

Master 1 et Magistère 2^{ème} année de
Physique Fondamentale – Paris-Saclay

Année 2025-26

CATALOGUE DES COURS

COMPOSITION DE L'ANNEE M1 PHYSIQUE FONDAMENTALE	4
SEMESTRE 1 (30 ECTS)	4
SEMESTRE 2 (30 ECTS)	4
COMPOSITION DU MAGISTERE 2^{EME} ANNEE	4
SEMESTRE 1 (3 ECTS)	4
SEMESTRE 2 (17 ECTS)	4
U.E. OBLIGATOIRES	5
OPTIQUE	5
PHYSIQUE STATISTIQUE QUANTIQUE	5
PHYSIQUE STATISTIQUE CLASSIQUE ET QUANTIQUE	6
PHYSIQUE DES LASERS	6
PYTHON	7
PROGRAMMATION C++ (MAGISTERE)	8
ENSEIGNEMENT EXPERIMENTAL	8
ANGLAIS	9
TRAVAIL BIBLIOGRAPHIQUE	9
U.E. DE BASE	10
ATOMES ET MOLÉCULES	10
PARTICULES ET NOYAUX	11
MATIÈRE CONDENSÉE	12
OPTIONS DE SEMESTRE 1	14
ASTROPHYSIQUE : FONDEMENTS ET OBSERVATIONS	14
ASTROPHYSIQUE AVANCEE	14
COMPLEMENT DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE POUR L'AGREGATION	16
DEVELOPPEMENTS RECENTS EN MAGNETISME ET SUPRACONDUCTIVITÉ	16
ELECTRODYNAMIQUE CLASSIQUE ET QUANTIQUE	17
PREPARATION AU FRENCH PHYSICISTS' TOURNAMENT	18
GENIE NUCLEAIRE : TRANSFERTS THERMIQUES + SCIENCES DES MATERIAUX POUR LE NUCLEAIRE	19
GEOPHYSIQUE, GEODYNAMIQUE	21
NANOSCIENCES ET NANOTECHNOLOGIES	22
PHYSIQUE APPLIQUEE A LA MEDECINE : DE LA BIOLOGIE A LA THERAPIE	23
PHYSIQUE DES SEMI-CONDUCTEURS	24
TRANSITIONS DE PHASES	25
U.E. DE COLORATION (9 ECTS)	27

MÉCANIQUE DES FLUIDES	27
PHYSIQUE DES PLASMAS	28
PHYSIQUE NON LINEAIRE	29
MATIERE MOLLE	30

OPTIONS DE SEMESTRE 2 (6 ECTS) 31

ACCELERATEURS ET DETECTEURS DE PARTICULES	31
FLUIDES COMPLEXES ET INTERFACES	31
GENIE NUCLEAIRE, PROCESSUS STOCHASTIQUES	32
INTERFACE BIOLOGIE-PHYSIQUE : FONCTIONNEMENT DU VIVANT ET METHODES D'ETUDE PHYSIQUES	33
OPTIQUE QUANTIQUE	34
OPTIQUE NON-LINEAIRE	35
PHYSIQUE A L'ECHELLE NANOMETRIQUE	35
PHYSIQUE DE LA CONVERSION ET DU STOCKAGE DE L'ENERGIE	36
PHYSIQUE DU CLIMAT	37
RELATIVITE GENERALE ET COSMOLOGIE	38

Composition de l'année M1 Physique Fondamentale

Semestre 1 (30 ECTS)

Le semestre 1 est composé de :

- des U.E. obligatoires :
 - Atomes et Molécules (6 ECTS)
 - Noyaux et Particules (6 ECTS)
 - Physique des Lasers (3 ECTS)
 - Physique Statistique Quantique (3 ECTS)
 - Optique (3 ECTS)
 - Physique Statistique Classique et Quantique (6 ECTS) à la place de Physique Statistique Quantique et Optique
 - Python (3 ECTS)
- 1 U.E. d'option 1 (6 ECTS)

Semestre 2 (30 ECTS)

Le semestre 2 est composé de :

- des U.E. obligatoires :
 - Matière Condensée (6 ECTS)
 - Anglais (4 ECTS)
 - Travail bibliographique (2 ECTS)
 - Enseignement expérimental (12 ECTS)
- 2 U.E. de coloration (6 ECTS)
- stage non obligatoire.

Composition DU MAGISTERE 2^{ème} année

Semestre 1 (3 ECTS)

Le semestre 1 est composé de :

- Programmation C++ (3 ECTS)

Semestre 2 (17 ECTS)

Le semestre 2 est composé de :

- 1 U.E. de coloration (3 ECTS)
- 1 U.E. d'option 2 (3 ECTS)
- Stage obligatoire de 12 semaines minimum (11 ECTS)

U.E. Obligatoires

Optique

Responsable du cours : Elizabeth Boer-Duchemin

Equipe pédagogique : Dana-Codruta Marinica, Pierre Billaud, Marion Jacquey

Déroulement et organisation pratique : 7 cours de 1h45 ; 7 TD de 1h45.

Objectifs pédagogiques visés : bonne compréhension de la cohérence temporelle et spatiale de la lumière

Contenu :

Les rubriques de ce cours sont : introduction à la cohérence (nature des sources de lumière), outils mathématiques (modèle de l'enveloppe lentement variable, le signal analytique et l'amplitude spectrale), cohérence temporelle (l'interféromètre de Michelson, la fonction d'autocorrélation et le degré complexe de cohérence, visibilité et temps de cohérence, lien entre cohérence et spectre : le théorème de Wiener-Khintchine, applications), cohérence spatiale (théorème de van Cittert-Zernike, l'expérience de Thompson et Wolf, l'interféromètre de Michelson), interférences en deux ondes avec une source étendue (localisation des franges), exemples d'interféromètres et leurs applications, cohérence du deuxième ordre, l'expérience de Hanbury Brown et Twiss, les mesures de cohérence du deuxième ordre en optique quantique.

Prérequis :

Cours d'optique traitant l'optique géométrique et ondulatoire dont la réflexion et la réfraction, la diffraction, et les impulsions. Cours de mathématiques pour des physiciens (transformées de Fourier, fonctions de Bessel...).

Bibliographie :

- [1] Champeau et al. « Ondes lumineuses » ; Goodman « Statistical optics »
- [2] Wolf « Introduction to the theory of coherence and polarization of light »
- [3] Fox « Optique quantique: une introduction ».

Physique statistique quantique

Responsable du cours : Asmaa Abada

Cours 12,5h - TD 12,5h

Contenu :

Chapitre 1 : Ensemble grand canonique

- propriétés générales
- facteurs d'occupation
- systèmes de particules sans interaction, statistiques quantiques

Chapitre 2 : Fermions

- Distribution de Fermi-Dirac
- Fermions à $T=0$, applications
- développements à basse T et applications

Chapitre 3 : Bosons

- Distribution de Bose-Einstein

- Cas des Photons/Phonons et applications
- Condensation de Bose-Einstein pour les particules libres
- Condensation de Bose-Einstein dans un piège harmonique et description des expériences

Prérequis : Physique Statistique des systèmes à l'équilibre, thermodynamique, mécanique quantique

Bibliographie :

- [1] B. Diu, C. Guthman, D. Lederer & B. Roulet, Physique Statistique, Hermann, Paris (1989) ;
- [2] Sator & Pavloff, Physique Statistique, Vuibert, 2016 ;
- [3] Christophe Texier & Guillaume Roux, Physique Statistique : des processus élémentaires aux phénomènes collectifs, Dunod, 2017

Physique statistique classique et quantique

Responsable du cours : Gilles Abramovici

Déroulement et organisation pratique : un cours et une séance de travaux dirigés de 2h par semaine, pendant les deux premières périodes de l'année (de début septembre à la première semaine de janvier). Un examen partiel vers la Toussaint et un examen final début janvier, ainsi qu'un examen de rattrapage globale éventuel selon les modalités.

Contenu :

Contenu et plan développé : Notions de base (espace des phases microscopiques et espace des phases macroscopiques, variables extensives et intensives, hypothèse ergodique, statistique discrète et continue, équivalence des ensembles d'équilibres) ; ensembles micro-canoniques, canoniques et grand-canoniques dans le cadre classique (approche de Gibbs, approche d'Einstein, entropie, fonction de partition, potentiels thermodynamiques, dont énergie interne, énergie libre, fluctuations, relations de Gibbs-Duheim) ; statistique semi-quantique (distributions de Fermi-Dirac, de Bose-Einstein, niveau de Fermi, changements de phases et condensation de Bose-Einstein).

Prérequis :

Mécanique du point.

Bibliographie :

- [1] « Physique statistique », C. Ngo & H. Ngo, ed. Dunod
- [2] « Physique statistique », C. Guthmann, B. Roulet, B. Diu & D. Lederer, ed. Eyrolles
- [3] « Physique statistique », T 1 & 2, R. Balian, ed. Ecole Polytechnique (1992) ou « From microphysics to macrophysics », R. Balian, ed. Springer (2007) (plus complet que la version française).

Physique des lasers

Responsable du cours : F. Glotin

Equipe pédagogique : S. Douin, D. Nutarelli, P. Billaud, S. Kazamias

Déroulement et organisation pratique :

Cette UE se déroule de janvier à mars. L'équipe est constituée d'enseignants-chercheurs qui utilisent les lasers quotidiennement dans leur activité de recherche. En cours, les étudiants travaillent sur des versions à compléter des diapositives projetées afin de les rendre plus actifs. Les TD sont construits de façon à leur permettre de travailler en autonomie et à leur rythme, les enseignants apportant des

réponses individualisées aux questions posées et interagissant avec les étudiants tout au long de la séance. Les sujets de TD comportent au moins un exercice facultatif (hors-programme) pour aborder des points plus complexes non évoqués dans le cours et permettre aux étudiants plus à l'aise d'aller plus loin. Les étudiants ont également la possibilité de rendre 2 problèmes à la maison (non notés mais corrigés par les enseignants) pour approfondir certaines parties du cours et s'entraîner pour l'examen final. Un corrigé détaillé est distribué systématiquement à la fin de chaque TD.

