

Master 2 Astronomie, Astrophysique et Dynamique Céleste
Année 2025-2026

Brochure des cours

Direction et secrétariats	page 3
Déroulement de l'année et modalités de contrôle des connaissances	page 4
Liste des enseignements	page 6
Descriptifs des différents cours	page 8

M2 AAIS : Direction et secrétariats

Equipe administrative

Sonia AKROUR (Secrétariat à Meudon) sonia.akrour@obspm.fr

Responsables pédagogiques

Gwenaël BOUÉ (Sorbonne Université) gwenael.boue@obspm.fr

Emeric BRON (Observatoire de Paris, PSL) emeric.bron@obspm.fr

Sonia FORNASIER (Université Paris Cité) sonia.fornasier@obspm.fr

Pierre GUILLARD (Sorbonne Université) guillard@iap.fr

François LEVRIER (Ecole Normale Supérieure, PSL) francois.levrier@ens.fr

Noël ROBICHON (Observatoire de Paris, PSL) noel.robichon@obspm.fr

Mathieu VINCENDON (Université Paris Saclay) mathieu.vincendon@universite-paris-saclay.fr

Pour contacter l'ensemble de ces personnes
(équipe administrative et responsables pédagogiques) :
responsables.m2r@obspm.fr

Site web de la formation : <http://ufe.obspm.fr/Master/Master-2-Recherche/>

Site Moodle de la formation : <https://moodle.psl.eu/>

Déroulement de l'année et modalités de contrôle des connaissances

L'année de M2 est divisée en deux semestres : M2S1 (S3) et M2S2 (S4). Chaque semestre est validé par l'obtention de **30 ECTS**. Le Master est obtenu lorsque les deux semestres ont été validés.

La présence à tous les enseignements et activités pédagogiques proposés (cours, TP, projets méthodologiques, réunions d'information, visites de laboratoires, etc.) est obligatoire.

Liste des UE

M2S1			ECTS
UE "Fondamentales"	(F01 à F07)	F	12
UE "Thématiques, Ouverture & Insertion professionnelle"	(T01 à T14 & activités obligatoires)	T	9
UE "Méthodologiques"	(CTP01 et CTP02)	CTP	6
UE "Projet Méthodologique"	(M01 à M11)	M	3
M2S2			ECTS
UE "Stage d'observation"		O	3
UE "Stage de recherche"		S	27

Evaluations

Le contrôle des connaissances comprend :

- un ensemble d'épreuves portant sur les UE fondamentales (**F**), thématiques (**T**) et méthodologiques (**CTP**).
- un ensemble d'évaluations portant sur les UE de projet méthodologique (**M**) et de stage d'observation (**O**).
- une évaluation portant sur le stage de recherche (**S**) : rapport écrit et soutenance orale.

Chaque étudiant(e) suit obligatoirement :

- les 2 cours-TP "Analyse de données, Méthodes statistiques & Machine-learning" et "Méthodes numériques & Calcul scientifique"
- 4 cours au choix parmi les 7 cours fondamentaux
- 5 cours au choix parmi les 14 cours thématiques
- 1 projet parmi les 11 projets méthodologiques

Le choix des cours en début d'année engage pour l'examen et doit être validé par l'un des responsables pédagogiques.

Les étudiant(e)s doivent donc communiquer leurs choix :

- au plus tard le **15 septembre 2025** pour les projets méthodologiques ;
- au plus tard le **15 septembre 2025** pour les cours fondamentaux et thématiques¹ ;
- au plus tard le **19 octobre 2025** pour le stage d'observation.

Constitution des notes

- La note **F** est constituée de la moyenne des 4 notes obtenues aux examens des cours fondamentaux suivis.
- La note **T** est constituée de la moyenne des 5 notes obtenues aux examens des cours thématiques suivis.
- La note **CTP** est constituée de la moyenne des 2 notes obtenues aux évaluations des deux cours-TP.
- La note **M** est constituée de la note obtenue à l'évaluation du projet méthodologique suivi.
- La note **O** est constituée de la note obtenue à l'évaluation du stage d'observation suivi.
- La note **S** est constituée de la note obtenue à l'évaluation du stage de recherche effectué.

1. Chaque étudiant formulera son choix via un document partagé mis en place par les responsables pédagogiques. Pour les cours qui commencent après cette date limite, des modifications de choix seront envisageables si elles sont bien argumentées et validées par les responsables pédagogiques.

Les notes du M2S1 (N_1) et du M2S2 (N_2) sont calculées avec les formules suivantes :

$$N_1 = 0.4F + 0.3T + 0.2CTP + 0.1M \qquad N_2 = 0.9S + 0.1O$$

La note finale du M2 est calculée avec la formule suivante :

$$N = 0.5N_1 + 0.5N_2$$

Attribution des ECTS

- Pour les UE **F**, **CTP**, **M**, **O** et **S** : l'obtention d'une note supérieure ou égale à la moyenne conduit automatiquement à l'obtention des ECTS correspondantes ;
- pour l'UE **T** : la même règle s'applique avec la condition supplémentaire d'avoir participé aux activités d'ouverture et de préparation de l'insertion professionnelle obligatoires figurant au planning (demi-journée de visite des laboratoires d'astrophysique en Île-de-France et demi-journée de compte-rendu de ces visites, exposé sur l'organisation de la recherche en astrophysique en France et ses financements et demi-journée sur l'après-Master 2).

Règles générales du contrôle des connaissances

- **Écrits et oraux** : les épreuves seront écrites ou orales, selon les modalités définies par chaque enseignant(e).
- **Capitalisation** : capitalisation des notes des UE (Fondamentales, Thématiques, Méthodologiques, Stage).
- **Compensation** : entre les éléments constitutifs d'une UE et entre les UE d'un même semestre. Une compensation entre le M2S1 et le M2S2 peut être accordée, à l'appréciation du jury.
- **Rattrapage** : tout(e) étudiant(e) qui a obtenu moins de la moyenne à un semestre peut passer une session de rattrapage. Cette deuxième session aura lieu au moins deux mois après la première. L'étudiant(e) ne repasse que les épreuves des UE où il/elle a obtenu moins de la moyenne. Dans ces UE, il/elle ne repasse que les examens des éléments constitutifs où il/elle n'a pas eu la moyenne. La note finale est la note du rattrapage. L'indication d'une note de seconde session est portée sur le relevé de notes.

Liste des enseignements 2025-2026

Cours fondamentaux : 4 cours à choisir parmi 7

Intitulé	Enseignant(s)	
F01 - Principes physiques des observations	M. Ollivier, R. Galicher, G. Perrin, P. Kervella	p. 8
F02 - Gravitation classique et Mécanique Hamiltonienne	G. Boué	p. 9
F03 - Gravitation relativiste	C. Le Poncin-Lafitte, M.-C. Angonin	p. 10
F04 - Astronomie fondamentale et systèmes de référence	S. Lambert, C. Bizouard	p. 12
F05 - Transfert de rayonnement et interactions matière-rayonnement	T. Fouchet	p. 14
F06 - Dynamique des fluides astrophysiques	M. González	p. 15
F07 - Physique stellaire	R.-M. Ouazzani, J. Marques	p. 16

Cours thématiques : 5 cours à choisir parmi 14

Intitulé	Enseignant(s)	
T01 - Hautes énergies et Radioastronomie	J. Girard, A. Zech	p. 17
T02 - Planètes et petits corps : surfaces et atmosphères	T. Bertrand, M. Vincendon	p. 18
T03 - Exoplanètes	A. Cassan	p. 19
T04 - Physique solaire	S. Masson	p. 20
T05 - Plasmas astrophysiques	L. Griton, A. Zaslavsky	p. 22
T06 - Objets compacts et phénomènes associés	F. Daigne	p. 24
T07 - Milieu interstellaire et formation des étoiles	F. Levrier	p. 25
T08 - Physique des galaxies	A. Hallé, M. Haywood	p. 26
T09 - Cosmologie	B. Semelin	p. 27
T10 - Géodésie	P. Bonnefond, A. Bourgoïn	p. 28
T11 - Processus non-thermiques et approche multi-messagers	S. Chaty	p. 29
T12 - Dynamique galactique	P. Di Matteo, J.-P. Marco	p. 31
T13 - Dynamique orbitale	F. Deleflie	p. 33
T14 - Astrochimie et Exobiologie	D. Baklouti	p. 35

Cours-TP méthodologiques obligatoires

Intitulé	Responsable(s)	
CTP01 - Analyse de données, méthodes statistiques et "Machine learning"	K. Benabed	p. 37
CTP02 - Méthodes numériques et Calcul scientifique	R. Belmont	p. 38

Projets méthodologiques : 1 projet à choisir parmi 11

Intitulé	Responsable(s)	
M01 - Projet observationnel	P. Gallais, E. Gendron, E. Huby, J.-M. Martin, M. Montargès	p. ??
M02 - Projet observationnel	P. Gallais, E. Gendron, E. Huby, J.-M. Martin, M. Montargès	p. ??
M03 - Projet observationnel	P. Gallais, E. Gendron, E. Huby, J.-M. Martin, M. Montargès	p. ??
M04 - Projet expérimental	C. Lantz, Z. Djouadi	p. 41
M05 - Projet d'analyse de données	F. Cangemi, A. Coleiro	p. 42
M06 - Projet d'analyse de données	E. Habart, P. Guillard	p. 44
M07 - Projet d'analyse de données	S. Fornasier	p. 46
M08 - Projet d'analyse de données	M. Douspis	p. 47
M09 - Projet de modélisation numérique	F. Le Petit, Z. Meliani, Y. Rasera	p. ??
M10 - Projet de modélisation numérique	F. Le Petit, Z. Meliani, Y. Rasera	p. ??
M11 - Projet de modélisation numérique	F. Le Petit, Z. Meliani, Y. Rasera	p. ??

Stage d'observation : 1 stage à choisir parmi 4

Intitulé	Responsable(s)	
O01 - Stage d'observation à l'OHP : complémentarité sol-espace	H. Dole & N. Robichon	p. 49
O02 - Stage d'observation à l'OHP : instrumentation & observation	P. Gallais & A. Zech	p. 50
O03 - Stage d'observation en radioastronomie à la station de Nançay		p. 51
O04 - Stage d'observation en radioastronomie millimétrique à l'IRAM	P. Guillard	p. 52

Stage de recherche

F01 Principes Physiques des Observations

Marc Ollivier, IAS, Université Paris-Saclay (marc.ollivier@ias.u-psud.fr)
Raphaël Galicher, LIRA, Université Paris Cité (raphael.galicher@obspm.fr)
Guy Perrin, LIRA, Observatoire de Paris (guy.perrin@obspm.fr,)
Pierre Kervella, LIRA, Observatoire de Paris (pierre.kervella@obspm.fr)

Objectifs

Aborder les bases des techniques d'observations optiques et IR, les instruments associés et leur utilisation en vue de pouvoir rédiger et justifier des demandes de temps d'observation : principes de bases, modes instrumentaux, outils d'évaluation des performances (observables, ETC, évaluation des SNR...)

Thèmes abordés – Déroulement

Autres informations

1. Les messagers astrophysiques - spectre électromagnétique - processus physiques et sources associées,
2. Repérage des objets sur le ciel, astronomie de position, référentiels d'espace et de temps et instruments de mesure,
3. Formation d'image à travers un instrument optique : diffraction lumineuse, fonction de transfert optique, aberrations de la surface d'onde (turbulence atmosphérique, aberrations optiques),
4. Principe de fonctionnement des différents systèmes d'optique adaptative (SCAO, GLAO, LTAO, MCAO, MOAO)
5. Imagerie haute dynamique : coronagraphie, imagerie différentielle, minimisation du résidu stellaire coronographique
6. Interférométrie optique : principes, effets de la turbulence atmosphérique, interférométrie monomode, réduction et étalonnage des données, utilisation des visibilité et phases, principes de la reconstruction d'images, exemples de résultats
7. Détection des photons, photométrie, estimation de la qualité des observations, rapport signal/bruit, performances d'un instrument, bilan photométrique
8. Détection : détection cohérente et incohérente, les grandes familles de détecteurs associés,
9. Diagnostic spectroscopique et instrumentation associée, spectrographie basse, moyenne et haute résolution, spectrographie multi-objets, spectrographie intégrale de champ, spectro-imagerie .

Pré-requis

Cours avec exercices d'illustration. Support de cours : planches de cours, corrigé des exercices disponibles sur le Moodle du master.

Goût pour l'expérimentation et l'instrumentation, théorie de la mesure, optique géométrique et physique, statistiques. Connaissances de base des processus d'interaction rayonnement - matière

F02 Gravitation Classique & Mécanique Hamiltonienne

Gwenaël Boué, LTE, Sorbonne Université (gwenael.boue@obspm.fr)

Objectifs

Le cours a pour but de fournir les outils de base qui permettront de mieux comprendre les interactions dynamiques dans les systèmes gravitationnels, avec un accent sur les systèmes planétaires. Le cours vise aussi à présenter les outils les plus efficaces pour la mise en forme analytique et numérique des problèmes généraux rencontrés dans les systèmes dynamiques conservatifs.

Thèmes abordés – Déroulement

Le cours est divisé en trois grandes parties comme suit :

1. Introduction à la mécanique Hamiltonienne (3 séances)

- Formalismes Lagrangien et Hamiltonien
- Structure symplectique et changement de variables canoniques
- Flot des systèmes Hamiltoniens, espace des phases et intégrateurs symplectiques

interrogation de 30 min sur la première partie (15% de la note)

2. Problème planétaire à N corps (4 séances)

- Problème à deux corps et développements classiques
- Construction des variables canoniques de Delaunay
- Problème planétaire : modèle séculaire de Lagrange-Laplace
- Problème à 3 corps hiérarchiques, effet Kozai

interrogation de 30 min sur la première partie (15% de la note)

3. Dynamique non-intégrable (3 séances)

- Théorie des perturbations
- Chaos et instabilités
- Analyse en fréquence

examen final de 2 heures (70% de la note)

Autres informations

Le cours est accompagné d'exercices dont certains pourront être résolus en séance. L'évaluation est composée de deux interrogations de 30 min et d'un examen final de 2 heures.

