

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

نموذج مطابقة و مواءمة

عرض تكوين ماستر أكاديمي
2025 – 2026

التخصص	الشعبة	ميدان
الفيزياء النظرية	الفيزياء	علوم المادة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**Canevas de mise en conformité et
harmonisation**

OFFRE DE FORMATION

L.M.D. MASTER ACADEMIQUE

2025 – 2026

Domaine	Filière	Spécialité
SCIENCES DE LA MATIERE	PHYSIQUE	PHYSIQUE THEORIQUE

II – Fiche d'organisation semestrielle des enseignements (S1 , S2 et S3))

**Fiche d'organisation semestrielle des enseignements
(Prière de présenter les fiches des 4 semestres)**

Semestre 1 :

Autres* : Travail complémentaire en consultation semestrielle ; CC* : Contrôle continue.

Unité d'Enseignement	Intitulé des Matières	VHS	V.H hebdomadaire			Autres*	Coeff	Crédits	Mode d'évaluation	
		15 semaines	C	TD	TP				CC*	Examen
UE Fondamental Code : UEF 1 Crédits : 18 Coefficient : 9	Mécanique Quantique Approfondie 1	67h30	3h	1h30		82h30	3	6	33%	67%
	Théorie Quantique des Champs 1	67h30	3h	1h30		82h30	3	6	33%	67%
	Physique Statistique Quantique 1	67h30	3h	1h30		82h30	3	6	33%	67%
UE Méthodologie Code : UEM 1 Crédits : 9 Coefficient : 5	Méthodes Mathématiques pour la Physique	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	50%	50%
	Programmation Numérique 1	45h00	1h30		1h30	55h00	2	4	50%	50 %
	Intelligence artificielle et Machine Learning 1	15h00			1h00	10h00	1	1	50%	50 %
UE Découverte Code : UED 1 Crédits : 2 Coefficient : 2	Théorie du solide 1	45h00	1h30	1h30		05h00	2	2	50%	50%
UE Transversal Code : UET 1 Crédits : 1 Coefficient : 1	Symétries en Mécanique Quantiques 1	22h30	1h30			2h30	1	1		100%
Total Semestre 1		375h00	15h00	7h30	2h30	375h00	17	30		

Semestre 2:

Unité d'Enseignement	Intitulé des Matières	VHS	V.H hebdomadaire			Autres*	Coeff	Crédits	Mode d'évaluation	
		15 semaines	Cours	TD	TP				CC*	Examen
UE Fondamental Code : UEF 2 Crédits : 18 Coefficient : 9	Mécanique Quantique Approfondie 2	67h30	3h00	1h30		82h30	3	6	33%	67%
	Théorie Quantique des Champs 2	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
	Physique Statistique Quantique 2	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
	Relativité générale	45h00	3h00			55h00	2	4	33%	67%
UE Méthodologie Code : UEM 2 Crédits : 9 Coefficient : 5	Introduction à l'Information Quantique	45h00	3h00			55h00	2	4	50%	50%
	Programmation Numérique 2	45h00	1h30		1h30	55h00	2	4	50%	50 %
	Intelligence artificielle et Machine Learning 2	15h00			1h00	10h00	1	1	50%	50 %
UE Découverte Code : UED 2 Crédits : 2 Coefficient : 2	Dynamique des Particules chargées	45h00	1h30	1h30		05h00	2	2	50%	50%
UE Transversal Code : UET 2 Crédits : 1 Coefficient : 1	Particules élémentaires 1	22h30	1h30			2h30	1	1		100%
Total Semestre 2		375h00	16h30	6h00	2h30	375h00	17	30		

Autres* : Travail complémentaire en consultation semestrielle ; CC* : Contrôle continue.

Semestre 3:

Unité d'Enseignement	Intitulé des Matières	VHS	V.H hebdomadaire			Autres*	Coeff	Crédits	Mode d'évaluation	
		15 semaines	C	TD	TP				CC*	Examen
UE Fondamental Code : UEF 3 Crédits : 18 Coefficient : 9	Etude des plasmas	67h30	3h00	1h30		82h30	3	6	33%	67%
	Cosmologie	45h00	3h00			55h00	2	4	33%	67%
	Introduction à la Théorie de la Structure Nucléaire	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
	Théorie du solide 2	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
UE Méthodologie Code : UEM 3 Crédits : 9 Coefficient : 5	Intégrale de chemin	45h00	1h30	1h30		55h00	2	4	33%	67%
	Techniques de simulation en Physique	60h00	1h30		2h30	65h00	3	5	50%	50 %
UE Découverte Code : UED 3 Crédits : 2 Coefficient : 2	Particules élémentaires 2	45h00	1h30		1h30	5h00	2	2	50%	50%
UE Transversal Code : UET 3 Crédits : 1 Coefficient : 1	Entrepreneuriat, Innovation et Startup	22h30	1h30			2h30	1	1		100%
Total Semestre 3		375h00	15h00	6h00	4h00	375h00	17	30		

Autres* : Travail complémentaire en consultation semestrielle ; CC* : Contrôle continue

III - Programme détaillé par matière (1 fiche détaillée par matière)

Adapter le programme des cours et travaux dirigés (TD) en fonction du volume horaire hebdomadaire présentiel (VHH présentiel) et du volume horaire hebdomadaire personnel (VHH personnel).

SEMESTRE 1

Semestre : 1

UE : Fondamentale

Matière : Mécanique Quantique Approfondie 1

Prérequis

- Enseignements de physique quantique et de mécanique quantique dispensés en Licence de Physique Fondamentale.

Objectifs de l'enseignement

Il s'agit d'inculquer à l'étudiant le formalisme mathématique de la mécanique quantique ainsi que les différentes techniques d'approximation utilisées en mécanique quantique. L'objectif est de renforcer sa compréhension des phénomènes quantiques et de le préparer à des applications avancées.

Programme détaillé :

Chapitre 1 : Rappels de Mécanique Quantique de Licence

- Notions de base : états quantiques, opérateurs, fonctions d'onde
- Valeurs propres et vecteurs propres
- Composition des moments cinétiques, coefficients de Clebsch-Gordan

Chapitre 2 : Potentiel Central et Problèmes à Trois Dimensions

- Compléments sur la mécanique quantique à 3 dimensions
- Propriétés générales du problème aux valeurs propres pour un potentiel central
- Oscillateur harmonique à 3 dimensions : cas à symétrie sphérique et symétrie axiale

Chapitre 3 : Méthodes d'Approximation en Mécanique Quantique

- Perturbations stationnaires (premier et second ordre)
- Perturbations dépendant du temps : transitions induites, règle de Fermi d'or
- Méthode variationnelle : calcul d'états liés approximatifs

Chapitre 4 : Applications et Approfondissements

- Étude de cas particuliers : effet Stark, effet Zeeman
- Couplage spin-orbite et structure fine

Références bibliographiques

1. A. Messiah, Mécanique Quantique, tomes 1 & 2, Dunod, 1995.
2. N. Zettili, Quantum Mechanics: Concepts and Applications, 2e éd., Wiley, 2009.
3. C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloë, Mécanique Quantique, tomes 1 & 2, Hermann, 1973.
4. Michel Le Bellac, Physique Quantique, EDP Sciences, 2007.
5. D. J. Griffiths, D. F. Schroeter, Introduction to Quantum Mechanics, 3e éd., Cambridge University Press, 2018.
6. J. J. Sakurai, J. Napolitano, Modern Quantum Mechanics, 3e éd., Cambridge University Press, 2020.

Semestre : 1

UE : Fondamentale

Matière : Théorie Quantique des Champs 1

Prérequis

- Relativité restreinte (niveau Licence).
- Mécanique quantique (niveau Licence).

Objectifs de l'enseignement

Le contenu de cette matière correspond aux trois premiers chapitres des notes de David Tong. L'étudiant sera initié à la notion de champs classiques, à leur quantification dans le cas scalaire, au calcul des propagateurs, des amplitudes de transition, ainsi qu'aux sections efficaces et taux de désintégration.

