

4TNU905U Structure et dynamique de systèmes atomiques et moléculaires

*Jouin Hervé
Pons Bernard*

I- Atomes

A- Structure électronique

- 1) Rappels sur la structure des atomes monoélectroniques
- 2) Structure des atomes multiélectroniques
 - a) Approche de champ moyen (Hartree-Fock)
 - b) Notions d'interaction de configuration
 - c) Approche simplifiée (Potentiel-modèle)

B- Dynamique électronique

- 1) Approche quantique de la diffusion; développement en ondes partielles
- 2) Approche perturbative des processus d'excitation et d'ionisation
 - a) Processus ionisants; règle d'or de Fermi
 - b) Interactions asymptotiquement coulombiennes: formalisme des ondes distordues
 - c) Cas pratiques de l'excitation et de l'ionisation par impact d'électrons

II- Molécules

A- Approximation de Born-Oppenheimer

B- Structures nucléaire et électronique des molécules diatomiques

- 1) Rotation et vibration
 - a) Rotation, du rotateur rigide aux harmoniques
 - b) Vibration, de l'approximation harmonique à la description ab initio
- 2) Structure électronique
 - a) Symétries des systèmes électroniques diatomiques
 - b) De la combinaison d'orbitales atomiques pour l'état fondamental aux descriptions ab initio de l'intégralité du spectre lié

C- Molécules polytomiques

- 1) Symétries, groupes et représentations irréductibles
- 2) Modes vibrationnels et rotationnels

D- Dynamiques électronique et nucléaire

- 1) De l'approximation de Franck-Condon aux approches ab initio; application à l'impact de photons dans le cadre Born-Oppenheimer
- 2) Impact de particules; couplages non-adiabatiques

E- Spectres de rayonnement

- 1) Spectres rotationnels
- 2) Spectres ro-vibrationnels
- 3) Signatures des couplages fin et hyperfin

3 TPs de 2h

1. Construction d'états atomiques monoélectroniques par diagonalisation du Hamiltonien dans une base de Slater (bonne description des états liés) et dans une base de Bessel sphérique (bonne description des états liés et des états du continu)

2. Utilisation du logiciel de chimie quantique GAMESS-US pour mise en pratique de l'approche Hartree-Fock pour les systèmes multiélectroniques (atomes et molécules); optimisation de géométrie moléculaire. Visualisation des orbitales par MOLDEN.

4TNU904U Physique des plasmas et du rayonnement

Santos Joao

Batani Dimitri

Duchateau Guillaume

Partie 1

Dynamique collective et cinétique des plasma

Cours Description cinétique d'un plasma

Fonction de distribution moyenne et équations cinétiques de Vlasov et de Fokker-Planck.

Grandeurs macroscopiques : densité et densité de charge, vitesse moyenne, densité de courant, énergie cinétique moyenne, flux d'énergie cinétique, flux d'impulsion.

Plasma à l'équilibre et fonction de distribution de Maxwell.

Cours 2 Configurations d'équilibre

Plasma dans un potentiel électrique externe : plasma dans un condensateur.

(Plasma dans un champ magnétique externe : le z-pinch => sujet de DM)

Cours 3 Propriétés diélectriques d'un plasma isotrope

Tenseur permittivité. Permittivité parallèle et transverse au vecteur d'onde.

Cours 4 Dispersion et amortissement non-collisionnel des ondes plasma

Partie principale de la permittivité longitudinale : la dispersion des ondes plasma.

Contribution des particules résonnantes : principe de causalité et amortissement Landau.

Cours 5 Instabilités d'un plasma hors équilibre

Instabilité d'un faisceau d'électrons dans un plasma.

Instabilité deux-faisceaux.

Instabilité de filamentation.

Partie 2

Les effets collisionnels dans les plasmas

Cours 1 Intégrales de collision de Fokker-Planck et de Landau

Collision binaire entre particules chargées, diffusion aux petits angles et intégrale de Fokker-Planck, diffusion et le frottement dans l'espace de phases, intégrale de collision de Landau, coupure aux grands et petits paramètres d'impact.