Pré-requis

Il est fortement conseillé d'avoir au moins suivi un cours de méthodes mathématiques pour la physique niveau L3.

F03 Gravitation relativiste

Christophe Le Poncin-Lafitte, LTE, Observatoire de Paris (christophe.leponcin-lafitte@obspm.fr)
Marie-Christine Angonin, LTE, Sorbonne Université (m-c.angonin@obspm.fr)

Objectifs

Thèmes abordés – Déroulement

Présentation des bases de la relativité générale en développant les applications astrophysiques et les tests fondamentaux de la théorie. Les compétences acquises durant ce cours donnent les outils de base pour permettre d'effectuer la modélisation d'un phénomène de manière à contraindre les observables associées. Plusieurs cours traitent des objets compacts et de leur environnement et développent la théorie linéaire des ondes gravitationnelles en lien avec leur détection. Ce cours constitue aussi une introduction pour le cours de cosmologie.

Autres informations

1. Contexte général et cadre géométrique
Mots clés : espace-temps, principe d'équivalence, variété, tenseur, dérivation covariante, métrique
2. Physique dans l'espace-temps
Mots-clés : ligne d'univers, transformation de Lorentz, cinématique, dynamique
3. Electromagnétisme
Mots-clés : équations de Maxwell, champs, trajectoire d'une particule chargée
4. Gravitation relativiste
Mots-clés : tenseur énergie-impulsion, géodésique, équations d'Einstein
5. Cosmologie
Mot-clé : métrique de Friedmann-Robertson-Walker, équations de Lemaître, paramètres cosmologiques
6. Métriques d'une masse ponctuelle
Mots-clés : métriques de Schwarzschild et de Kerr, orbites de particule massive et de photon
7. Trous noirs et objets compacts
Mot-clé : équation de Tolman–Oppenheimer–Volkoff
8. Ondes gravitationnelles
Mots-clés : linéarisation des équations d'Einstein, théories linéaires, jauge TT, principe de détection
9. Observables, cas du Système solaire
Mots-clés : tétrades, référentiels localement inertiels, formalismes à Paramètres Post-Newtoniens, tests classiques

Pré-requis

Des documents pédagogiques de type poly de cours et exercices seront disponibles sur le moodle. Le cours est en français, mais certains documents pourront comporter de l'anglais. Des exercices sont proposés pour accompagner chaque cours. Des corrections sommaires sont systématiquement données pour ces exercices et la correction étendue d'un ou plusieurs exercices est exposée dans le cours suivant (afin de laisser les étudiants chercher par eux-mêmes). Les illustrations et exemples qui accompagnent les cours (slides) sont aussi déposées sur moodle.

L'examen est consiste en un travail écrit en temps limité. Un travail sous la forme de résolution d'exercices en séance est proposé en cours de semestre pour compléter l'évaluation.

Avoir suivi un cours sur la relativité restreinte est très vivement conseillé. Les bases de mathématiques (matrices...), d'électromagnétisme et de mécanique doivent être maîtrisées.

F04 Astronomie fondamentale et systèmes de référence

Sébastien Lambert, LTE, Observatoire de Paris (Sebastien.Lambert@obspm.fr)

Christian Bizouard, LTE, Observatoire de Paris (christian.bizouard@obspm.fr)

Objectifs

Ce cours introduit le cadre conceptuel et les méthodes permettant de déterminer les positions ou les mouvement des corps célestes qui, non seulement fondent l'astrophysique ou la cosmologie, mais sont aussi cruciaux pour la navigation spatiale ou le positionnement sur Terre. A l'aune des techniques d'observation modernes, cette discipline, appelée astronomie fondamentale, répond à cette double quête aussi pratique que philosophique : "où sommes-nous, quand sommes-nous?", même si elle n'en tire que des réponses toutes relatives. A cette fin elle établit d'abord les systèmes de coordonnées d'espace et de temps permettant de déterminer le mouvement des astres depuis la Terre ou d'une sonde spatiale.

Depuis le 18ème siècle un système céleste ne se cantonne plus à un maillage d'étoiles fixes entre elles, il doit s'abstraire de leurs mouvements relatifs, dont une partie est provoquée par le mouvement de la Terre elle-même (aberrations diurne et annuelle, parallaxe annuelle) ou du système solaire dans la galaxie (aberration séculaire) et l'autre partie reflète leurs mouvements propres le cas échéant. De même, depuis les années 1960, le système terrestre ne saurait se limiter à un réseau de plots géodésique en béton, mais doit s'abstraire des mouvements de la croûte en surface, qu'ils soient d'origine maréale², tectoniques, ou induit par les variations de charges hydro-atmosphériques en surface.

Depuis la Terre tout astre voit sa position modifiée par la rotation de la terrestre, et si l'on veut déterminer sa position par rapport au sol à partir de sa position céleste, ou vice versa, on doit disposer de la transformation de rotation entre systèmes de coordonnées céleste et terrestre. C'est pourquoi la rotation terrestre, plus précisément de la croûte terrestre, dans l'espace, rentre dans le champ de l'astronomie fondamentale.

Comme l'objet principal de cette discipline est de rapporter le mouvement des astres, toute observation se doit d'être datée dans le temps. A cette fin on utilise une échelle de temps qui, à l'aune de la relativité, est propre au référentiel d'espace. Pour le système céleste, selon que l'on adopte le barycentre du système solaire ou le centre de masse de la terre, on prend TCB (Temps Coordonnée Barycentrique) ou TCG (Temps coordonnée barycentrique). Pour une observation sur Terre, c'est TAI (Temps Atomique International) ou sa version "civile" UTC (Universal Time Coordinated), synchronisée à 0,9 s avec le temps de la rotation de la Terre. Les praticiens de la Mécanique céleste lui préfèrent le Temps Terrestre ($TT = TAI + 32,184$ s), qui poursuit l'ancienne échelle de temps newtonnienne des éphémérides (TE).

Par ailleurs la technologie des horloges atomiques a rendu possible la mesure des durées avec une précision extrême, inférieure à 0.01 nanoseconde. A la vitesse de la lumière cela représente une précision de $3 \cdot 10^8 \times 10^{-11} = 0.003$ m. Une telle précision sur la distance de sources radio ou optiques fonde les techniques *astro-géodésiques*³ modernes qui ont révolutionné notre connaissance des mouvements terrestres, qu'il s'agisse de la rotation globale ou des déformations locales. Pratiquée au sol, l'astrométrie optique était obérée par les turbulences et a été largement abandonnée. En conséquence on l'a déplacé à bord de satellites artificiels : Hipparcos (1990-1992) puis Gaïa (2013-) ont permis de fournir les positions des étoiles jusqu'au centre galactique, ainsi que d'en affiner les mouvements propres avec une précision inégalée. Ainsi, si l'astrométrie optique n'a plus vocation géodésique, elle n'en demeure pas moins fondamentales en astrophysique.

Thèmes abordés – Déroulement

Ce cours comporte 7 parties :

2. Néologisme signifiant "relatif aux marées".

3. L'astro-géodésie consiste à déterminer la forme ou les déformations de la Terre, par extension son potentiel gravitationnel à partir de l'observations de la position des astres ou des satellites artificiels. Le VLBI est la technique astro-géodésique la plus emblématique.

1. Systèmes spatio-temporels sur un plan conceptuel
2. Echelles de temps présentées dans une perspective historique
3. Transformation de rotation entre système céleste et terrestre, c'est-à-dire la description cinématique de la rotation terrestre
4. Réalisation des systèmes célestes et terrestre et détermination des variations de la rotation terrestre au moyen des techniques astro-géodésique. Cas du VLBI.
5. Réalisation et applications des repères célestes internationaux radio ICRF3 et radio-optique ICRF4
6. Variations astronomiques de la rotation terrestre
7. Irrégularités géophysiques de la rotation terrestre

Autres informations

Organisations de TD pour assimiler les cours ou parties du cours données sous la forme de TD.

Pré-requis

Pré-requis : Mécanique du solide

F05 Transfert du rayonnement et interaction matière–rayonnement

Thierry Fouchet, LIRA, Sorbonne Université (thierry.fouchet@obspm.fr)

Objectifs

Electromagnetic radiation carries most of the information that allows us to study astrophysical objects and the Universe in general. It also often plays a dominant role in the transport of energy within astrophysical objects. Its study is therefore essential both for the observation and the modeling of astrophysical objects. In this course, we will first examine the transport of radiation and the quantities used to describe it. We will provide basic solution of the radiative transfer equation for some specific environments, like dust particles in the ISM, or for stellar and planetary atmospheres. We will also study the interaction between matter and radiation with atoms and molecules, to understand how radiation is produced, scattered, and absorbed by matter.

Thèmes abordés – Déroulement

Introduction (1 session)

1. The sky at all wavelengths
2. Sources of radiation in astrophysics

Radiative Transfer (4 sessions)

1. Definition of concepts and quantities (specific intensity and its moments)
2. Transfer equation, absorption, optical depth, emissivity
3. Blackbody radiation and gas-photon equilibrium (Maxwell and Saha laws, LTE)
4. Scattering (Rayleigh, Mie) and transfer equation with scattering
5. Eddington approximation – Rosseland opacity – Stellar structure – Greenhouse effect

Emission Processes (2 sessions)

1. Source function calculation with departure from LTE
2. Spectral line shapes (Lorentz – Doppler – Voigt)

Wave–Matter Interaction (3 sessions)

1. Atomic and molecular structure (hydrogen, multi-electron atoms, ions, molecules)
2. Rabi oscillation, selection rules, Einstein coefficients
3. Spectral line shapes (Lorentz – Doppler – Voigt)

Autres informations

The lecture slides will be distributed and made available on Moodle.
A course booklet will also be available on Moodle.
Exercises will be corrected during class.

Pré-requis

Scattering and transport processes. Population balance. Electromagnetism. Basics of quantum physics.

F06 Dynamique des fluides astrophysiques

Matthias González, AIM, Université Paris Cité (matthias.gonzalez@cea.fr)

Objectifs

Ce cours présente les bases de l'hydrodynamique et de la magnéto-hydrodynamique (MHD) qui est l'étude des fluides magnétisés. De nombreux phénomènes astrophysiques peuvent être décrits dans ce cadre : dynamique des atmosphères stellaires, du milieu interstellaire, de la formation des étoiles, du gaz dans les disques galactiques et les disques d'accrétion (AGN, étoiles jeunes...), formation des grandes structures.

Thèmes abordés – Déroulement

Introduction (2 séances)

- contexte astrophysique, description fluide (Euler/Lagrange)
- équations de conservation, Navier-Stokes

Hydrodynamique (4 séances)

- propriétés des écoulements (hydrostatique, vorticité, incompressibilité, fluides parfaits)
- ondes sonores, chocs et relations de Rankine-Hugoniot (avec TD)
- instabilités de Kelvin-Helmholtz, Jeans (avec TD)
- turbulence (Reynolds, Kolmogorov)

Magnéto-hydrodynamique (4 séances)

- équations MHD (hypothèses, tension et pression magnétique, champ gelé en MHD idéale)
- ondes d'Alfvén, ondes magnétosoniques rapides et lentes, chocs MHD (avec TD)
- théorème du Viriel en MHD et application à la formation stellaire
- MHD non idéale, dynamo

Autres informations

Le cours est accompagné d'exercices mis à disposition à l'avance et qui seront corrigés en séance. Des annales sont également fournies. Ces documents sont en ligne sur le site Moodle du cours.

Pré-requis

Aucun pré-requis.

F07 Physique stellaire

Rhita-Maria Ouazzani, LIRA, Observatoire de Paris (rhita-maria.ouazzani@obspm.fr)
João Marques, IAS, Université Paris-Saclay (joao.marques@ias.u-psud.fr)

Objectifs

Dans ce cours de Physique stellaire, nous allons étudier en profondeur les caractéristiques physiques internes des étoiles ainsi que leur évolution au cours du temps. Dans notre description de la structure des étoiles, nous nous attacherons à analyser et comprendre les processus physiques sous-jacents. En général, nous nous concentrerons sur les étoiles solitaires, depuis la pré-séquence principale, jusqu'au stade de naine blanche, ou supernova. Ce cours sera constitué de deux parties, Structure stellaire puis Évolution stellaire.

Thèmes abordés – Déroulement

Introduction générale, caractérisation des étoiles (une séance de cours).

La modélisation stellaire (une séance de cours).

- Équations générales de la structure interne stellaire dans le cas standard.
- Temps caractéristiques de la structure et de l'évolution stellaire, lois d'échelle, ordres de grandeurs.
- Le théorème du viriel.

Les ingrédients physiques de la modélisation stellaire (deux séances de cours).

- Équations d'état, opacités, convection, réactions nucléaires.

Au delà de la modélisation standard (deux séances de cours).

- Traitement de la convection.
- La rotation des étoiles et ses effets sur la structure et évolution des étoiles.
- Champ magnétique, activité stellaire

Évolution stellaire (trois séances de cours, une séance de TP).

- Formation stellaire.
- Évolution des étoiles de faible masse.
- Évolution des étoiles massives.
- TP : utilisation d'un code d'évolution stellaire pour calculer des modèles.

Autres informations

Une séance de TP ainsi qu'un devoir maison sont prévus. Le cours est accompagné d'un polycopié de cours. Le polycopié contient des exercices de travaux dirigés qui ne seront pas corrigés en cours. Les corrigés ne seront pas fournis. Nous vous encourageons à les faire de votre côté, et venir en discuter à la fin du cours. Plusieurs documents seront fournis sur le site Moodle du cours, en particulier les supports de présentation.