Programme détaillé :

Introduction : Champs en physique

- Définition et utilité de la notion de champ
- Système d'unités naturelles
- Notations et préliminaires mathématiques

Chapitre 1 : Théorie Classique des Champs

- Équations d'Euler-Lagrange : cas du champ scalaire (Klein-Gordon) et électromagnétique (Maxwell)
- Propriétés de localité et invariance de Lorentz
- Le théorème de Noether : applications aux symétries de translation, Lorentz et symétries internes
- Introduction au formalisme hamiltonien

Chapitre 2 : Champs Libres

- Quantification canonique des champs
- Champs scalaires réels et complexes
- Représentation de Heisenberg
- Calcul du propagateur

Chapitre 3 : Champs en Interaction

- Représentation d'interaction
- Théorème de Wick et contractions
- Diagrammes de Feynman : règles de construction
- Calcul d'amplitudes de diffusion simples

Chapitre 4 : Observables Physiques

- Sections efficaces
- Taux de désintégration
- Fonctions de Green

Chapitre 5 : Approfondissements et Révisions

- Discussion sur les limites du formalisme perturbatif
- Introduction à d'autres types d'interactions (selon le temps disponible)
- Synthèse des résultats obtenus

Références bibliographiques

1. D. Tong, Quantum Field Theory, <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/qft.html>
 2. M. E. Peskin and D. V. Schroeder, An Introduction to Quantum Field Theory, Addison-Wesley, 1995.
 3. A. Das, Lectures On Quantum Field Theory, World Scientific Publishing, 2008.
 4. M. Kaku, Quantum Field Theory, Oxford University Press, 1993.
 5. S. Weinberg, The Quantum Theory of Fields, Vol. 1, Cambridge University Press, 1995.
 6. N. N. Bogoliubov and D. V. Shirkov, Introduction to the Theory of Quantized Fields, Wiley, 3rd ed., 1980.
 7. J.-P. Derendinger, Théorie quantique des champs, PPUR, 2001.
-

Semestre : 1

UE : Fondamentale

Matière : Physique Statistique Quantique 1

Prérequis

- Thermodynamique et physique statistique
- Mécanique quantique (notamment formalisme des opérateurs)
- Bases mathématiques enseignées en Licence et M1

Objectifs de l'enseignement

La physique statistique quantique est une méthode centrale pour modéliser les systèmes comportant un grand nombre de particules en interaction ou non, dans un cadre quantique. Ce cours fournit à l'étudiant les **principes fondamentaux** et **outils mathématiques** nécessaires pour décrire l'équilibre statistique des gaz de bosons et de fermions. Il constitue une base indispensable à la compréhension des phénomènes comme la condensation de Bose-Einstein ou la dégénérescence du gaz de Fermi.

Programme détaillé :

Chapitre I : Rappels de Physique Statistique

- Définition des micro-états quantiques et espace de phase
- Densité de probabilité, fonctions de distribution
- Ensembles statistiques : micro-canonique, canonique, grand canonique
- Fonction de partition : calculs et interprétations
- Entropie statistique, lien avec la thermodynamique
- Théorème de Liouville et conservation de la densité

Chapitre II : Formulation de la statistique quantique

- Formalisme de l'opérateur densité : cas pur et mélange
- Systèmes composites et entropie de von Neumann
- Équilibre statistique en mécanique quantique
- Equation de Liouville quantique
- Différences fondamentales avec la statistique classique

Chapitre III : Systèmes Quantiques en Équilibre

- Gaz idéal de **bosons** : statistiques de Bose-Einstein
- Gaz idéal de **fermions** : statistiques de Fermi-Dirac
- Applications :
 - Condensation de Bose-Einstein
 - Propriétés thermodynamiques du gaz de Fermi dégénéré
- Discussion sur les transitions de phase quantiques

Références bibliographiques

1. L. Landau, Physique statistique, Éditions ELLIPSES
2. C. Ngo, H. Ngo, Physique statistique, Masson

3. **R. K. Pathria**, Statistical Mechanics, Elsevier
4. **Kerson Huang**, Statistical Mechanics, Wiley
5. Supports de cours, articles scientifiques et ressources en ligne (arXiv, Scholar)

Semestre : 1

UE : Méthodologie

Matière : Méthodes Mathématiques de la Physique

Prérequis

- Mathématiques classiques dispensées en licence de physique fondamentale

Objectifs de l'enseignement

L'objectif est de fournir aux étudiants les outils mathématiques fondamentaux pour aborder et résoudre les problèmes de la physique théorique et de la physique mathématique.

Programme détaillé :

Chapitre 1 : Fonctions spéciales

- Équations différentielles des fonctions spéciales
- Fonctions sphériques, cylindriques, hypergéométriques
- Applications en mécanique quantique et en physique mathématique

Travaux dirigés :

- Résolution de problèmes physiques utilisant les fonctions spéciales

Chapitre 2 : Calcul tensoriel

- Vecteurs et tenseurs euclidiens
- Changement de base et opérations sur les tenseurs
- Tenseurs en physique et rôle de la symétrie

Chapitre 3 : Théorie des distributions

Cours :

- Définitions et propriétés générales
- Dérivation, limites, séries et régularisation
- Convolution, transformations de Fourier et de Laplace

Chapitre 4 : Calcul des variations

- Principe fondamental
- Cas à une et plusieurs variables
- Équation d'Euler, multiplicateurs de Lagrange
- Variations avec contraintes

Chapitre 5 : Équations intégrales et fonctions de Green

- Fonctions de Green (1D, 2D, 3D)
- Transformations intégrales et fonctions génératrices
- Équations intégrales de Volterra et de Fredholm
- Méthodes de résolution

Références bibliographiques

1. **Y. Ayant** et **M. Borg**, Fonctions spéciales à l'usage des étudiants en physique, Dunod.
2. **A. Nikiforov** et **V. Ouvarov**, Fonctions spéciales de la physique mathématique, Éditions Mir.
3. **L. Schwartz**, Théorie des distributions, Hermann.
4. **J. Hladik**, Le calcul tensoriel en physique, Dunod.
5. **I.M. Gel'fand** & **G.E. Shilov**, Generalized Functions, Vol. 1, Academic Press, 1964.

6. **M. Abramowitz & I.A. Stegun**, Handbook of Mathematical Functions, Dover Publications.
7. **G. Arfken**, Mathematical Methods for Physicists, Academic Press.
8. **R. Courant & D. Hilbert**, Methods of Mathematical Physics, Wiley-VCH.
9. **L.D. Landau & E.M. Lifshitz**, Théorie des champs, Éditions MIR (sections mathématiques fondamentales).

Semestre : 1

UE : Méthodologie

Matière : Programmation Numérique 1

Prérequis :

Connaissances de base en analyse numérique et mathématiques acquises durant la licence en physique.

Objectifs de l'enseignement

Cet enseignement vise à fournir aux étudiants des outils numériques efficaces pour la résolution de problèmes en physique, en mettant l'accent sur des applications ciblées à l'aide du langage Python.

Programme détaillé

Chapitre 1 : Introduction d'outils numériques avec Python

1. Langage Python
2. Manipulation des fichiers via l'utilisation des librairies

Chapitre 2 : Techniques d'optimisation des systèmes non linéaires

1. Méthode de Newton multivariée
2. Méthode du Gradient
3. Applications en physique

Chapitre 3 : Valeurs et vecteurs propres

1. Méthode de la puissance itérée
2. Méthode de Jacobi
3. Méthode de Lanczos
4. Méthode QR
5. Applications en physique

Travaux pratiques

I. Introduction d'outils numériques avec Python

- Syntaxe de base : variables, types, opérations, opérateurs
- Structures de contrôle
- Fonctions et modules
- Librairies essentielles
- Lecture et traitement de fichiers textes

II. Techniques d'optimisation des systèmes non linéaires

- Programmation des méthodes de Newton
- Programmation des méthodes du Gradient
- Application en physique : principe de moindre action

III. Valeurs et vecteurs propres (4 séances)

- Programmation des méthodes de Jacobi et de Lanczos
- Application en physique : diagonalisation de matrices pour un système quantique

Références bibliographiques

1. **E. Schultz & M. Bussonnier** (2020), Python pour les SHS. Introduction à la programmation de données, Presses Universitaires de Rennes.
2. **R.H. Landau, M.J. Páez, C.C. Bordeianu**, Computational Physics: Problem Solving with Python, Wiley-VCH.
3. **P.G. Ciarlet**, Introduction à l'analyse numérique matricielle et à l'optimisation, Dunod.

4. F. Jedrzejewski, Introduction aux méthodes numériques, Springer.
5. M. Fellah et N.H. Allal, Analyse numérique, OPU.

Semestre : 1

UE : Méthodologie

Matière : Intelligence Artificielle et Machine Learning 1

Objectifs du cours :

Introduire les bases de l'IA et de l'apprentissage automatique (Machine Learning), en se concentrant sur leurs applications dans les sciences de la matière. Les étudiants comprendront les concepts fondamentaux de la modélisation basée sur les données et comment appliquer les techniques de l'apprentissage automatique pour résoudre des problèmes du monde réel.

Programme détaillé :

Chapitre 1 : Introduction à l'IA et à l'apprentissage automatique

- Aperçu de l'IA et de ses applications.
- Importance des données dans l'IA et l'apprentissage automatique.

Chapitre 2 : Concepts de base de l'apprentissage automatique

- Apprentissage supervisé ou non supervisé.
- Algorithmes clés de l'apprentissage automatique : régression, classification, regroupement.
- Mesures d'évaluation (MAE, R^2 , précision).

Chapitre 3 : Collecte et traitement des données

- Ingénierie des caractéristiques et techniques de prétraitement des données.
- Traitement de l'ajustement excessif et de l'ajustement insuffisant.
- Bases de données sur les matériaux : Materials Project, OQMD, AFLOW.