Contenu :

Le cours est découpé en 5 chapitres principaux qui abordent les propriétés des éléments constitutifs de tout laser, détaille leur fonctionnement individuel ainsi que les conditions de leur couplage. Le chapitre 1 donne un aperçu des propriétés du rayonnement laser et de ses nombreuses applications. Le chapitre 2 est consacré à l'étude des cavités optiques stables via le formalisme de l'optique matricielle. Les propriétés du mode fondamental gaussien qui s'établit dans les cavités stables sont ensuite présentées (chapitre 3), en les reliant à la géométrie de la cavité choisie. Le chapitre 4 expose les processus fondamentaux d'interaction matière-rayonnement qui sont à la base de l'émission laser dans les milieux amplificateurs, et définit les grandeurs caractéristiques des amplificateurs optiques. Un 5ème chapitre aborde la théorie du laser en établissant les liens entre cavité, amplificateur, pompage et coupleur de sortie, et en définissant les conditions de fonctionnement en régimes stationnaire et impulsionnel. Une séance est consacrée à une ouverture sur un thème particulier, comme les lasers à électrons libres, l'état de l'art sur les impulsions ultra-brèves, ou les applications en optique non-linéaire.

Prérequis :

Optique géométrique (lois de Snell-Descartes, lentilles minces, miroirs sphériques)

Optique ondulatoire (onde plane, onde sphérique, diffraction)

Electromagnétisme (équations de Maxwell)

Notions de mécanique quantique (systèmes quantiques à deux niveaux)

Bibliographie :

- [1] « Lasers et Optique non linéaire » - Ch. Delsart – Editions Ellipses - (Cours et exercices corrigés niveau M1 et M2)
- [2] « Les lasers - Cours et exercices corrigés » - D. Hennequin, V. Zehnlé et D. Dangoisse, – Editions Dunot (niveau L3 et M1)
- [3] « Lasers. Interaction lumière-atomes » - J.P. Faroux et B. Cagnac – Editions EDP Sciences (CNRS éditions), niveau M1, M2 et doctorat

Python

Responsable du cours : X. Garrido

Equipe pédagogique : A. Campaniello

Déroulement et organisation pratique : Chaque séance de 2h30 se découpera en un premier cours en amphithéâtre d'une heure suivi 1h30 de travaux dirigés en relation avec le cours dispensé.

Contenu :

Ce cours et les travaux dirigés associés ont pour objectif d'enseigner les bases de la programmation Python et d'introduire les outils de programmation numérique de la suite logicielle scipy ainsi que de la gestion de données via la librairie pandas.

- Bases de la programmation en Python (~ 3 séances)
 - environnement Python (ipython, pip, venv), utilisation de notebook Jupyter
 - type de données (containeurs), bloc conditionnel, boucles for, déclaration de fonction
- Manipulation de données numériques (numpy) et représentation graphique avec matplotlib (2 séances)
 - gestion & manipulation données numériques sous forme vectorielle, programmation orientée tableau
 - création de (sous)-figures, axes, histogramme, courbe de niveau, 3D
- pandas : gestion de structure de données
- Utilisation de la librairie scientifique scipy
 - résolution d'équation différentielle, algèbre linéaire, transformée de Fourier
 - optimisation et introduction au machine learning avec scikit

Prérequis :

Aucun prérequis n'est nécessaire. Ce cours reprend les bases de la programmation Python.

Bibliographie :

- [1] [Open Classroom : Apprenez à programmer en Python](#)
- [2] [Python Data Science Handbook](#)
- [3] [Scipy Lectures Notes](#)
- [4] [Scientific Python Lectures](#)

Programmation C++ (Magistère)

Responsable du cours : Nouari Kebaili

Equipe pédagogique : Clarisse Hamadache Nouari Kebaili.
(A renseigner)

Enseignement expérimental

Responsable du cours : Gaulard Carole

Equipe pédagogique : S. Boyé-Péronne, M. Jacquey, E. Kermarrec, C. Krafft.

Contenu :

15 séances (8h) de TP sont proposées aux étudiants.

- 1 TP Zeeman
- 1 TP Brose
- 1 TP Fabry Perot

- 1 TP Laser à colorant
- 1 TP doublage de fréquence
- 1 TP Plasma (sonde ou décharge)
- 1 TP Plasma (Héliçon)
- 1 TP Propriété électronique des solides
- Projet OCT de 3 journées (Tomographie par Cohérence Optique)
- Projet en physique nucléaire de 4 journées.

Anglais

Responsable du cours : T. Duncan
(A renseigner)

Travail bibliographique

Responsable du cours : Roland Mastrippolito
Equipe pédagogique :

Contenu :

Une analyse de documents scientifiques (articles, chapitre de thèse, ...) est demandée aux étudiants. Un rendu de 3 à 4 pages sera évalué.

2 U.E. à choisir parmi 3. L'une comptera pour le premier semestre et la seconde pour le deuxième semestre.

Atomes et Molécules

Responsable du cours : Nouari Kebaili

Equipe pédagogique : Stéphane Douin, Hans Lignier, Cyril Falvo.

Déroulement et organisation pratique : Cours et TD au 1er semestre. Un cours de 1h45 + un TD de 1h45 chaque semaine.

Contenu :

L'objectif pédagogique de ce cours est de donner aux étudiants les outils théoriques utiles pour l'étude de la structure et de la dynamique d'un système quantique à N corps (atome ou molécule diatomique) isolé ou en interaction avec un champ extérieur statique ou dépendant explicitement du temps.

La structure électronique dans les atomes sera tout d'abord abordée en mettant tout particulièrement l'accent sur l'effet des interactions de structure fine ou hyperfine mais également de l'interaction entre électrons qui brise la symétrie sphérique du système. Cette structure électronique sera ensuite étudiée pour une molécule diatomique dans l'approximation de Born-Oppenheimer. La dynamique quantique rovibrationnelle de la molécule sera ensuite considérée. Les effets non-adiabatiques pourront être discutés en fin de cours.

Le cours est organisé en 9 chapitres :

Chap. 1 : L'atome d'hydrogène et les systèmes hydrogénoïdes.

Chap. 2 : Structure électronique d'un atome polyélectronique

Chap. 3 : Calcul des énergies propres pour un atome polyélectronique

Chap. 4 : Spin-orbite pour un atome polyélectronique

Chap. 5 : Structure électronique d'une molécule à un seul électron

Chap. 6 : Structure électronique d'une molécule polyélectronique

Chap. 7 : Interaction d'un atome avec un champ extérieur

Chap. 8 : Etats stationnaires rovibrationnels d'une molécule

Chap. 9 : Interaction d'une molécule avec un champ électromagnétique

Prérequis :

- Des bases solides en mécanique quantique
- Des connaissances générales de physique (électromagnétisme, physique statistique ...).

Bibliographie :

- [1] Physique atomique : Tome 2, l'atome : un édifice quantique par B. Cagnac, L. Tchang- Brillet et J.-C. Pebay-Peyroula. Edition Dunod.
- [2] Spectroscopie atomique par Emile Biémont. Edition De Boeck.
- [3] Spectroscopie moléculaire par Emile Biémont. Edition De Boeck.
- [4] Physics of atoms and molecules par B. H. Brandsen et C. J. Joachain.
- [5] The theory of atomic spectra par E. U. Condon et G.H. Shortley. Cambridge University press.
- [6] Molecular Quantum Mechanics par P. Atkins et R. Friedman. Oxford éditions.

Responsable du cours : Bruno Espagnon

Equipe pédagogique : C. Gaulard, X. Garrido, I. Matéa, M. Lebois, T. Houdy

Déroulement et organisation pratique : Cours et TD au 1er semestre. Un cours de 1h45 + un TD de 1h45 chaque semaine. Mise à disposition de notes de cours. 1 examen partiel. 1 examen terminal. Un aide-mémoire est fourni en annexe des partiels et examens.

Contenu :

L'objectif pédagogique de ce cours est de donner aux étudiants de M1 une introduction à la physique des particules et à la physique nucléaire et leur présenter les dernières découvertes dans ce domaine. A la fin, ils doivent maîtriser les concepts généraux de cette physique pour aborder des cours plus techniques de niveau M2.

Introduction et notions générales :

Introduction à la physique subatomique
Sonder la matière
Section Efficace

Physique des Particules

Particules et Symétries
Classification des particules
Particules et Interactions
Particules et lois de conservation
Phénoménologie des hadrons
Modèle des quarks
Les neutrinos

Physique nucléaire

Forces nucléaires
Modèles nucléaires
Processus nucléaires dynamiques I
Processus nucléaires dynamiques II
Applications de la physique nucléaire.

Conclusion

Le Modèle Standard et Au-delà

TPs :

Ces travaux pratiques concernent l'apprentissage des méthodes et techniques en détection nucléaire ainsi que la manipulation d'une chaîne d'acquisition, de l'électronique et de l'analyse du signal. Les étudiants réalisent deux expériences.

La première expérience porte sur la spectrométrie gamma avec pour but de déterminer les énergies des principales raies gamma du ^{207}Pb et leurs intensités relatives.

La deuxième expérience doit être menée en autonomie. Les étudiants feront une expérience parmi trois proposées.