Cours 2

La fonction de distribution de l'équilibre et le théorème H de Boltzmann. Lois de conservation.

Echelles caractéristiques des collisions : collisions électron-ion, électron-électron et ion-ion. La relaxation de la quantité de mouvement et de l'énergie. Isotropisation et maxwellisation de la fonction de distribution.

Cours 3

Formes simples de l'intégrale de collision : intégrale de collision de Lorentz, collisions des particules rapides, intégrale BGK. Collisions des particules rapides dans un plasma, ralentissement des électrons et des ions rapides.

Cours 4

Conductivité électrique aux hautes et basses fréquences. Application à l'amortissement des ondes électromagnétiques et électrostatiques.

Cours 5

Conductivité thermique, formule de Spitzer et Harm. Transport de l'énergie par les électrons, onde thermique supersonique – solution auto-semblable.

Partie 3

Interaction du rayonnement avec la matière

Cours 1 : Introduction

Généralités sur l'équilibre thermodynamique et les états hors-équilibre thermodynamique dans les plasmas.

Equilibre Thermodynamique Local, statistique de l'équilibre thermodynamique. Equation de Saha, Equation de Planck de corps noir.

Autres types d'équilibre: Equilibre Coronal, Equilibre Collisionnel-Radiatif.

Cours 2 : Eléments de calcul des opacités

Couplage Rayonnement-Matière, Transfert Radiatif, Introduction des principales grandeurs radiatives, Etablissement de l'équation de transfert.

Cours 3

Plasmas optiquement minces et optiquement épais, Processus de diffusion dans les plasmas, Opacité de Planck et de Rosseland.

Cours 4

Equations de la hydrodynamique radiative, Classification des régimes, Relations thermodynamiques, Régime des petites perturbations: ondes acoustiques, Refroidissement radiatif: limites optiquement mince et épais.

Cours 5

Onde de Marshak - transport diffusif du rayonnement, Chocs optiquement épais et mince, Précurseurs radiatifs.

Partie 4

Propagation et absorption laser, interaction laser-plasma non-linéaire

Cours 1

Equations de Maxwell, dérivation de l'équation d'Helmholtz.

Cours 2

Puissance laser absorbée par absorption collisionnelle le long d'un rayon.

Début résolutions de l'équation d'Helmholtz : WKB et fonction d'Airy en incidence normale, et absorption collisionnelle, incidences normale et oblique (polarisation S).

Cours 3

Absorption résonnante (polarisation P) et force pondéromotrice.

Cours 4 et 5

Introduction aux instabilités paramétriques : oscillateur mécanique forcé, couplage à 3 ondes, notion des instabilités SBS et SRS.

4TNU903U Physique subatomique, nucléosynthèse et particules

Tsekhanovich Igor

Czajkowski Serge

Caillon Jean-Christophe

Structure du noyau et l'interaction nucléon-nucléon

1. Propriétés globales des noyaux : distribution de protons et neutrons et rayons nucléaires, masses, énergie de séparation et limites de stabilité des noyaux, densité des états excités et leur espacement moyenne, spin et parité des états fondamentaux et excités.
2. Propriétés électromagnétiques des noyaux : distribution non-sphériques de charge et formes oblate-prolate nucléaires, moments électrique quadripolaire et magnétique dipolaire des noyaux.
3. Rayonnement électromagnétique et désintégration des états excités : lois de conservation, dipôle classique et distribution angulaire, méthodes de mesures, probabilités de transitions, conversion interne, nature de l'isomérisme nucléaire, notion de séniorité.
4. Excitations collectives des noyaux : évidence expérimentale, déformation nucléaire statique et dynamique et paramétrisation de la forme, excitations vibrationnels et résonances géantes, excitations rotationnels, moment d'inertie et backbending, approximation adiabatique et structure générale des états excités des noyaux, super-déformation.

