

Université Claude Bernard



Lyon 1

**DEPARTEMENT de PHYSIQUE**

**Faculté des Sciences et Technologies**

**MASTER de PHYSIQUE**

**Voie Recherche**

**M2R Physique Fondamentale**

**Année 2015 / 2016**

14, rue Enrico Fermi - Bâtiment Gabriel Lippmann  
Domaine Scientifique de la Doua - 69622 Villeurbanne cedex  
Site web: <http://master-physique.univ-lyon1.fr>  
E-mail: [scolarite.physique@univ-lyon1.fr](mailto:scolarite.physique@univ-lyon1.fr)

## Introduction

Le Master de Physique est une formation de 120 crédits ECTS répartis en 4 semestres. Il est constitué de 5 spécialités s'appuyant d'une part sur les thématiques de recherche des Laboratoires d'accueil de Lyon et de la Région Rhône-Alpes et d'autre part sur les offres de stages et d'emplois des industriels partenaires du Master. Les 2 premières spécialités possèdent une finalité Recherche et les 3 suivantes une finalité Professionnelle. Des spécialités transversales complémentaires à finalité Professionnelle sont aussi proposées à l'issue de l'obtention du Master de Physique.

Ces spécialités sont respectivement :

**Physique Fondamentale (PhysFond)**  
**Synthèse, Vieillessement et Caractérisation des Matériaux du Nucléaire (SYVIC)**  
**Environnement, Atmosphère et Radioprotection (EAR)**  
**Développement Instrumental pour les Micro et Nanotechnologies (DIMN)**  
**Compétences Complémentaires en Informatique (CCI)**

Quelques spécificités sont à noter : la spécialité « PhysFond » s'appuie sur un ensemble d'enseignement en Astrophysique proposées dans le Master des Sciences de la Matière de l'Ecole Normale Supérieure de Lyon (ENS Lyon) et la spécialité SYVIC est co-habilitée avec l'INSA Lyon..

## Physique Fondamentale : Les Semestres 3 et 4

Les semestres 3 et 4 de la spécialité Physique Fondamentale du Master de Physique s'inscrivent dans la suite logique de la formation du Master de Physique, première année. Le semestre 3 est formé par un ensemble de cours de tronc commun et de spécialisation et le semestre 4 contient les ateliers et le stage de recherche. Deux parcours sont proposés :

Physique Subatomique et Astrophysique (PSA)  
Physique Atomique et Moléculaire, Matière Condensée et Optique (PAMMCO)

## Conditions d'accès

Le Master de Physique 2<sup>ème</sup> année est accessible à tous les étudiants ayant 60 crédits obtenus en première année (année M1). L'autorisation d'accès est donnée par la commission pédagogique du Master. Les étudiants titulaires d'un diplôme équivalent pourront être admis en Master 2<sup>ème</sup> année après accord de la commission pédagogique.

Pour les étudiants élève-ingénieur de dernière année, l'accès au Master de Physique pourra se faire directement en 2<sup>ème</sup> année. L'autorisation d'accès sera donnée par la commission pédagogique du Master qui délivrera les équivalences d'UE adaptée en fonction des cursus Ingénieurs suivis. Des personnes en formation continue pourront également être admis après accord de la commission pédagogique.

## Coordonnées

**Coordonnateur** du Master de Physique :

**Pierre-François Brevet**

E-mail : [pfbrevet@univ-lyon1.fr](mailto:pfbrevet@univ-lyon1.fr) Téléphone : 04 72 44 58 73

**Parcours Physique Subatomique et Astrophysique (PSA) :**

**Imad Laktineh**, [i.laktineh@ipnl.in2p3.fr](mailto:i.laktineh@ipnl.in2p3.fr) (Physique Subatomique)

**Jean-François Gonzalez**, [Jean-Francois.Gonzalez@ens-lyon.fr](mailto:Jean-Francois.Gonzalez@ens-lyon.fr) (Astrophysique)

**Physique Atomique et Moléculaire, Matière Condensée et Optique (PAMMCO)**

**Thierry Biben**, [Thierry.Biben@univ-lyon1.fr](mailto:Thierry.Biben@univ-lyon1.fr) (Matière Condensée)

**Pierre-François Brevet**, [pfbrevet@univ-lyon1.fr](mailto:pfbrevet@univ-lyon1.fr) (Physique Atomique et Moléculaire Optique)

**Secrétariat :**

Département de Physique – Service Scolarité  
Rue Enrico Fermi - Bâtiment Gabriel Lippmann – 1<sup>er</sup> étage  
Téléphone : 04 72 43 19 67 ou 04 72 43 26 89  
E-mail : [scolarite.physique@univ-lyon1.fr](mailto:scolarite.physique@univ-lyon1.fr)

# Organisation du Master 2 Recherche Physique Fondamentale

La formation pédagogique dispensée en M2 se compose de **60 crédits ECTS** répartis différemment selon la finalité des parcours. Les UE sont réparties en plusieurs catégories :

- Des **UE de Tronc Commun** de 3 crédits ECTS et dont au moins 5 doivent être choisies par les étudiants,
- Des **UE de Spécialisation** de 3 crédits ECTS et dont au moins 5 doivent être choisies par les étudiants,
- Des **Ateliers** de 2 crédits ECTS d'initiation aux techniques indispensables à une bonne insertion dans les laboratoires de recherche fondamentale ou appliquée et deux ateliers transversaux (Informatique, Anglais),
- Une certification en langue étrangère, obligatoire,
- Un **Stage Obligatoire** d'une durée de 4 mois effectué dans un laboratoire de recherche académique ou industriel et comptant pour **24 crédits ECTS**.