Les thèmes abordés couvrent une partie de la physique nucléaire (durée de vie avec les coïncidences alpha-gamma, moment cinétique total et la parité avec les électrons de conversion) ou du domaine médical (coïncidences gamma-gamma du ^{22}Na). Pour mener à bien cette expérience, ils doivent

mettre en place une chaîne d'acquisition, régler et calibrer des détecteurs utilisés dans le domaine, et analyser les données obtenues.

Durant ces TPs, les étudiants sont amenés à manipuler des sources radioactives. Ils suivent donc une formation obligatoire de radioprotection.

Prérequis :

Cours de relativité. Cours de mécanique quantique. Connaissances générales de physique (électromagnétisme, physique statistique ...). Dans l'étude de la structure du noyau, on retrouve des concepts développés dans le cours de physique atomique et moléculaire (modèle en couche).

Bibliographie :

- [1] Physique nucléaire : des quarks aux applications, Claude Le Sech, Christian Ngô : Dunod
- [2] Noyaux et particules (vol. 1), Le monde subatomique (vol. 2), Luc Valentin, Editeur : Hermann
- [3] **Introductory Nuclear Physics, Kenneth Krane, Editeur : John Wiley & Sons**
- [4] **Modern Particle Physics, Mark Thomson, Cambridge University Press**
- [5] **Introduction to Elementary Particles, David Griffiths, Editeur : Wiley VCH**
- [6] Introduction à la physique subatomique, André Rougé, Editeur : Ellipses Marketing
- [7] Quarks and leptons Francis Halzen, Alan D. Martin, Editeur : John Wiley & Sons
- [8] **Relativité restreinte : Bases et applications, Claude Semay, Bernard Silvestre-Brac, Editeur : Dunod**
- [9] Relativité restreinte : des particules à l'astrophysique, Ericourgoulhon, Editeur : CNRS éditions
- [10] **Mécanique quantique, Jean-Louis Basdevant, Jean Dalibard, Manuel Joffre, Editeur : Polytechnique.**
- [11] **Introduction to quantum mechanics, David Griffiths, Editeur : Prentice-Hall**
- [12] Mécanique quantique I et II, Claude Cohen-Tannoudji, Bernard Diu, Franck Laloë, Editeur : Hermann

Matière Condensée

Responsable du cours : Fabrice Bert

Equipe pédagogique : V. Baledent, E. Deleporte, E. Kermarrec, J.S. Lauret, A. Santander-Syro

Cours 25h - TD 25h

Ce cours constitue une introduction à la physique des solides. Il s'agit ici de décrire avec la mécanique quantique et la physique statistique le comportement d'un grand nombre d'électrons dans un cristal afin de rendre compte des propriétés des matériaux. L'arrangement périodique des atomes dans un cristal structure les niveaux d'énergie des électrons, et combiné au principe de Pauli, conduit à la diversité des propriétés électroniques ; isolant, métal, semiconducteur. On abordera aussi le problème délicat des interactions entre électrons qui peuvent générer de nouveaux états fondamentaux magnétiques, supraconducteurs... au cœur des développements récents.

La physique des solides (ou 'matière quantique') est l'un des domaines de la matière condensée qui inclut aussi la matière dite molle que l'on ne pourra pas aborder dans ce cours.

Plan du cours

- I- Electrons libres (métaux)
- II - Description des cristaux, réseau réciproque, diffractions
- III- Structure électronique des Solides
 - Bandes d'énergie (liaisons fortes)
 - Application aux semiconducteurs
- IV- Electrons en interactions

Magnétisme (transition de phase ferromagnétique)
Introduction à la supraconductivité

Le TP "Propriété électronique des solides" de l'UE Enseignement Expérimental est en lien direct avec ce cours.

Prérequis :

Bases de Mécanique quantique, Physique Statistique, Statistiques Quantiques, Thermodynamique, Electromagnétisme.

Bibliographie :

- [1] C. Kittel : Physique de l'Etat Solide (Dunod)
- [2] N.W. Ashcroft et N.D. Mermin : Physique des Solides (EDP Sciences)
- [3] H. Alloul : Physique des électrons dans les solides (Editions de l'Ecole Polytechnique)
- [4] S.H. Simon : The Oxford Solid State Basics (*Oxford University Press*).

Astrophysique : fondements et observations

Responsable du cours : Alain Abergel et Mathieu Vincendon

Equipe pédagogique : Joao Marques, Cateline Lantz, Pierre Guiot, Lucie Degott, Théo Lebeau, Laura Nardelli, Zélia Dionnet, Zahia Djouadi

Déroulement et organisation pratique : L'enseignement est composé de 9 séances divisées en cours et TD, complétées par un volet conséquent de travaux pratiques sous forme de deux mini-projets. Une séance de l'un de ces deux TP-projets se déroule obligatoirement la nuit, sauf pour les étudiants du sujet "Soleil". Le contrôle de l'acquisition des connaissances se fait sous la forme d'un partiel écrit de 2h, d'un examen écrit de 2h, et d'une évaluation des deux TP-projets par contrôle continu et soutenance.

L'astrophysique est une discipline avant tout guidée par l'observation. L'objectif de cette UE est de présenter les principaux concepts des différents champs de l'astrophysique, en mettant l'accent sur l'obtention et l'interprétation des contraintes observationnelles. Les grands principes de l'astrophysique et plusieurs techniques d'observation seront présentés et mis en œuvre sur différents objets de l'univers. L'UE repose sur une pédagogie laissant une grande place à la mise en application des concepts vus en cours lors de TD et TP. Ces derniers représentent plus de 60% du volume horaire de l'enseignement.

Contenu :

Les thèmes abordés en cours sont :

- 1) Systèmes planétaires : exoplanètes, évolution planétaire, exploration du système solaire
- 2) Physique stellaire : formation, vie et mort des étoiles ; objets extrêmes
- 3) Univers lointain : galaxies et cosmologie

Le cours et les TD sont complétés par deux TP-projets :

- Le 1er porte sur la prise de données à l'aide d'un télescope équipé d'un spectromètre, puis l'analyse et l'interprétation de ces données télescopiques (plusieurs sujets au choix associés à l'observation d'étoiles, de planètes ou du Soleil).

- Le 2e est à choisir entre un sujet de simulation numérique du cycle de vie des étoiles, et un sujet d'analyse en laboratoire par spectroscopie de grains météoritiques.

Prérequis :

L'UE s'adresse aux étudiants ayant suivi une 3e année de licence de physique.

Astrophysique avancée

Responsable du cours : Alain Abergel et Mathieu Vincendon

Equipe pédagogique : Joao Marques, Cateline Lantz, Pierre Guiot, Lucie Degott, Théo Lebeau, Laura Nardelli.

Déroulement et organisation pratique : L'UE est composée de 12 séances de cours de 3h30 et d'un TP-projet de 9h. Une séance du TP-projet se déroule obligatoirement la nuit, sauf pour les étudiants

du sujet "Soleil". Le contrôle de l'acquisition des connaissances se fait sous la forme d'un partiel écrit de 2h, d'un examen écrit de 3h, et d'une évaluation du TP-projet par contrôle continu et soutenance.

Contenu :

L'objectif de cette UE est de proposer un enseignement approfondi des différentes disciplines de l'astrophysique. Les lois physiques gouvernant la formation et l'évolution des objets de l'univers à toutes les échelles spatiales et temporelles seront abordées. L'enseignement théorique sous forme de cours magistraux, prépondérant, sera complété par des travaux pratiques d'observation au télescope comprenant obtention, analyse et interprétation des données, afin d'avoir un aperçu complet de l'astrophysique.

Contenu et plan développé :

Les thèmes abordés lors des cours sont :

- 1) Physique stellaire
- 2) Systèmes planétaires (système solaire et exoplanètes)
- 3) Accrétion et objets compacts
- 4) Galaxies et grandes structures
- 5) Cosmologie et univers primordial

Le cours est complété par un TP-projet portant sur la prise de données à l'aide d'un télescope équipé d'un spectromètre, puis l'analyse et l'interprétation de ces données télescopiques (plusieurs sujets au choix associés à l'observation d'étoiles, de planètes ou du Soleil).

Prérequis :

L'UE s'adresse aux étudiants possédant une solide formation en physique fondamentale. L'enseignement est constitué de cours magistraux, qui permettent d'aborder un grand nombre de notions mais requièrent une part importante de travail personnel.

Complément de physique et de chimie pour l'agrégation

Responsable du cours : Donia Baklouti et KV Pham

Equipe pédagogique : Donia Baklouti (Chimie) et KV Pham (Physique)

Déroulement et organisation pratique :

Partie Chimie

La partie chimie de l'UE se répartit en 8 séances de cours-TD de 3h chacune, auxquelles s'ajoutent deux séances de TP de 3h15 chacune.

Contenu :

Partie Chimie

Les principes de la thermodynamique constituent le premier pilier sur lequel repose l'étude d'une réaction chimique. Cette partie de l'option étant à la fois conçue comme un module d'ouverture scientifique vers la chimie, et un module préparant les étudiants à l'épreuve de chimie des concours d'agrégation et du CAPES, est ainsi un enseignement complet de thermochimie (24h de cours/TD), complété par 6h30 de TP permettant de faire la transition vers la chimie des solutions.

Plan du cours/TD :

1 - Grandeurs thermodynamiques de réaction

1er et 2ème principes appliqués aux réactions chimiques. Grandeurs de réaction et grandeurs standard de réaction. Réactions conventionnelles et grandeurs de réaction associées. Bilan énergétique d'une réaction chimique.

2 - Potentiel chimique et enthalpie libre de réaction

Prévoir le sens d'évolution d'une réaction chimique. Expressions du potentiel chimique, notions d'activité. Changement de phase du corps pur et relation de Clausius-Clapeyron. Lois de Raoult et de Henry pour les mélanges binaires.

