

## See the general structure of the FunPhys curriculum

### Semester 2 (optional units)

#### Plasma Physics (4 ECTS)

##### Preliminaries

- Reminder on Maxwell's equations, macroscopic fields

##### General considerations on classical plasmas

- Plasma frequency, Debye length
- Microscopic (corpuscular) formulation

##### Kinetic formulation

- Concepts of kinetic theory, Liouville equation
- Equation for the one-particle distribution function
- Vlasov and Boltzmann equations, notion of collision operator

##### Fluid Formulation

- Derivation of fluid equations from kinetic theory
- Plasma as a mixture of two fluids

##### Electronic plasma waves

- Plasma Oscillations: fluid approach
- Plasma Oscillations: kinetic approach (Landau damping)

##### Collision phenomena in plasmas

- Preliminary: kinematic analysis, dynamic analysis of a Coulombian scattering event
- Collisions between corpuscles in plasmas
- Characteristic collision frequencies in maxwellian plasmas

##### Electromagnetic waves in plasmas

- EM wave without external magnetic field in a cold plasma
- EM wave with external magnetic field in a homogeneous plasma – propagation perpendicular to B, parallel to B

##### Radiation mechanisms in plasmas

- Emission and absorption mechanisms (atomic transitions, recombination radiation, Bremsstrahlung)
- Population of energy levels (laws of the local thermodynamic equilibrium, collisional-radiative equilibrium)

##### Charged particle motion in electromagnetic fields

- Motion in a constant magnetic field
- Drift due to an additional force
- $E \times B$  drift and polarization drift
- Drift in inhomogeneous magnetic fields
- Adiabatic invariance of the magnetic moment
- Particle trapping

##### Magnetic configuration for confinement

- Simplified tokamak equilibrium
- Passing particle orbits
- Trapped particles in a tokamak

##### Thermonuclear fusion

- Fusion reactions: reaction rate and power density
- Power balance
- Ignition condition

# Charged fluids dynamics (4 ECTS)

## Content (*French text*)

### 1. PARTICULES CHARGÉES DANS UN CHAMP ELECTROMAGNETIQUE: MHD

- Éléments de cinétique: vitesse, pression et température.
- Modèles à deux fluides,
- Modèle à un fluide, Quasi-neutralité, Limites de validité du modèle
- Diffusion magnétique, Nombre de Reynolds magnétique,
- Diffusion de la matière, paramètre beta

### 2. MHD IDEALE

- conservation d'énergie en MHD idéale
- Hélicité magnétique et topologie, Invariants
- Théorèmes d'Alfvén: Théorème du flux, Théorème du gel
- Principe d'énergie.

### 3. ONDES MHD

- ondes magnéto-soniques, ondes d'Alfvén.

### 4. EQUILIBRES MHD

- pression magnétique
- équilibres cylindriques : theta-pinch, z-pinch, screw-pinch
- magnétosphère (Théorème de Ferraro, ...)

### 5. INSTABILITÉS EN MHD (Plasmas Confinés, Plasmas Spatiaux)

- instabilité de Rayleigh-Taylor magnétique (densité)
- instabilité magnéto-rotationnelle (moment cinétique)

## Semester 1 (mandatory units)

### Statistical Physics (6 ECTS)

#### Principles

- Statistical ensemble: from the microscopic states to thermodynamics
- Density matrix and the microcanonical distribution of an isolated system
- Gibbs ensembles
- Gibbs distribution (classical and quantum); the partition function and the free energy
- Thermodynamic quantities

#### Noninteracting systems

- Energy equipartition
- Ideal gas
- Rotation and vibration of molecules
- Bose distribution, photons and phonons, Debye, Bose condensation
- Fermi distribution, degenerated electron gas

#### Interactions

- Pauli paramagnetism and mean field ferromagnetism
- Landau diamagnetism
- Ising model, low and high energy expansions in 2D
- Cumulant expansion and virial coefficients
- Van der Waals equation and liquid-gas transition

#### Phase transitions and fluctuations

- Phenomenology and scaling laws
- Order parameter and Landau free energy
- Symmetry breaking
- Linear response and correlations

#### Applications

- From the binomial distribution to the large number and central limit theorems
- Chaos, ergodicity and mixing
- Mixing entropy and the Gibbs paradox
- Maxwell demon and information theory
- Two level systems
- Quantum oscillator
- Monte Carlo for the ising model
- 2x2 random matrices, Wigner surmise
- Lenard-Jones potential and molecular dynamics
- White dwarf stars Black hole entropy
- Yang-Lee theory of phase transitions
- Quantum spin in a transverse field