Pré-requis

Aucun pré-requis indispensable.

T01 Hautes énergies et radioastronomie

Julien Girard, LIRA, Université Paris Cité (Julien.Girard@obspm.fr)

Andreas Zech, LUX, Observatoire de Paris (Andreas.Zech@obspm.fr)

Objectifs

En se basant sur les notions acquises en F01, ce cours donne une introduction plus approfondie à l'instrumentation, aux techniques d'observation et à la réduction et analyse de données des domaines d'astronomie qui se trouvent aux deux limites extrêmes du spectre électromagnétique : la radioastronomie (notamment imagerie avec les interféromètres modernes) d'un côté et l'astrophysique aux hautes énergies (astronomie X, gamma, très hautes énergies) de l'autre. Une séance sera aussi dédiée aux "multi-messagers" de haute énergie (rayons cosmiques, astro-neutrinos).

Thèmes abordés – Déroulement

1. Les fondamentaux de la radioastronomie (*~ 2 séances*)
 - Survol des processus d'émissions en radio
 - notions fondamentales sur les antennes
 - Phénomènes de propagation : de l'émission à la mesure du signal
 - Chaîne d'acquisition : de l'enregistrement à l'exploitation du signal
2. Radio astronomie moderne, les réseaux d'antennes et l'Imagerie (*~ 2 séances*)
 - introduction : au-delà de l'antenne unique
 - image et transformée de Fourier
 - imagerie par synthèse d'ouverture (interféromètre à N antennes)
 - les enjeux de la radioastronomie moderne
3. Télescopes spatiaux en rayons X et gamma (*~ 1,5 séances*)
 - interactions photon-matière : photo-absorption, diffusion Compton, production de paires
 - télescopes et détecteurs pour rayons X et rayons gamma
 - principes de la réduction des données
4. Télescopes Cherenkov et détecteurs de grand champ au sol (*~ 1,5 séances*)
 - la physique des gerbes atmosphériques
 - fonctionnement des télescopes Cherenkov et réduction des données
 - fonctionnement de détecteurs de grand champ et réduction des données

Autres informations

Support de cours au moins partiellement en anglais. Des documents utiles sont fournis sur le site Moodle du cours. Des annales d'examen seront disponibles. Proposition d'exercices pendant le cours. TP numérique de simulation dans la partie radio. Examen final.

Pré-requis

Il est recommandé d'avoir suivi le cours F01. Il est par ailleurs fortement conseillé d'avoir suivi le cours F05.

T02 Planètes et petits corps : surfaces & atmosphères

Mathieu Vincendon, IAS, Université Paris-Saclay (mathieu.vincendon@universite-paris-saclay.fr)
Tanguy Bertrand, LIRA, Observatoire de Paris (tanguy.bertrand@obspm.fr)

Objectifs

- Expliquer les grands enjeux de la recherche en planétologie.
- Caractériser les propriétés et les mécanismes d'évolution des surfaces au sein du Système solaire.
- Justifier les principales caractéristiques des atmosphères planétaires à l'aide de grands principes généraux.
- Illustrer tous ces concepts par des exemples : planètes telluriques (Mercure, Venus et Mars), géantes gazeuses et glacées et leurs satellites (Jupiter, Europe, Titan...), petits corps (astéroïdes et comètes), exoplanètes.

Thèmes abordés – Déroulement

Le cours est composé de 7 séances de 3 heures : 4 séances sont dédiées aux surfaces et enseignées par Mathieu Vincendon, 3 séances sont dédiées aux atmosphères et enseignées par Tanguy Bertrand.

- Séance 1 - La composition élémentaire des surfaces telluriques : composition observée et mécanismes à l'origine de cette composition. Espèces réfractaires et volatiles : séquence spatiale et temporelle de condensation lors de la formation planétaire, cas particulier du carbone.
- Séance 2 - La planète Mercure : mécanismes à l'origine du noyau de fer géant et des espèces volatiles en surface. Grains et comètes : composition, origine, répartition et mobilité spatiale dans le Système solaire.
- Séance 3 - Les satellites glacés : composition, formation, origine et propriétés des océans internes. Océans terrestres : contraintes isotopiques sur l'origine de l'eau.
- Séance 4 - Les astéroïdes carbonés hydratés : origine, formation, exploration, composition. Processus d'altération aqueuse sur Mars : conditions de formation des minéraux observés, conséquences sur le climat passé.
- Séance 5 - Introduction à la physique des atmosphères, grands principes simples gouvernant les climats planétaires, habitabilité et évolution des atmosphères, applications dans les environnements des atmosphères du Système Solaire et exoplanétaires.
- Séance 6 - Bilan radiatif dans les atmosphères, impact des changements de phase et formation de nuages, chimie et photochimie (espèces chimiques présentes dans les atmosphères planétaires et les processus qui les font varier dans l'espace et dans le temps). Aperçu des différentes méthodes d'observation.
- Séance 7 - Dynamique de l'atmosphère, équations de Navier-Stokes, circulation atmosphérique à grande et moyenne échelle, ondes et tourbillons à plus petite échelle.

Autres informations

L'enseignement est principalement composé de cours magistraux au tableau. Des exercices sont également proposés. Les annales corrigées des derniers examens sont fournies. L'évaluation est basée sur deux épreuves :

- (1) Travail individuel sur article (35%) : chaque étudiant choisi un article parmi une liste et dispose de plusieurs semaines pour préparer une soutenance orale (présentation : 5 minutes ; questions : 10 minutes).
- (2) Examen écrit (65%) : épreuve sur table d'1h30 avec calculatrice et fiche mémoire manuscrite (une feuille A4 recto-verso).

Pré-requis

Pas de pré-requis indispensables pour la partie surface. Pour la partie atmosphère, des connaissances de base en mécanique des fluides (F06 ou cours d'introduction de niveau L3/M1) et en thermodynamique (cours de Licence) sont nécessaires.

T03 Exoplanètes

Arnaud Cassan, IAP, Sorbonne Université (cassan@iap.fr)

Objectifs

Ce cours propose une introduction détaillée des principales techniques de détection d'exoplanètes et des scénarios de formation planétaire. Les propriétés des systèmes exoplanétaires sont présentées à l'aune des dernières découvertes, qu'il s'agisse d'objets individuels et ou de populations planétaires.

Thèmes abordés – Déroulement

Introduction (une séance).

- Brève histoire des idées sur la formation du Système solaire et paradigme pré-exoplanètes.
- Découvertes des premières exoplanètes.
- Nouveaux paradigmes.

Techniques de détection des exoplanètes (deux séances et demie).

- Détection par imagerie directe.
- Détection par mesure de vitesses radiales.
- Détection par transit.
- Détection par effet de microlentille gravitationnelle.
- Détection par astrométrie.

Propriétés des planètes et des systèmes planétaires (une séance).

- Panorama statistique des détections.
- Comment accéder à certaines propriétés physiques des exoplanètes ?
- Sur une typologie des exoplanètes.
- Exploration des configurations des systèmes exoplanétaires.

Scénarios de formation planétaire (deux séances).

- Introduction : des nuages moléculaires aux disques protoplanétaires.
- Formation des planétésimaux et évolution dynamique dans le disque.
- Paradigme de formation par accréition d'un cœur rocheux : planètes telluriques et planètes géantes.

Évolution des systèmes planétaires (une demi-séance).

- Phénomène de migration orbitale.
- Phase post-gazeuse et restructuration finale des systèmes planétaires (dont Système solaire).
- Conclusion : vers une exoplanétologie.

Autres informations

Séances de cours sur diapositives, ponctuées de nombreux moments d'interactivité. Documents présentés en cours ainsi que fiches de compléments techniques mis en ligne sur Moodle.

Pré-requis

Notions de base en mécanique du point, mécanique des fluides, corps noir, optique géométrique et ondulatoire.

T04 Physique solaire

Sophie Masson, LPP, Observatoire de Paris (Sophie.Masson@obspm.fr)

Objectifs

Ce cours propose d'étudier l'activité solaire et les processus physiques au coeur de celle-ci, ainsi que son impact sur l'héliosphère : génération/émergence du champ magnétique à la surface de notre étoile, éruptions/éjections de matière associées, propagation dans le milieu interplanétaire. Les principales observations (imagerie, données de sondes in situ), la façon de les interpréter et la physique à l'œuvre des phénomènes sera étudiée.

Thèmes abordés – Déroulement

Partie I : Les processus physiques

- **Chapitre 1 : Introduction - Le Soleil et son activité eruptive**
 - Carte d'identité du Soleil
 - La couronne solaire
 - TP Jhlioviewer sur les éruptions solaires
- **Chapitre 2 : La reconnexion magnétique**
 - Introduction et définition de la reconnexion magnétique
 - Evolution de la connectivité du champ magnétique
 - Modèle de reconnexion de Sweet-Parker et Petschek
 - Ecrasement des nappes de courant et instabilité de déchirement

Partie II : La couronne et l'héliosphère statique

- **Chapitre 3 : Le champ magnétique solaire**
 - Emergence des régions actives
 - Reconstruction 3D du champ magnétique coronal
 - Notion de topologie magnétique et reconnexion magnétique associée
- **Chapitre 4 : L'héliosphère**
 - Le vent solaire
 - Le champ magnétique interplanétaire

Partie III : La couronne et l'héliosphère dynamique

- **Chapitre 5 : Les éruptions solaires**
 - Description phénoménologique d'une éjection de masse coronale (CME)
 - Les tubes de flux torsadés
 - Mécanismes déclencheurs
 - Les conséquences coronales et interplanétaires
- **Chapitre 6 : Propagation des éjections de masse coronales dans le milieu interplanétaire .**
 - Phénoménologie des CME interplanétaire
 - Evolution des structures
 - Effets sur les environnements planétaires et météorologie de l'espace

Autres informations

- La première séance est une introduction générale à l'activité éruptive solaire. Afin d'avoir une vision concrète des événements éruptifs solaires, un TP sur ordinateur avec un logiciel de visualisation des observations spatiales du Soleil sera réalisé. Ce logiciel est libre d'accès soit en ligne soit en local après téléchargement (<https://www.jhelioviewer.org/>)
- Les séances suivantes sont entièrement au tableau et nécessitent la prise de note. Il n'y a pas de polycopié du cours.
- Des exercices à faire en cours seront proposés au fil de l'eau.

Pré-requis

Avoir suivi les cours F06 et T05 sera un atout certain, de même que le cours F07 (ou un cours d'introduction à la physique stellaire de niveau M1

T05 Plasmas astrophysiques

Léa Griton, LIRA, Sorbonne Université (lea.griton@obspm.fr)

Arnaud Zaslavsky, LIRA, Sorbonne Université (arnaud.zaslavsky@obspm.fr)

Objectifs

La physique des plasmas astrophysiques et spatiaux est au cœur de plusieurs des grandes questions actuelles de recherche soutenue par les programmes nationaux, européens et internationaux de Sciences de l'Univers. Ce « Cours thématique » propose d'aborder les plasmas astrophysiques sous un angle à la fois théorique et pratique, au plus près des projets de recherche en cours, afin de donner les clés nécessaires aux étudiantes et étudiants pour pouvoir conduire un projet de projet de recherche en physique des plasmas astrophysiques/spatiaux.

- Valider des compétences en physique appliquées à la physique des plasmas
- Mettre en œuvre les connaissances théoriques en pratiquant des calculs d'ordre de grandeur, de modes de propagation d'ondes, d'échelles caractéristiques à travers des séances d'exercices
- Prendre connaissance des questions actuelles de recherche en plasmas astrophysiques/spatiaux par l'analyse de publications scientifiques récentes
- Pratiquer l'analyse de données plasma in-situ et de logiciels professionnels (AMDA, 3Dview)
- Restituer des connaissances et des travaux de recherche personnels à l'oral et à l'écrit.

Thèmes abordés – Déroulement

Séance 1 : Origine des plasmas dans l'univers : ionisation et recombinaison. Sections efficaces. Phénomènes collectifs dans les plasmas : oscillation plasma, écrantage de Debye, champs électriques ambipolaires. Application : atmosphère stellaire.

Séance 2 : Collisions coulombiennes, coefficients de transport, effet « runaway ». Transport dans un plasma magnétisé. Application : systèmes de courants dans l'ionosphère terrestre.

Séance 3 : Trajectoire de particules chargées dans des champs électromagnétiques. Force miroir, dérives magnétiques, invariants adiabatiques, accélération de Fermi.

Séance 4 : Plasmas non-collisionnels, approche cinétique, équation de Vlasov, amortissement Landau. Plasma comme un milieu linéaire, modes normaux, propagation d'ondes électromagnétiques dans les plasmas. Rotation Faraday. Ondes plasmas. Applications à la physique du vent solaire (accélération, champ magnétique interplanétaire, propagation et rôle des ondes dans le vent solaire).

Séance 5 : Découverte des missions spatiales en cours : Parker Solar Probe, Solar Orbiter. Discussion autour des méthodes d'étude des plasmas astrophysiques/spatiaux : simulations numériques, observations, mesures in-situ, types d'instrumentation mis en œuvre. Introduction à l'étude des magnétosphères planétaires. Planétologie comparée appliquée à la physique des magnétosphères. Moyens d'exploration. Missions spatiales en cours : Juice, BepiColombo.

Séance 6 : Application : séance de travaux pratiques sur le logiciel AMDA du Centre de Données de Physique des Plasmas (CDPP) pour se confronter à la réalité des mesures in-situ de champ magnétique et propriétés du plasma (densité des particules, vitesses et températures ou fonctions de distribution, spectres). Le compte-rendu de TP sera à rendre en fin de séance (pas de travail à la maison).