Chapitre 4 : Apprentissage automatique (Machine Learning) pratique en sciences de la matière

- Étude de cas : Prédiction des propriétés des matériaux (bande interdite, etc.).
- Utilisation de modèles d'apprentissage automatique pour des tâches simples de classification et de régression.

Chapitre 5 : Fondements de l'apprentissage profond

- Introduction aux réseaux neuronaux.
- Principaux cadres d'apprentissage profond : TensorFlow, Keras, PyTorch.
- Application : Prédiction de la structure cristalline à l'aide de réseaux neuronaux.

Bibliographie :

1. "Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow" by Aurélien Géron (focuses on practical applications of machine learning)
2. "Pattern Recognition and Machine Learning" by Christopher M. Bishop (provides theoretical foundations of ML)

Outils et bibliothèques :

1. Python, Jupyter Notebooks
2. Scikit-learn, Pandas, Matplotlib
3. Materials science tools: Matminer, Pymatgen

Semestre : 1

UE : Découverte

Matière : Théorie du solide 1

Prérequis

- Physique statistique
- Électromagnétisme
- Mécanique quantique

Objectifs de l'enseignement

Ce cours constitue une base essentielle pour tout physicien souhaitant comprendre la matière condensée. Il propose une interprétation des phénomènes physiques à l'état solide à partir des outils fondamentaux de la physique, et prépare à la recherche dans le domaine.

Programme détaillé :

Chapitre 1 : Structure cristalline

- Rappels de cristallographie
- Éléments de symétrie
- Réseau réciproque et diffraction cristalline
- Cohésion du cristal

Chapitre 2 : Vibrations cristallines et propriétés thermiques

- Dispersion des modes vibratoires (approximation harmonique)
- Densité de modes
- Énergie vibratoire et quantification
- Capacité calorifique du réseau
- Terme anharmonique et dilatation thermique

Chapitre 3 : Structure électronique des solides et propriétés optiques

- Électrons dans un potentiel périodique
- Modèles des électrons libres, faiblement et fortement liés
- Orbitales moléculaires et formation de bandes
- Propriétés des semi-conducteurs
- Interaction onde-matière
- Dispersion et transmission de la lumière dans les cristaux
- Pénétration de la lumière dans les métaux
- Conductivité optique

Références bibliographiques

1. W. Ashcroft & N.D. Mermin, Solid State Physics, W.B. Saunders Co., 1976
2. C. Kittel, Physique de l'état solide, 8e éd., Dunod, 2005
3. M. Brousseau, Physique du solide – Propriétés électroniques, Masson, 1992
4. J. Patterson & B. Bailey, Solid-State Physics, Springer, 2010
5. M.S. Rogalski & S.B. Palmer, Solid-State Physics, GBS Publisher, 2000

Semestre : 1

UE : Symétries en Mécanique Quantique 1

Matière : Théorie du solide 1

Prérequis

Mécanique quantique de niveau licence

Objectifs de l'enseignement

Ce cours introduit les étudiants aux notions de base de la théorie des groupes et de leurs représentations. L'accent est mis sur les applications concrètes en physique, en évitant les aspects trop abstraits ou purement mathématiques.

Programme détaillé :

Chapitre 1 : Introduction

- Particule sur un réseau unidimensionnel
- Représentations des opérateurs de translation discrète
- Conséquences physiques de la symétrie de translation
- Fonctions de représentation et analyse de Fourier
- Groupes de symétrie en physique

Chapitre 2 : Représentations des groupes symétriques

- Représentations unidimensionnelles
- Partitions et diagrammes de Young
- Symétrisateurs et antisymétrisateurs des tableaux de Young
- Représentations irréductibles de S_n
- Classes de symétrie des tenseurs

Chapitre 3 : Groupes continus unidimensionnels

- Le groupe de rotation $SO(2)$
- Le générateur de $SO(2)$
- Représentations irréductibles de $SO(2)$
- Mesure d'intégration invariante, relations d'orthonormalité et de complétude
- Représentations multivaluées
- Groupe de translation continue en une dimension
- Vecteurs de base conjugués

Chapitre 4 : Rotations dans l'espace à 3 dimensions – Le groupe $SO(3)$

- Description du groupe $SO(3)$
- Paramétrisation par angle et axe
- Les angles d'Euler
- Sous-groupes à un paramètre, générateurs et algèbre de Lie
- Représentations irréductibles de l'algèbre de Lie de $SO(3)$
- Propriétés des matrices de rotation
- Propriétés de transformation des fonctions d'onde et des opérateurs
- Représentations du produit direct et leur réduction
- Tenseurs irréductibles et théorème de Wigner-Eckart

Références bibliographiques

1. **W.K. Tung**, Group Theory in Physics, World Scientific.
2. **H. Georgi**, Lie Algebras in Particle Physics, Westview Press, 1999.
3. **J.F. Cornwell**, Group Theory in Physics, Volume 1–3, Academic Press, 1984.
4. **A.W. Joshi**, Elements of Group Theory for Physicists, 4th Edition, New Age International, 2011.
5. **M. Tinkham**, Group Theory and Quantum Mechanics, Dover Publications, 2003.
6. **J. Taylor**, Scattering Theory: The Quantum Theory of Nonrelativistic Collisions, Dover Publications, 2006.
7. **E. Wigner**, Group Theory and its Application to the Quantum Mechanics of Atomic Spectra, Academic Press, 1959.
8. **L.H. Ryder**, Quantum Field Theory, Cambridge University Press, 1996 (chapitres introductifs sur les symétries).

SEMESTRE 2

Semestre : 2

UE : Fondamentale

CPND-SM

2025-2026

Master : Physique Théorique

15

Matière : Mécanique Quantique Approfondie 2

Prérequis

- Enseignements de physique quantique et de mécanique quantique dispensés en licence de physique fondamentale
- Unité – Mécanique Quantique Approfondie 1

Objectifs de l'enseignement

Cet enseignement approfondit les méthodes et concepts avancés de la mécanique quantique. Il introduit les techniques d'approximation essentielles, le traitement des particules identiques et les bases de la seconde quantification, préparant ainsi les étudiants à l'étude de la physique quantique des systèmes à plusieurs corps.

Programme détaillé :

Chapitre 1 : Méthodes d'approximation approfondies

- Méthode variationnelle pour les états liés
- Méthode de Born-Kramers-Wentzel (BKW)
- Théorie des perturbations stationnaires (cas non dégénéré et dégénéré)
- Perturbations dépendant du temps

Chapitre 2 : Théorie de la diffusion par un potentiel central

- Section efficace de diffusion – Amplitude de diffusion
- Décomposition en ondes partielles – Applications
- Théorie générale de la diffusion – Approximation de Born

Chapitre 3 : Particules identiques

- Opérateurs de permutation
- Principe de symétrisation – Fermions et bosons
- Notion de spin isotopique

Chapitre 4 : Seconde quantification

A – Systèmes de fermions en interaction

- Opérateurs de création et d'annihilation
- Opérateurs à un corps et à deux corps
- Théorème de Wick appliqué aux fermions

B – Systèmes de bosons en interaction

- Opérateurs de création et d'annihilation
- Opérateur nombre de particules

Références bibliographiques

1. **A. Messiah**, Mécanique quantique, Tomes 1 & 2, Dunod, 1995.
2. **N. Zettili**, Quantum Mechanics: Concepts and Applications, 2^e éd., Wiley, 2009.
3. **C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloë**, Mécanique quantique, Tomes 1 & 2, Hermann, 1973.
4. **Michel Le Bellac**, Physique quantique, EDP Sciences, Paris, 2007.
5. **D.J. Griffiths, D.F. Schroeter**, Introduction to Quantum Mechanics, 3^e éd., Cambridge University Press, 2018.
6. **J.J. Sakurai, J. Napolitano**, Modern Quantum Mechanics, 3^e éd., Cambridge University Press, 2020.

Semestre : 2

UE : Fondamentale

Matière : Théorie Quantique des Champs 2

Prérequis : Théorie Quantique des Champs 1 – Semestre 1

Objectifs de l'enseignement : Ce cours approfondit la Théorie Quantique des Champs (TQC) en se basant sur les chapitres 4 à 6 des notes de cours de David Tong. Il vise à familiariser l'étudiant avec les champs spinoriels de Dirac (pour les particules de spin 1/2) et le champ électromagnétique (pour les photons). À l'issue de ce cours, l'étudiant sera apte à aborder l'électrodynamique quantique (QED) et à calculer certaines amplitudes de transition non divergentes.