## UE de Tronc Commun

Les **UE de Tronc Commun** constituent une mise à un niveau avancé dans des matières déjà présentes en 1<sup>ère</sup> année de Master. Chaque module a une durée de 24h CM et compte pour 3 crédits ECTS. La liste est la suivante :

- **Mécanique quantique II**
- **Physique statistique II et transitions de phase**
- **Propriétés physiques du solide II**
- **Thermodynamique et transport**
- **Surfaces et interfaces**
- **Physique atomique**
- **Physique du noyau**
- **Symétries et particules**
- **Optique quantique et non linéaire**

Au moins 5 UE de Tronc Commun doivent être choisies par les étudiants avec un maximum de 7. Le choix définitif pourra être effectué après discussion avec les responsables de parcours. Toutes ces UE ne comportent aucun TD afin de développer le travail personnel des étudiants.

## UE de Spécialisation

Les **UE de Spécialisation** à finalité recherche correspondent aux grandes thématiques de recherche des Ecoles Doctorales de Physique de l'UCB Lyon 1, en particulier l'ED PHAST « Physique et Astrophysique ». Elles se composent de cours de 16h CM comptant chacun pour 3 crédits ECTS. En accord avec le responsable de parcours dont relève l'étudiant, des crédits obtenus dans d'autres Masters proposés par les Etablissements lyonnais pourront être acquis. La liste des UE optionnelles est la suivante :

Parcours ASTRO (incluant les UE spécifiquement délivrées à l'ENS Lyon):

- **Cosmologie et Systèmes gravitationnels**
- **Astrophysique des particules**
- **Astrophysique stellaire approfondie**
- **Relativité générale**

Parcours SUBA

- **Introduction aux théories de jauge et QCD**
- **Matière hadronique: des basses aux hautes densités**
- **Instrumentation et détecteurs**
- **Modèle standard et au-delà**
- **Energie nucléaire et cycle électronucléaire (mutualisation avec SYVIC)**
- **Traitement d'Images**

Parcours PAMMCO

- **Agrégats, nano-objets, matériaux nano-structurés**
- **Optique du solide**
- **Diffraction de rayonnement**
- **Liquide et Matière Molle**
- **Traitement d'Images**

Les UE sont susceptibles d'être fermées si l'effectif n'est pas suffisant. Les cours de spécialisation en Astrophysique » sont communs avec le Master des Sciences de la Matière de l'ENS Lyon. Les UE apparaissant dans le Master des Sciences de la Matière sont reprises à l'identique avec leurs crédits ECTS d'origine dans cette organisation du Master de Physique. Ces cours ont lieu uniquement à l'ENS Lyon. Le statut particulier de cette spécialisation résulte de la mise en commun nécessaire des moyens dans le domaine de l'Astrophysique et de la présence de thèmes de recherche forts dans les laboratoires de l'UCB Lyon 1 et de l'ENS Lyon : IPN Lyon et CRAL.

## **Ateliers**

Les **Ateliers** constituent un ensemble cohérent d'enseignement théorique et/ou pratique sur des techniques indispensables dans des travaux de recherche. Ils se déroulent sur une semaine à temps complet. Les chercheurs CNRS des laboratoires d'accueil de l'Université Claude Bernard Lyon 1 assurent une très large partie de l'encadrement nécessaire à ces Ateliers. Ces Ateliers sont comptabilisés pour 2 crédits ECTS par atelier, l'étudiant choisissant trois ateliers. La liste actuelle des ateliers est la suivante :

- **Informatique (obligatoire)**
- **Anglais (obligatoire)**
- **Ateliers Expérimentaux (liste fournie à la rentrée)**

La liste des ateliers disponibles est susceptible de changer, par augmentation ou diminution, selon la disponibilité des enseignants d'une année sur l'autre. L'ouverture d'un atelier est conditionnée par l'inscription d'un nombre suffisant d'étudiants.

En plus des ateliers, des **cours externes** donnés par des enseignants étrangers dans le cadre de programmes d'échange avec des Universités étrangères pourront avoir lieu. Les étudiants sont alors tenus de participer à ces programmes internationaux du Master.

## **Stage**

Un stage de 4 mois dans une équipe de recherche des Laboratoires de Lyon, sa région, en France ou à l'étranger est effectué de Mars à Juin. La remise du rapport et la soutenance ont lieu début Juillet. Ce stage compte pour un total de 24 crédits ECTS.

**ANNEXE**  
**FICHES INDIVIDUELLES DES U.E.**

## MECANIQUE QUANTIQUE II

3 ECTS - 24 h CM

UE de Tronc Commun

**Responsable** : François GIERES, Professeur

**Programme** :

### ■ MECANIQUE QUANTIQUE RELATIVISTE

I- Le groupe de Lorentz et ses représentations

1- Introduction et position du problème

2- Le groupe de Lorentz : rappels, notations, générateurs

3- Spineurs droits et gauches

II- Equation de Dirac

1- Construction des états à impulsion bien déterminée

2- Spineurs de Dirac

3- Equation de Dirac libre

4- Densité scalaire; courant conservé

5- Equation de Dirac dans un potentiel : invariance de jauge, limite non relativiste, rapport gyromagnétique de l'électron, précession de Thomas, spin-orbite en physique atomique et nucléaire

6- Conjugaison de charge

III- Interaction électromagnétique de particules relativistes

Remarque : Pour des étudiants qui ne suivraient pas un cours de TQC

1- Diffusion d'un électron dans un champ électromagnétique

2- Amplitude conjuguée de charge

3- Réinterprétation des états à énergie négative

4- Diffusion coulombienne d'électrons et de positrons

### ■ ELECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE (QED)

I - Formalisme lagrangien et invariances.