Séance 7 : Restitution des analyses des articles de recherche présentés lors de la séance 5, interrogation orale portant sur l'ensemble du cours (en rapport avec l'article)

Autres informations

Évaluation :

L'analyse de publication scientifique de la séance 7, sous la forme d'une courte présentation orale, suivie de questions, comptera pour 20% de la note du cours. La séance de travaux pratiques de la séance 6 fera l'objet d'un compte-rendu de TP, qui comptera pour 20% de la note du cours. Un examen final écrit comptera pour 60% de la note finale du cours.

En fonction de l'effectif, l'analyse de publication scientifique et/ou le compte-rendu de TP pourra être évalué en binômes d'étudiant-e-s.

Encadrement :

Arnaud Zaslavsky et Léa Griton sont maîtres de conférences à Sorbonne Université et chercheurs au LIRA, un laboratoire de l'Observatoire de Paris-PSL. Leurs travaux de recherche, mêlant analyse de données, modélisation et simulations numériques, portent sur la physique du vent solaire et de son interaction avec les environnements planétaires du Système solaire. Ils sont impliqués à titre de chercheur associé ou de (co-)responsables de contributions instrumentales dans plusieurs missions spatiales en cours ou en préparation : Parker Solar Probe, Solar Orbiter, BepiColombo, Plasma Observatory.

Pré-requis

Électromagnétisme dans le vide et dans les milieux. Bases de théorie cinétique (équation de Boltzmann notamment). Bases de mécanique des fluides. Anglais scientifique pour les publications. Intérêt pour l'analyse de données de sondes spatiales.

T06 Objets compacts et phénomènes associés Astrophysique des hautes énergies et multi-messagers

Frédéric Daigne, IAP, Sorbonne Université (daigne@iap.fr)

Objectifs

Ce cours présente les concepts, modèles et observations fondamentales nécessaires pour aborder l'étude des objets compacts et des phénomènes qui leur sont associés. Cette thématique joue un rôle essentiel en astrophysique des hautes énergies et multi-messagers (astronomie X et γ , rayonnement cosmique, neutrinos, ondes gravitationnelles). Le cours introduira les différentes classes d'objets compacts (naines blanches, étoiles à neutrons, trous noirs) en posant la question de leur formation, de leur structure interne et de leur rayonnement. Il mettra en évidence le lien entre les objets compacts et les phénomènes les plus énergétiques observés dans l'Univers. Seront ainsi discutés le rayonnement des objets compacts accrétants et l'émission multi-messagers des phénomènes explosifs extrêmes associés à l'effondrement gravitationnel d'une étoile massive ou à la coalescence d'un système binaire.

Thèmes abordés – Déroulement

Introduction (~ une séance et demie).

- critère de compacité, propriétés communes des objets compacts
- intérêts de l'étude des objets compacts : les liens avec la physique stellaire, avec l'astrophysique des hautes énergies et multi-messagers, avec la physique fondamentale et la cosmologie.

Les objets compacts : structure interne et rayonnement (~ deux séances et demie).

- naines blanches
- étoiles à neutrons et pulsars
- trous noirs

Objets compacts accrétants (~ une séance et demie).

- physique de l'accrétion, comparaison aux observations
- phénomènes d'éjection
- explosions thermonucléaires de surface : novae et sursauts X
- explosions thermonucléaire d'une naine blanche : supernovae de type Ia

Effondrement gravitationnel (~ une séance et demie).

- supernovae gravitationnelles et neutrinos (optionnel : le lien avec le rayonnement cosmique galactique)
- sursauts gamma
- coalescences d'objets compacts et ondes gravitationnelles

Certains aspects ne seront que mentionnés dans ce cours et seront discutés plus en détails dans deux autres cours : les processus d'accélération de particules et les processus radiatifs non-thermiques (T11), les techniques de détection et d'observation à haute énergie (T01) ou pour les messagers non-photoniques (T11).

Autres informations

Le cours est accompagné d'un polycopié de cours, d'un polycopié d'exercices et des annales d'examen des années passées. Chaque semaine sont déposés sur Moodle les transparents du cours, des conseils de préparation pour les prochains cours, et des suggestions d'exercices à rechercher en priorité.

Pré-requis

Aucun pré-requis indispensable, mais avoir suivi plusieurs des cours suivants sera un atout : F03 : gravitation relativiste ; F05 : rayonnement ; F06 : fluides astrophysiques (ou cours de mécanique des fluides de niveau L3 ou M1) ; F07 : physique stellaire (ou cours d'introduction à la physique stellaire de niveau M1) ; cours d'introduction à la physique statistique de niveau L3/M1 (en particulier : statistique des fermions).

T07 Milieu interstellaire et formation des étoiles

François Levrier, LPENS, Ecole Normale Supérieure (francois.levrier@ens.fr)

Objectifs

Ce cours présente une introduction - aussi exhaustive que possible dans le format imparti - à la vaste étendue de thématiques que recouvrent la physique du milieu interstellaire (MIS) et le problème connexe de la formation stellaire. Le cours s'attachera à décrire les différentes composantes du MIS, sa structure et sa dynamique, des phases les plus diffuses jusqu'à la formation des étoiles, pour mettre en évidence le rôle de véritable "écosystème Galactique" qu'il joue, et la variété des processus physiques à prendre en compte pour en saisir la complexité.

Thèmes abordés – Déroulement

Introduction (une séance)

- Les acteurs du milieu interstellaire : composantes et processus.
- La structure du milieu interstellaire Galactique.
- Le cycle de la matière interstellaire.

Le gaz interstellaire (deux séances)

- Le gaz ionisé : processus d'ionisation et de recombinaison, régions HII et gaz coronal.
- Le gaz atomique : méthodes d'observation, distribution spatiale, caractère multi-phasique.
- Le gaz moléculaire : méthodes d'observation, distribution spatiale, PDR, nuages moléculaires.

Les poussières interstellaires (une séance)

- Les méthodes d'observation.
- Les modèles de poussières : composition, distribution de tailles, température et charge électrique.
- La dynamique et l'évolution des grains.

La formation des étoiles (deux séances)

- Les modèles et les observations de cœurs préstellaires.
- L'effondrement vers la proto-étoile.
- L'évolution vers la séquence principale.
- Les cas particuliers des étoiles massives et des naines brunes.
- L'impact des étoiles jeunes sur leur environnement.

L'interaction entre les étoiles et le milieu interstellaire (une séance)

- Les chocs interstellaires.
- Les vents stellaires et les rémanents de supernovæ.
- Le modèle de McKee & Ostriker du milieu interstellaire

Autres informations

Le cours est accompagné d'un polycopié synthétique présentant les notions abordées pendant le cours. Ce polycopié comprend un grand nombre de questions présentées comme des exercices qui proposent souvent de chercher à démontrer les relations données. Un ensemble de feuilles d'exercices complémentaires sont proposées, à faire à la maison. L'examen, écrit, prendra la forme d'un ensemble de questions portant sur une proposition d'observation ayant trait à la physique du milieu interstellaire ou à la formation stellaire.

Pré-requis

Le cours F05 ("Transfert du rayonnement et interaction matière-rayonnement") est un pré-requis quasiment indispensable. Avoir suivi le cours F06 ("Dynamique des fluides astrophysiques") sera un atout. Ce cours peut être complété utilement par T11 ("Processus non-thermiques et approches multi-messages") et T14 ("Astrochimie et exobiologie"). Il peut aussi venir en complément du cours T08 ("Physique des galaxies").

T08 Physique des galaxies

Anaëlle Hallé, LUX, Observatoire de Paris (anaelle.halle@observatoiredeparis.psl.eu)

Misha Haywood, LIRA, Observatoire de Paris (misha.haywood@obspm.fr)

Objectifs

Ce cours est une introduction au domaine très large de la formation et de l'évolution des galaxies. Le cours est scindé en deux parties, consacrées d'une part à la Voie lactée et le Groupe local et d'autre part à l'ensemble des autres galaxies. Il a pour objectif de donner un aperçu de leur très grande variété, des processus dominants leur évolution, depuis l'univers à grand redshift jusqu'à l'univers local.

Thèmes abordés – Déroulement

- Propriétés des galaxies (10.5h)
 1. Contexte cosmologique. Propriétés statistiques des galaxies. Simulations de formation et d'évolution de galaxies.
 2. Propriétés des galaxies spirales et elliptiques. Formation stellaire dans les disques (lois empiriques, gaz moléculaire, feedback stellaire). Spectres de galaxies.
 3. Rôle de l'environnement : interactions de galaxies (queues de marée, sursauts de formation d'étoiles), amas de galaxies (gaz X, morphologies des galaxies et formation stellaire dans les amas). Paradigme de formation hiérarchique des galaxies, accréation et éjection de gaz.
 4. Galaxies actives. Physique et co-évolution des trous noirs supermassifs avec les galaxies hôtes.
- La Galaxie et le Groupe Local (10.5h)
 1. Introduction et rappels. Observables. Caractéristiques générales de la Voie lactée et du Groupe local.
 2. Les disques mince et épais de la Voie Lactée. Caractéristiques. Evolutions chimique et dynamique. Courbe de rotation et matière noire.
 3. La barre et le bulbe. Processus de formation et d'évolution. Le système d'amas globulaires.
 4. Le halo stellaire de la Voie Lactée. Processus de formation et d'évolution. Collapse monolithique et formation du disque. Courants stellaires.
 5. Le Groupe Local : Les satellites de la Voie Lactée. La variété des galaxies du Groupe local. La Galaxie d'Andromède et son système de satellites.

Autres informations

L'évaluation aura lieu sous la forme d'un examen final sous forme écrite, et un examen intermédiaire pour les 2 parties du cours, probablement sous forme de QCM.

Pré-requis

Aucun pré-requis indispensable. F01 et F07 seraient des atouts.

T09 Cosmologie

Benoît Semelin, LUX, Sorbonne Université (benoit.semelin@observatoiredeparis.psl.eu)

Objectifs

L'objectif du cours est de donner des bases théoriques solides en cosmologie tout en dressant un panorama des grands enjeux observationnels actuels (voir plan du cours). Chaque séance de 3h sera constituée d'une partie cours et d'une partie TD. Par ailleurs, lors des (ou de la) dernières séances, des binômes ou trinômes d'étudiants présenteront un exposé sur un sujet de recherche actuel en cosmologie.

Thèmes abordés – Déroulement

Voici un plan prévisionnel du cours. La structure et les thèmes abordés pourront changer à la marge en fonction du retour d'expérience.

- Séance 1 : Introduction, bases de relativité générale pour la cosmologie (principe cosmologique, métrique FLRW)
- Séance 2 : Equation de Friedmann, modèles cosmologiques simples, modèle Λ -CDM
- Séance 3 : Univers primordial, inflation
- Séance 4 : Fond diffus cosmologique, chandelles standard (i.e : supernovae)
- Séance 5 : Formation des structures ($P(k)$, fonctions de masse, fonctions de luminosité) + exposés
- Séance 6 : BAO, premières galaxies, réionisation + exposés
- Séance 7 : Lensing + exposés

Les sujets d'exposés seront proposés dès la première séance. Les binômes-trinômes d'étudiants disposeront donc au minimum de 4 semaines pour préparer l'exposé.

Autres informations

1h de TD par séance de 3h. Un polycopié de cours complet sera fourni. L'évaluation sera constituée à 30% de la note d'exposé et à 70% de la note d'examen final.

Pré-requis

Sans être absolument indispensable, le cours fondamental "Gravitation relativiste" (F03) sera une base théorique très utile. Il semble difficile de s'en passer pour poursuivre avec une thèse en cosmologie. Le cours thématique "Physique des galaxies" (T08) présente également des liens thématiques forts avec le cours de cosmologie.

T10 Géodésie

Pascal Bonnefond, LTE, Observatoire de Paris (Pascal.Bonnefond@obspm.fr)

Adrien Bourgoïn, LTE, Observatoire de Paris (Adrien.Bourgoïn@obspm.fr)

Objectifs

L'observation de la Terre se basait, jusqu'au milieu de notre siècle, sur les méthodes de géodésie classique pour la détermination de sa forme et de ses dimensions (ellipsoïde de référence), sur des méthodes astronomiques pour l'observation de son mouvement (rotations et révolutions autour du Soleil), et sur des mesures locales de pesanteur et de déflexion de la verticale pour l'étude de son champ de gravité (géoïde). Dès l'apparition des premiers satellites artificiels, à la fin des années 50, les géodésiens ont vu tout l'intérêt de mesures entre un ou plusieurs points au sol et le satellite. L'utilisation des satellites en géodésie a et aura encore un impact immédiat sur les utilisateurs de réseaux géodésiques (bâisseurs, cadastre, géodynamiciens, ...). Les enjeux liés à la détermination précise des références d'espace et de temps touchent un champ d'applications extrêmement large (e.g. positionnement statique ou dynamique) et sont au cœur des défis sociétaux notamment reliés aux conséquences du changement climatique (e.g. variations du niveau moyen des mers).

Thèmes abordés – Déroulement

Les 21 heures de cours magistraux seront découpées en séances traitant, dans l'ordre, les sujets qui suivent :

- Introduction à la géodésie : objets, aspects historiques et défis sociétaux
- Les observations de Géodésie Spatiale : télémétrie laser (satellites et Lune), système DORIS, Global Navigation Satellite System (GPS, GLONASS, Galileo, ...), VLBI
- Forme et déformation de la Terre : réseaux de stations, champ de gravité
- La dynamique orbitale pour mesurer la Terre : principes de base de mécanique céleste, modélisation des forces (gravitationnelles et non-gravitationnelles), principes de l'extrapolation et de la restitution d'orbite
- Altimétrie satellitaire : principe et historique, principaux champs d'application scientifiques (courants océaniques, surface moyenne, élévation du niveau des mers, hydrologie continentale, ...)