3 - Etude des équilibres chimiques

Constante d'équilibre et lois de déplacement des équilibres. Variance. Loi de Van't Hoff.

4 - Application 1 : Le diagramme d'Ellingham

5 - Application 2 : Les diagrammes d'équilibres binaires

TP de chimie des solutions : mises au point de différents montages de dosages acido-basique et conductimétriques

Prérequis :

Partie Chimie

Écrire et équilibrer une réaction bilan. Les bases de la thermodynamique classique appliquées à des systèmes physiques simples : 1er et 2ème principes, fonctions d'état U, H et S, propriétés des fonctions d'état.

Bibliographie :

[1] « La réaction chimique », Tomes 1 et 2, M. Laffitte et F. Rouquérol, Ed. Masson

[2] « Thermodynamique des états de la matière », P. Papon et J. Leblond, Ed. Hermann

[3] « Thermodynamique chimique, 2ème année PC-PC* », A. Durupthy, C. Mesnil et T. Zobiri, Ed. Hachette Supérieur.

Développements récents en Magnétisme et Supraconductivité

Responsable du cours : Vincent Jeudy

Equipe pédagogique : M. Ferrier, V. Jeudy, P. Simon

Déroulement et organisation pratique : Magnétisme (V. Jeudy), il s'agit d'un ensemble de cours et de cours-TD suivis d'une lecture d'articles. Supraconductivité (M. Ferrier, P. Simon), il s'agit d'un cours illustré suivi d'un TD en lien direct avec le cours qui s'appuie sur des articles scientifiques.

Magnétisme et supraconductivité sont deux domaines florissants de la Matière Condensée aussi bien pour la recherche fondamentale que pour les applications (énergie, stockage de l'information, ordinateur quantique). Nous exposerons d'abord les concepts de base qui reposent sur des acquis de physique fondamentale (électromagnétisme, physique statistique et mécanique quantique), puis nous aborderons des développements originaux actuels et des domaines d'application récents. Les deux parties, peu présentes dans le cours de tronc commun, constituent un socle nécessaire pour aborder la matière quantique (niveau M2).

Contenu et plan développé:

Magnétisme

- Origines du magnétisme – description micromagnétique
- Etats magnétiques de nano-aimants – physique du disque dur
- Domaines magnétiques et parois de domaines
- Dynamique d'aimantation – dynamique des parois de domaines
- Rudiments d'électronique de spin – phénomènes physiques et applications

Supraconductivité

- Supraconductivité : un état quantique macroscopique
- Thermodynamique des supraconducteurs
- Théorie de Ginzburg Landau des supraconducteurs
- Effet Josephson et application aux qubits supraconducteurs
- Origine microscopique de la supraconductivité

Prérequis :

Physique statistique niveau L3-M1 (Modèle du cristal paramagnétique, traitement en champ moyen des transitions de phases, des notions de statistiques quantiques), Electromagnétisme des milieux.

Bibliographie :

- [1] E. du Trémolet de Lacheisserie, Magnétisme I (Fondements), PUG, EDP Sciences (2008).
- [2] J. M. D. Coey, Magnetism and magnetic materials, Cambridge University Press (2012).
- [3] J. F. Annett, Superconductivity, Superfluids and condensates, Oxford University Press (2004).
- [4] M. Tinkham, Introduction to superconductivity, Dover Publications (2004).

Electrodynamique Classique et Quantique

Responsable du cours : Samuel Wallon

Equipe pédagogique : B. van Tent

Déroulement et organisation pratique : Les cours et les travaux dirigés ont lieu le vendredi après-midi. Sur un créneau de 3h30. Ils sont soit alternés une semaine non l'autre, soit consécutifs 1h45 + 1h45.

C'est un cours d'introduction à la théorie classique des champs, et à la quantification canonique, basé sur le cas pratique de l'électrodynamique. On fait, en travaux dirigés, une large place à l'étude de phénomènes physiques (désintégration bêta, diffusion Thomson et Rayleigh, effet Casimir...).

Plan du cours :

- Rappels de relativité restreinte : notation covariante, tenseurs, intégration et théorème de Gauss-Ostrogradsky dans l'espace de Minkowski.
- Théorie du rayonnement : potentiels retardés en jauge de Lorentz, formule de Larmor. Rayonnement par une distribution de charges et de courants.
- Théorie classique des champs. Formalisme lagrangien pour le champ électromagnétique et les particules en interaction. Tenseur impulsion-énergie. Symétries et lois de conservation.
- Quantification du champ en jauge de Coulomb. Fluctuations du vide. Interaction entre photons et atomes, émission spontanée.

Prérequis :

Une certaine familiarité avec les équations de Maxwell, et des bases en relativité restreinte et mécanique lagrangienne, un cours introductif de physique quantique.

Bibliographie :

- [1] « Classical electrodynamics » par J. D. Jackson
- [2] « Théorie des champs » par L. Landau et E. Lifchitz.
- [3] Volume 2 du cours de physique théorique « Invariances en physique et théorie des groupes », par J.B. Zuber
- [4] « Ondes multipolaires, lagrangien et hamiltonien du champ électromagnétique ». Cours de C. Cohen-Tannoudji au Collège de France

Préparation au French Physicists' Tournament

Responsable du cours : Philippe Gondret & Claire Marrache-Kikuchi

Equipe pédagogique : Philippe Gondret, Claire Marrache-Kikuchi, Maxime Varèse

Déroulement et organisation pratique :

16 séances de préparation d'une journée entre fin septembre et mi-février.

Modalité de contrôle des connaissances Session 1 : Participation et compte-rendus oraux

Session 2 : Compte-rendu écrit d'un sujet.

Objectifs pédagogiques visés : Développement d'une démarche de recherche.

Contenu :

Le French Physicists' Tournament (<https://france.iptnet.info/>) est un concours de physique organisé depuis 2013 par la section jeune de la Société Française de Physique, et soutenu par l'Académie des Sciences. Le principe est de proposer à des équipes d'étudiants de travailler sur 11 problèmes de physique ouverts pendant quelques mois, et de confronter leurs résultats lors de joutes de physique.

Les sujets du concours changeant tous les ans, nous proposons des séances de préparation pour répondre aux 11 problèmes proposés par le tournoi. Pendant ce temps de préparation qui court de fin septembre à mi-février, les étudiants s'organiseront pour travailler en groupe sur un ou plusieurs des problèmes qu'ils aborderont d'un point de vue théorique, expérimental et en simulation.

Transferts thermiques

Responsable du cours : Nicolas Vernier

Equipe pédagogique : Nicolas VERNIER (cours & TD), Audrey CHATAIN (TD) et Hanna ENRIQUEZ

Déroulement et organisation pratique : 7 séances de 1H45 cours, 7 séances de 1H45 de TD

Contenu du cours :

- Introduction aux différents processus qui interviennent
- Diffusion thermique : loi de Fourier, conservation de la chaleur, notion de résistance thermique, régimes transitoires
- Convection : exemples, méthode de calcul des coefficients d'échange par convection
- Rayonnement : rayonnement du corps noir, émissivité d'une surface, applications
- Echangeurs thermiques

Applications : il y a de très gros enjeux du point de vue des économies d'énergie, mais cette science intervient aussi pour la conception de nombreux appareils (cryostats, fours, chaudières, pompe à chaleur...). Pour la physique fondamentale : c'est une science très importante pour les expérimentateurs car elle permet la détermination de la température réelle d'un échantillon, l'évaluation de l'homogénéité de la température dans un système, elle est au centre de l'effet thermoélectrique...

Prérequis :

Maîtrise des opérateurs usuels (gradient, Laplacien, divergence ou rotationnel), résolution des équations différentielles, thermodynamique.

Sciences des matériaux pour le nucléaire

Responsable du cours : Frederico Garrido

Déroulement et organisation pratique : 5 séances de cours-TD (3H30 – 17H30 au total) ; 2 séances de TP informatisé (3H30 – 7H au total)

L'objectif du cours est de définir la classe des matériaux nucléaires, leur spécificité en termes de sollicitations extrêmes sous irradiation, la compréhension des mécanismes d'interaction projectile-solide et d'endommagement associé à l'échelle atomique, et l'examen de transformations (micro)structurales sous irradiation.

1 – Demande énergétique et place de l'énergie nucléaire.

2 - Concepts fondamentaux en sciences des matériaux : classes de solides, spécificité des matériaux nucléaires. Sources de rayonnement : radioactivités, matériaux soumis à l'irradiation (combustible, matrices de transmutation, confinement et stockage, matériaux de structure).

3 – Physique de l'irradiation à l'échelle atomique : interactions particule chargée-matière et neutron-matière. Destinée du solide irradié : défauts dans les solides, processus d'endommagement par collisions atomiques et électroniques. Description du code de simulation SRIM.

4 - Évolution sous irradiation : exemples de transformations (micro)structurales sous irradiation (amorphisation, transformation mono-polycristal, transformation de phase solide-solide).

Deux séances de TP informatisées reprennent les concepts importants du cours. Un cas d'un matériau nucléaire est considéré : l'utilisation du logiciel cherche à reproduire les sources de l'endommagement et à estimer ses principales caractéristiques. Un second cas concerne des applications pour le spatial

(fusée propulsée par des fragments de fission) ou la physique nucléaire (source d'ions pour la production de faisceaux radioactifs).

Prérequis :

Physique de niveau Licence ; mécanique classique ; électromagnétisme ; concepts élémentaires de physique de la matière condensée ; rudiments de relativité restreinte et physique quantique

Bibliographie :

- [1] Clément Lemaignan, Sciences des Matériaux pour le Nucléaire, Collection Génie Atomique, EDP Sciences.semestre 1 (6 ECTS)

Géophysique, géodynamique

Responsable du cours : Pascal Sailhac

Déroulement et organisation pratique :

La partie du cours consacrée aux bases sur les propriétés des matériaux terrestres et des grandes structures terrestres occupe la première moitié des enseignements.