Programme détaillé :

Chapitre 1 : L'Équation de Dirac

- Représentation des spineurs
- Construction de l'action relativiste pour les fermions
- Équation de Dirac
- Spineurs chiraux et fermions de Majorana
- Symétries et courants conservés
- Solutions en ondes planes

Chapitre 2 : Quantification du champ de Dirac

- Théorème spin-statistique (aperçu)
- Quantification fermionique canonique
- Interprétation du trou de Dirac
- Propagateurs du champ de Dirac
- Propagateur de Feynman
- Théorie de Yukawa
- Règles de Feynman pour les fermions

Chapitre 3 : Électrodynamique Quantique (QED)

- Équations de Maxwell et champ électromagnétique quantifié
- Couplage champ matière-photon
- Formulation de la QED
- Règles de Feynman pour la QED
- Calculs de diffusion en QED

Références bibliographiques

1. **D. Tong**, Quantum Field Theory, [Notes de cours en ligne](#)
2. **M.E. Peskin & D.V. Schroeder**, An Introduction to Quantum Field Theory, Addison-Wesley, 1995
3. **A. Das**, Lectures On Quantum Field Theory, World Scientific, 2008
4. **M. Kaku**, Quantum Field Theory, Oxford University Press, 1993
5. **S. Weinberg**, The Quantum Theory of Fields, Volume 1, Cambridge University Press, 1995
6. **N.N. Bogoliubov & D.V. Shirkov**, Introduction to the Theory of Quantized Fields, 3e éd., Wiley, 1980
7. **J.-P. Derendinger**, Théorie quantique des champs, PPUR, 2001

Semestre : 2

UE : Fondamentale

Matière : Physique Statistique Quantique 2

Prérequis

- Physique statistique quantique 1
- Mécanique quantique

Objectifs de l'enseignement

Ce cours approfondit les bases de la physique statistique quantique acquises dans le module Physique Statistique Quantique 1. Il introduit l'étudiant aux phénomènes **hors équilibre**, aux **équations cinétiques quantiques**, ainsi qu'à une première approche de la **théorie de la renormalisation** appliquée aux systèmes statistiques. L'objectif est d'apporter les outils conceptuels et techniques nécessaires à la compréhension des phénomènes irréversibles et de la dynamique des systèmes quantiques complexes.

Programme détaillé :

Chapitre 1 : Systèmes quantiques hors équilibre

- Effets de perturbations extérieures sur un système quantique
- Équation de Liouville et équation de von Neumann
- Théorie de la réponse linéaire : relations de fluctuation-dissipation
- Applications à des systèmes ouverts et modèles de relaxation

Chapitre 2 : Équations cinétiques quantiques

- Fonction de distribution quantique
- Équation de Boltzmann quantique : dérivation, approximations, collisions
- Équation de Vlasov quantique : dynamique collective et couplage champ moyen

Chapitre 3 : Théorie de la renormalisation

- Introduction à la renormalisation dans les systèmes statistiques
- Approximation du champ moyen (Mean Field Theory)
- Changement d'échelle et transformation de groupe de renormalisation
- Applications à la transition de phase et à la physique critique

Chapitre 4 : Révisions et approfondissements

- Retour sur les concepts clés du cours
- Analyse de cas concrets hors équilibre

Références bibliographiques

1. L. Landau & E.M. Lifshitz, Physique statistique, Éditions ELLIPSES
2. Noëlle Pottier, Physique statistique hors d'équilibre, CNRS Éditions
3. W.C. Schieve & L.P. Horwitz, Quantum Statistical Mechanics, Cambridge University Press

Semestre : 2

UE : Fondamentale

Matière : Relativité Générale

Prérequis

- Relativité restreinte
- Calcul différentiel et éléments de géométrie
- Notions de mécanique analytique (lagrangien, hamiltonien)

Objectifs de l'unité

Ce cours vise à introduire les fondements physiques et géométriques de la relativité générale. L'étudiant apprendra à manipuler les outils de base du calcul tensoriel sur les variétés, à comprendre les géodésiques dans l'espace-temps courbe, et à résoudre les équations d'Einstein dans des cas simples. Le cours donne également un aperçu des applications modernes, notamment la cosmologie relativiste, les ondes gravitationnelles et les trous noirs.

Programme détaillé :

Chapitre 1 – Principes fondamentaux de la relativité générale

- Limites de la relativité restreinte
- Principe d'équivalence et chute libre
- Notion d'espace-temps courbe
- Introduction au concept de géodésique

Chapitre 2 – Géométrie de l'espace-temps

- Notion de métrique : rôle et interprétation
- Courbes, longueurs, intervalles d'espace-temps
- Espace tangent, vecteurs et bases coordonnées
- Calcul tensoriel élémentaire (produits, contractions, indices)

Chapitre 3 – Connexions et courbure

- Connexion de Levi-Civita : définition et propriétés
- Transport parallèle et dérivée covariante
- Tenseur de courbure de Riemann : intuition et expressions
- Notions de courbure scalaire et tenseur de Ricci

Chapitre 4 – Équations d'Einstein et solutions simples

- Formulation des équations d'Einstein à partir du principe variationnel
- Le tenseur énergie-impulsion et son rôle dans la gravitation
- Solutions exactes dans le vide : métrique de Schwarzschild
- Interprétation physique : horizon, géodésiques, tests classiques de la RG

Chapitre 5 – Trous noirs : notions de base

- Propriétés de la solution de Schwarzschild : horizon et singularité
- Notions qualitatives sur les trous noirs chargés et en rotation
- Concepts fondamentaux : horizon des événements, causalité
- Introduction à la thermodynamique des trous noirs

Chapitre 6 – Ondes gravitationnelles

- Linéarisation des équations d'Einstein : champ faible
- Ondes gravitationnelles dans le vide, jauge transverse-traceless
- Production d'ondes : quadripôle et applications astrophysiques
- Détection des ondes : principes des interféromètres LIGO/VIRGO

Références bibliographiques

1. **David Tong**, Lectures on General Relativity, University of Cambridge.
2. **S. Carroll**, Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity, Addison-Wesley, 2004.
3. **B. Schutz**, A First Course in General Relativity, Cambridge University Press, 2009.
4. **R.M. Wald**, General Relativity, University of Chicago Press, 1984.
5. **L. Landau & E. Lifchitz**, Théorie du champ, Éditions Mir.
6. **J.M. Souriau**, Géométrie et relativité, Hermann.

Semestre : 2

UE : Méthodologie

Matière : Introduction à l'Information Quantique

Prérequis

- Mécanique quantique (niveau licence)

Objectifs de l'enseignement

Ce cours a pour objectif de familiariser les étudiants avec les concepts fondamentaux de l'information quantique. Ils découvriront la théorie quantique de la mesure ainsi que les effets de la décohérence sur celle-ci.

L'introduction au qubit — notamment via la polarisation du photon — servira de base à l'exploration de protocoles tels que BB84. Le cours couvre également l'intrication, la téléportation quantique, les portes logiques quantiques et les principaux algorithmes quantiques comme ceux de Grover et Deutsch-Jozsa. Enfin, il propose un survol des différentes réalisations physiques des ordinateurs quantiques.

Programme détaillé :

Chapitre 1 : Mesure quantique et décohérence

- Mesure quantique PVM

- Mesure quantique POVM
- Décohérence et mesure quantique

Chapitre 2 : Qubit et applications

- Polarisation du photon, spin 1/2 et sphère de Bloch
- Polariseur, protocole BB84 et théorème de non-clonage
- Lame semi-réfléchissante et représentation dual-rail
- Interféromètre de Mach-Zehnder et applications

Chapitre 3 : Intrication

- États multipartites
- Critères d'intrication
- Inégalités de Bell
- Téléportation

Chapitre 4 : Introduction aux calculs quantiques

- Portes quantiques
- Calcul parallèle
- Algorithme de Deutsch-Jozsa
- Algorithme de Grover
- Transformée de Fourier Quantique

Chapitre 5 : Réalisation d'ordinateur quantique

- Oscillateur harmonique
- Photons
- Ions piégés
- Résonance magnétique nucléaire (RMN)

Mode d'évaluation :

- Contrôle continu (interrogations, exposés, devoirs) : 50 %
- Examen final : 50 %

Références bibliographiques

1. M. A. Nielsen, I. L. Chuang, Quantum Computation and Quantum Information, Cambridge University Press, 2000
2. John Preskill, Quantum Information and Computation
(<http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph229/>)
3. Maximilian Schlosshauer, Decoherence and the Quantum-to-Classical Transition, Springer, 2007
4. Michel Le Bellac, Physique Quantique, EDP Sciences & CNRS Éditions, 2007

Semestre : 2

UE : Méthodologie

Matière : Programmation Numérique 2

Prérequis

Connaissances élémentaires en Excel et en mathématiques, acquises durant la licence en physique.

Objectifs de l'enseignement

Cet enseignement vise à apprendre à l'étudiant à planifier un projet scientifique, en maîtrisant Excel pour l'analyse des données, l'utilisation de Python pour le calcul, ainsi que la création d'un diagramme de Gantt pour le suivi et la gestion d'un projet.