Autres informations

- **Langue** : cours en français, support en français ou en anglais (en majorité des diaporama PowerPoint).
- **Modalités d'évaluation** : lecture d'un article parmi une liste et restitution du contenu scientifique sous forme de présentation orale + questions.

Pré-requis

Aucun pré-requis indispensable mais un intérêt pour les sciences d'observation de la Terre. Des connaissances basiques en Mécanique Céleste sont un plus mais pas indispensable. Avoir suivi les cours F04 sera un atout certain.

T11 Processus non-thermiques et approches multi-messagers

Sylvain Chaty, APC, Université Paris Cité (sylvain.chaty@u-paris.fr)

Objectifs

Ce cours présente les concepts, modèles et observations fondamentales nécessaires pour aborder l'étude des processus non-thermiques, en particulier ceux associés aux objets compacts. Cette thématique joue un rôle essentiel en astrophysique des hautes énergies et multi-messagers. Nous aborderons ainsi l'astronomie X et γ , les rayons cosmiques, les neutrinos, ainsi que les ondes gravitationnelles).

Thèmes abordés – Déroulement

- **Introduction générale et panorama des observations (CM 3h / Séance 1) :**

Objectif : Se familiariser avec l'astrophysique non-thermique et le multi-messager

Contenu : Définitions : rayonnement non-thermique, messagers astrophysiques (photons, rayons cosmiques, neutrinos, ondes gravitationnelles) ; Historique et état des lieux des observations : découvertes majeures, études récentes ; Instruments et télescopes emblématiques (Fermi, H.E.S.S., LIGO/Virgo, IceCube, CTA)

- **Sources astrophysiques, messagers non-thermiques (CM 4h+TD 2h, Séances 2-3) :**

Objectif : Explorer les différents types de sources et leur signature multi-messager

Contenu : Sources Galactiques : pulsars, supernovae, restes de supernovae (nébuleuse du Crabe) ; Sources extragalactiques : noyaux actifs de galaxies, sursauts gamma (GRB), blazars ; Coalescences d'objets compacts et émissions associées (GW, neutrinos, photons) ; Introduction au diagramme de Hillas

Atelier pratique (2h) : analyse multi-longueurs d'onde d'un blazar et/ou d'un GRB

- **Processus physiques de rayonnement (CM 4h + TD 2h, Séances 4-5) :**

Objectif : Décrire les mécanismes fondamentaux du rayonnement non-thermique

Contenu : Formule de Larmor, émission synchrotron : exemples dans pulsars et jets relativistes ; Diffusion Compton inverse : blazars ; Bremsstrahlung : SNR ; Production de paires e^+/e^- : seuils énergétiques, AGN et GRB ; Rayonnement hadronique : interaction pions, neutrinos, et rayons γ ; Accélération de Fermi : chocs non-relativistes ; Rayons cosmiques : spectres d'énergie et de masse, origine, composition ; sources astrophysiques et implications

Atelier pratique (2h) : simulation simple de spectres non-thermiques avec Python

- **Méthodes de détection et analyse d'événements (CM 3h + TD 2h, Séances 6-7) :**

Objectif : Présenter les principes de détection et l'interprétation des données

Contenu : Techniques de détection : photométrie gamma, télescopes Cherenkov, détecteurs de neutrinos, interféromètres pour GW ; Méthodologies de corrélation multi-messager : outils et bases de données (ex. GCN) ; Analyse de données : introduction à l'analyse multi-messagers (concepts clés et outils) ; Ondes gravitationnelles : propagation et signature des événements majeurs (GW170817)

Atelier pratique (2h) : extraction et interprétation d'un événement multi-messager

- **Synthèse et perspectives (1h, Séance 7) :**

Objectif : Intégrer les connaissances acquises et explorer les questions ouvertes

Contenu : Synthèse des processus physiques et observations ; Défis instrumentaux et scientifiques pour les décennies à venir (SKA, LISA, CTA) ; Discussion sur les implications astrophysiques de l'approche multi-messager

Autres informations

Le cours alternera entre cours magistral et séances de Travaux dirigés incluant cas pratiques et articles récents, les copies de transparents seront fournies aux étudiants.

Modalités d'évaluation : Questions de cours en début de chaque séance (10%), Exposé oral avec lecture critique d'article scientifique (30%), Examen final écrit (60%).

Pré-requis

Aucun pré-requis indispensable, mais avoir suivi plusieurs des cours suivants sera un atout : F03 : gravitation relativiste ; F05 : Transfert de rayonnement et interactions matière-rayonnement ; F06 : Dynamique des fluides astrophysiques ;

T12 Dynamique galactique

Paola Di Matteo, LIRA, Observatoire de Paris (paola.dimatteo@obspm.fr)

Jean-Pierre Marco, IMJ, Sorbonne Université (jean-pierre.marco@imj-prg.fr)

Objectifs

Ce cours présentera les bases de la dynamique galactique, en donnant les instruments théoriques et méthodologiques nécessaires pour une compréhension des galaxies, et des principaux processus dynamiques qui façonnent leur évolution. Nous traiterons aussi de questions plus spécifiques et spécialisées sur les équations de Vlasov-Poisson et la hiérarchie BBGKY (Bogoliubov–Born–Green–Kirkwood–Yvon), avec quelques rappels et compléments mathématiques.

Thèmes abordés – Déroulement

Part I : Basics of galactic dynamics

- * Gravitation
- * Elements of classical mechanics
- * Examples of spherical potentials
- * Orbits in spherical mass distributions
- * Equilibria of collisionless stellar systems
- * Masses of spherical stellar systems

Part II : (Axisymmetric) disc galaxies

- * Gravitation in galactic discs
- * Examples of axisymmetric disc potentials
- * The kinematics and dynamics of galactic rotation
- * Orbits in discs
- * Equilibria of galactic discs

Part III : (Asymmetric) disc galaxies

- * Some examples of barred and spiral arms potentials
- * Orbits in axisymmetric potentials
- * Pattern speeds and resonances
- * Orbital families at resonances

Part IV : Elliptical galaxies

- * Gravitation in elliptical galaxies and dark matter halos
- * Orbits in triaxial mass distributions and surfaces of section
- * Equilibria of elliptical galaxies and dark matter halos
- * Mass modelling in elliptical galaxies

Part V : Towards more realism : composite galaxies and galaxies out-of-equilibrium

- * Orbits in composite (disc+bulge+dark halo) galaxies
- * Dynamical friction and tidal effects
- * Mergers and interactions among galaxies : out-of-equilibrium discs

Part VI : Rappels mathématiques, hiérarchie BBGKY et équation de Vlasov-Poisson

Autres informations

Des indications supplémentaires et compléments de cours seront mis à disposition sur Moodle, suivant l'avancement du cours.

Pré-requis

T13 Dynamique orbitale

Florent Deleflie, LTE, Observatoire de Paris (florent.deleflie@obspm.fr)

Objectifs

Ce Cours Thématique (7 séances de 3h) propose l'acquisition et la manipulation des techniques de propagation de trajectoires, de restitution de données de poursuite et de les mettre en pratique. Sur la base d'exemples de trajectoires autour de la Terre et autour d'autres corps du Système solaire, et de trajectoires interplanétaires, il s'agira de comprendre (i) les écarts d'une trajectoire réelle aux trajectoires képlériennes, et (ii) les conditions de visibilité d'une sonde spatiale ou d'un satellite depuis une station au sol.

Thèmes abordés – Déroulement

Séance 1 :

- 0) Introduction : définition de la dynamique orbitale (extrapolation, restitution), enjeux et besoins
- 1) Problème des deux corps et éléments képlériens : ellipses et hyperboles
- 2) Traces et observabilité : repères planétocentriques et topocentriques

Séance 2 :

- 3) Équations du mouvement perturbé, caractérisation des perturbations
- 4) Modélisation analytique et écart au mouvement képlérien
- 5) Caractérisation des familles dynamiques (Terre et autres corps centraux) et conséquences sur l'observabilité
- Fiche d'exercices n°1 : le mouvement képlérien

Séance 3 :

- 6) Modélisation des manœuvres et forces non gravitationnelles
- Correction de la première fiche d'exercices
- TP/TD : mise à poste d'un satellite autour de la Terre
- Fiche d'exercices n°2 : le mouvement perturbé

Séance 4 :

- 7) Équations de la restitution de trajectoires : détermination préliminaire et correction différentielle
- 8) Dynamique long terme : moyennisation, stabilité, chaos et résonances
- Fiche d'exercices n°3 : mise en évidence des effets de résonance

Séance 5 :

- 9) Les points de Lagrange : théorie et applications
- Révision sur l'identification de trajectoires à partir des traces, correction des fiches d'exercices 2 et 3
- TP noté (1ère partie) : exploitation d'une série temporelle d'éléments orbitaux

Séance 6 :

- 10) Trajectoires interplanétaires : juxtaposition de coniques
- TP : étude des différentes étapes d'une trajectoire interplanétaire

Séance 7 :

- TP pratique : outils pour le calcul d'orbite parmi Celestlab/Scilab, bibliothèques Python, kernels SPICE
- TP noté (2ème partie) : exploitation d'une série temporelle d'éléments orbitaux

Autres informations

Évaluation : QCM au début des séances (identification de trajectoire), TD noté, une épreuve sur table.

Documents distribués : fiches de synthèse, énoncé et correction d'exercices.

Pré-requis

Ce module propose ainsi une illustration concrète des notions fondamentales abordées en F02, mais peut être choisi indépendamment de celui-ci. Il est conseillé de suivre ce module pour bénéficier au mieux des notions vues en T10. Il peut aussi être vu comme un complément intéressant à F04. Il sera utile d'être à l'aise avec des notions de base de mécanique du point (énergie mécanique, principe fondamental de la dynamique), et du calcul intégral.

T14 Astrochimie et exobiologie

Donia Baklouti, IAS, Université Paris-Saclay (donia.baklouti@universite-paris-saclay.fr)

Objectifs

L'objectif principal de l'UE proposée n'est pas tant de fournir un relevé exhaustif de la composition chimique de tous les objets astrophysiques possibles, mais plutôt de donner aux étudiants les clés principales de compréhension de cette discipline qui prend une place de plus en plus importante dans le paysage astrophysique et se complexifie d'autant. Il s'agit de comprendre quels outils théoriques et expérimentaux sous-tendent les travaux et résultats en astrochimie pour en saisir la portée et les éventuelles limitations ou biais. L'idée est aussi de se familiariser avec les principales questions auxquelles tente de répondre cette discipline, son lien étroit avec les travaux et observations en astrophysique et en planétologie, et avec tous les questionnements autour de l'apparition de la Vie sur Terre et ses spécificités.

Thèmes abordés – Déroulement

Chapitre 1 : Pourquoi trouve-t-on les mêmes molécules majeures partout dans l'Univers ?

Les bases de l'(astro)-chimie :

- La nucléosynthèse et les abondances cosmiques
- La compétition entre thermodynamique et cinétique chimique : fondements théoriques de la réaction chimique

Chapitre 2 : Physico-chimie du milieu-interstellaire

- Processus physico-chimiques à l'œuvre
- Modélisation thermodynamique des enveloppes circumstellaires et composition des poussières
- Modélisation cinétique et composition moléculaire de la phase gaz
- Photochimie des glaces : confrontation entre expériences de laboratoire et observations

Chapitre 3 : Physico-chimie du disque protoplanétaire aux petits corps

- Processus pré- et post-accrétions
- Analyse de matière extraterrestre *in situ* par sonde spatiale et *ex situ* en laboratoire
- Simulations expérimentales : évolution des surfaces (astéroïde et TNOs) sous l'effet de différents types de bombardements (e⁻, ions, micrométéorites), effet du métamorphisme thermique, processus d'altération hydrothermale
- Astéroïdes/comètes/TNOs : continuum de composition et divergences, conséquences sur les modèles de formation et d'évolution du Système solaire

Chapitre 4 : Chimie de deux objets phares

- Titan et ses aérosols
- Io, son volcanisme et sa chimie « exotique »

Chapitre 5 : Pourquoi ne détecte-t-on pas la Vie partout dans l'Univers ?

- Exobiologie et astrobiologie : que recouvrent ces termes ?
- Différences fondamentales entre chimie(s) extraterrestre(s) et chimie terrestre
- L'apport exogène de matière à la surface des planètes telluriques et sa contribution potentielle à la chimie prébiotique terrestre
- Habitabilité et biosignatures : quels critères ou signatures rechercher ? Qu'est-ce qui fait de l'eau liquide le "graal" de l'exobiologiste ?

Autres informations

L'évaluation des acquis se fera via un examen final. Il reposera sur un questionnaire impliquant l'analyse critique d'articles scientifiques à la lumière de ce qui sera présenté et explicité en cours. Ces articles seront fournis aux étudiants dès le début de l'UE et le travail de préparation demandé sera explicité en séance.

Pré-requis

Il n'y a pas de prérequis indispensables pour débiter le cours, mais il est tout de même souhaitable d'avoir quelques bases en physico-chimie et chimie générale (niveau licence) pour suivre ce cours. Par ailleurs, ce cours est en lien fort avec les cours T02 et T07.

CTP01 Analyse de données, méthodes statistiques et "Machine learning"

Karim Benabed, IAP, Sorbonne Université (benabed@iap.fr) [cours]
Emmanuel Bertin, AIM, Université Paris-Saclay (bertin@iap.fr)
Emeric Bron, LUX, Observatoire de Paris (emeric.bron@obspm.fr)
Damien Le Borgne, IAP, Sorbonne Université (leborgne@iap.fr)

Objectifs

L'objectif de cette série de cours et TP est de permettre aux étudiants d'acquérir les concepts et la pratique de moyens contemporains d'analyse statistique des données dans un contexte d'astronomie-astrophysique. Les notions théoriques seront illustrées par de nombreux exemples concrets et mises en pratique dans des exercices de programmation en langage Python.