Elle est suivie d'une séance de travaux pratiques (TP) généralement avant la Toussaint. Celle-ci permet l'utilisation des instruments de mesures géophysiques sur le campus à l'extérieur des bâtiments : d'une année à l'autre, les cibles peuvent être de différentes natures, canalisations enfouies, strates du sous-sol, humidité du sol, etc. L'ensemble des séances suivantes est consacré à l'analyse des mesures du TP et donnera lieu à un rapport individuel comptant pour moitié de la note finale.

Contenu :

L'option "géophysique" concerne l'un des domaines d'application de la physique, celui de l'étude et l'exploration des structures internes de la Terre. S'adressant aux étudiants physiciens, cette option permet de reprendre et compléter des notions relatives à plusieurs propriétés physiques des matériaux (mécaniques, magnétiques, électriques, électromagnétiques, thermiques) tout en abordant l'étude de la composition et de la dynamique de la Terre (depuis la croûte jusqu'au noyau) à l'aide de méthodes permettant sa caractérisation (imagerie du sous-sol).

La première partie introduit les matériaux terrestres et décrit les grandes structures terrestres à l'aide de différentes méthodes :

- Séismes et imagerie sismologique
- Minéralogie et magnétisme terrestre
- Electromagnétisme terrestre
- Transferts de chaleur et géodynamique

La seconde partie est une introduction à la géophysique appliquée, consacrée à des séances de mesures et d'interprétation (visualisation, traitement, modélisation, inversion/imagerie) utilisées en prospection :

- Sismique réfraction
- Prospection électrique
- Radar de sol
- Magnétométrie

Prérequis :

Des notions préalables en physique des roches facilitent le suivi de ce cours optionnel, néanmoins certaines bases sont rappelées lors du cours. Aussi il est souhaité mais pas nécessaire d'avoir suivi le cours de L3 d'introduction à la géophysique.

Bibliographie :

- [1] Richard J. **Blakely** 1996, Cambridge Univ. Press, "Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications", 441 p
- [2] Michel **Cara**, Editions Bordas 1989, "Géophysique", 186 p
- [3] Jean-Jacques **Delcourt**, Editions Masson 1990, "Magnétisme Terrestre : Introduction", 316 p
- [4] Donald L. **Turcotte** & Gerald **Schubert**, Wiley Editor 1982, "Geodynamics: Application of Continuous Physics to Geological Problems", 450 p

Nanosciences et nanotechnologies

Responsable du cours : E. Boer-Duchemin

L'unité d'enseignement aborde le monde des nanotechnologies par une approche expérimentale. Elle est proposée aux étudiants de master de différentes filières et se découpe en trois parties : nanoélectronique, microscopie en champ proche et microscopie électronique ; ce qui permet de mettre en évidence l'interdisciplinarité des nanotechnologies dans les domaines des sciences physiques et chimiques, de l'électronique, de l'informatique et du traitement des données.

Contenu :

Nanoélectronique :

- microélectronique ultime CMOS
- nanoélectronique à base de carbone (nanotubes, graphène)
- structures à blocage de Coulomb
- réalisation structures en salle blanche et caractérisation (AFM, électrique)
- spintronique

Microscopie de champ proche :

- nanoscopie par effet tunnel (STM)
- nanoscopie à force atomique (AFM)
- acquisition en STM d'images de surfaces et mesures par spectroscopie tunnel

Microscopie électronique :

- imagerie, notion de résolution, interaction élastique incohérente, interaction élastique cohérente
- nano-analyse chimique
- synthèse par arc électrique de nanotubes
- observation au microscope et mesures par spectroscopie de pertes d'énergie d'électron

Prérequis :

Des bases en mécanique quantique et en physique du composant sont fortement recommandées.

Bibliographie :

- [1] Les Nanosciences - Tome 1, Nanotechnologies et nanophysique, de Marcel Lahmani, Claire Dupas et Philippe Houdy, édité par Belin (Collection Echelles) en 2004 ou 2006

Physique appliquée à la médecine : de la biologie à la thérapie

Responsable du cours : Charlotte Robert

Équipe pédagogique : composée d'enseignants-chercheurs, de chercheurs (CNRS), et de physiciens médicaux hospitaliers

Déroulement et organisation pratique : L'UE a lieu sur 14 demi-journées de septembre à janvier pour un total de 48h par étudiant. L'ensemble des cours, excepté les TP IRM/Ultra-sons (CEA SHFJ, Orsay), a lieu dans le bâtiment hbar. Les enseignements sont dispensés par des chercheurs, enseignants-chercheurs et physiciens médicaux. Une analyse d'articles, réalisée en binôme (articles distribués aux étudiants en décembre et restitution en janvier) compte pour un tiers de la note. Les $\frac{2}{3}$ restants correspondent à l'examen final qui a lieu courant janvier.

Objectifs pédagogiques visés :

- Mettre à profit ses connaissances en physique théorique (physique subatomique, physique du solide, électromagnétisme, optique, etc) pour comprendre le fonctionnement des principales modalités diagnostiques et thérapeutiques qui sont au coeur de la thématique de la physique médicale
- Ouverture vers un champ d'application connexe qu'est la physique de la cellule

Contenu :

La physique médicale a pour objectif d'optimiser les actes diagnostiques (médecine nucléaire, radiologie, IRM...) et thérapeutiques (radiothérapie, curiethérapie...) pour répondre à des enjeux de santé publique. Ce sous-domaine de la physique fait appel à de nombreuses bases théoriques enseignées à la fois en physique fondamentale et physique appliquée : traitement du signal, détecteurs, physique nucléaire, interactions rayonnements-matière... et ouvre la voie vers des carrières multiples et variées (recherche et développement, carrières en laboratoires académiques, carrières hospitalières). L'objectif de l'enseignement proposé vise à familiariser les étudiants avec les notions de base de la physique médicale pour des applications dans des domaines médicaux variés tels que la cancérologie, la neurologie ou la cardiologie.

Principaux thèmes abordés :

- **Rappels physiques :** physique atomique, radioactivité, interactions rayonnements-matière
- **Grands instruments :** cyclotrons, synchrotrons, accélérateurs à plasma laser
- **Traitements focalisés :** radiothérapie, curiethérapie, ultra-sons focalisés
- **Imagerie :** IRM, US, médecine nucléaire, radiologie, scanographie
- **Physique de la cellule :** motilité cellulaire, adhésion des cellules, perméabilité membranaire, électrophysiologie, effet Warburg

Prérequis :

Physique atomique, Electromagnétisme.

Bibliographie :

- [1] Handbook of Radiotherapy Physics: Theory and Practice, P. Mayles, A Nahum, J.C Rosenwald
- [2] Handbook of Particle Detection and Imaging, C. Grupen, I. Buvat
- [3] Handbook of MRI pulse sequences, M.A. Berstein, Elsevier
- [4] Magnetic Resonance Imaging Physical Prin.

Physique des semi-conducteurs

Responsable du cours : J. Barjon, A. Delteil

Déroulement et organisation pratique : 13 séances à raison d'une séance hebdomadaire de 4 heures, y compris deux présentations sous formes de séminaires et une visite de laboratoire (GEMaC). La note finale est établie comme Partiel (30%)/Compte-rendu de visite labo (20%)/Examen (50%)

Contenu :

Ce cours a pour but d'introduire les notions fondamentales de la physique des semi-conducteurs, permettant d'appréhender les propriétés de transport et les propriétés optiques de structures semi-conductrices.

Plan succinct du cours :

1. "Rappels" de physique des solides : Théorie des fonctions d'onde électroniques dans les solides cristallins avec modèle de l'électron libre (Sommerfeld), modèle de l'électron quasi-libre (Bloch-Brillouin), approximation des bords de bandes paraboliques, notion de masse effective.
2. Semi-conducteur à l'équilibre et hors équilibre. A l'équilibre : densité de porteurs, semi-conducteur intrinsèque, semi-conducteur extrinsèque. Hors équilibre : courant de dérive/de diffusion, potentiel électrochimique, génération/recombinaison, équations de continuité.
3. Jonction : interfaces entre matériaux, un exemple : la jonction PN.
4. Optique des semi-conducteurs :
 - a. Interaction lumière-matière appliqué aux états électroniques dans les semi-conducteurs
 - b. Formalisme de la fonction enveloppe, puits quantiques, règles de sélection.
 - c. Emission spontanée : Diodes électroluminescentes (LEDs)
 - d. Emission stimulée : Laser à semi-conducteur

Prérequis :

Les notions et concepts introduits s'appuient sur le cours de "Physique de la matière condensée" dispensé dans le tronc commun. Des notions de mécanique quantique sont également nécessaires.

Bibliographie :

- [1] N. W. Ashcroft, N. D. Mermin, Solid state physics
- [2] H. Mathieu, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques
- [3] P. Y. Yu and M. Cardona, Fundamentals of semiconductors
- [4] E. Rosencher, B. Vinter, Optoélectronique

Transitions de phases

Responsable du cours : Christophe Texier

Déroulement et organisation pratique : Cours et Tds alternent de façon hebdomadaire avec une présentation classique entièrement faite au tableau sauf pour la partie numérique. Les modalités de contrôle de connaissance sont :

- contrôle continu : 4 petits exercices écrits pendant les TDs (typiquement finir les dernières questions)
- examen final : 3 heures, écrit
- note finale (2*Exam + CC)/3

Site web du cours (avec sujets, résumé de cours et annales) : http://lptms.u-psud.fr/wiki-cours/index.php/Transitions_de_phase.