Programme détaillé

Cours

Chapitre 1 : Apprentissage avancé d'Excel (2 séances)

1. Principes des macros et création d'une macro simple
2. Tableaux croisés dynamiques
3. Création d'histogrammes

Chapitre 2 : Apprentissage de GanttProject (2 séances)

1. Introduction à la gestion de projets
2. Gestion des tâches

Chapitre 3 : Simulation de problème physique (8 séances)

1. Résolution des équations aux dérivées partielles
 - Méthode des différences finies
 - Méthode des éléments finis
2. Méthode de Monte Carlo
 - Algorithme de Hastings-Metropolis
 - Algorithme de Metropolis

Travaux pratiques (TP)

I. Apprentissage avancé d'Excel (2 séances)

- Programmation du tableau de bord
- Création de tableaux Excel automatisés
- Macros simples

II. Apprentissage de GanttProject (2 séances)

- Organisation d'une réunion dans GanttProject
- Définition des tâches
- Définition de la durée
- Création d'un diagramme de Gantt

III. Simulation de problème physique (8 séances)

1. Résolution des équations aux dérivées partielles par la méthode des différences finies
 - Résolution de l'équation de Laplace en 2D
 - Résolution de l'équation de la chaleur en 2D
2. Résolution des équations aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis
 - Résolution de l'équation de la chaleur en 1D
3. Méthode de Monte Carlo
 - Algorithme de Hastings-Metropolis
 - Algorithme de Metropolis

Références bibliographiques

1. C. Paroissin, Pratique de la data science avec R : arranger, visualiser, analyser et présenter des données, Ellipses, 2021
2. J.W. Thomas, Numerical Partial Differential Equations: Finite Difference Method, Springer
3. H.M. Antia, Numerical Methods for Scientists and Engineers, Birkhäuser
4. A. Quarteroni, R. Sacco, F. Saleri, Numerical Mathematics, Springer
5. A. Jaun, Numerical Methods for Partial Differential Equations, Micolink College
6. J. Chaskalovic, Mathematical and Numerical Methods for Partial Differential Equations, Springer
7. M.E.J. Newman, G.T. Barkema, Monte Carlo Methods in Statistical Physics, Oxford University Press, 1999

Semestre : 2

UE : Méthodologie

Matière : Intelligence Artificielle et Machine Learning 2

Objectifs du cours :

S'appuyer sur les techniques de base de l'apprentissage automatique (Machine Learning) pour introduire l'apprentissage profond, les réseaux neuronaux et les concepts avancés d'apprentissage automatique pour les applications en sciences de la matière. Les étudiants approfondiront leur compréhension de la découverte et de la conception de matériaux basées sur l'IA.

Programme détaillé :

Chapitre 1 : Modèles basés sur les graphes dans les sciences de la matière

- Les matériaux sont des graphes : atomes = nœuds, liaisons = arêtes.
- Réseaux convolutionnels de graphes de cristaux (CGCNN).
- Étude de cas : Prédiction des énergies de formation.

Chapitre 2 : Modèles génératifs pour la conception de matériaux

- Introduction aux réseaux adversariels génératifs (GAN) et aux auto-encodeurs variationnels (VAE).
- Application : Conception de nouveaux matériaux et molécules.

Chapitre 3 : Évaluation des modèles et interprétabilité

- Techniques d'évaluation des modèles d'apprentissage profond : validation croisée, surajustement.
- Interprétation des modèles avec SHAP et LIME.

Chapitre 4 : Techniques avancées de ML

- Modèles d'ensemble (Random Forests, XGBoost, LightGBM).
- Modèles avancés de régression et de classification.
- Réduction de la dimensionnalité : ACP, t-SNE, UMAP.

Chapitre 5 : Applications avancées en sciences de la matière

- Conception inverse pour la découverte de matériaux à l'aide de l'IA.
- Prédiction des propriétés des matériaux (modules élastiques, supraconductivité, etc.).
- Modélisation multi-échelle : combinaison de l'IA avec la dynamique moléculaire ou la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT).

Chapitre 6 : Mini-Projet de spécialisation (Capstone Project)

Les étudiants réaliseront un projet dans lequel ils appliqueront l'IA/ML pour résoudre un problème en sciences de la matière, en utilisant les compétences acquises tout au long du semestre.

Outils et bibliothèques :

1. Python, Jupyter Notebooks
2. TensorFlow, PyTorch
3. Matminer, Pymatgen

Bibliographie :

1. "Deep Learning" by Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville (a comprehensive introduction to deep learning)
2. "Deep Learning with Python" by François Chollet (applies Keras for hands-on deep learning projects)
3. "Machine Learning for Materials Science" by Jha et al. (directly relates to AI in materials science)

4. "Data Science for Materials Discovery" by K. A. Persson, et al. (focused on machine learning applications in materials science)
5. "Materials Informatics: Methods, Tools, and Applications" by Rajiv S. Mishra (further extends ML into material discovery)

Semestre : 2

UE : Découverte

Matière : Dynamique des particules chargées

Prérequis :

Notions basiques de mathématiques, Mécanique des fluides, Physique statistique et Électromagnétisme.

Objectifs de l'enseignement

Ce cours initie à l'étude des trajectoires et interactions des particules chargées dans des champs électromagnétiques, en s'appuyant sur la loi de Lorentz et les équations de Maxwell. Il couvre les effets magnétiques (cyclotron, hélicoïdal) et électriques (accélération, déviation), et ouvre sur des notions relativistes, quantiques et des applications (plasmas, accélérateurs, technologies quantiques). Il vise à former des chercheurs rigoureux et polyvalents en physique théorique.

Programme détaillé

Chapitre I : Mouvement d'une particule chargée dans un champ électromagnétique

- Mouvement dans un champ électrostatique uniforme
- Mouvement dans un champ magnétique uniforme
- Mouvement de dérive
- Mouvement dans des champs non-uniformes
- Mouvement dans des champs électriques et magnétiques variables
- Invariants adiabatiques
- Application : confinement des particules chargées

Chapitre II : Théorie cinétique

- Rappels (espace des phases, fonctions de distribution...)
- Équations de Vlasov et de Boltzmann
- Équation cinétique de Boltzmann
- Moments de la fonction de distribution
- Moments de l'équation cinétique de Boltzmann et équations de conservation
- Quelques fonctions de distribution (à l'équilibre, non-thermique...)

Chapitre III : Théorie fluide

- Équations d'Euler
- Modèle à plusieurs fluides
- Relations de fermeture (équations d'état...)
- Description à un seul fluide : dérivation des équations MHD à partir de la théorie multi-fluide
- Loi d'Ohm généralisée
- Les deux régimes MHD

Chapitre IV : Collisions

- Dynamique des collisions binaires
- Modèle des sphères dures
- Collisions coulombiennes
- Sections efficaces

Références bibliographiques

1. **F.F. Chen**, Introduction to Plasma Physics, Plenum Press, New York, 1974.
2. **R.J. Goldston & P.H. Rutherford**, Introduction to Plasma Physics, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1995.

3. **J.A. Bittencourt**, Fundamentals of Plasma Physics, Pergamon Press, 1986.
4. **J.-L. Delcroix & A. Bers**, Physique des Plasmas, Tome 1, Savoirs Actuels, EDP Sciences / CNRS Éditions, 1994.
5. **J.-L. Delcroix & A. Bers**, Physique des Plasmas, Tome 2, Savoirs Actuels, EDP Sciences / CNRS Éditions, 1994.
6. **G. Belmont et al.**, Introduction à la Physique des Plasmas, ISTE Éditions.
7. **S. Galtier**, Magnétohydrodynamique, Dunod, 2018.
8. **P. Bellan**, Fundamentals of Plasma Physics, Cambridge University Press.
9. **D. Gurnett & A. Bhattacharjee**, Introduction to Plasma Physics with Space and Laboratory Applications, Cambridge University Press.

Semestre : 2

UE : Transversal

Matière : Particules Élémentaires 1

Prérequis

- Mécanique quantique (niveau Licence)
- Relativité restreinte
- Bases en physique nucléaire et interactions fondamentales (souhaitables)

Objectifs de l'enseignement

Ce cours vise à offrir une **vue globale, qualitative et introductive** de la physique des particules. Il met l'accent sur les **symétries**, les **lois de conservation**, les **interactions fondamentales** et les **éléments clés du modèle des quarks**, en préparation à des cours plus avancés en physique des hautes énergies.