Thèmes abordés – Déroulement

- **Cours 1** : Introduction. Modélisation des données. Représentation des signaux et des données, variables aléatoires, lois de probabilité, tirage, processus stationnaires, ergodiques, estimateurs des moments d'une distribution statistique, matrice de covariance.
- **Cours 2** : Décomposition des signaux, analyse en composantes principales, modèles de données, transformée de Fourier, filtrage.
- **Cours 3** : Inférence statistique, test de Kolmogorov-Smirnov, bootstrap, signification statistique, distances, loi et test du χ^2 , degrés de liberté, erreurs corrélées.
- **Cours 4 à 6** : Vraisemblance et maximum de vraisemblance, ajustement de modèle et méthodes, Théorème de Bayes, Exploration bayésienne (échantillonnage d'importance, chaînes de Markov, MCMC, HMC, nested sampling), sélection de modèles.
- **Cours 7 et 8** : Introduction au machine learning, zoologie (supervisé, non supervisé, algorithmes). Concepts clefs (sur et sous apprentissage, erreur de généralisation, critères), réseaux de neurones et réseaux convolutifs, Emulation, Apprentissage non supervisé, Normalizing flows et approximation de distributions.

Autres informations

L'enseignement comporte 8 séances de cours de 2h accompagnés de 7 séances de travaux pratiques de 4h. Ces TP seront réalisés en langage Python sur les ordinateurs de Meudon et de l'Institut d'Astrophysique de Paris. Le premier TP permettra de tester ses compétences en python numérique sur deux petits exemples inspirés du cours. Le contrôle des connaissances se fera par un travail à rendre dans un délai d'une semaine à deux semaines après certaines séances de TP.

Pré-requis

Il est fortement souhaité de disposer d'une première familiarisation avec le langage Python, sa bibliothèque de manipulation de tableaux numériques Numpy et celle d'affichage Matplotlib.

CTP02 Méthodes numérique et calcul scientifique

Renaud Belmont, AIM, Université Paris Cité (renaud.belmont@u-paris.fr) [cours]
Mathias Gonzalez, AIM, Université Paris Cité (matthias.gonzalez@cea.fr)
Zakaria Meliani, LUX, Observatoire de Paris (Zakaria.Meliani@obspm.fr)
Yann Rasera, LUX, Université Paris Cité (yann.rasera@obspm.fr)

Objectifs

Ce cours a pour objectif de fournir une compréhension approfondie des méthodes numériques dédiées aux problèmes les plus communs en Astrophysique, ainsi qu'un regard critique sur leurs performances.

Les TPs sont réalisés en C ou Fortran, permettant ainsi d'atteindre une aisance minimale dans la programmation en langage compilé.

Le but est de permettre aux étudiants d'être opérationnels dès le début de thèse, de pouvoir intervenir dans les codes de leur discipline ou d'en développer de nouveaux.

Thèmes abordés – Déroulement

Les thèmes suivant seront abordés en cours, puis mis en pratique lors des 7 séances de TP :

- TP1 : Rappels sur les langages compilés, création et utilisation d'un Makefile
Représentation des entiers et des réels, erreurs de troncation et ordre des schémas numériques
- TP2 : Intégration de fonctions (méthodes de Newton-Cotes, de Gauss-Legendre)
Résolution de systèmes linéaires (méthodes directes/itératives, conditionnement)
- TP3 : Résolution d'équations non linéaires
Optimisation
- TP4 : Équations différentielles ordinaires (méthodes de Runge-Kutta, implicites, symplectiques)
- TP5-6 : Équations aux dérivées partielles (équation de la chaleur, équation d'advection, de Poisson, condition CFL, méthodes implicites, (méthodes Godunov et problème de Riemann)
- TP7 : Simulations N-corps (particule-particule, particule-mesh, tree code)
Introduction au calcul parallèle et parallélisation avec OpenMP

Autres informations

Les transparents de cours et énoncés de TP seront librement accessibles sur Moodle

Le choix du langage utilisé en TP pour implémenter les méthodes (C ou Fortran) est libre. L'analyse des résultats et les graphiques seront fait en Python.

Pour une grande partie des TPs, des structures pré-écrites de codes seront fournies afin de se concentrer sur les l'implémentation des méthodes numériques proprement dites.

Évaluation : 1 TP à rendre (50%) + participation générale en TP (50%)

Pré-requis

Cet enseignement n'est pas un cours de C ou Fortran. Il est indispensable pour les étudiants n'ayant aucune base en langage compilé de se familiariser avec l'un de ces langages avant le premier cours (de préférence Fortran) et d'être capable d'écrire et d'exécuter quelques codes simples (boucles, conditions, écriture fichiers).

M01-02-03 Projets observationnels

Pascal Gallais, AIM, CEA et Observatoire de Paris (pascal.gallais@obspm.fr)

Eric Gendron, LIRA, Observatoire de Paris (eric.gendron@obspm.fr)

Jean-Michel Martin, LUX, Observatoire de Paris (Jean-Michel.Martin@obspm.fr)

Miguel Montargès, LIRA, Observatoire de Paris (miguel.montarges@obspm.fr)

Objectifs

L'objectif de ces enseignements méthodologiques est de donner aux étudiants, au travers d'applications pratiques et concrètes, une formation conséquente instrumentale et observationnelle en astrophysique. Les étudiants apprendront à construire et réaliser un programme d'observation professionnel, étalonner et exploiter un instrument astrophysique et présenter l'avancement de leurs travaux devant leurs pairs.

Les étudiants en bi-tri-nôme devront choisir un des quatre projets d'observation suivants :

- spectroscopie haute résolution (M. Montargès, T60 à la Table Équatoriale et spectromètre sur banc optique, caméra CCD) :
 - ★ classification stellaire et/ou mesure de vitesse de rotation planétaire
 - ★ caractérisation du spectromètre (dispersion, résolution, sensibilité)
- imagerie infrarouge proche (P. Gallais, T32 IR au Grand Sidéostat, caméra infrarouge NICMOS et filtres photométriques J, H et K) :
 - ★ structure et photométrie d'une région de formation d'étoiles (nébuleuse d'Orion par exemple)
 - ★ estimation de la magnitude limite sur le site
- interférométrie des tavelures (É. Gendron, Télescope de 1 m, caméra CCD rapide) :
 - ★ détermination de la séparation angulaire et du rapport de flux de systèmes binaires connues
 - ★ estimation des limites (magnitude, contraste, séparation)
- radio-interférométrie à 864 MHz (J.-M. Martin, antennes paraboliques de 3m et récepteurs) :
 - ★ mesure de la taille angulaire du Soleil dans le domaine radio
 - ★ détection d'une source extragalactique (la radiogalaxie Cygnus A)
 - ★ caractérisation des bruits instrumentaux et environnementaux

Cette liste est sujette à modification en fonction de l'état précis de l'instrumentation et de l'état précis des télescopes au moment de la rentrée universitaire.

Thèmes abordés – Déroulement

Les 3 projets M01-2-3 ont vocation à proposer une formation méthodologique basée sur l'instrumentation, notamment sur les techniques d'observations depuis le sol. Les séances se déroulent sur **le campus de Meudon**.

Chaque projet se déroule des séances hebdomadaires de 4h encadrées par un enseignant spécifique, spécialiste de l'instrument. Ces séances incluent 3 à 4 soirées d'observations encadrées sur les télescopes du campus de Meudon, placées opportunément selon la météo.

Les séances opérées en journée (hors observations) se déroulent dans des laboratoires dédiés à chaque projet d'observation, elles aborderont au minimum les points suivants :

- la prise en main et la compréhension de l'expérience
- la définition d'un programme scientifique d'observation adéquat (après recherches bibliographiques et sur conseils de l'encadrant)
- la caractérisation et l'étalonnage de l'expérience en laboratoire
- la prise de notes informelles de suivi des manipulations et réflexions menées (« cahier de manip »)
- la définition des procédures d'observation propres à l'instrument
- la préparation des observations : identification des sources et références à observer

- le développement des procédures de traitement et d'analyse (code en Python)
- le traitement et l'analyse des résultats, avec un regard critique
- la présentation des travaux, méthodes et résultats associée à l'acquisition d'un vocabulaire scientifique précis et adapté

Deux séances seront particulières et transversales :

- Une séance se fera sous la forme d'un cours appliqué sous forme pratique et numérique, commun à M01/2/3, et sera consacrée à des rappels d'un certain nombre de notions de base utiles dans tout exercice de développement instrumental. Ces notions seront répétées et mises en pratique durant les séances suivantes et incluent :
 - ★ statistiques,
 - ★ coordonnées et pointage,
 - ★ formation d'images, diffraction,
 - ★ transformation de Fourier, échantillonnage,
 - ★ bruits, propagation d'erreurs,
 - ★ biais, bruit et signaux issus des capteurs d'imagerie et vocabulaire associé.
- Une séance de 4h commune à M01/2/3 est appelée « mi-parcours ». Il s'agit d'un point d'étape (sans évaluation) fait en présence des enseignants et des étudiants de M01/2/3. La présentation est suivie des remarques, questions et retours des enseignants et étudiants. Ces présentations visent à :
 - ★ analyser et vérifier la profondeur de la compréhension et de la prise en main du sujet.
 - ★ examiner et analyser les points positifs et négatifs du travail accompli, de façon à corriger/orienter la trajectoire en cours d'exercice.
 - ★ donner l'opportunité d'exprimer clairement un propos possiblement délicat ou incertain, sans être déstabilisé, en face d'un public, avec un vocabulaire adapté.
 - ★ faire un retour constructif sur une première version de diapositives, dont le but est de véhiculer des informations de façon claire, précise et pertinente (titres, légendes, unités, barres d'erreur, représentation des données, utilisation adaptée des ressources graphiques).

Autres informations

Hormis pour le projet d'interférométrie radio, les autres observations doivent avoir lieu de nuit, sur le campus de Meudon.

Pré-requis

Pratique de Python (CTP01). Avoir suivi le cours F01 est un atout.

M04 **Projet expérimental** **Astrophysique de laboratoire**

Cateline Lantz, IAS, Université Paris-Saclay (cateline.lantz@universite-paris-saclay.fr)
Zahia Djouadi, IAS, Université Paris-Saclay (zahia.djouadi@universite-paris-saclay.fr)

Objectifs

Cette méthodologie propose de découvrir l'astrophysique de laboratoire via différents aspects : analyse d'échantillons (analogues ou extra-terrestres) et simulation de processus astrophysiques. Cela sera mené via un ensemble d'expériences et mesures de caractérisation associées basées sur les expertises et instruments que nous possédons à l'IAS. Le but est de pouvoir participer à toutes les étapes d'une manipe (de la préparation de l'échantillon à l'analyse des données) et de travailler sur des plateformes expérimentales de grande envergure (l'implanteur SIDONIE de l'IJCLab et la ligne SMIS du synchrotron SOLEIL, tous deux sur le campus de Saclay).

La méthode est en tous points similaire à ce que nous sommes amenées à faire dans notre recherche au quotidien.

Thèmes abordés – Déroulement

Le projet se déroulera en 2 parties :

1. Caractérisation, irradiation ionique et analyse d'un échantillon de silicate anhydre.
Un échantillon sera synthétisé pour coupler des mesures en spectroscopie IR de réflectance (2,5-20 μm) et Raman. Une campagne d'irradiations ioniques sera réalisée pour implanter du H^+ avec un suivi in-situ en spectroscopie visible et proche infrarouge (0,4-4 μm) afin de suivre l'apparition de la bande OH sous vide (hors contamination par l'eau de l'atmosphère). Une nouvelle série de mesures IR et Raman sera ensuite effectuée ex-situ pour déterminer les effets de l'irradiation sur le minéral (amorphisation) et les éventuels organiques (destruction).
2. Analyses sur simulants de météorites.
Synthèse d'échantillons pour mesures en transmission IR (2,5-20 μm) d'un simulant avec différentes tailles de grains pour comprendre l'influence de ce paramètre sur la mesure. Un échantillon pour des mesures en réflectance sera également synthétisé afin d'étudier les différences spectrales entre les deux modes de spectroscopie (transmission vs réflexion). Un autre objectif sera de comparer le spectre obtenu du simulant avec les spectres dans la littérature des constituants (connus) du simulant, puis avec une vraie météorite pour voir si le simulant est bien représentatif.

Autres informations

- La méthodologie commencera le 8/12 et s'achèvera le 16/02. Elle se déroulera sur 11 séances (demi-journées) : 7 après-midi à l'IAS et 2 journées complètes sur les plateformes nationales de Saclay (IJCLab et SOLEIL).
- L'évaluation se fera sur la base d'une soutenance (présentation et questions) tout en prenant en compte l'investissement au cours du projet.

Pré-requis

Notions de Python préférables pour traiter les données. Des liens seront faits avec les cours T02 (Planètes et petits corps : surfaces et atmosphères) et T14 (Astrochimie et Exobiologie).

M05 Projet d'analyse de données

Floriane Cangemi, APC, Université Paris Cité (cangemi@apc.in2p3.fr)
Alexis Coleiro, APC, Université Paris Cité (alexis.coleiro@u-paris.fr)

Objectifs

Cette méthodologie vise à former les étudiant.e.s à l'analyse de données astrophysiques en rayons X, en se concentrant sur deux types d'instruments : les collimateurs et les masques codés. Elle permettra d'apprendre à traiter et calibrer des données brutes, à utiliser des outils logiciels spécialisés pour extraire des informations spectrales, temporelles et spatiales, et à interpréter ces résultats dans un contexte multi-longueur d'onde et/ou multi-messager. La méthodologie s'appuiera sur des données en rayons X issues d'instruments spatiaux actuels et relatives à des objets compacts (étoiles à neutrons et trous noirs).