1 - Lagrangien.

2 - Théorème de Noether.

3 - Exemples : champs scalaire, spinoriel, vectoriel.

II - Quantification canonique des champs.

1 - Champ de Klein-Gordon.

2 - Champ de Dirac.

3 - Propagateurs de Feymann.

4 - Quantification du champ électromagnétique.

III - Théorie des perturbations.

1 - Matrice S.

2 - Règles de Feymann de QED.

3 - Exemples de calculs de sections efficaces.

IV - Interaction rayonnement-atome.

1 - Temps de vie d'un état excité. Largeurs de raies.

2 - Diffusion de photons sur les atomes.

## ■ SECONDE QUANTIFICATION ET PROBLEME A N CORPS

### I- Introduction et Rappels

### II- Système de fermions

- 1- Base d'états antisymétriques~: déterminants de Slater
- 2- Opérateurs de création~: espace de Fock
- 3- Opérateurs de destruction et d'annihilation
- 4- Opérateurs nombre de particules; algèbre des opérateurs
- 5- Notion d'opérateurs de champ
- 6- Opérateurs à un et deux corps

### III- Système de bosons

- 1- Etats occupés
- 2- Opérateurs de création et d'annihilation
- 3- Opérateurs à un corps et deux corps, opérateurs de champ

### IV- Théorème de Wick

- 1- Etat de référence
- 2- Opérateurs de création et d'annihilation dépendant du temps
- 3- Produit chronologique, produit normal, contraction, produit normal

contracté

- 4- Enoncé du théorème de Wick ; quelques cas simples

### V- Quelques exemple d'application}

- 1- Théorie Hartree-Fock
- 2- Condensat de Bose et trappes bosoniques
- 3- Superfluidité : modèle simple pour l'Hélium superfluide

### VI- Quelques notions de théorie quantique des champs}

- 1- Opérateur de champ en représentation de Heisenberg
- 2- Opérateur de création et de destruction de particules et d'anti-particules
- 3- Hamiltonien en seconde quantification pour une particule relativiste
- 4- Application : un modèle relativiste pour la matière nucléaire dense et les étoiles à neutrons



# PHYSIQUE STATISTIQUE II ET TRANSITIONS DE PHASE

3 ECTS - 24 h CM

**Responsable** : Dany DAVESNE, Professeur

## Programme

### I - Transitions de phase.

- 1 - La thermodynamique des transitions de phase et brisure de symétrie.
- 2 - Ordre vs fluctuations, la phénoménologie de Imry et Ma.
- 3 - La théorie du champ moyen : atouts et défauts.
- 4 - Théorie de Landau : transitions de 2<sup>ème</sup> et de 1<sup>er</sup> ordre.
- 5 - Fonctionnelle d'énergie de Landau-Ginzburg, réponse linéaire / .
- 6 - Les lois d'échelle.
- 7 - Le groupe de renormalisation.

### II - Thermodynamique des systèmes hors d'équilibre.

- 1 - Phénomènes stochastiques.
  - a - Rappels sur les variables aléatoires
  - b - Classification des processus stochastiques.
  - c - Mouvement brownien. Equation de Langevin.
  - d - Equation de Fokker-Planck. Méthodes de résolution et application au cas de l'équation de la diffusion et au cas d'une particule dans un potentiel périodique. Illustrations : le conducteur superionique ; la rotation des dipôles dans un champ constant.
- 2 - Equation de Boltzmann.
  - a - Equation de Boltzmann. Théorème H.
  - d - Bilan d'entropie. Equilibre local.
  - e - Développement de Chapman-Enskog.
- 3 - La théorie de la réponse linéaire.
  - a - Réponse d'un système à une perturbation faible dépendant du temps. Susceptibilité.
  - b - Fonction spectrale. Dissipation.
  - c - Relaxation à partir d'un état légèrement hors d'équilibre. Fonction de corrélation de Kubo.
  - d - Dynamique des fluctuations. Fonction de corrélation symétrique.
- 4 - Le fluide normal.
  - a - Equation de la dynamique des fluides.
  - b - Solution des équations hydrodynamiques.
  - c - Règles de somme thermodynamiques.
  - d - Fonctions de corrélation hydrodynamiques.
  - e - Diffusion de la lumière.
  - f - Expression de Kubo pour les coefficients de transport.

## PHYSIQUE DU SOLIDE II

3 ECTS - 24 h CM

**Responsable** : Joël BELLESSA - Professeur

### Programme

- Gaz d'électrons libres
- Modèle de Drude
- Gaz de Fermions
- Propriétés thermiques
- Mesure de densité d'état par STM

Electrons dans un potentiel période

- Théorème de Bloch
- Bandes d'énergie
- Exemple de structures de bande caractéristiques
- Constantes diélectriques des métaux

Semiconducteurs et nanostructures

- Masse effective
- Puits et boîtes quantiques de semiconducteur
- Excitons

Emission et absorption de semiconducteurs

- Coefficient d'absorption
- Règles de sélections
- Processus d'émission
- Emission des nanostructures

Supraconductivité

- Eléments de théorie microscopique
- Equation de London et Pippard
- Modèle de Ginzburg Landau
- Quantification du flux et effet Josephson

## THERMODYNAMIQUE ET TRANSPORT

3 ECTS - 24 h CM

**Responsable** : Denis MACHON, Maître de Conférences

### Programme

Rappels de thermodynamique à l'équilibre et hors équilibre.