5. Modèle en couches pour les noyaux déformés : orientations des orbitales et nombres quantiques, diagrammes de Nilsson : signification et propriétés basiques, exemples d'utilisation.

Quelques éléments d'introduction sommaire à la nucléosynthèse stellaire

1. Introduction

Les objets célestes
Zoologie, diagramme HR, étoiles, nuages etc.
La question de l'origine de tous les éléments chimiques
Les briques élémentaires, la composition chimique de l'univers
L'origine nucléaire de tous les éléments
Abondance des éléments et énergie de liaison nucléaire

2. Préambule

BBNS ou la nucléosynthèse de la première heure
Bilan des réactions à l'équilibre avec premiers nucléons
Deux mots de mécanique stellaire

3. Les cycles pp

L'interaction faible au secours de l'impossible fusion de deux protons
Section efficace, distribution de vitesse et taux de réaction : le pic de Gamow
Les cycles pp et la synthèse de l'hélium

4. La fusion de l'hélium

Les murs $A=5$ et $A=8$
De l'hélium au carbone : une fusion à trois corps !

5. Au-delà du carbone

Les cycles CNO
Les cycles types CNO
Les captures alpha
La production de neutrons dans les étoiles: (α, n) et (γ, n)

6. Suite et fin des réactions de fusion dans les étoiles les plus massives

Fusions exoénergétiques successives jusqu'au maximum de la courbe d'Aston.
Supernova
Dispersion d'éléments lourds consécutive à une SN

7. Nucléosynthèse stellaire au-delà du fer

Les neutrons entrent en jeu
Deux processus de capture: s et r
Compétition entre la capture et la radioactivité bêta
Les sites, les nuclides et les points d'arrêts du processus s
Les sites, les nuclides et les points d'arrêt du processus r
Le processus r comme chronomètre de la supernova
La fission dans le processus r
Exemples de processus s et r sur Terre
Nucléosynthèse des nuclides déficients en neutrons
Les réactions (γ, n) , le processus rp, les réactions de spallation

Post-scriptum

Deux mots sur la mort des étoiles massives: SN, étoiles à neutrons, trous noirs

Introduction à la physique des particules

1. Particules élémentaires : familles des quarks et des leptons, nombres quantiques, Interactions fondamentales, notion d'échange.
2. Les hadrons : notions sur les groupes de symétrie, les baryons et les mésons dans le modèle des quarks, masses des quarks et des hadrons.
3. Particules relativistes de spin zéro et de spin $\frac{1}{2}$: l'équation de Klein-Gordon et l'équation de Dirac, densité de probabilité et densité de courant de probabilité, hélicité, états d'énergie négative, antiparticules.
4. Interactions électromagnétiques entre particules de spin zéro et entre particules de spin $\frac{1}{2}$, amplitude de diffusion et section efficace, interactions méson-méson et lepton-lepton, la charge électrique en QED.
5. Structure du nucléon : diffusion électron-nucléon, modèle de partons, spin du nucléon.

6. Annihilation électron-positron : résonances et production des hadrons non résonants.
7. Propriétés fondamentales de l'interaction forte : liberté asymptotique et le confinement.
8. Interaction faible : classification et caractéristiques générales, théorie de Fermi et interaction V-A, angle de Cabbibo et matrice CKM.
9. Théories de jauge et unification des interactions : symétries globales et locales, l'interaction électrofaible, le modèle standard.