Contenu :

Ce cours propose une introduction aux méthodes de physique statistique et théorie des champs appliquées à l'étude des transitions de phase. Après avoir présenté la méthode de champ moyen dans le cas particulier du modèle d'Ising, nous allons dégager des propriétés génériques des transitions de phase. Une approche phénoménologique développée par Landau permet de classifier les transitions de phase sur la base d'arguments de symétries et du développement d'une énergie libre, appelée énergie libre de Landau, en termes du paramètre d'ordre différenciant la phase ordonnée de la phase désordonnée. Cette approche permet de généraliser l'étude aux systèmes inhomogènes ainsi qu'aux aspects dynamiques des transitions de phase, c'est la théorie de Ginzburg-Landau. Nous mettrons le focus sur le rôle des fluctuations et de l'invariance d'échelle au voisinage du point critique.

Syllabus

- Champ moyen sur le modèle d'Ising ferromagnétique
- Théorie de Landau et classification des transitions de phases
- Systèmes inhomogènes, théorie de Ginzburg Landau
- Fluctuations
- Invariances d'échelle et universalité
- Dynamique des transitions de phases
- Approches numériques.

Prérequis :

Thermodynamique, physique statistique, mécanique lagrangienne, méthodes mathématiques pour la physique.

Bibliographie :

Liens url vers les descriptifs :

- [1] [Pavloff & Sator : physique statistique](#)
- [2] [Chaikin & Lubensky : principles of condensed matter](#)

- [3] [Batrouni, le Bellac, Mortessagne : Equilibrium and Non-Equilibrium Statistical Thermodynamics](#)
- [4] Ben Simmons : [Phase Transitions and Collective Phenomena](#)

Choix de 3 U.E. parmi 4 :

Mécanique des Fluides

Responsable du cours : Frederic Moisy

Equipe pédagogique : Cyprien MORIZE, Pierre MOREL, Ladislav WIERZCHALEK

Déroulement et organisation pratique : 7 séances de cours de 1h45, 7 TDs de 1h45 en groupes.

Contenu :

Les écoulements sont omniprésents dans la nature, à toutes les échelles spatiales. Ils permettent aux bactéries de se déplacer, créent des ondes de surface à la mer, forment des rivières qui érodent le paysage, font voler les avions, contrôlent la météo et causent les mouvements à l'intérieur des planètes. La mécanique des fluides fixe les lois physiques fondamentales qui contraignent ces écoulements et grâce aux nombreuses non-linéarités, elle est loin d'être parfaitement comprise. La diversité et la richesse des écoulements ainsi que les nombreuses applications expliquent pourquoi ça reste un domaine de recherche très actif, qui est à découvrir par tout physicien. Quelque-soit votre niveau ou centre d'intérêt, il est certain que ce cours de mécanique des fluides vous apportera de nouvelles compétences physiques et mathématiques, qui vous seront utiles dans la suite.

Dans ce cours de mécanique des fluides, on met en place les lois fondamentales et puis on apprend à trouver des solutions dans certaines limites particulières.

Ch. 1: De la loi de Newton à la mécanique des milieux continus (qu'est un milieu continu, cinématique des milieux continus, lois fondamentales, équations de bilan).

Ch. 2: Fluide parfait incompressible (définition, équation d'Euler, loi de Bernoulli, théorème de Kelvin, écoulement potentiel, forces sur un obstacle, théorie des ailes).

Ch. 3: Fluide newtonien incompressible. (Définition, équation de Navier-Stokes, écoulement laminaire, régime de Stokes, approximation de lubrification, couches limites, transition laminaire turbulent).

Ch. 4: Surfaces libres & capillarité. (Surface matérielle, condition cinématique, loi de Young-Laplace, ménisque, ondes de surface, mouillage).

Un polycopié complet est fourni et servira comme base pour les cours. En TD, nous proposons de nombreux exercices de tous les niveaux de difficulté et nous distribuons des corrigés.

Prérequis :

Maîtrise du calcul vectoriel (théorèmes d'intégration, opérateurs différentiels, systèmes de coordonnées orthogonales, calcul indiciel). Mécanique du point.

Bibliographie :

[1] Mécanique des fluides, S. Candel, Dunod, 1990

[2] Advanced transport phenomena, J.C. Slattery, Cambridge Univ. Press, 1999

[3] Hydrodynamique Physique, E. Guyon, J.-P. Hulin & L. Petit, EDP éditions, CNRS, 2001

Responsable du cours : Sébastien Galtier

Equipe pédagogique : Benoît Gay; Olivier Guilbaud; Pierre Morel.

Déroulement et organisation pratique : 7 séances de cours de 1h45, 7 TDs de 1h45 en groupes.

Contenu :

La matière constituant notre environnement proche se présente essentiellement sous forme solide, liquide ou gazeuse. Au-delà de ces trois états, à haute température, les gaz ionisés – appelés plasmas – se distinguent par l'apparition d'une grande diversité de phénomènes physiques nouveaux. Les plasmas constituent l'essentiel de l'environnement terrestre au-delà de la haute atmosphère. Ainsi, la physique des plasmas est l'outil essentiel pour étudier ces environnements. Au-delà de son intérêt en tant qu'outil de référence pertinent pour l'étude des problèmes d'astrophysique, la physique des plasmas se situe en amont d'un vaste champ d'applications technologiques (comme la recherche sur la fusion thermonucléaire).

Ce cours, à vocation généraliste, est construit autour de l'ensemble de ces connaissances et résultats communs ou connexes. Les concepts et méthodes de la physique des plasmas sont présentés ici en cherchant à concilier deux objectifs complémentaires : (i) présenter aux étudiants qui en resteront là avec cette discipline, ce qu'est cette science et les sensibiliser à l'importance des plasmas ; (ii) donner une solide formation de base à ceux qui, dans la recherche, l'enseignement, ou l'industrie, seront amenés à pratiquer cette discipline.

Le cours est composé des quatre parties suivantes :

PHYSIQUE DES PLASMAS : découverte et exploration des plasmas ; des gaz aux plasmas ; plasmas naturels et de laboratoire ; méthodes de diagnostic ; échelles caractéristiques ; oscillation de plasmas ; traitements possibles des plasmas.

MOUVEMENTS INDIVIDUEL ET COLLECTIF DES PARTICULES : mouvement individuel en champ magnétique ; mouvement individuel en champ électrique ; mouvements en champs faiblement variables ; ondes plasmas dans l'approximation fluide.

THÉORIE CINÉTIQUE : fonction de distribution d'un plasma ; équation cinétique ; ondes dans un plasma sans collisions ; du cinétique au fluide.

MAGNÉTOHYDRODYNAMIQUE : introduction ; lois de conservation et topologie magnétique ; ondes d'Alfvén ; équilibres MHD et confinement magnétique.

Prérequis :

Maîtrise du calcul vectoriel (théorèmes d'intégration, opérateurs différentiels, systèmes de coordonnées). Maîtrise des bases de l'électromagnétisme.

Bibliographie :

- [1] *Introduction à la physique des plasmas*, G. Belmont et al., ISTE éditions, 229 pages (2018).
- [2] *Magnétohydrodynamique*, S. Galtier, Vuibert, 301 pages (2013).
- [3] *Physique des plasmas*, J-M Rax, Dunod, 426 pages (2003).

Physique non linéaire

Responsable du cours : Mélanie Lebental

Déroulement et organisation pratique : 7 séances de cours de 1h45 et 7 séances de TD de 1h45.

Contenu :

L'objectif de ce module est de fournir une introduction aux méthodes de la physique non-linéaire au travers d'exemples issus de divers domaines de la physique. Nous verrons comment les notions de chaos et de fractale apparaissent naturellement. Au terme des sept séances, nous appliquerons ces méthodes à des systèmes ondulatoires ou quantiques.

Plan de cours indicatif :

Séance 1 - Introduction.

Séances 2 et 3 – Introduction au point fixe, cycles limites, bifurcations. Sections de Poincaré.

Théorème de Poincaré-Bendixson.

Séances 4 et 5 – Chaos et fractales. Différentes définitions du chaos. Systèmes discrets : cascade de bifurcations, route vers le chaos. Méthodes de quantification : exposants de Lyapounov, dimensions fractales.

Séances 6 et 7 – Introduction au chaos quantique. Matrices aléatoires. Spectre et formule de trace.

Prérequis :

Physique analytique et physique quantique de L3. Il n'est pas nécessaire d'avoir suivi le module optionnel de systèmes dynamiques en L3.

Bibliographie :

[1] « Nonlinear dynamics and chaos » de Steven H. Strogatz.

Matière molle

Responsable du cours : Giuseppe Foffi

Déroulement et organisation pratique : Cours : 14h, TD : 11h,

Attention : un nouveau responsable reprendra le cours en 2022-2023, le cours est sujet à modifications

Contenu :

Matière condensée mais matière mal organisée. La structure et les propriétés de ces systèmes complexes sont sensibles à de nombreux paramètres extérieurs : température, présence d'eau, sollicitation mécanique faible.... Leur compréhension fait appel à des notions de physique fondamentale (physique statistique, mécanique...) alors que leurs applications industrielles sont nombreuses et variées.

L'objectif de ce module est de présenter aux étudiants physiciens quelques concepts de physique de base essentiels pour analyser ou prédire le comportement de ces systèmes de matière molle. L'agitation thermique est essentielle dans la compréhension de nombreux phénomènes et nous aborderons son effet notamment dans le mouvement Brownien et les phénomènes de diffusion. Les interactions entre les différents objets sont diverses et compétitives comme les interactions de van der Waals et les interactions électrostatiques en milieu aqueux ; liaisons hydrogènes, interactions hydrophobes ou interactions de déplétion complexifient ce panorama. Ces sont ces forces qui vont conduire à des organisations spatiales très variées et contrôlables.