Thèmes abordés – Déroulement

Thèmes abordés : Les 11 séances de TP seront réparties en deux blocs :

1. Introduction aux concepts d'analyse des données en rayons X : 1 ou 2 séance(s) ;
2. Projet portant sur une source astrophysique (9 ou 10 séances).

Bloc 1 : Initiation à l'analyse des données en rayons X

Objectif général : la première partie de cette méthodologie sera dédiée à la description des concepts de base nécessaires à l'analyse des données en rayons X (instruments avec collimateur et instruments à masque codé).

Plus précisément, cette introduction permettra de se familiariser avec les différentes étapes d'analyse des données : depuis le pré-traitement (calibration), jusqu'à l'extraction des produits scientifiques de haut niveau (déconvolution, imagerie, analyse spectrale et temporelle). Nous nous concentrerons ensuite sur les outils disponibles pour réaliser ces analyses.

Bloc 2 : Projet en binôme

Objectif général : la seconde partie des séances (séances 3 à 11) permettra aux étudiant.e.s d'étudier une source astrophysique (binaire X ou noyau actif de galaxie) au travers de son rayonnement X.

L'enjeu sera dans un premier temps l'analyse des données en rayons X en utilisant les outils standards de traitement et d'analyse des données (XSPEC, Python, suite HEASoft, ftools, pipelines dédiés, ...) ainsi que la fabrication des produits de haut niveau : images, courbes de lumière, spectres de puissance, spectres en énergie, ... La deuxième partie du projet sera axée sur l'interprétation scientifique des résultats obtenus afin d'en déduire les paramètres physiques des sources étudiées (étoiles à neutrons et trous noirs) qui seront mis en perspective dans un contexte multi-longueur et/ou multi-messager.

Autres informations

Les séances se dérouleront au laboratoire APC, sur le campus de l'Université Paris Cité (Paris 13e).

L'évaluation se fera sous deux formes pour refléter l'acquisition des compétences techniques, la capacité à interpréter et à présenter les résultats scientifiques et l'autonomie acquise au cours du projet :

- Engagement, participation active et autonomie durant les séances de TP (30%) ;
- Rédaction d'un article scientifique et présentation orale des résultats (70%).

Pré-requis

- Compétences en programmation et traitement de données (Python, notions de statistiques, ...) et familiarité avec les outils informatiques scientifiques (Linux/UNIX, scripts shell, terminal, ...) : notions abordées en CTP01.
- Avoir des connaissances de base en astrophysique observationnelle des hautes énergies est un atout (mais pas indispensable pour autant) : notions abordées dans le cadre des UEs F01, F05, T01, T06, T11.

M06 Projet d'analyse de données

Emilie Habart, IAS, Université Paris-Saclay (emilie.habart@ias.u-psud.fr)
Pierre Guillard, IAP, Sorbonne Université (guillard@iap.fr)

Objectifs

Cet enseignement méthodologique est centré sur l'analyse de données de spectro-imagerie multi-longueur d'onde du milieu interstellaire (MIS). Le gaz et la poussière du MIS des galaxies modifie le spectre des sources de photons de hautes énergies, par absorption, diffusion et ré-émission à d'autres longueur d'onde. Pour interpréter les observations en les connectant à des modèles physiques, il est donc fondamental de comprendre l'évolution dynamique et thermochimique du MIS. Cet enseignement méthodologique a pour objectif d'exploiter des données de spectro-imagerie (galactiques et extra-galactiques) et des modèles physico-chimiques (issus de codes utilisés par la communauté internationale) pour caractériser les conditions physiques, et connecter ces résultats aux problématiques de la formation stellaire et l'évolution des galaxies. L'enseignement est structuré en projets visant à interpréter des données spectroscopiques obtenues avec des télescopes modernes (e.g., JWST) ou simulées pour les futurs instruments. Les codes de modélisation physico-chimique proposés traitent de processus à l'oeuvre dans la plupart des objets astrophysiques, i.e. de l'interaction matière-rayonnement et du dépôt d'énergie par choc.

Thèmes abordés – Déroulement

Cette méthodologie s'organise autour de 2 axes principaux, chacun représentant 50% du volume des projets :

(1) Analyse et exploitation de données spectroscopiques : manipulation de cubes de spectro-imagerie (JWST/MIRI, JWST/NIRSpec, VLT/SINFONI, Herschel/HIFI/PACS/SPIRE, Spitzer/IRS, SOFIA/GREAT, IRAM), fabrication de cartes spectrales et de continuum, convolution de données d'une même espèce chimique à une même résolution spatiale, ajustement de profils spectraux, cinématique, fabrication de diagrammes position-vitesse et de diagrammes d'excitation.

(2) Modélisation physico-chimique et ajustement des données pour extraire l'information physique : compréhension des codes de modélisation physico-chimique de la plateforme MIS & Jets (régions de photo-dissociation PDR et chocs), ainsi que le code CLOUDY pour le gaz ionisé et DustEM pour l'émission de la poussière. Compréhension de l'excitation de H₂, CO, H₂O, CII et OI et autres raies spectrales dans les régions photo-dissociées et choquées. Utilisation d'outils d'ajustement des intensités de raies et cartes spectrales, de diagrammes d'excitation de H₂ et CO. Extraction des conditions physiques (champ de rayonnement, densité, température, vitesses de chocs, champ magnétique, etc.)

Outils à disposition : l'analyse des données se fera en python avec glueviz.py pour la visualisation et l'analyse de cubes spectraux, et la librairie astropy pour l'ajustement des raies spectrales ; les outils développés dans le cadre de l'ERS/JWST PDRs4All (e.g., ajustement de spectres, liste de raies et production de diagrammes d'excitation) seront également utilisés. Pour la modélisation et la comparaison avec les données : les codes de modélisation de la plateforme MIS et jet, ainsi que le code CLOUDY pour les raies du gaz ionisé et l'outil DustEM, les outils de la plateforme MIS pour l'ajustement des intensités de raies et cartes spectrales ; les outils RADEX pour le transfert des raies de CO et H₂O.

Modalités d'évaluations : court rapport (4 pages hors figures) et soutenance orale (20 minutes)

Autres informations

Les séances se dérouleront dans la salle informatique de l'Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS, Orsay).

Pré-requis

Pratique du Python

M07 Projets d'analyse de données : spectroscopie d'étoiles et des petits corps du système solaire

Sonia Fornasier, LIRA, Université Paris Cité (sonia.fornasier@obspm.fr)

Objectifs

Ce projet méthodologique est centré sur le traitement, l'analyse et la modélisation des données en spectroscopie acquises avec des télescopes au sol, concernant de petits corps du système solaire (géocroiseurs, astéroïdes et transneptuniens) et des étoiles. Bien que la thématique astrophysique abordée soit la planétologie, les techniques de traitement des données utilisées sont applicables à n'importe quelle source astrophysique ponctuelle.

L'objectif de ce projet est de se familiariser avec les techniques de réduction des données astronomiques en spectroscopie, de comprendre les différentes étapes de réduction, les sources d'incertitudes et les limites observationnelles, et de développer des procédures en Python pour optimiser les corrections nécessaires tout en maîtrisant les paramètres en jeu.

Thèmes abordés – Déroulement

Un cours sera dispensé à la 1^{re} séance afin de rappeler quelques notions observationnelles et instrumentales, d'expliquer les différentes étapes de correction et d'étalonnage à appliquer aux spectres, de présenter les notions de base sur les propriétés des différents petits corps du système solaire, leur minéralogie, leur taxonomie et leur composition de surface, ainsi que les modèles de transfert radiatifs utilisés pour modéliser leur composition.

Puis chaque étudiant travaillera sur des jeux de données différents apprenant d'abord à traiter des listes et des bases de données observationnelles, à extraire les informations nécessaires de l'en-tête des images, à identifier les données de calibration pertinentes associées au setup instrumental, avant d'appliquer les différentes étapes de traitement des spectres : correction des artefacts induits par le détecteur (biais, défauts d'uniformité, courant d'obscurité) et des rayons cosmiques, modélisation du signal par ajustement gaussien, intégration du signal de la cible, correction du fond ciel, étalonnage en longueur d'onde, correction de l'extinction atmosphérique, calibration absolue des données, génération des spectres en réflectance, traitement cosmétique final (filtres, réduction du bruit).

Les spectres corrigés des astéroïdes seront comparés à des spectres types représentant les différentes classes taxonomiques afin d'en déterminer la taxonomie et la minéralogie de surface. Cette comparaison sera effectuée combinant une minimisation par moindres carrés entre le spectre d'un astéroïde donné et les spectres types, l'inspection visuelle des caractéristiques spectrales (présences ou non des bandes d'absorption), et considérant l'albédo des astéroïdes. Les paramètres spectraux seront aussi déterminés (pente spectrale, centre, profondeur et surface des bandes d'absorption). Les spectres des astéroïdes seront enfin comparés à la base de données RELAB (qui regroupe plus de 30 000 spectres de minéraux et de météorites) à l'aide de l'outil en ligne M4AST, afin de rechercher des analogues météoritiques et d'identifier d'éventuels corps parents des certaines météorites.

Autres informations

- Une séance de cours puis 10 séances de TP de 4h (quelque TP sera réalisé aussi le lundi matin, quand possible)
- L'évaluation se fera sur la base d'une soutenance (présentation et questions) tout en prenant en compte l'investissement au cours du projet.

Pré-requis

Connaissance de Python et de spectroscopie. Des liens seront faits avec les cours F01 (Principes physiques des observations), T02 (Planètes et petits corps : surfaces et atmosphères) et T14 (Astrochimie et Exobiologie).

M08 **Projet d'analyse de données** **Cosmologie et Machine Learning**

Marian Douspis, IAS, Université Paris-Saclay (marian.douspis@ias.u-psud.fr)

Objectifs

Cet enseignement méthodologique est axé sur l'interprétation des observations cosmologiques. L'objectif est de faire le lien entre les observations et les résultats scientifiques en se frottant au bruit, aux systématiques instrumentales et aux analyses statistiques. Des données sous forme de cartes et de catalogues seront analysées par des méthodes classiques ainsi que du machine learning pour dériver les paramètres cosmologiques ou bien valider la nature des sources dans les catalogues.

Thèmes abordés – Déroulement

- Les premières séances seront axées sur la prise en main des données : cartes tout le ciel en radio, effet SZ, catalogues d'amas de galaxies, histoire de la réionisation
- Les cartes seront utilisées en séparation de composantes pour retrouver une carte de CMB ou de SZ. Des snapshots des amas de galaxies seront découpés dans les cartes Planck. Les histoires de réionisation seront triées.
- Des cartes CMB seront extraits des spectres de puissances. En parallèle, un émulateur sera créé pour prédire le spectre théorique. Puis les deux seront comparés pour extraire les paramètres cosmologiques.
- Le flux des amas sera calculé sur les cartes, ainsi que celui de sources ponctuelles. Une architecture machine learning sera mise en place pour reconnaître les amas des sources ponctuelles et appliquée à d'autres catalogues
- Un émulateur de fraction d'ionisation sera développé en fonction de paramètres astrophysiques. Ce dernier sera comparé aux données observationnelles pour retrouver l'histoire de la réionisation ainsi que la profondeur optique de la réionisation.

Autres informations

- Les séances de méthodologie s'étaleront sur 11 demies journées : quelques séances se feront sur un après-midi, les autres seront réparties sur des journées entières distribuées sur les semaines restantes.
- La méthodologie se déroulera dans la salle informatique de l'Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS, Orsay), sur des ordinateurs équipés des librairies Python nécessaires et hébergeant les données principales. Les différents sujets spécifiques seront effectués par binôme.
- L'évaluation se fait sur des critères en contrôle continu, sur un rapport écrit de quelques pages et une soutenance finale. L'ensemble des critères sont : implication, compréhension/bibliographie, initiative, travail, présentation (fond, forme, questions, contexte), rapport.

Pré-requis

Des notions de Python (CTP01), de programmation (CTP02) et de cosmologie (T09 ou cours d'introduction de niveau M1) sont souhaitées mais pas nécessaires.

M09-10-11 Projets de modélisation numérique

Franck Le Petit, LUX, Observatoire de Paris (Franck.LePetit@obspm.fr)

Zakaria Meliani, LUX Observatoire de Paris (Zakaria.Meliani@obspm.fr)

Yann Rasera, LUX, Université Paris Cité (Yann.Rasera@obspm.fr)

Objectifs

L'objectif de la méthodologie est d'acquérir des connaissances et des savoir-faire sur le développement de modèles numériques simulant des problèmes astrophysiques. Les projets proposés sont caractéristiques de types de problèmes pouvant être rencontrés en recherche. Outre l'apprentissage de méthodes numériques, cette méthodologie permettra aussi d'acquérir des compétences en développement de code, sur l'utilisation d'outils de programmation (système de gestion de versions, documentation de code, bibliothèques numériques) et sur l'exploitation de moyens de calculs intermédiaires.

Thèmes abordés – Déroulement

Trois projets sont proposés. Pour chacun, l'approche suggérée correspond à des méthodes couramment utilisées dans les équipes de recherche. Chacun des projets est très ouvert et il est possible d'explorer des pistes non prévues tant du côté des méthodes numériques que du problème astrophysique étudié.

- **Modélisation d'instabilités thermiques dans un disque d'accrétion autour d'un trou noir.** Ce projet nécessite de résoudre plus d'une dizaine d'équations physiques couplées dont deux équations aux dérivées partielles (EDP). Il est l'occasion d'apprendre à résoudre des EDP par des schémas numériques implicites et explicites et de choisir la méthode et les pas d'intégration en fonction de l'état physique du système. Le code étant long à programmer, il est habituellement développé par un groupe de 6 étudiants travaillant en mode projet.