#### References:

- Chaikin et Lubensky, Principles of Condensed Matter Physics, Cambridge, 1995.
- Kardar, Statistical Physics, particles (I) and fields (II), Cambridge, 2007.
- Krapivsky, Redner et Ben-Naim, A Kinetic view of Statistical Physics, Cambridge, 2010.
- Leach, Molecular Modelling, Prentice Hall, 2001.
- Mori et Kuramoto, Dissipative Structures and Chaos, Springer, 1998.
- Onuki, Phase Transition Dynamics, Cambridge, 2002.
- Safran, Statistical Thermodynamics of Surfaces, Interfaces and Membranes, Westview, 2003.
- Sethna, Statistical Mechanics: entropy, order parameters and complexity, Oxford, 2006

## Quantum Mechanics (6 ECTS)

### Content:

- Quantum Mechanics : postulates and formalism
- Spin and rotational symmetry - Spin measurements
- General theory of angular momentum and spin - composition of angular momenta
- Quantum entanglement and Bell's theorem
- Identical particles : bosons and fermions, elements of second quantization
- Stationary perturbation theory
- Time evolution of systems and time dependent perturbation theory
- Element of scattering theory

### Programme:

*(French text)* Description de l'état d'un système quantique - Rappels historiques - Espaces de Hilbert et états, exemple du spin et d'une particule - Observables et mesures, réduction du paquet d'onde, inégalité de Heisenberg Opérateur densité - Systèmes composites, applications aux particules identiques et à l'intrication Evolution temporelle - Equation de Schrödinger - Opérateur d'évolution, calcul pour un spin et une particule libre - Particule dans un champ magnétique, invariance jauge et équation de Pauli Symétries en mécanique quantique - Transformation géométriques, action sur les états quantiques - Opérateur de translation - Rotations et moment cinétique, application au moment cinétique orbital et au spin - Composition des moments cinétiques Théorie des perturbations dépendantes du temps - Calcul perturbatif de l'opérateur d'évolution, série de Dyson - Application à la diffusion et à l'interaction atome-onde électromagnétique.

### Références:

- [1] M. Le Bellac, "Physique Quantique", 2 volumes, EDP Sciences (2013)  
[2] R. Shankar, "Principles of quantum mechanic", Plenum Press (1994)

# Electromagnetism and Optics (4 ECTS)

Alternative title : “Electrodynamics – from the fundamental theory to photonics”

## Content

*(French text)*

Prérequis/Rappels des outils mathématiques: géométrie différentielle et topologie, analyse fonctionnelle : distributions, transformations de Fourier, opérateurs et théorie spectrale, analyse du plan complexe, formalismes lagrangien et hamiltonien.

Définition d'un problème électromagnétique bien posé :

- Équations de Maxwell (EM) et conditions de passage aux interfaces (on utilise l'expression des EM sous une forme indépendante des milieux matériels et au sens des distributions pour établir des résultats complètement généraux), forme intégrale des EM à l'aide du théorème de Stokes.
- Milieux matériels - classification des milieux simples (isotropie, anisotropie, bianisotropie, dispersion temporelle - causalité et relations de Kramers-Kronig), homogénéisation.
- Conditions aux limites (Dirichlet, Neumann, Floquet-Bloch pour les structures périodiques, conditions d'ondes sortantes...)

Formulation lagrangienne. Mouvement d'une particule dans un champ électromagnétique, forme lagrangienne et hamiltonienne.

Fonctions de Green pour les équations des ondes de l'électromagnétisme et formulations intégrales. Électrodynamique des charges en mouvement, rayonnement électromagnétique.

Optique physique : Optique de Fourier et intégrale de Fresnel. Réseaux de diffraction.

Introduction à la photonique : Cristaux photoniques, métamatériaux. Optique de transformation. Plasmonique.

## **Mathematics for Physics (4 ECTS)**

### Spaces and Vector Spaces

- Measurable spaces
- Topological spaces
- Vector spaces
- Representation of vectors and operators in a basis

### Curvilinear Coordinates

- Coordinates systems
- Euclidean metric associated to a coordinates system
- Coordinates transformations
- Bases associated to a coordinates system
- Charting a space with coordinates
- Derivatives of geometric vectors
- Relation between bases
- Measuring the extension of figures in space

### Integral and differential operators

- Types of fields
- Gradient of a scalar field
- Line integrals of vector fields
- Surface integrals of vector fields
- Curl of a vector field
- The Laplacian
- Remarkable integral identities
- Potential Theory

### Calculus of Variations

- Local maxima and minima of functions
- Lagrange multipliers
- Functionals
- First Integral of the Euler-Lagrange equation
- Variation of constrained functionals
- Functionals with variable end points
- Maxima and minima of functionals
- Fermat's principle
- Principle of least action
- Noether's theorem
- Variational principle applied to fields

### Orthogonal Functions

- Fundamental function spaces
- Orthonormal bases for functions
- Orthogonal polynomials

### Ordinary Differential Equations

- Ordinary differential equations: a quick review
- Initial Value Problems for second order linear HODE
- IVPs for second order linear IODE
- Boundary values problems
- BVPs for a second order linear IODE: the eigenfunctions' method