4TNU902U Formation et évolution des systèmes astrophysiques

*Csengeri Timéa
Di Folco Emmanuel
Pierens Arnaud*

1. Hydrodynamique, Gravitation et Instabilités

I. Introduction

- Description statistique : fonction de distribution, équation de Boltzmann
- Description macroscopique : lois de conservation (masse, moment, énergie totale)
- Equations de Navier-Stokes, Bilans énergétiques
- bases de la magnéto-hydrodynamique (MHD)

II. Gravitation et équilibre hydrostatique

- Gravitation : potentiels et champs gravitationnels, équation de Poisson, distributions à symétrie sphérique, théorème du Viriel
- Equilibre hydrostatique : atmosphère isotherme, polytropes, équation de Lane-Emden, application à la structure stellaire

III. Instabilités astrophysiques

- Ondes de faible amplitude, d'amplitude finie
- Formation de chocs
- Instabilités gravitationnelles (Jeans, Tomme) et dans les fluides en rotation
- Instabilité de Kelvin-Helmoltz, instabilité convective, instabilité thermique

IV. Croissance et dynamique des grains dans les disques protoplanétaires

- Barrières de croissance et fragmentation
- Sédimentation verticale et dérive radiale des grains
- Instabilités dans les fluides de poussières
- Accrétion de cailloux

2. Physics and chemistry of the Interstellar medium & Star Formation

I. Interstellar medium (ISM)

- Introduction: history of ISM research, composition of the ISM
- Physics of the ISM, phases of the ISM
- Gas - ionised, neutral, molecular, different tracers
- Grains - origin, properties, evolution, emission of dust, spectral energy distribution
- Heating and cooling processes
- Galactic structure, surveys

II. Star formation

- Formation and evolution of dark clouds, Jeans instability, Bonnor-Ebert spheres
- Gravitational collapse, accretion and ejection processes, protoplanetary disks
- Protostellar evolution, observational phases (pre-stellar cores, Class 0, I, II et III), low- and high-mass star formation, protoclusters
- Pre-main sequence evolution, young clusters

III. Astrochemistry

- Initial chemical abundances, chemical processes in the ISM
- Gas phase processes, definition of reaction rates

- Processes on the grain surfaces, depletion
- Isotopic fractionation
- Chemical evolution and models: from the diffuse gas to protoplanetary disks

3. Formation planétaire et systèmes extra-solaires

Aborder la complexité des systèmes planétaires : du système solaire aux exoplanètes. Théorie : formation et structure des disques d'accrétion autour d'étoiles de la pré-Séquence Principale, formation et évolution des systèmes planétaires (des planètes telluriques aux géantes gazeuses). Observations : notions de base du transfert radiatif, application à la caractérisation des disques et planètes, méthodes de détection des systèmes extra-solaires.

- I. **Le Système Solaire et son histoire dynamique** : contraintes observationnelles sur les mécanismes à l'origine du Système Solaire (caractéristiques planétaires, distribution des petits corps, moment cinétique, datation) ; distribution de matière : la masse minimale de la Nébuleuse pré-solaire ; histoire dynamique : le modèle de Nice, le « Grand Tack », notion de migration planétaire.
- II. **Éléments de transfert du rayonnement** : grandeurs photométriques (intensité, flux, luminosité, distributions spectrales), absorption/émission/diffusion, épaisseur optique, équation du transfert (solution sans diffusion). Lois de l'équilibre thermique : lois de Kirchhoff, de Planck, approximations de Rayleigh-Jeans et de Wien, loi de Stefan, températures caractéristiques. Applications astrophysiques.
- III. **Exoplanètes** : principales méthodes de détection (imagerie directe, vitesses radiales, astrométrie, transits, micro-lentilles gravitationnelles) ; principe de détection, performances et limites, paramètres planétaires accessibles ; éléments de démographie exo-planétaire.
- IV. **Disques proto-planétaires** : formation des disques, disque mince à la Shakura-Sunyaev, viscosité turbulente, structures radiale et verticale des disques en densité et en température (mécanismes de chauffage), caractéristiques observationnelles des disques autour des étoiles jeunes.
- V. **Formation planétaire** : formation bi-modale des planètes telluriques et des géantes gazeuses par accrétion de cœurs, croissance des planétésimaux : section efficace de collision et focalisation gravitationnelle, sphère de Hill, masse d'isolement, accrétion de gaz emballée.