- **Diffusion de photons par méthode Monte Carlo.** Les méthodes Monte Carlo sont basées sur des tirages de nombres aléatoires qui simulent statistiquement des lois physiques. Elles sont utilisées pour résoudre de nombreux types de problèmes. Ce projet sera l'occasion d'apprendre à maîtriser ces méthodes sur le cas particulier de la diffusion de photons à travers une atmosphère, problème courant dans de nombreux domaines de l'astrophysique. Les simulations Monte Carlo pouvant être lourdes, ce projet sera aussi l'occasion d'apprendre à utiliser un cluster de calcul et de faire de la parallélisation de code.

- **Collision et structure de galaxies.** Dans ce projet, il s'agira de simuler la dynamique d'une distribution d'étoiles auto-gravitantes. Simuler l'évolution de chaque étoile en interaction avec toutes les autres n'est pas possible en raison du grand nombre d'étoile. Ici, on résoudra le problème en résolvant l'équation de Boltzmann sans collisions (équation de Vlasov-Poisson). Ce projet sera l'occasion d'acquérir des compétences sur des méthodes "Cloud in Cell" et de calcul de potentiels sur grille par résolution de l'équation de Poisson via la méthode de Jacobi ou de Gauss Seidel.

Autres informations

Les séances de méthodologie s'étaleront sur 15 semaines.

La méthodologie se déroulera dans la salle informatique des M2 sur le site de Meudon.

L'évaluation se fera sur un rapport écrit et une soutenance finale. L'ensemble des critères sont : implication, compréhension, initiative, travail personnel et en groupe, présentation (fond, forme, question, contexte), rapport.

Pré-requis

Les codes numériques seront réalisés de préférence en Fortran (C est également possible). L'exploitation des résultats sera faite en python. Les cours-TP CTP01 et CTP02 sont des pré-requis.

001 Stage d'observation à l'OHP Complémentarité sol – espace

Noël Robichon, LIRA, Observatoire de Paris (noel.robichon@obspm.fr)
Hervé Dole, IAS, Université Paris-Saclay (Herve.Dole@u-psud.fr)
Cateline Lantz, IAS, Université Paris-Saclay (cateline.lantz@ias.u-psud.fr)
Lucie Maquet, LTE, Observatoire de Paris (lucie.maquet@obspm.fr)
Henry J. McCracken, IAP, Sorbonne université (hjmcc@iap.fr)
David Katz, LIRA, Observatoire de Paris (David.Katz@obspm.fr)

Objectifs

- Techniques d'observation : imagerie, photométrie, spectroscopie, systèmes de coordonnées, planification d'observation
- Analyse scientifique de données : analyse des raies (paramètres physiques des étoiles, rotation et composition des planètes, astéroïdes...), courbes de lumière (exoplanète, étoile double, astéroïde...), trichromie.
- Complémentarité sol / espace / big data : utilisation de Gaia, Planck, préparation Euclid, Plato, bases de données VO, CFHT

Nous privilégierons l'observation et l'analyse de données afin de permettre une maîtrise de l'imagerie, spectroscopie et photométrie en vue de mener un mini-projet scientifique. Dans ce cadre, le traitement de données sera automatisé, afin de permettre aux étudiants de se concentrer sur les autres aspects d'observation et analyse, et ainsi de saisir les clefs de l'astrophysique observationnelle contemporaine : multi-instrumentale, multi-technique, faisant appel aux grands bases de données, et surtout à la complémentarité sol-espace.

Thèmes abordés – Déroulement

Les étudiants travailleront sur des mini-projets en binômes. Le stage durera 7 jours et 6 nuits dont 5 nuits d'observation au T152 (spectroscopie), T120 et T80 (imagerie et photométrie) afin de mener à bien les nuits d'initiation et de projets. Chaque binôme passera au moins une nuit sur chaque télescope. Chaque mini-projet a un lien avec une mission spatiale européenne structurante, et éventuellement des données de relevés accessibles en VO, afin de former les étudiants aux enjeux de l'astrophysique du XXI^e siècle. Les soutenances auront lieu sur place le dernier soir. Exemples de mini-projets

- astéroïdes position, courbe de lumière (T80, T120) - lien avec Gaia
- minor planet center : confirmation de NEO
- amas d'étoiles, métallicité (T152) - lien avec Gaia
- étoiles, classification spectrale, diagramme HR (T152) - lien avec Gaia
- étoiles variables en photométrie et spectrométrie : binaires à éclipses ou Céphéides, RR Lyrae, delta scuti : photométrie et spectro (vitesse radiale, courbe de lumière)
- transits d'exoplanètes (T80, T120) - lien avec Gaia, Plato
- imagerie d'amas de galaxies, comptages de galaxies (T120) et comparaison avec CFHT - lien avec Planck, Euclid

Autres informations

Pré-requis

- Pratique de Python (CTP01).
- Avoir suivi F01 est un atout mais n'est pas indispensable : il faut alors disposer de quelques connaissances de base en optique ondulatoire, photométrie, spectroscopie et systèmes de coordonnées célestes.

002 Stage d'observation à l'OHP Instrumentation & observation

Matteo Cerruti, APC, Université Paris Cité (cerruti@apc.in2p3.fr)
Stéphane Erard, LIRA, Observatoire de Paris (stephane.erard@obspm.fr)
Pascal Gallais, AIM, CEA et Observatoire de Paris (pascal.gallais@obspm.fr)
Frédéric Merlin, LIRA, Université Paris Cité (frederic.merlin@obspm.fr)
Andreas Zech, LUX, Observatoire de Paris (andreas.zech@obspm.fr)

Objectifs

Durant cette semaine de stage, quatre télescopes de l'OHP, chacun équipé d'une instrumentation spécifique, seront utilisés pour mener à bien des mini programmes scientifiques basés sur observations en imagerie et en spectroscopie, dans le visible et l'infrarouge proche. L'objectif est de se former aux différents outils de l'astrophysique observationnelle moderne en menant des observations dans des conditions favorables. Tous les aspects de la chaîne de mesure seront abordés, de l'analyse de l'instrument jusqu'à l'interprétation des résultats, en passant par l'établissement des procédures d'observation, par la recherche de cibles pertinentes et par l'identification des sources de bruit introduit tout au long de la chaîne de mesure, en s'appuyant aussi sur une recherche bibliographique raisonnable.

Thèmes abordés – Déroulement

Le stage s'appuie sur l'exploitation de quatre télescopes de l'OHP sur lesquels sont installés différents instruments :

- le T80 équipé d'une caméra CCD et des filtres U, B, V, R et H α
- le T1m suisse équipé soit d'une expérience de "haute résolution angulaire" consistant en un analyseur de front d'onde couplé à une voie d'imagerie des tavelures, soit d'un spectromètre haute résolution spectrale Lhires III.
- le T120 équipé d'une caméra infrarouge proche de type NICMOS et des filtres J, H et K
- le T152 équipé du spectromètre à haute résolution spectrale "Aurélien" avec un grand choix de réseaux

Plusieurs programmes scientifiques sont proposés tels que :

- Étude de galaxies à formation d'étoiles par bouffées,
- Réalisation du diagramme HR d'amas globulaires et d'amas ouverts,
- Étude de l'excitation dans les nébuleuses planétaires et/ou noyaux actifs de galaxies,
- Résolution de systèmes binaires proches, séparation "sub-seeing", ...

Les étudiants sont répartis en binômes/trinômes. Chaque groupe observera 2 nuits sur un télescope puis 2 nuits sur un autre. La dernière nuit sera dédiée à un instrument qu'ils n'auront pas utilisé les nuits précédentes. Le travail proposé se décompose en trois phases principales :

- Préparer et réaliser le programme d'observation : définir la stratégie d'observation, rechercher les sources à observer (objets, références,...), observer.
- Réduire et interpréter les données,
- Réaliser la synthèse et présenter les résultats.

Des réunions seront programmées pour présenter l'avancement des projets, discuter les méthodes mises en œuvre, préciser des notions fondamentales...

Autres informations

Pré-requis

- Pratique de Python (CTP01).
- Avoir suivi F01 est un atout mais n'est pas indispensable : il faut alors disposer de quelques connaissances de base en optique ondulatoire, photométrie, spectroscopie et systèmes de coordonnées célestes.

003 Stage d'observation à la Station de Nançay

Julien Girard, AIM, Université Paris Cité (julien.girard@cea.fr)

Jean-Mathias Griessmeier, LPC2E, Univ. d'Orléans (jean-mathias.griessmeier@cnrs-orleans.fr)

Lucas Guillemot, LPC2E, Univ. d'Orléans (lucas.guillemot@cnrs-orleans.fr)

Jean-Michel Martin, LUX, Observatoire de Paris (jean-michel.martin@obspm.fr)

Cyril Tasse, LUX, Observatoire de Paris (cyril.tasse@obspm.fr)

Objectifs

La radioastronomie vit actuellement une période d'activité intense avec la construction de nouveaux radiotélescopes très sensibles à travers le monde et cela dans différentes gammes de fréquences, l'ouverture vers les basses fréquences étant récemment permises grâce à de nombreuses innovations technologiques et algorithmiques. La Station de Nançay héberge de nombreux instruments à la pointe des observations radio et ceux-ci seront donc au cœur de ce stage d'observations afin de familiariser les étudiants avec les méthodes et les techniques d'observations en radioastronomie.

Thèmes abordés – Déroulement

Nous proposons plusieurs projets d'observations qui se dérouleront sur l'ensemble de la semaine à la Station de Nançay. Les projets utiliseront les données acquises par le grand radiotélescope de Nançay (NRT), la station LOFAR FR606 et le nouveau radio télescope basse fréquence NenuFAR qui vient d'être ouvert aux observations scientifiques. Le stage est basé sur l'observation et l'analyse de données afin de permettre une maîtrise de l'imagerie, de la spectroscopie, des techniques de chronométrage des pulsars, et des mesures temps-fréquence en vue de mener un mini-projet scientifique. Dans ce cadre, les étudiants seront confrontés aux techniques de programmation des observations et au traitement de données avec les outils les plus récents disponibles à la communauté. Exemples de mini-projet pouvant être appliqué à diverses sources :

- Étude du contenu en gaz HI de galaxies avec le NRT
- Étude de la polarisation des ondes radio dans les quasars avec le NRT
- Chronométrie de pulsars avec le NRT
- Observations de pulsars à basses fréquences avec LOFAR FR606
- Observations en imagerie avec LOFAR en utilisant les algorithmes les plus récents
- Imagerie et observations temps fréquence avec NenuFAR
- ...

Autres informations

Format : 5 jours, 4 nuits avec évaluation sur place le dernier jour. Le déroulement comprend une introduction aux sujets proposés, la préparation des observations, le traitement des données et leur interprétation. Une présentation orale évaluée des résultats par les étudiants le vendredi permet aux différents binômes de partager les connaissances acquises.

Pré-requis

- Pratique de Python (CTP01).
- Avoir suivi F01 et T01 est un atout mais n'est pas indispensable : il faut alors disposer de quelques connaissances de base en optique ondulatoire, photométrie, spectroscopie et systèmes de coordonnées célestes.

O04 Stage d'observation en radioastronomie millimétrique à l'IRAM

Pierre Guillard, IAP, Sorbonne Université (guillard@iap.fr)

Objectifs

Le télescope de 30m de l'IRAM est localisé à Pico Veleta en Espagne à coté de Grenade. Depuis 2010, quatre étudiants de la promotion peuvent aller y observer pendant une semaine. Le but de ce séjour d'observation sera donc de familiariser les étudiants avec un instrument de pointe dans le domaine millimétrique : techniques d'observations (continuum, spectroscopie), prise de données, réduction des données radioastronomiques, analyse et exploitation scientifique des données. C'est une excellente opportunité pour les étudiants de se former à la radioastronomie dans un contexte actuel riche (ALMA, SKA, AtLAST en particulier).

Thèmes abordés – Déroulement

Les étudiants participent d'abord à 4 séances de 2h de cours/préparation des observations. Ces cours introduisent la problématique scientifique, les concepts de base de la radioastronomie, se familiariser avec le logiciel de visualisation et réduction des données. Ensuite nous nous rendons au télescope à Grenade pour 3 jours d'observations et de réduction des données. Sur place, les étudiants suivent un cours d'environ 2h sur la chaîne de détection hétérodyne des données. Puis les étudiants écrivent un rapport envoyé à la direction de l'IRAM et (si possible !) publient les résultats !

1. Introduction à la problématique scientifique de la proposition d'observation (formation d'étoiles et processus de rétroaction des trous noirs supermassifs au centre des galaxies centrales d'amas, cinématique du gaz.)
2. Concepts de base de la radioastronomie dans le domaine (sub-)mm.
3. Caractéristiques de l'antenne et détection hétérodyne. Notion de température récepteur et calcul du bruit.
4. Définition de la stratégie d'observation et préparation des scripts.
5. Familiarisation avec CLASS, logiciel de réduction des données de l'IRAM. Technique d'empilement (stacking) des spectres et de filtrage.

Autres informations

Ce stage ne peut accueillir qu'un tout petit nombre d'étudiant(e)s (4) qui seront sélectionné(e)s sur leur motivation. Une à deux séances d'introduction et de préparation avant le départ sont prévues (un créneau est bloqué le 19/02 matin) avec des slides et des cours / documents en ligne disponibles.

Pré-requis

- Pratique de Python (CTP01).
- Avoir suivi F01, T07/T08 est un atout mais n'est pas indispensable : il faut alors disposer de quelques connaissances de base en optique ondulatoire, photométrie, spectroscopie et systèmes de coordonnées célestes.