Options de semestre 2 (6 ECTS)

Accélérateurs et détecteurs de particules

Responsable du cours : Patrick Puzo

Contenu :

La 1^{re} partie se propose d'aborder les processus d'interaction du rayonnement avec la matière en introduisant des concepts tels que ionisation, perte d'énergie, parcours, diffusion, rayonnement de freinage, ...

L'objectif final est de transmettre les connaissances de base sur les techniques de détection des rayonnements ionisants pour la physique nucléaire et la physique des particules, ainsi que leurs applications en industrie et médecine.

La 2^e partie est une introduction aux accélérateurs de particules. On détaillera les méthodes d'accélération actuelles, ainsi les nouvelles idées développées pour le futur, en soulignant tout particulièrement le rôle de l'accélération à l'aide de plasmas. On se concentrera ensuite sur les effets du champ électromagnétique sur les particules chargées, considérées individuellement puis dans un paquet. On terminera le cours en abordant les effets collectifs.

Enfin, la 3^e partie fera la synthèse des deux parties précédentes en prenant un ou deux exemples de détecteurs placés auprès d'un accélérateur.

Prérequis :

Pour aborder cet enseignement, il convient d'avoir de bonnes bases d'électromagnétisme classique. Des connaissances plus succinctes en relativité restreinte, en physique des plasmas et en physique des particules élémentaires sont également nécessaires.

Bibliographie :

- [1] J.D. Jackson, Electrodynamique classique, 3e édition, Dunod, Paris, 2001
- [2] D. Green, The Physics of Particle Detectors, 2010
- [3] C. Joram, Particle detectors, CERN Summer Student Lectures, 2002

Fluides complexes et interfaces

Responsable du cours : Emmanuelle Rio

Déroulement et organisation pratique :

Les TDs seront intégrés au cours. Une séance sera consacrée à des TP et démonstrations.

Contenu :

L'amplitude de réponse de la matière à une sollicitation est d'autant plus importante que les matériaux sont mous. C'est donc tout naturellement que les matériaux à faibles modules élastiques ont leur place dans la vie de tous les jours. Mais ces matériaux ont souvent un comportement plus complexe, parfois entre solide et liquide ou de viscosité complexe.

Le but de ce cours est d'introduire des bases de **physique des milieux continus** permettant de **modéliser ces écoulements et ces déformations complexes, entre liquides et solides**.

Les lois de l'élasticité et de l'écoulement visqueux seront introduites dans des cas simples afin d'avoir une base solide pour décrire les comportements plus complexes de la matière et présenter des

modèles simples de rhéophysique. Nous nous attacherons à faire le lien entre ces comportements macroscopiques la structure microscopique des matériaux.

Nous montrerons que ce genre de comportements peuvent se retrouver à 2 dimensions aux interfaces liquide/liquide ou liquide/air. Ainsi les vésicules telles les globules rouges, par exemple, sont des **membranes viscoélastiques** dont les propriétés mécaniques impactent fortement le comportement des vésicules.

Prérequis :

Les notions de mécanique des matériaux et d'hydrodynamique nécessaires à la compréhension du cours seront rappelées en début de cours. Néanmoins, nous nous appuyerons sur les notions de bases concernant la mécanique (force, contrainte, déformation, énergie) et les écoulements de liquides visqueux.

Bibliographie :

[1] Rhéophysique ou comment coule la matière ? Patrick Oswald, Belin, collection Echelles.

Processus stochastiques et neutronique

Responsable du cours : Eric Dumonteil

Equipe pédagogique : Eric Dumonteil, Alain Mazzolo

Contenu :

L'esprit de cette option s'inspire de la thermodynamique statistique (hors équilibre) dans le sens où partant du microscopique on aboutit, après des moyennes adéquates, au macroscopique. Dans le cas de la neutronique, la brique de base est la marche aléatoire du neutron. Entre deux collisions successives le neutron se déplace en ligne droite selon une loi exponentielle. En fait, de tels processus, appelés marches aléatoires (branchantes) ou processus stochastiques (branchants), se rencontrent dans de nombreux domaines des sciences (biologie animale, génétique, physique, chimie, mathématiques, médecine). L'option se veut une introduction à ces phénomènes aléatoires et ses nombreuses applications. Pour cela plusieurs idées probabilistes en relation avec la physique seront introduites : l'équation maîtresse, le mouvement brownien, l'équation de Fokker-Planck et les processus de Markov. Ensuite nous aborderons la diffusion des neutrons, c'est à dire la diffusion avec absorption. L'option se termine par une initiation à la méthode de Monte Carlo, notamment l'échantillonnage de lois, qui permet de résoudre par une approche probabiliste les équations établies en cours.

Prérequis :

Si l'option ne nécessite aucun prérequis en physique, en revanche plusieurs notions mathématiques sont bienvenues. En probabilité : espérance et variance de variables aléatoires, fonction génératrice, somme de variables aléatoires indépendantes. En analyse : transformée de Fourier, équations différentielles linéaires, propriétés de la distribution de Dirac et des fonctions harmoniques. Tous ces résultats mathématiques seront rappelés dans un fascicule qui sera distribué au début du cours.

Bibliographie :

[1] Polycopié du cours

[2] Cours de B. Houchmandzadeh sur les processus stochastiques: <https://www-liphy.ujf-grenoble.fr/pagesperso/bahram/>

[3] P. Krapivsky, S. Redner, E. Ben-Naim, «A kinetic view of statistical physics», Cambridge University Press (2010).

Interface Biologie-Physique : Fonctionnement du vivant et méthodes d'étude physiques

Responsable du cours : Guillaume Barthole et François Treussart

Déroulement et organisation pratique :

L'UE est divisée en 7 séances de 3h30 soit 25h au total. A chaque séance, 1h45 est dédiée à la partie Biologie et 1h45 à la partie Biophysique. Une unité thématique est associée à chaque séance et abordée à la fois dans la partie Biologie et la partie Biophysique.

L'évaluation de l'UE prend la forme d'un examen terminal écrit regroupant des questions de cours et des exercices portant sur la Biologie et les méthodes d'étude par la Physique.

Contenu :

La Biologie explore la complexité du vivant. Son étude historiquement macroscopique, qualitative et descriptive devient de plus en plus microscopique, mécanistique et quantitative. Le développement de nouveaux outils issus de la Physique permet aujourd'hui aux biologistes et aux biophysiciens de mieux comprendre à petite échelle les processus biologiques fondamentaux, avec précision et de manière quantifiée.

La partie Biologie aborde dans les grandes lignes un certain nombre d'aspects fondamentaux du fonctionnement des systèmes biologiques. Sans rentrer dans les détails, ni multiplier les exemples, les différents cours permettent d'appréhender les bases de la biologie.

La partie Physique aborde quatre grands types de méthodes (principalement optiques) utilisées pour étudier le vivant à l'échelle moléculaire et cellulaire. Chaque cours présente une méthode ou un ensemble de méthodes depuis leur principe jusqu'à leur utilisation et leur application en biologie. Trois séances de cours sont suivies d'un TD.

Prérequis :

Il n'est pas nécessaire d'avoir des pré-requis en Biologie pour suivre cette UE. Les concepts de base seront rappelés lorsque nécessaire pour permettre à chacun de suivre l'ensemble de l'UE.

Des connaissances de niveau L2-L3 en électrostatique, magnétostatique, électromagnétisme, ainsi qu'en optique physique (interférences et diffractions) sont souhaitables mais des rappels seront fait si nécessaire.

Bibliographie :

- [1] Molecular Biology of the Cell, Bruce Alberts, Alexander Johnson, Julian Lewis, Martin Raff, Keith Roberts, Peter Walter ; 6ème édition, 2014, Garland Science.
- [2] Physical Biology of the Cell, Rob Philipps, Jane Kondev, Julie Theriot, Hernan Garcia, 2ème édition, 2012, CRC Press Book.
- [3] Introduction to Optical Microscopy, Jérôme Mertz, 2019, Cambridge University Press (2^{ème} édition).

Responsable du cours : Denis Boiron

Contenu :

Le point principal du cours est la quantification du champ électromagnétique et l'étude de quelques exemples emblématiques d'états non classiques de la lumière.

Après des rappels de mécanique quantique et la description du corps noir, le champ électromagnétique sera quantifié. Suivront l'interaction photon-atome, la détection de photons, le bruit d'un interféromètre et la notion d'états compressés.

Prérequis :

Notion en mécanique quantique (postulats de la mécanique quantique, notion de Dirac, niveau d'énergie d'un atome), en électromagnétisme (équations de Maxwell, potentiels scalaire et vecteur, énergie électromagnétique) et en mathématiques (analyse vectorielle, espace vectoriel).

Bibliographie :

- [1] Quantum Optics, an introduction, M. Fox, Oxford Master Series (2006)
- [2] Introductory Quantum optics, C. Gerry and P. Knight, Cambridge (2006)
- [3] The quantum Theory of light, R. Loudon, Oxford University Press
- [4] A guide to experiments in quantum optics, H.-A. Bachor, T. Ralph, Wiley (2004).