4TMN901U Instrumentation et Signaux

*Gobet Franck
Gratier Pierre*

A Instrumentation (20 h)

Chapitre 1 : la mesure d'un nombre d'événements, son erreur et sa propagation

- Position du problème objet du cours
- Etude d'une chaîne de mesure.
- Différentes variables aléatoires sous-jacentes liées au comptage ou intrinsèque au détecteur
- Distributions de probabilité d'une variable aléatoire
 - Valeur moyenne, variance et covariance
 - Distributions de probabilité en physique atomique ou subatomique
- Systèmes à 2 états + essais indépendants : loi binomiale
Grand nb d'essais et probabilité d'état faible : loi de poisson
Grande valeur moyenne : loi de Gauss
Ecart-type et largeur à mi-hauteur de la gaussienne
- L'erreur de mesure
 - L'erreur systématique
 - L'erreur aléatoire, statistique, lien avec la loi de Gauss
 - Propagation quadratique des erreurs statistiques
- Quelques applications : erreur sur une valeur moyenne, sur un nb d'événements nets, sur un rapport d'embranchement
- La limite de détection

Définition à partir des lois de Gauss de critères de détection ou non détection d'un phénomène (illustré sur l'exemple de prise de décision sur la présence ou non de radioactivité dans un échantillon).

Chapitre 2 : caractéristiques générales d'une chaîne de mesure

But : dégager les questions à se poser pour monter une chaîne de mesure pertinente

I) Choix du détecteur

a) Rappel des grandes familles (chambre à ionisation, semiconducteur, scintillateur, le bolomètre)

b) Sensibilité aux particules

Dépendance avec les sections efficaces d'interactions, la fenêtre d'entrée, le bruit électronique

II) La fonction de réponse du détecteur

Définition, moyens numériques pour la déterminer. Application sur un cas concret (analyse d'une manip faite au CELIA...)

III) La résolution en énergie

a) Définition et interprétation statistique via loi de Gauss

b) Facteur de Fano pour semiconducteur et chambre à ionisation

c) Effet du bruit électronique sur la résolution en énergie

IV) Temps mort d'une chaîne de mesure

2 configurations :

a) Système d'acquisition avec temps mort non extensible : quantification et correction

b) Système d'acquisition avec temps mort extensible : quantification et correction

Mesure du temps :

c) Méthode des 2 sources

d) Utilisation d'échelles conditionnées

Chapitre 3 : Chambre à ionisation

I) Principe et fonctionnement :

1) Le détecteur de base : 2 électrodes + gaz

2) Processus d'ionisation, nb moyen d'ionisation

3) Migration des charges

4) Les différents régimes de fonctionnement

II) Le signal de sortie

1) Théorème de Ramo

2) Tensions maximales

3) Forme temporelle du signal en régime proportionnel.

III) Applications : traditionnellement orienté autour de la mesure de trajectoire de particules : chambre à dérivées ; chambre à fil

Chapitre 4 : Le détecteur à scintillation

I) Intro

II) Les corps scintillants

1) Scintillateurs organiques

2) Scintillateurs inorganiques

3) Loi de Birks

4) Fluorescence vs phosphorescence : détermination de la nature de la particule incidente

III) Le photomultiplicateur

1) La photocathode

2) Les dynodes comme amplificateur d'électrons

Nécessité de générateur de tension stabilisé + courant de 10 mA

3) Le signal en sortie de dynode

Etude des différentes configurations en fonction de l'impédance de charge du PMT.

4) Application à la mesure de position

Chapitre 5 : le détecteur à semi-conducteur

I) Propriétés générales des semi-conducteurs intrinsèques et extrinsèques

II) La jonction PN

1) Principes généraux de la jonction PN, intérêt d'une polarisation inverse

2) Largeur de la zone de déplétion : modèle électrostatique 1D.