Programme simplifié

Chapitre 1 – Introduction à la physique des particules

- Qu'est-ce qu'une particule élémentaire ?
- Rôle et portée de la physique des particules
- Unités naturelles et échelles d'énergie
- Interactions fondamentales et classification des particules
- Vue d'ensemble des expériences modernes (LHC, ATLAS, CMS)

Chapitre 2 – Outils expérimentaux et processus de base

- Types de sources : accélérateurs, désintégrations radioactives
- Détecteurs : principes de fonctionnement (chambres, calorimètres, semi-conducteurs)
- Processus élémentaires : diffusion, désintégration, vie moyenne
- Notions qualitatives : section efficace, largeur, espace de phase

Chapitre 3 – Symétries et lois de conservation

- Symétries de l'espace-temps : translation, rotation, parité (P), temps (T), charge (C)
- Symétries internes : isospin, saveur, étrangeté
- Lois de conservation associées (énergie, moment, baryon, lepton...)
- Introduction aux symétries locales et invariance de jauge

Chapitre 4 – Le modèle des quarks

- Historique du modèle des quarks et familles de particules
- Classification des hadrons (mésons, baryons)
- Notions qualitatives sur la couleur, le confinement et le rôle de SU(3)
- Diagrammes de quarks et phénomènes caractéristiques : charme, saveur, résonances

Références bibliographiques

1. **L. Marleau**, Introduction à la physique des particules, Éditions Ellipses
2. **David Tong**, Lectures on Particle Physics, University of Cambridge
→ <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/particle.html>
3. **D. Griffiths**, Introduction to Elementary Particles, Wiley

4. **C. Amsler**, Particle Physics: An Introduction, Oxford University Press
5. **CERN**, Ressources pédagogiques et documents de vulgarisation
→ <https://home.cern>

SEMESTRE 3

Semestre : 3

UE : Fondamentale

Matière : Étude des Plasmas

Prérequis

Notions basiques de mathématiques, mécanique des fluides, physique statistique, électromagnétisme, Dynamique des particules chargées.

Description et objectifs de l'unité :

Cette unité approfondit les propriétés et phénomènes des plasmas (quatrième état de la matière), prolongeant le cours de dynamique des particules chargées du M1. Elle couvre les équations fondamentales, les effets collectifs et les applications en fusion, astrophysique et technologies spatiales.

Programme détaillé :

Chapitre1 : Définitions et propriétés des plasmas

- Gaz ionisé et processus d'ionisation
- Équation de Saha
- Caractéristiques générales des plasmas
- Écrantage de Debye
- Fréquence plasma
- Classification des plasmas
- Rappel des différentes théories d'étude des plasmas

Chapitre 2 : Les Ondes

- Ondes dans les plasmas
- Ondes acoustiques
- Ondes électromagnétiques
 - Applications au chauffage radiofréquence

Chapitre3 : Les effets non-linéaires

- Introduction
- Gaines charge-espace
- Structures localisées : solitons, double couches, pseudo-potentiel, équation KdV, équation de Schrödinger
- Force pondéromotrice
- Sonde de plasmas (Sonde de Langmuir)

Chapitre 4 : Les instabilités

- Taux de croissance
- Quelques instabilités remarquables :
 - Instabilité macroscopique
 - Instabilité de Rayleigh–Taylor
 - Instabilité de Weibel

Chapitre 5 : Notions sur l'étude des plasmas

- Plasmas de décharges
- Plasmas poussiéreux
- Plasmas denses
- Plasmas fortement couplés

Références bibliographiques :

1. **F.F. Chen**, Introduction to Plasma Physics, Plenum Press, New York, 1974.
2. **R.J. Goldston et P.H. Rutherford**, Introduction to Plasma Physics, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1995.
3. **J.A. Bittencourt**, Fundamentals of Plasma Physics, Pergamon Press, 1986.
4. **J.-L. Delacroix et A. Bers**, Physique des Plasmas : Tome 1, Savoirs Actuels, EDP Sciences / CNRS Éditions, 1994.

Semestre : 3

UE : Fondamentale

Matière : Cosmologie

Prérequis

Cours de Relativité Générale (Semestre 2), Mécanique analytique et lagrangienne, Notions de base en thermodynamique et en mécanique quantique et Calcul différentiel et intégral sur les variétés.

Objectifs de l'enseignement

Ce cours a pour but d'introduire les fondements de la cosmologie moderne en s'appuyant sur la relativité générale comme cadre théorique. Il permet aux étudiants de comprendre l'évolution dynamique de l'Univers, d'interpréter les observations cosmologiques (expansion, fond diffus, structures), et de manipuler les outils conceptuels et mathématiques nécessaires à l'étude de modèles cosmologiques standards et alternatifs.

Programme détaillé :

Chapitre 1 – Introduction à la cosmologie moderne

- Histoire de l'Univers et observations cosmologiques fondamentales
- Hypothèses cosmologiques : homogénéité et isotropie
- Principe cosmologique
- Aperçu du contenu de l'Univers (matière, rayonnement, énergie noire)

Chapitre 2 – L'espace-temps de Friedmann-Robertson-Walker (FRW)

- Métrique FRW : justification et implications
- Distances en cosmologie : comobile, propre, luminosité, angulaire
- Définition du redshift cosmologique

Chapitre 3 – Les équations de Friedmann

- Dérivation à partir des équations d'Einstein
- Énergie-matière et équation d'état
- Solutions analytiques dans différents cas : Univers dominé par la matière, le rayonnement, la constante cosmologique
- Âge de l'Univers, destin cosmique

Chapitre 4 – Contenu de l'Univers et évolution thermodynamique

- Composantes : baryons, photons, neutrinos, matière noire, énergie noire
- Température de l'Univers, équilibre thermique
- Découplage et recombinaison
- Nucléosynthèse primordiale

Chapitre 5 – Rayonnement fossile (CMB)

- Origine et découverte du fond diffus cosmologique
- Caractéristiques et anisotropies
- Interprétation et importance du spectre du CMB
- Contraintes sur les paramètres cosmologiques

Chapitre 6 – Formation des structures et inflation cosmique

- Perturbations gravitationnelles linéaires
- Croissance des fluctuations de densité
- Rôle de la matière noire
- Formation hiérarchique des grandes structures
- Problèmes du modèle standard : horizon, platitude

- Théorie de l'inflation : mécanisme, modèles, conséquences
- Fluctuations primordiales et spectre de puissance

Chapitre 7 – Cosmologie d'observation et paramètres cosmologiques

- Mesures du Hubble constant, des distances, de l'accélération
- Courbes de lumière des supernovae
- Contraintes observationnelles (CMB, lentilles gravitationnelles, grands relevés spectroscopiques)
- Modèle Λ CDM et alternatives

Références bibliographiques essentielles

1. **Barbara Ryden**, Introduction to Cosmology, 2nd Edition, Cambridge University Press, 2017.
2. **Steven Weinberg**, Cosmology, Oxford University Press, 2008.
3. **Edward Harrison**, Cosmology: The Science of the Universe, Cambridge University Press, 2000.
4. **Scott Dodelson**, Modern Cosmology, Academic Press, 2003.

Semestre : 3

UE : Fondamentale

Matière : – Introduction à la Théorie de la Structure Nucléaire

Prérequis

- Mécanique quantique approfondie
 - Physique nucléaire élémentaire
 - Mathématiques pour la physique
- (Ces connaissances sont en général acquises durant la licence en physique fondamentale ou en M1 du même master.)

Objectifs de l'enseignement

Cette matière vise à doter les étudiants des bases théoriques nécessaires pour comprendre la structure des noyaux atomiques et leur modélisation. À l'issue de cet enseignement, l'étudiant maîtrisera les concepts essentiels de la théorie du champ moyen, de l'interaction nucléon-nucléon et des modèles nucléaires tels que la goutte liquide ou le modèle en couches. Ces notions constituent un socle indispensable pour entamer des travaux de recherche dans le domaine de la physique nucléaire des basses énergies.

Programme détaillé :

Chapitre 1 : L'interaction nucléon-nucléon

- Symétries et invariances
- Construction de l'interaction
- Différentes formes de l'interaction

Chapitre 2 : Théorie du champ moyen

- Déterminant de Slater
- Équations d'Hartree-Fock
- Résolution des équations d'Hartree-Fock
- Modèle à particules indépendantes et potentiel moyen d'Hartree-Fock
- Symétrie des solutions
- Potentiel de Nilsson : valeurs propres et vecteurs propres

Chapitre 3 : L'interaction d'appariement

- Origine des corrélations
- Définition de l'interaction d'appariement
- Transformation de Bogoliubov-Valatin
- Minimisation, énergie BCS et équations du gap

- Hamiltonien de quasi-particules indépendantes et états quasi-particules

Chapitre 4 : Modèle de la goutte liquide

- Formule semi-empirique des masses
- Paramétrisation de la surface nucléaire
- Définition des paramètres de déformation
- Oscillations de surface et hamiltonien nucléaire

Références bibliographiques essentielles

1. **D. Heyde**, From Nucleons to the Atomic Nucleus: Concepts of Microscopic Nuclear Theory, Springer, 2004.
2. **W. Greiner & J. Maruhn**, Nuclear Models, Springer, 1996.
3. **P. Ring & P. Schuck**, The Nuclear Many-Body Problem, Springer, 2000.
4. **D.J. Rowe**, The Nuclear Shell Model: Fundamentals, Springer, 2010.
5. **R.F. Casten**, Nuclear Structure from a Simple Perspective, Oxford University Press, 2000.
6. **J.A. Arias & M. Lozano**, An Advanced Course in Modern Nuclear Physics, Springer, 2001.