Lecture et construction de diagrammes de phase de corps purs et de mélanges.

Solides cristallins et solutions solides.

Défauts ponctuels et diffusion dans les solides – défauts étendus et plasticité – séparation de phases : nucléation – croissance, décomposition spinodale.

Liquides : caractéristiques statiques et dynamiques de l'état liquide – transition liquide-cristal – forme d'équilibre et croissance d'un cristal.

Transition liquide-verre : généralités sur la transition vitreuse – phénomènes de relaxation dans les liquides très visqueux et les verres.

## SURFACES ET INTERFACES

3 ECTS - 24 h CM

**Responsable** : Thierry BIBEN, Professeur

### Programme

Introduction à la science des surfaces.

Capillarité et mouillage, aspects microscopiques et macroscopiques.

Surfaces à l'échelle colloïdale.

Interactions entre surfaces.

Formation et stabilité des films liquides minces.

Adhésion.

Surfaces solides.

Méthodes d'analyse.

Structures cristallines.

Propriétés électroniques.

Tension superficielle et contrainte de surface.

## PHYSIQUE DU NOYAU

3 ECTS - 24 h CM

**Responsable** : Camille DUCOIN, Maître de Conférences

### **Programme**

#### I. Introduction

- I.1) Généralités / Présentation de l'UE / Exemple d'étude d'article
- I.2) Rappels de bases

#### II. Noyaux et matière nucléaire

- II.1) Matière nucléaire, équation d'état
- II.2) Méthode du champ moyen

#### III. Au-delà de la vallée de stabilité

- III.1) Noyaux exotiques
- III.3) Nucléosynthèse

#### IV. Notions de structure nucléaire

- IV.1) Etats individuels et modes collectifs
- IV.2) Appariement
- IV.4) Déformations, clusterisation
- IV.5) Eléments de spectroscopie gamma

#### V. Notions de réactions nucléaires

- V.1) Réactions directes
- V.2) Noyau composé

# PHYSIQUE ATOMIQUE ET MOLECULAIRE

3 ECTS - 24 h CM

**Responsable** : Bruno BAGUENARD et Heather HARKER, Maîtres de Conférences

## Programme

### Physique Atomique

- I - Théorème de Wigner-Eckart. Opérateurs tensoriels.
  - 1 - Opérateurs vectoriels.
  - 2 - Opérateurs tensoriels irréductibles.
  - 3 - Produit tensoriel. Produit scalaire de deux tenseurs.
  - 4 - Calcul explicite des éléments de matrice et des éléments de matrice réduits.
  - 5 - Tenseurs cartésiens, tenseur réductible de rang 2. Décomposition en tenseurs irréductibles.
  
- II - Structure hyperfine.
  - 1 - Structure hyperfine magnétique.
  - 2 - Structure hyperfine électrique.
  - 3 - Développement multipolaire électrique et magnétique.
  
- III - Effet d'un champ externe statique.
  - 1 - Effet Zeeman.
  - 2 - Effet Stark.
  
- IV - Interaction avec une onde électromagnétique. Développement multipolaire.
  - 1 - Position du problème.
  - 2 - Principe du calcul du développement multipolaire.
  - 3 - Hamiltonien dipolaire électrique.
  - 4 - Hamiltoniens dipolaire magnétique et quadrupolaire électrique.
  - 5 - Ordres de grandeur.
  
- V - Interaction avec une onde électromagnétique résonnante. Résonance optique.
  - 1 - Position du problème.
  - 2 - Equation d'évolution du système.
  - 3 - Modèle géométrique du vecteur de Bloch optique.
  
- VI - Quelques méthodes expérimentales en physique atomique.
  - 1 - Spectroscopie atomique. Généralités.
  - 2 - Spectroscopie laser. Spectroscopie sub-Doppler.
  - 3 - Spectroscopie de photoélectrons.
  
- VII - Atomes neutres refroidis et piégés par laser.
  - 1 - Décélération et refroidissement des atomes.
  - 2 - Piégeage des atomes neutres.
  - 3 - Condensation de Bose-Einstein.

VIII - Introduction à la théorie des systèmes électroniques finis : atomes et agrégats.

1 - Approximations des particules indépendantes. Champ moyen. Modèle Hartree-Fock.

2 - Théorie de la fonctionnelle de la densité. Modèle de Thomas-Fermi. Méthode de Kohn-Sham. Approximation de densité locale.

3 - Etats excités et oscillations collectives. Concepts de base. Règles de somme. Descriptions classiques. Exemples : atomes et agrégats. Similitudes entre agrégats métalliques et noyaux atomiques.

4 - Théorie de la réponse linéaire. Approximation des phases aléatoires (RPA). Approximation semi-classique : équation de Vlasov.

