

ÉCOLE DE PHYSIQUE DISTRIBUÉE
pour le monde de l'enseignement



Les MESSAGERS de L'UNIVERS

<http://e2phy.in2p3.fr>

28 - 30 Août 2017
APC / Université Paris 7 / Paris



MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION
NATIONALE

Programme

Lundi 28 août

10h00 : *accueil / café*

10h15 : **Ouverture** (*Olivier Martineau & Alessandra Tonazzo*)

10h30 : **Rapide panorama de la physique des hautes énergies** (*Pascal Sauvage*)

10h45 : **Mécanique quantique** (*Pierre-François Cohadon*)

12h15 : *Déjeuner (libre)*

13h30 : **Relativité restreinte et générale** (*Alexandre Le Tiec*)

15h00 : *Pause-café*

15h30 : **Genèse de l'astroparticule et son évolution** (*Stavros Katsanevas*)

18h00 : *cocktail de bienvenue (péniche du CROUS)*

Mardi 29 août

10h00 : *accueil / café*

10h30 : **Les rayons cosmiques** (*Pierre Salati*)

12h00 : *Déjeuner (libre)*

13h30 : **Les rayons gamma** (*Thierry Stolarczyk*)

15h00 : *Pause-café*

15h30 : **Les neutrinos** (*Alessandra Tonazzo*)

Mercredi 30 août

10h00 : *accueil / café*

10h30 : **Les ondes gravitationnelles** (*Nicolas Leroy*)

12h00 : *Déjeuner (libre)*

13h30 : **Ateliers 1**

15h00 : *Pause-café*

15h30 : **Ateliers 2**

17h00 : *clôture de l'école*

19h00 : **Einstein, Black holes & Gravitational Waves** (*Barry Barish*)

Conférence en anglais, sur inscription.

Présentation des cours

Génèse des astroparticules et de son évolution (S. Katsanevas)

Je vais passer en revue la confluence de sept «fleuves» de tradition expérimentale et théorique qui ont constitué le grand fleuve qu'on appelle aujourd'hui «Physique des Astroparticules et Cosmologie».

En particulier je vais présenter brièvement l'historique et les concepts des recherches:

- I. des rayons cosmiques chargés qui ont mené à la création AMS à l'espace et des Observatoires des rayons Cosmiques Auger au sol
- II. des rayons gamma à l'espace et des photons de haute énergie au sol qui ont conduit à l'expérience Fermi à l'espace et la proposition du Télescope Cherenkov CTA au sol
- III. des neutrinos de haute énergie qui a amené à la conception et réalisation des observatoires de fonds de mer ou fonds arctique Amanda/Antares ainsi qu'ICECUBE/KM3NET
- IV. des ondes gravitationnelles qui ont amené aux observatoires LIGO/Virgo et les récentes détections de fusion de trous noirs
- V. de l'étude de désintégration du proton qui a été à l'origine du mouvement vers la physique souterraine, donnant la première détection des neutrinos en provenance des supernovae ainsi que la recherche de la détection directe de la matière noire et les désintégrations rares pouvant nous informer sur la nature du neutrino
- VI. la recherche de la matière noire baryonique précurseur des grands relevés d'aujourd'hui pour la recherche d'énergie noire
- VII. la recherche du fonds diffus cosmologique.

Je vais conclure, en montrant la convergence concomitante des problématiques vers une image unifié du cosmos aujourd'hui, liant les modèles standard de la cosmologie et celles de la physique des particules, la convergence de l'information en provenance de différents messagers cosmiques, ainsi que les théories liant les parties "sombres" et "violents" à la structuration de l'Univers. Si le temps le permet, je parlerai enfin des structurations disciplinaires et interdisciplinaires qui ont accompagné ce vaste mouvement.