3) Applications aux détecteurs Si et Ge, alpha, électrons, gamma

En fonction des années un des 2, voir les 2 chapitres suivants :

Chapitre VI) Détecteur à cryogénie, le bolomètre

I) Principe de fonctionnement

II) Vers une mesure de température

Ou/et :

Chapitre VII) Transmission d'un signal dans un câble coaxial

I) Position du pb

- II) Modélisation du câble coaxial non dissipatif
Vitesse de propagation
Impédance du câble
- III) L'adaptation d'impédance sur une terminaison
Quelques applications, illustrations de ce qu'il faut faire et ne pas faire....

B. Signaux

Cours (4 x 2h40) :

1. Introduction : Comment confronter une théorie à des observations et comment exploiter au mieux les mesures réalisées avec un instrument ?
2. Fondements de la théorie des probabilités
3. Test d'une ou plusieurs hypothèses scientifiques
4. Estimation de la valeur d'une grandeur physique
5. Travailler avec la fonction d'une grandeur physique
6. Travailler avec un jeu de grandeurs physiques, notions de corrélation et de dépendance
7. Estimation d'une grandeur constante à partir d'un jeu de mesures
8. Ajustement d'un modèle sur un jeu de mesures
9. Numérisation de signaux analogiques
10. Analyse spectrale
11. Systèmes linéaires et filtrage de signaux
12. Aperçu de notions plus avancées

TP (4 x 2h40) :

1. Signaux, images, histogrammes et nuages de corrélation
2. Caractérisation du bruit de mesure d'un radiotélescope
3. Corrélation, auto-corrélation et somme de grandeurs
4. Observation d'une radio-source constante
5. Analyse spectrale de signaux discrets
6. Filtrage linéaire

4TPF003U UE Anglais scientifique

Karine Goyer
Lecteurs USA/GB

Cours magistraux en laboratoire de langues, avec enseignant et lecteurs/lectrices, et travail individuel sur article scientifique 20h
Auto-formation 5.5h

UE Option Physique nucléaire avancée

Tsekhanovich Igor
Smirnova Nadezda
Champion Christophe
Gobet Franck
Barberet Philippe
Bonneau Ludovic
Caillon Jean-Christophe

1. Découverte C++ & Géant 4
2. Mesure de sections efficaces (27 Al, production ray. X). Expérience sur AIFIRA et modélisation associée
3. Questions actuelles en physique subatomique
4. Expériences de détections ("basse radioactivité", rayonnement cosmique, etc.)

UE Option Astrophysique avancée

Guilloteau Stéphane
J.B. Marquette

*Reposeur Thierry
J.M. Huré
E. Di Folco
P. Gratier*

1. Elements de structure interne. Relations masse-rayon.
2. Radioastronomie & interférométrie (mm et submm) . Acquisition de données.
3. Techniques d'imagerie IR-opt.-UV et détections gamma. Expérimentations. Mission d'observation au Pic-du-Midi (partenariat OAMP).

Accompagnement

*Bercy Yasmine
Huré Jean-Marc*

Quel stage de Master 2 choisir ? Comment répondre à un appel à propositions de stage ? Projection d'une vidéo.

Comment se porter candidat sans appel à propositions ? Ecriture collective d'une lettre type Points sur i) les candidatures en stage, ii) l'après Master.

Rédaction des CV, version fr. Entretiens individuels

Rédaction des CV, version eng. Entretiens individuels

Ateliers d'écriture des CV et des lettres de motivation en anglais pour la recherche des stages à l'étranger (A.C Harrison/DLLC).

Bilan stages. L'après Master. Les concours de recrutement dans la recherche académique.

Entretiens individuels récurrents, ~ 2-3h/étudiants en moyenne :

- aide à la rédaction de mails et prise de contact,
- discussions sur les stratégies,
- aide au montage de dossiers spécifiques (candidature stage étrangers, PhD étranger, etc.)