## Physique Moléculaire

1.Introduction Physique Moléculaire

1.Atome -> Molécule

2.Ordres de grandeur

3.Hamiltonien moléculaire

4.Approximation Born Oppenheimer

5.Autres approximations

6.Outils théoriques et expérimentaux

I. Traitement électronique de petites molécules

a. H<sub>2</sub><sup>+</sup>

b. Orbitales moléculaires

c. Méthode variationnelle

d. Surfaces d'énergie potentielle

e. États liants

f. Hybridation

g. Types de liaisons moléculaires

h. Description atomes unifiées/séparées

i. Configurations électroniques

j. Termes électroniques

k. Molécules à N électrons

I. Degrés de liberté vibrationnels

a. Transitions vibroniques

b. Franck-Condon

c. Transitions vibrationnelles

d. Règles de sélection

e. Oscillateur (an)harmonique

f. Énergie de point zéro

g. Énergie de dissociation

h. Potentiel de Morse

i. Moment de transition

j. Molécules polyatomiques

k. Modes normaux

1.Degrés de liberté rotationnels

1. Transitions rovibrationnelles
2. Mouvement sur un anneau (2D)
3. Mouvement sur une sphère (3D)
4. Moment angulaire
5. Harmoniques sphériques
6. Rotateur rigide
7. Rotation moléculaire
8. Moments d'inertie et constants de rotation
9. Classification de rotateurs
10. Règles de sélection
11. Moment de transition
12. Couplage Coriolis
13. Branches R, P, Q
14. Distortion centrifuge

1. Spectres moléculaires



# SYMETRIES ET PARTICULES

3 ECTS - 24 h CM

**Responsable** : Corinne AUGIER, Professeur

## Programme

### I - Introduction : de l'atome aux constituants élémentaires, plus d'un siècle de particules

**A – La nature de la matière ou la quête de l'élémentaire** : une première introduction à la physique des particules ; quelques définitions ; les unités adaptées.

**B – Généralités sur la classification des particules** : premières notions sur les symétries ; particules et antiparticules ; les 3 familles de quarks et leptons ; interactions et quanta de champ ; lois de conservation ; résonances.

**C – Pions, particules étranges** : propriétés et caractéristiques des pions, particules étranges, particules delta, des résonances mésoniques et des hypernoyaux ; les réactions associées et l'intérêt de leur étude et de leur utilisation.

**D – Le modèle des quarks** : modèle des quarks ; multiplets de baryons et de mésons ; quarkonia

**E – Preuves expérimentales : quarks, gluons et couleur** : les expériences qui ont confirmé l'existence des quarks, des gluons et de la couleur.

### II – Le Modèle Standard

**A – Cadre théorique de la physique des particules** : Quelques outils en vrac ; Théorie de la diffusion et diagrammes de Feynman.

**B – QED et tests expérimentaux** : Particules libres, interactions, principe de jauge et dérivée covariante ; Lagrangien de QED ; diagrammes de Feynman en QED ; exemples de la diffusion électron-muon et du processus  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  ; Moment magnétique anormal des leptons ; Higher order QED et renormalisation.

**C – Le Modèle Standard** : rappels ; QCD ; interaction faible et violation des symétries ; connaissances expérimentales sur l'interaction faible ; unification électrofaible : la théorie de Glashow ; brisure spontanée de symétrie ; modèle de Weinberg et Salam et lagrangien du MS.

**D – Le Modèle Standard à l'épreuve des expériences** : avant le Higgs, les tests de la théorie électrofaible ; 50 ans de traque du Higgs.

### III – Violation de CP pour les mésons

**A – Système des mesons K et violation de CP et T** : le système des mésons K neutres ; violation de CP dans le système des kaons neutres ; résultats expérimentaux : violation de CP et T, invariance CPT.

**B – Matrice CKM** : la matrice CKM ; triangle d'unitarité et violation de CP

**C – Mais où est passée l'antimatière ?** : asymétrie baryonique, baryogénèse et conditions de Sakharov.

### IV – Neutrinos et physique BSM

**A – La physique du neutrino** : rappels historiques et sources de neutrinos ; oscillations, masse et nature des neutrinos ; donner une masse aux neutrinos : le mécanisme du Seesaw

**B – Au-delà du Modèle Standard** : Les limites du MS ; Les modèles de GUT ; A la recherche de SUSY

**En conclusion de ce cours : les questions ouvertes en physique des particules**

# OPTIQUE QUANTIQUE ET NON LINEAIRE

3 ECTS - 24 h CM

**Responsable** : Pierre-François BREVET, Professeur

## Programme

Les bases de l'**Optique Quantique** et de l'**Optique Non Linéaire** pour certains auteurs, sont exposées dans ce cours. Le cours comprend deux parties. Dans la première, les aspects quantiques de la lumière sont décrits alors que dans la seconde, les aspects non linéaires sont concernés.

### Optique Quantique

- 1 Introduction
- 2 Quantification du champ électromagnétique
- 3 Interaction Atome-Photon
- 4 Théorie de la Photo-détection
- 5 Problèmes Modernes en Optique Quantique

### Optique Non Linéaire

- 6 Bases de l'Optique Non Linéaire
- 7 Processus Optiques Non Linéaires Quadratiques
- 8 Processus Optiques Non Linéaires Cubiques
- 9 Problèmes Modernes en Optique Non Linéaire

## DIFFRACTION DE RAYONNEMENTS

3 ECTS - 16h CM

**Responsable** : Alfonso SAN MIGUEL, Professeur

### Programme

Les différents rayonnements et leur domaine de longueur d'onde.  
Processus de diffusion et sections efficaces.  
Interaction des électrons et des protons avec la matière.  
Interaction des neutrons avec la matière.  
Interaction des photons avec la matière.  
Diffusions élastique et inélastique et leurs applications.  
Application aux rayons X. EXAFS

## AGREGATS, NANO-OBJETS, MATERIAUX NANO-STRUCTURES

3 ECTS - 16h CM

**Responsable** : Emmanuel COTTANCIN, Maître de Conférences

### Programme

Agrégats et nanostructures.