Semestre : 3

UE : Fondamentale

Matière : Théorie du solide

Prérequis

Physique Statistique, Électromagnétisme, Mécanique Quantique, Physique du Solide Approfondie 1 (du même Master).

Objectifs de l'enseignement

Ce cours fait suite au cours de Théorie du Solide 1, acquis en S1, tout en étant indépendant. Son programme aborde certaines propriétés physiques importantes de la matière, comme base fondamentale nécessaire à la recherche dans le domaine de la physique des matériaux dans son aspect théorique.

Programme détaillé

Chapitre 1 : Comportement diélectrique de la matière

- Rappel de la description macroscopique des milieux polarisés
- Les différents types de polarisation (processus microscopique)
- Relaxation diélectrique
- Milieux diélectriques anisotropes et non linéaires
- Interaction ondes électromagnétiques / milieux diélectriques

Chapitre 2 : Milieux magnétiques

- Aspects macroscopiques et microscopiques des milieux aimantés
- Milieux magnétiques anisotropes et non linéaires
- Relaxation, résonance magnétique, ondes de spin
- Diamagnétisme de Landau
- Quelques aspects du magnétisme à champ magnétique fort – transitions optiques dans les cristaux magnétiques ordonnés

Chapitre 3 : Surfaces et interfaces

- Morphologie et structure, mode de croissance, réseaux bidimensionnels
- Tension de surface, énergie de surface
- Vibrations de surface (phonons de surfaces)
- Propriétés électroniques, modèle du jellium
- Physisorption et chimisorption

- Transitions de phase – Modèle d’Ising – Modèle gaz sur réseau

Références bibliographiques

1. **W. Ashcroft & N.D. Mermin**, Solid State Physics, W.B. Saunders Co., 1976
2. **C. Kittel**, Physique de l’état solide, 8e édition, Dunod, 2005
3. **Max Brousseau**, Physique du solide – Propriétés électroniques, Masson, 1992
4. **H. Ibach**, Physics of Surfaces and Interfaces, Springer, 2006
5. **H. Lüth**, Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films, 5e édition, Springer, 2010

Semestre : 3

UE : Méthodologie

Matière : Intégrale de chemin

Prérequis

- Mécanique quantique (niveau Licence)
- Algèbre linéaire et analyse mathématique (niveau Licence)

Objectifs de l’enseignement

Ce cours vise à initier l’étudiant au formalisme des intégrales de Feynman, en mettant l’accent sur ses applications en physique théorique. Il explore les techniques permettant de contourner les difficultés de calcul des propagateurs, notamment par des transformations d’espace-temps et des changements de coordonnées. L’étudiant pourra appliquer ce formalisme à divers domaines, tels que la physique statistique ou la théorie de la décohérence.

Programme détaillé :

Chapitre 1 : Introduction aux intégrales de chemin

- Origine historique et contexte physique
- Expérience de pensée de Feynman
- Construction d’une intégrale de chemin via le produit de Trotter

Chapitre 2 : Propagateurs relatifs à des lagrangiens quadratiques

- Approche par chemins polygonaux
- Intégrales gaussiennes appliquées à des formes quadratiques
- Cas des propagateurs classiques
- Applications à l’oscillateur harmonique et au potentiel libre

Chapitre 3 : Intégrales de chemin dans différents systèmes de coordonnées

- Propagateurs en coordonnées polaires et sphériques
- Étude des potentiels centraux
- Généralisation à D dimensions
- Applications à la physique atomique et moléculaire

Chapitre 4 : Transformations de coordonnées

- Transformations temporelles locales en mécanique classique
- Changements d’espace-temps dans les intégrales de chemin
- Applications : potentiel de Coulomb, de Morse, et systèmes à trois corps

Chapitre 5 : Intégrales de chemin en physique statistique

- Mouvement brownien et intégrales de Wiener
- Fonctions de partition et densité de particules dans le formalisme de Feynman

- Méthode variationnelle de Feynman
- Approche Feynman-Kleinert pour l'énergie de l'état fondamental
- Applications aux potentiels polynomiaux
- Étude du spectre des états excités par la méthode de Kleinert
- Méthodes perturbatives et corrections systématiques
- Cas des potentiels à symétrie PT

Chapitre 6 : Études de cas et synthèse

- Application intégrée à un système quantique réel
- Comparaison entre formalisme de Schrödinger et de Feynman
- Bilan du cours et perspectives

Semestre : 3

UE : Méthodologie

Matière : Techniques de Simulation en Physique

Prérequis

- Discrétisation par différences finies
- Symétries des systèmes physiques à différentes échelles
- Maîtrise de l'outil mathématique

Objectifs de l'enseignement

Ce cours initie les étudiants aux techniques de simulation en physique, en mettant l'accent sur la modélisation dynamique de phénomènes physiques à différentes échelles (nano, méso). Il ne s'agit pas simplement de résoudre numériquement des équations, mais de faire "vivre" un événement physique sur un ordinateur à partir de modèles théoriques, en explorant aussi bien les méthodes déterministes que stochastiques.

Programme détaillé :

Chapitre 1 : Introduction aux techniques de simulation

- Différences entre simulations et résolutions numériques d'équations
- Boîtes de simulation, conditions aux bords, configurations initiales
- Échelles de temps et de longueur
- Techniques déterministes et stochastiques

Chapitre 2 : Simulations à l'échelle nanoscopique

- Systèmes nanométriques et dynamique newtonienne
- Potentiels interatomiques et équations du mouvement
- Relaxation des systèmes

Chapitre 3 : Technique de Dynamique Moléculaire classique

- Simulation en 3D (bulk), 2D (surface), nanoparticules
- Choix du pas de temps, thermostats, distribution des vitesses
- Préparation et exploitation des fichiers Input/Output

Chapitre 4 : Simulations à l'échelle mésoscopique

- Microstructures et interfaces dans les alliages binaires
- Phénomènes de diffusion, lois de Fick, interfaces de phases

Chapitre 5 : Modèle de champ de phases

- Paramètres d'ordre (conservatif et non-conservatif)
- Potentiels chimiques, gradients, interface diffuse
- Fonctionnelle d'énergie libre
- Équations de Cahn-Hilliard et Allen-Cahn

Chapitre 6 : Simulation du champ de phases

- Configuration initiale, stabilité numérique, croissance stationnaire

Contenu des Travaux pratiques :

- **TP1: Installation des software open-source**
 - Installation de Linux
 - Installation de LAMMPS pour les TP de Dynamique Moléculaire
 - Installation de OPEN-PHASE pour les TP de champs de phases
- **TP2 (avec LAMMPS)**
 - Simulations d'un système massif (3D)
- **TP3 (avec LAMMPS)**
 - Simulations de nanoparticules
- **TP4 (avec OPEN-PHASE)**
 - Simulation de la décomposition spinodale
- **TP5 (avec OPEN-PHASE)**
 - Simulation d'un phénomène de précipitation à partir d'une phase mère sur-saturée.

Références bibliographiques

1. M. P. Allen, D. J. Tildesley, Computer Simulation of Liquids, Oxford Science Publications, 1989
2. D. Frenkel & B. Smit, Understanding Molecular Simulation, Academic Press, 2nd ed., 2001
3. "OpenPhase" – OpenPhase Academic, <https://openphase.rub.de>
4. Steinbach, I., et al., "A phase field concept for multiphase systems", Physica D, 94(3), 135–147, 1996
5. Steinbach, I., "Phase-field models in materials science", Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 17(7), 073001, 2009
6. LAMMPS documentation, <https://docs.lammps.org/>
7. Article de référence : <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2021.108171>
8. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2021.108171>.
9. <https://docs.lammps.org/>
10. M. P. Allen & D. J. Tildesley, Computer Simulation of Liquids, Oxford Science Publication, Clarendon Press; Reprint edition (June 29, 1989)
11. D. Frenkel & B. Smit, Understanding Molecular Simulation: From Algorithms to Applications (Computational Science Series, Vol. 1, Academic Press; 2nd edition (November 7, 2001).
12. "OpenPhase" OpenPhase Academic, OpenPhase.rub.de
13. Steinbach, Ingo, et al. "A phase field concept for multiphase systems." Physica D: Nonlinear Phenomena", 94.3, 135-147, (1996).
14. Steinbach, Ingo. "Phase-field models in materials science." Modelling and simulation in materials science and engineering", 17.7, 073001, (2009).

Semestre : 3

UE : Découverte

Matière : Particules Élémentaires 2

Prérequis

- Unité Particules Élémentaires 1 (UET2.1.1)
- Mécanique quantique relativiste (équation de Dirac)

- Notions de jauge, symétries internes et représentation de groupes
- Bases en théorie quantique des champs (souhaitées)

Objectifs de l'enseignement

Ce cours vise à approfondir la compréhension formelle et phénoménologique du Modèle Standard des interactions fondamentales. Il introduit les fondements de la dynamique de jauge, le mécanisme de Higgs, et la structure détaillée des interactions électrofaibles et fortes. Il prépare l'étudiant à aborder des questions ouvertes de la physique des hautes énergies et les pistes au-delà du Modèle Standard.