Optique non-linéaire

Responsable du cours : Ngoc Diep Lai

Contenu :

Ce module constitue une introduction aux concepts et aux outils associés au phénomène de l'optique non-linéaire, illustrée par des exemples choisis en deuxième ordre et troisième ordre. Le cours comporte plusieurs parties, de notion de base, aux calculs détaillés, puis aux applications potentielles :

- Introduction aux systèmes faiblement non-linéaires par développement perturbatif classique.
- Susceptibilités généralisées : tenseurs. Implications physiques dans le contexte de l'interaction lumière-matière.
- Des équations de Maxwell à l'équation générale d'optique non-linéaire.
- Traitement des processus d'optique non-linéaire d'ordre 2 : génération paramétrique, génération de second harmonique, etc.
- Optique non-linéaire dans un milieu périodique et quasi-périodique : quasi-accord de phase, cristal non-linéaire photonique.
- Optique non-linéaire d'ordre 3 : génération de troisième harmonique, effet Kerr optique, effet Raman, etc.
- Applications de l'optique non-linéaire en microscopie : STED, Nanoscopie non-linéaire, CARS, etc.

Prérequis :

Connaissance de l'optique (géométrique et ondulatoire), et physique des lasers.

Bibliographie :

- [1] « Nonlinear Optics », 3ème ed. Robert Boyd
- [2] "The principle of Nonlinear Optics", Y. R. Shen
- [3] "Optique non-linéaire", François Sanchez (Ellipses, 1999).

Physique à l'échelle nanométrique

Responsable du cours : Emmanuelle Deleporte

Déroulement et organisation pratique :

Il y aura tout d'abord 4 séances de cours/TD (fabrication des nano-objets, méthodes d'investigation à l'échelle nano, transport à l'échelle nano, interaction lumière-matière), puis 2 séances encadrées de travail sur documents pour répondre à une question posée. Exemple de questions posées : expliquer la couleur des nanoparticules; la loi d'Ohm est-elle encore valable dans les matériaux à basse dimensionnalité. La dernière séance sera consacrée au rendu, sous forme écrite et orale, du travail effectué pendant les 2 séances de travail.

Contenu :

Explorer les effets de la **dimensionnalité** sur les propriétés électroniques, optique et de transport, classique / quantique, de matériaux et de structures nanométriques.

Le contenu des cours reposera sur :

- Ordres de grandeur pertinents
- Quelques éléments sur la fabrication des objets nanométriques

- Méthodes d'investigation des objets nanométriques : spectroscopies (Raman, optique, ...), microscopies (électronique, champ proche)
- Interaction lumière-matière
- Transport

Prérequis :

Physique ondulatoire, physique quantique, physique statistique quantique, matière condensée (bandes, semiconducteur, métal, modèle de Drude).

Physique de la conversion et du stockage de l'énergie

Responsable du cours : Gatien Verley

Contenu :

Après une introduction sur la problématique «énergie et société » qui servira à mettre en contexte ce cours et à prendre conscience des ordres de grandeur de la production et de la consommation d'énergie, nous étudierons la physique des processus irréversibles de conversion de l'énergie, en se focalisant sur l'efficacité d'un convertisseur ainsi que sur le compromis puissance--efficacité.

Nous commençons par une approche thermodynamique standard permettant de différencier convertisseur idéaux et réels. Nous étudions ensuite un convertisseur stationnaire linéaire afin de comprendre le rôle de l'irréversibilité de conversion. Nous nous tournons enfin vers les principales applications de cours: fours solaires et générateurs photovoltaïques, turbines hydraulique (Pelton, Francis), éoliennes, et générateurs électrochimiques (piles et piles à combustible).

Après une introduction sur la problématique «énergie et société » qui servira à mettre en contexte ce cours et à prendre conscience des ordres de grandeur de la production et de la consommation d'énergie, nous étudierons la physique des processus irréversibles, en se focalisant sur l'efficacité du stockage et de la conversion énergétique, à travers les modélisations microscopique (processus markoviens) et macroscopique (flux linéaires couplés) classiques. La thermodynamique et ces deux cadres de descriptions sont utilisés pour présenter sous un angle général les convertisseurs d'énergie, tout d'abord idéaux (machines thermiques de Carnot et les machines chimiques de Van't Hoff) puis les convertisseurs réels (présentant des sources d'irréversibilité) avant de considérer les principales applications, telles que les fours solaires, les générateurs photovoltaïques, les générateurs électrochimiques (piles et piles à combustible), les éoliennes, etc.

Prérequis :

Mécanique, thermodynamique et électrodynamique classiques niveau prépa agrégation.

Bibliographie :

- [1] PHYSIQUE DE LA CONVERSION D'ENERGIE, JM Rax, 354 pages-206 figures, ISBN 978-2-7598-0792-5 Editions EDP-Sciences, Collection Savoirs Actuels, 2015.

Responsable du cours : Hélène Brogniez

Équipe enseignante : Hélène Brogniez, Cyril Szopa

Déroulement et organisation pratique : Les séances 1 à 6 sont des cours-TD, et la séance 7 correspond à des soutenances de problèmes traités au préalable par petits groupes, sur des approfondissements qui n'auront pas été traités en cours.

Évaluation : une évaluation formative sous forme de quizz en première séance (non noté), une note de présentation orale du problème traité (40%), un examen final classique (60%).

Contenu :

À l'issue de cette UE, les étudiant·es auront acquis des notions leur permettant de comprendre le fonctionnement physique du système climatique, en se focalisant sur l'atmosphère qui sera la seule enveloppe traitée. Ils pourront :

Restituer des notions de base sur la physique du climat :

- Variables géophysiques pertinentes pour décrire le système climatique
- Bilan d'énergie de la planète
- Mise en mouvement des enveloppes fluides : circulation générale et mouvements verticaux.

Identifier et donner le sens physique des termes présents dans les lois de conservation pour le système climatique

Mettre en équation un problème lié au climat et formulé en langage naturel

Simplifier les équations décrivant le système climatique et **résoudre** le problème

Calculer des ODG liés au problème

Déroulé de l'UE :

Séance 1 Présentation de l'UE et de l'approche pédagogique + Quizz : où en sont vos connaissances ? + Équation de Navier-Stokes et ordres de grandeurs de quelques phénomènes

Séance 2 Mise en mouvement de l'atmosphère : dynamique de grande échelle

Séance 3 Mise en mouvement de l'atmosphère : stabilité verticale et couche limite atmosphérique

Séance 4 Généralités sur les interactions rayonnement - matière / Le bilan radiatif de la Terre

Séance 5 Effet de serre et taux de chauffage radiatif

Séance 6 Sensibilité climatique et rétroactions dans le système climatique

Séance 7 Soutenance sujet apprentissage par problème : différents problèmes auront été proposés aux étudiant·es qui travailleront en groupe de 3. Chaque groupe dispose d'un matériel pédagogique de démarrage. La séance comprend une explication précise du rendu attendu. Les sujets permettront d'approfondir des thèmes qui n'auront pas été abordés en cours.

Prérequis :

-Savoir faire des calculs vectoriels simples (application d'un gradient, rotationnel, divergence, Laplacien, ...)

-Savoir manipuler des dérivées partielles -Savoir projeter une équation vectorielle sur les axes d'un repère en coordonnées cartésiennes, cylindrique.

Bibliographie :

- [1] Dynamique de l'atmosphère et de l'océan, P. Bougeault et R. Sadourny, Les éditions de l'École Polytechnique
- [2] Fondamentaux de météorologie, S. Malardel, Editions Cepadues/Météo France
- [3] Physique et chimie de l'atmosphère, R. Delmas, G. Mégie, et V.-H. Pe.

Responsable du cours : Bartjan van Tent

Déroulement et organisation pratique : Sept cours de 3,5h, dont les trois premiers sont consacrés à la relativité générale et les quatre derniers à la cosmologie. Le format sera celui du cours-TD : cours et TD mélangés. Le contrôle aura lieu par examen écrit à la fin.

Contenu :

Pour aborder les aspects modernes de la gravitation et de la cosmologie on utilisera la notion de champ se propageant dans un espace-temps 4D. On montrera que :

- 1.1 La gravitation est encodée dans la géométrie (courbe) de l'espace-temps, décrite par le champ métrique (tout comme l'électromagnétisme est encodé dans le champ quadri-potentiel).
- 1.2 Ce champ obéit à une équation du mouvement (équation d'Einstein) qui découle d'une action. La matière/énergie agit comme un champ source dans cette équation.
- 1.3 Il y a beaucoup d'applications de la relativité générale : les trajectoires des astres, le lentillage gravitationnel, les trous noirs, les ondes gravitationnelles, ... et toute la cosmologie !
- 2.1 L'évolution et l'histoire de l'univers découlent des équations d'Einstein, avec comme seuls ingrédients des invariances observées et des propriétés de son contenu matériel.
- 2.2 Une période d'inflation, décrite par un champ scalaire, est nécessaire dans l'univers primordial pour résoudre des problèmes dans le modèle standard.
- 2.3 Les fluctuations cosmologiques (quantiques) de ce champ sont les germes de la formation de toutes les structures dans l'univers.
- 2.4 Ces fluctuations sont mesurées avec précision dans le fond diffus cosmologique, augmentant ainsi notre compréhension de la cosmologie.

Prérequis :

La relativité restreinte et son formalisme covariant.

Bibliographie :

- [1] Bernard Schutz, "A First Course in General Relativity". Introduction claire et accessible à la relativité générale.
- [2] Robert Wald, "General Relativity". Présentation rigoureuse des concepts mathématiques.
- [3] Charles Misner, Kip Thorne, et John Wheeler, "Gravitation".
- [4] Andrew Liddle, "An Introduction to Modern Cosmology". Introduction claire et accessible à la cosmologie, mais à un niveau moins élevé que le cours.
- [5] Patrick Peter et Jean-Philippe Uzan, "Cosmologie Primordiale". Présentation très complète de la cosmologie, se focalisant en particulier sur la cosmologie théorique.
- [6] Scott Dodelson, "Modern Cosmology". Contient également des aspects de la cosmologie observationnelle.