1 - Un nouvel état de la matière : les agrégats.

2 - Description des jets supersoniques. Etude de la nucléation homogène.

Méthodes de synthèse.

3 - Effets quantiques de taille. Modèle de Kubo.

4 - Méthodes expérimentales d'étude des petits agrégats. Mécanismes de la photographie.

5 - Structure électronique des agrégats de métaux alcalins (Na, K, ...). Modèle en couches et propriétés optiques. Mise en évidence expérimentale.

6 - Les agrégats de métaux trivalents (Al, Ga, In) et de métaux de transition (Au, Ag, Ni, Co, ...).

7 - Etude statistique de l'évaporation dans les agrégats.

8 - Agrégats d'éléments covalents. Les fullérènes.

# OPTIQUE DU SOLIDE

3 ECTS - 16h CM

**Responsable** : Christophe DUJARDIN, Professeur

## Programme

- I - Energies et états électroniques dans les solides cristallins.
  - 1 - Rappels sur le modèle de bandes d'énergie.
  - 2 - Oscillations de plasma électroniques.
  - 3 - Interaction des oscillations de plasma de surface avec une onde électromagnétique - Effets de surface.
  - 4 - Oscillations de plasma confinées dans des nanocristaux.
  - 5 - Excitons dans les semi-conducteurs et les isolants.
  - 6 - Effet du confinement dans des nanocristaux de semi-conducteurs.
  - 7 - Niveaux et états électroniques localisés autour d'une impureté ou d'un défaut.
  
- II - Modes de vibration dans les solides cristallins.
  - 1 - Modes longitudinaux et modes transversaux. Courbes de dispersion.
  - 2 - Modes localisés autour d'une impureté ou d'un défaut.
  
- III - Interaction électron-vibration.
  - 1 - Principalement entre électrons et modes localisés.
  - 2 - Niveaux et états vibroniques - Effet Jahn-Teller.

## LIQUIDES ET MATIERE MOLLE

3 ECTS - 16h CM

**Responsable** : Catherine BARENTIN, Professeur

### Programme

Systemes désordonnés : liquides, amorphes et verres.

Exemple de systèmes topologiquement désordonnés.

Propriétés structurales.

Structure atomique mésoscopique et macroscopique.

Dynamique vibrationnelle.

Propriétés de transport atomique.

Matière molle : concepts généraux ; exemple des colloïdes (interactions, structures, dynamique) et des polymères (lois d'échelle, propriétés statiques et dynamiques).

## ENERGIE NUCLEAIRE. AVAL DU CYCLE ELECTRONUCLEAIRE

3 ECTS - 16h CM

**Responsable** : Nathalie MONCOFFRE, Directrice de Recherches  
(UE de la Spécialité SYVIC, mutualisée)

### Programme

#### 1. Interaction neutron– matière. Nouvelles filières et transmutation

- Interaction des neutrons avec la matière
  - ralentissement et diffusion.
  - capture et fission.
  - la réaction en chaîne.
- Principe et contrôle d'un réacteur nucléaire.
- Production de radioactivité en réacteur.
- Le cycle du combustible et les déchets nucléaires.
- Les nouvelles filières 'hybrides'.
- La transmutation des déchets nucléaires à vie longue.

#### Aval du cycle électronucléaire

- Problématique du stockage en site géologique pour des déchets de haute activité et longue durée de vie
- Migration des radioéléments dans les matériaux de stockage. Influence des dégâts d'irradiation.
- Intérêt des méthodes nucléaires d'analyse pour la caractérisation de la migration

## THEORIES DE JAUGE ET INTERACTIONS FAIBLES

3 ECTS - 16h CM

**Responsable** : Sacha DAVIDSON, Directrice de Recherches

### Programme

Vers le modèle standard. Invariance de jauge globale. Invariance de jauge locale. Électromagnétisme. Théorie de Yang-Mills. Masses et champs de jauge. Brisure spontanée de symétrie. Brisure spontanée d'une symétrie continue. Théorème de Goldstone. Brisure spontanée d'une symétrie interne. Brisure, Mécanisme de Higgs.

Lagrangien du modèle standard. Secteur de jauge. Secteur de Higgs. Secteur de Dirac. Hypercharge et anomalies. Interactions de Yukawa. Couplages du boson de Higgs. Le modèle standard Lagrangien et règles de Feynman. Le théorème d'équivalence. Calculs à l'arbre. Renormalisation de la charge. Observables et données.

La physique de la saveur. Trois générations. Changement de saveur en courants chargés et courants neutres. Oscillations de neutrinos.

Supersymétrie. Le modèle standard supersymétrique. Les particules. Le superpotentiel. Brisure souple de la supersymétrie. Le secteur de Higgs. Le spectre de masse. Supersymétrie aux collisionneurs.



## MATIERE HADRONIQUE

3 ECTS - 16h CM

**Responsable** : Hubert HANSEN, Maître de Conférences

### Programme

Physique des ions lourds :

- Modèle du sac du MIT
- Plasma de Quark et de Gluons (QGP)
- Diagramme de phases de QCD
- Collisions p-p et d'ions lourds
- Modèle de Glauber
- Signatures possibles de formation du QGP
- Effets de milieu et collectifs

## INTRUMENTATION ET DETECTEURS

3 ECTS - 16h CM

**Responsable** : Dario AUTIERO, Chargé de Recherches

### Programme :

Ce cours décrit les principales méthodes de détection de particules accompagnées des chaînes de lecture électronique et des systèmes d'acquisition des données utilisées en physique des particules. Il comporte également une introduction aux accélérateurs de particules, des principes de base jusqu'aux réalisations les plus récentes.