Programme simplifié

Chapitre 1 – Théorie quantique des champs en physique des particules

- Motivation et rappels : particules $\leftrightarrow$ champs
- Lagrangiens invariants de Lorentz et d'interaction
- Quantification des champs de bosons et de fermions (aperçu qualitatif)
- Interprétation physique des diagrammes de Feynman
- Interactions perturbatives : ordres, propagateurs, vertex

Chapitre 2 – Théories de jauge et invariance locale

- Jauge U(1), QED comme théorie de jauge abélienne
- Symétries de jauge non-abéliennes : SU(2), SU(3)
- Champs de jauge, bosons médiateurs et couplages
- Introduction à la chromodynamique quantique (QCD)
- Confinement et liberté asymptotique (éléments qualitatifs)

Chapitre 3 – Interaction électrofaible et unification

- Structure de SU(2) $\times$ U(1) et mélange des bosons
- Le neutrino et les courants faibles
- Le mécanisme de Higgs : brisure spontanée de symétrie
- Masse des bosons W et Z, propriétés du boson de Higgs
- Tests expérimentaux : LEP, LHC, mesures de précision

Chapitre 4 – Le Modèle Standard en pratique

- Lagrangien complet du Modèle Standard (structure et interprétation)
- Générations, matrices CKM et PMNS (notions qualitatives)
- Sources de violation de CP et implications cosmologiques
- Limites du Modèle Standard : matière noire, neutrinos massifs, gravité

Chapitre 5 – Ouvertures : au-delà du Modèle Standard

- Supersymétrie, grande unification, théories à dimensions supplémentaires
- Modèles de neutrinos massifs (seesaw, neutrinos stériles)
- Axions, particules candidates pour la matière noire
- Perspectives expérimentales futures (FCC, ILC, neutrino factories)

Références bibliographiques

1. M. E. Peskin, D. V. Schroeder, An Introduction to Quantum Field Theory, Addison-Wesley
2. David Griffiths, Introduction to Elementary Particles, Wiley
3. Ian Aitchison, A.J.G. Hey, Gauge Theories in Particle Physics, CRC Press
4. C. Quigg, Gauge Theories of the Strong, Weak, and Electromagnetic Interactions, Princeton University Press
5. David Tong, Lectures on Quantum Field Theory $\rightarrow$ <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/qft.html>
6. The Particle Data Group (PDG) $\rightarrow$ <https://pdg.lbl.gov>
7. CERN – Ressources pédagogiques avancées $\rightarrow$ <https://home.cern/science/physics>

Objectifs pédagogiques :

Ce module vise à former les apprenants aux fondamentaux de la gestion de projet et à les accompagner dans la création d'entreprises innovantes, en leur permettant :

- De maîtriser les méthodes et outils de gestion de projet (Gantt, Scrum, Business Model Canvas).
- De concevoir un plan d'affaires structuré et d'identifier les sources de financement (capital-risque, aides publiques).
- De développer un projet pratique (prototype ou startup) en équipe, avec une présentation orale et un pitch convaincant.
- De s'inscrire dans une démarche entrepreneuriale ou professionnelle en intégrant les enjeux de la gestion de projet et de l'innovation.

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction à la gestion de projet

- Définition et typologie des projets - Cycle de vie d'un projet
- Acteurs du projet (commanditaire, chef de projet, équipe, parties prenantes) - Contraintes : coût, qualité, délais - Introduction aux outils de gestion de projet (Gantt, PERT, etc.)

Chapitre 2 : Méthodologies de gestion de projet

- Méthodes classiques (cascade, cycle en V) - Méthodes agiles (Scrum, Kanban)
- Outils numériques : Trello, Asana, MS Project - Études de cas pratiques

Chapitre 3 : Création d'une startup

- De l'idée au projet entrepreneurial - Étude de marché et analyse des besoins
- Business model (notamment le Business Model Canvas)
- Définition de la proposition de valeur - Identification des segments de clientèle

Chapitre 4 : Plan d'affaires (Business Plan)

- Objectifs et structure du Business Plan - Analyse financière de base (plan de financement, seuil de rentabilité) - Plan marketing et stratégie de communication
- Éléments juridiques (forme juridique, propriété intellectuelle)

Chapitre 5 : Financement et accompagnement de projet

- Sources de financement : capital risque, business angels, subventions
- Incubateurs, accélérateurs, pépinières - Aides et dispositifs publics (ex. : en Algérie, ANSEJ, CNAC...)
- Pitch et levée de fonds

Chapitre 6 : Projet pratique

- Élaboration d'un mini-projet ou d'un prototype de startup
- Constitution d'équipes, travail collaboratif
- Présentation d'un pitch devant jury

Références

- 1) Claude Besner & Brian Hobbs, Management de projets, Presses de l'Université du Québec, 2012.
- 2) Jean-Michel Moutot & Jean-Noël Moutot, Management de projet : Principes et outils, Dunod, 2020.
- 3) Harold Kerzner, Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling, Wiley, 2022.
- 4) PMI (Project Management Institute), A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide), 7th Edition, PMI, 2021.
- 5) Olivier Ezratty, Guide des startups, édition annuelle gratuite
- 6) Steve Blank, The Startup Owner's Manual: The Step-by-Step Guide for Building a Great Company, K&S Ranch, 2012.

Semestre : 3

Semestre 3

Unité Transversale

Matière : Entrepreneuriat, Innovation et Startup

Objectifs de l'enseignement :

Donner aux étudiants une vision globale de l'entrepreneuriat moderne, développer leur esprit entrepreneurial et leur capacité à initier un projet.

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Fondements de l'Entrepreneuriat

- Définition, création de valeur par l'innovation et la prise de risque.
- Piliers : opportunité, innovation, gestion du risque, création de valeur.
- Écosystème : chercheurs-entrepreneurs, investisseurs, incubateurs, clusters.
- Processus : Idéation → Validation → Business Plan → Lancement → Croissance.
- Enjeux scientifiques : brevets, normes, financement R&D, équipes pluridisciplinaires.
- Cas pratiques : simulation de dépôt de brevet, recherche de financement.

Chapitre 2 : L'esprit entrepreneurial dans les sciences et technologies

- Comprendre l'entrepreneuriat scientifique et technologique.
- Esprit entrepreneurial : créativité, innovation, résilience, gestion du risque.
- Motivations à entreprendre dans les domaines scientifiques et technologiques.
- Grands secteurs d'opportunités : énergie, santé, matériaux, numérique, environnement, sciences alimentaires.

Chapitre 3 : De la recherche scientifique à l'opportunité entrepreneuriale

- Transformer une découverte scientifique ou technologique en projet entrepreneurial.
- Approche "problème-solution" : identifier un besoin réel.
- Initiation à l'étude de marché pour projets scientifiques.
- Validation rapide d'une idée : prototype minimum viable (MVP), enquêtes, tests utilisateurs.

Chapitre 4 : Construire et modéliser son projet innovant

- Introduction au Business Model Canvas (BMC) pour projets technologiques.
- Définir une proposition de valeur claire et différenciante.
- Identifier ressources, partenaires stratégiques, canaux de distribution.

Chapitre 5 : Lancer son projet scientifique ou technologique

- Étapes clés pour passer de l'idée au projet structuré.
- Sources classiques de financement en phase de démarrage : fonds d'amorçage, concours, soutiens privés.
- Savoir pitcher : vulgariser une innovation pour convaincre investisseurs, partenaires et premiers clients.
- Erreurs fréquentes à éviter : mauvaise évaluation du marché, développement technologique déconnecté du besoin réel.

Chapitre 6 : Réussir et se développer comme entrepreneur scientifique

- Gestion du risque et de l'incertitude dans les projets innovants.
- Stratégies de pivot : adapter son projet selon les retours du marché.
- Leadership scientifique : organiser et animer une équipe pluridisciplinaire.
- Bases de la propriété intellectuelle : brevets, licences, valorisation de l'innovation, protection.
- Entrepreneuriat à impact : répondre aux défis environnementaux, sociaux et économiques.
- Continuer à progresser : réseaux d'innovation, incubateurs, mentors, formations continues.

Références :

1. Verstraete, Thierry, et Fayolle, Alain, Entrepreneuriat : Fondements et dynamiques. Édition De Boeck Supérieur, 2005.
2. Julien, Pierre-André, Entrepreneuriat : devenir entrepreneur : théories et pratiques. Édition Économica, 2007.
3. Schieb-Bienfait, Nathalie, et Lemoine, Valérie, Entrepreneuriat : théories et réalités entrepreneuriales. Édition EMS (Management & Société), 2013.
4. Fayolle, Alain, Entrepreneuriat : Apprendre à entreprendre, Édition Dunod, 2014.