- **Introduction** : l'étude expérimentale des interactions à haute énergie.
- **Accélérateurs** : principes de base ; accélérateurs linéaires ; synchrotrons à protons ; collisionneurs hadroniques ; collisionneurs électrons-positrons et protons-électrons; faisceaux pour expériences sur cible fixe (hadrons, électrons, muons, neutrinos).
- **Détection de particules** : perte d'énergie par ionisation ; diffusion multiple, bremsstrahlung ; effet photoélectrique; effet Compton ; production de paires ; rayonnement Cherenkov et de transition; interactions hadroniques.
- **Détecteurs** : scintillateurs, détecteurs gazeux et liquides, détecteurs solides, autres types de détecteurs.
- **Systèmes de détection et mise en œuvre expérimentale** : trajectrométrie et analyse en impulsion ; calorimétrie électromagnétique et hadronique ; diverses techniques d'identification de particules ; bases de la lecture électronique ; systèmes d'acquisition de données et leurs déclenchements ; description complète d'expériences sur cible fixe et auprès de collisionneurs sur des exemples.
- **Méthodes d'analyse de données** : éléments de base sur la réduction des données et les chaînes d'analyse, analyse cinématique ; méthodes Monte-Carlo.

## TRAITEMENT DES IMAGES

3 ECTS - 16h CM

**Responsable** : Eric THIEBAUT, Astronome

### **Programme :**

Traitement du signal par l'approche inverse. Applications en reconstruction d'image.

- approche inverse, cadre bayésien : maximum de vraisemblance, maximum a posteriori
  - statistiques gaussiennes, modèle linéaire : filtre de Wiener généralisé, notion de résolution effective, statistique a posteriori, application à la déconvolution d'image, interprétation plus générale par décomposition spectrale
  - généralisation : modèles non-linéaires, régularisations, réglage de la régularisation (supervisé / non-supervisé), application à la déconvolution aveugle / myope (auto-calibrage de la réponse instrumentale)
  - notion d'information a priori / a posteriori : gain en information, traitement des données incomplètes, prédiction (filtrage de Kalman)
  - autres applications : imagerie bio-médicale, tomographie médicale, interférométrie, détection optimale, démélange (séparation de composantes)
- Débouchés sur méthodes numériques :
- décomposition spectrale, SVD
  - résolution d'un système linéaire d'équations (pivot de Gauss, Choleski, méthodes itératives : gradients conjugués)
  - Optimisation (méthode de Newton, Levenberg-Marquardt, algorithmes à mémoire limitée : gradients conjugués, métrique variable)

## COSMOLOGIE ET SYSTEMES GRAVITATIONNELS

6 ECTS - 24h CM et 10h TD

<http://www.ens-lyon.fr/MasterSDM/fr/component/k2/item/95-cosmologie-et-systèmes-gravitationnels>

**Responsable** : Thomas BUCHERT, Professeur

### Programme

*1. Introduction générale* : survol historique de la cosmologie ; la cosmologie homogène ; le modèle de « concordance » et l'inflation ; les données observationnelles importantes ; les problèmes de la matière sombre et de l'énergie noire ; la phénoménologie des systèmes gravitationnels ; l'espace des phases dans la mécanique classique ; les équations du champ gravitationnel ; le modèle de matière « poussière » ; le système d'Euler–Poisson et ses solutions connues ; image lagrangienne ; écoulements incompressibles dans l'espace des phases.

*2. Propriétés cinématiques et instabilité gravitationnelle* : la cinématique d'un système continu dans l'espace ; la hydrodynamique multi-flux ; singularités ; la morphogénèse des structures cosmiques ; les équations du transport (expansion, cisaillement, vorticité, champ gravitationnel, force de marée) ; modèles spéciaux non-linéaires et leurs intégrales ; la théorie des perturbations (euleriennes et lagrangiennes) ; l'architecture des simulations numériques et comparaison avec les approximations analytiques ; *session des illustrations*.

*3. La hiérarchie des moments de vitesse* : moments de vitesse de la densité dans l'espace des phases et de l'équation de Vlasov ; les fluctuations de vitesse ; traitement général de la hiérarchie des équations et l'approche de Klimontovich ; « coarse-graining » ; le théorème de Liouville ; le système d'Euler–Jeans–Poisson ; les systèmes avec dispersion de vitesse isotrope ; écoulements spéciaux (flux barotropes ; les équations de diffusion, de Burgers et de Navier–Stokes) ; turbulence gravitationnelle ; équations d'état dynamiques ; modèles non-perturbatifs.

*4. La hiérarchie des moments spatiaux* : moments spatiaux des observables ; le théorème du viriel de Chandrasekhar et Lee ; équilibres locaux et les théorèmes de Jeans ; structures orbitales des systèmes dynamiques ; équilibres hydrodynamiques ; la distribution de Maxwell–Boltzmann ; la dynamique effective des systèmes inhomogènes non-isolés ; les équilibres régionaux ; aspects de la cosmologie inhomogène en relativité générale ; instabilité gravitationnelle globale ; la courbure et la topologie de l'univers ; interprétation de l'énergie noire ; modèle de champ scalaire.

## ASTROPHYSIQUE DES PARTICULES

4 ECTS - 21h CM

<http://www.ens-lyon.fr/MasterSDM/fr/component/k2/item/98-astrophysique-des-particules>

**Responsable** : Sacha DAVIDSON, Directrice de Recherches

### Programme

1. *Thermodynamique du plasma primordial* On décrira le plasma homogène en expansion, fait de particules relativistes ou non-relativistes. Puis on étudiera divers exemples de gel thermique et chimique :

Exemple 1: le fond diffus cosmologique À l'âge de plusieurs centaines de milliers d'années, l'Univers est devenu transparent lors de la (re)combinaison des protons avec les électrons.

Exemple 2: la nucléosynthèse primordiale À l'âge de quelques secondes, il y a le gel thermique des neutrinos. Quelques minutes plus tard, certains des protons et neutrons se sont associés pour former de l'Hélium et un peu de Lithium.

Exemple 3: la densité relique de matière noire On calculera la densité relique de divers particules hypothétiques, sans interactions électromagnétiques.

Exemple 4: la baryo/leptogénèse Production d'un l'excès de matière (par rapport à l'antimatière) dans les désintégrations d'une particule très lourde, quand l'âge de l'Univers était de quelques fractions infimes d'une seconde.

2. *Transitions de phase* Théorie des champs à température finie. Modèle jouet d'un champs scalaire, pour représenter le cas de la transition de phase « électrofaible ». (Possibilité de baryogénèse à cette transition.)

## PHYSIQUE DU MILIEU INTERSTELLAIRE ET DES CHOCS

4 ECTS - 21h CM

<http://www.ens-lyon.fr/MasterSDM/fr/component/k2/item/103-astrophysique-stellaire-approfondie>

**Responsable** : Christophe WINISDOERFFER,

### Programme

1. *Hydrodynamique et formation stellaire* Équations hydrodynamiques et magnétohydrodynamiques. Instabilité de Jeans. Effondrement gravitationnel et fragmentation. Sphere de Bonnor-Ebert. Effets de la rotation et du champ magnétique.

2. *Fondements de la physique stellaire* Temps caractéristiques. Équilibre hydrostatique, modèles simplifiés. Physique statistique et équations d'état. Transport d'énergie, convection, conduction, radiation. Fusion nucléaire et réactions nucléaires.

3. *Principales phases de l'évolution stellaire* Phase proto-stellaire; évolution de Hayashi. Phase séquence principale. Phase post séquence principale (géantes rouges). Les naines brunes.

4. *Les naines blanches* Équation d'état de la matière dégénérée. Masse limite de Chandrasekhar. Refroidissement des naines blanches. Cosmochronologie.

5. *Les étoiles à neutrons* Neutronisation de la matière. Masse limite des étoiles à neutrons. Pulsars Hadronisation et étoiles "étranges" de quarks.

6. *Les supernovae* Supernovae type I. Systèmes binaires compacts. Limite de Roche, transfert de masse. Supernovae type II, temps caractéristique, énergétique, courbe de lumière.

## RELATIVITE GENERALE

6 ECTS - 24h CM et 10h TD

<http://www.ens-lyon.fr/MasterSDM/fr/component/k2/item/94-relativite-generale>

**Responsable :** Alexandre ARBEY

### Programme

1. *Le principe d'équivalence* : Expériences de Galilée, Bessel et Eötvös montrant l'équivalence entre masse inerte et masse pesante – Existence d'un référentiel en chute libre où la gravitation est localement éradiquée par les forces d'inertie – Similarité avec le principe de la géométrie non-euclidienne – Description géométrique de la chute d'un corps dans un champ gravitationnel faible, symboles de Christoffel et potentiels de gravitation – Dilatation du temps dans un champ de pesanteur et décalage gravitationnel des fréquences – Expérience de Pound et Rebka – Effet Sagnac et gyrolaser.

2. *Introduction à la géométrie non-euclidienne* : Une paramécie vivant sur une surface à deux dimensions arpente son espace et aimerait savoir par exemple s'il est courbe. Ne pouvant concevoir une troisième dimension, elle doit développer des méthodes intrinsèques afin d'explorer la structure géométrique de son univers. Ce chapitre présente les outils mathématiques qu'elle doit utiliser. Systèmes de coordonnées – Tenseur métrique – Espace tangent – Calcul tensoriel – Notion de difféomorphisme – Connexion affine – Dérivée covariante et transport parallèle – Tenseur de Riemann-Christoffel et courbure de l'espace – Tenseur de Ricci.

3. *Equation d'Einstein* : Principe de covariance générale – Définition du tenseur impulsion-énergie et conservation – Equations de la relativité générale.

4. *Quelques tests de la relativité générale* : Métrique de Schwarzschild – Déviation d'un rayon lumineux par le soleil et mesure de Eddington – Optique gravitationnelle – Trou noir de Schwarzschild et son horizon – Dérive du périhélie de Mercure – Retard gravitationnel de l'écho radar – Structure des étoiles en relativité générale – Equation de Tolman-Oppenheimer-Volkoff – Théorème de Birkhoff.

5. *Introduction aux ondes gravitationnelles* : Linéarisation des équations de la relativité générale et théorie maxwellienne de la gravitation – Jauge des coordonnées harmoniques – Structure d'une onde plane gravitationnelle – Interféromètre Virgo – Pulsar 1913+16 et mise en évidence indirecte des ondes gravitationnelles.

6. *Une approche plus formelle* : En fonction du temps disponible, nous aborderons l'analogie entre relativité générale et théorie de jauge – Construction lagrangienne du tenseur impulsion-énergie et démonstration covariante de sa conservation – Action de Einstein-Hilbert.