Notice biographique :

Professeur à l'Université Paris VII Denis Diderot, Stavros Katsanevas est directeur du laboratoire Astroparticules et Cosmologie (APC). Il a travaillé pour plusieurs expériences aux accélérateurs de Fermilab (US) et du CERN ainsi que pour des expériences des Astroparticules. De 2002 à 2012 il fut directeur adjoint Scientifique à l'Institut National de Physique Nucléaire (IN2P3), responsable pour l'astroparticule et la cosmologie et de 2012 à 2015 président du Consortium Européen de la Physique des AstroParticules. (APPEC). Il fut également président du conseil d'administration (2002-2012) de l'Observatoire Européen des Ondes Gravitationnelles (EGO) et chaire du conseil de l'Observatoire Auger (2012-2015).



Mécanique quantique (Pierre-François Cohadon)

La Mécanique Quantique est un pilier incontournable de la physique moderne, tant par son vaste champ d'application, que par l'étendue des développements technologiques qu'elle a permis de réaliser. Elle est caractérisée par des effets extrêmement spectaculaires et totalement contraires à toute intuition classique : interférences de particules matérielles, intrication, inégalité de Heisenberg...

Depuis deux décennies, des progrès expérimentaux considérables réalisés notamment en physique atomique ont permis de mettre directement en évidence certains de ces effets sur des systèmes individuels parfaitement contrôlés. Je présenterai plusieurs de ces expériences.

Nous étudierons en particulier les expériences d'interférence, réalisées avec des photons bien sûr, mais également avec des électrons, des atomes, des molécules de plus en plus complexes... Nous verrons également comment on peut directement mettre en évidence l'inégalité de Heisenberg sur le mouvement d'atomes piégés, ou la quantification du champ (autrement dit, les

photons) dans une cavité... Enfin, nous verrons comment (et pourquoi) on peut mettre en évidence le mouvement quantique d'oscillateurs macroscopiques, c'est-à-dire des structures artificielles réalisées par microfabrication.

Notice biographique :

Pierre-François Cohadon est enseignant-chercheur à l'Ecole Normale Supérieure. Son activité de recherche concerne les limites quantiques dans les mesures interférométriques de position. Une partie importante de cette activité concerne la mise en évidence expérimentale d'effets quantiques dans le mouvement d'un résonateur mécanique macroscopique. Il est également membre de la collaboration Virgo pour la détection des ondes gravitationnelles, pour laquelle il étudie l'amélioration de la sensibilité des interféromètres géants en utilisant des états non-classiques de la lumière.



Relativité restreinte et générale (Alexandre Le Tiec)

La théorie de la relativité restreinte, formulée par Einstein en 1905, est l'un des deux piliers de la physique moderne. Reposant sur le postulat d'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide dans tous les référentiels inertiels, cette théorie a révolutionné notre compréhension de la nature de l'espace et du temps.

Dix ans plus tard, en 1915, Einstein parvient à généraliser sa théorie afin de décrire l'interaction gravitationnelle dans un cadre relativiste. La gravitation apparaît alors simplement comme une manifestation de la courbure de l'espace-temps par son contenu matériel et énergétique.

Privilégiant une approche géométrique, je ferai amplement usage de diagrammes d'espace-temps afin d'expliquer de façon intuitive les phénomènes de « dilatation des durées » et de « contraction des longueurs » prédits par la théorie de la relativité restreinte.

Je décrirai également les principales idées physiques au cœur de la théorie de la relativité générale, ses prédictions les plus importantes (existence des trous noirs et du rayonnement gravitationnel, caractère dynamique de l'Univers) et son application à la géolocalisation par satellites.

Notice biographique :

Astrophysicien, Alexandre Le Tiec est chargé de recherche CNRS au laboratoire « Univers et Théories » de l'Observatoire de Paris. Ses activités de recherche portent principalement sur la théorie de la relativité générale d'Einstein, les trous noirs et les ondes gravitationnelles. Il cherche à prédire la forme des ondes gravitationnelles émises par diverses sources astrophysiques, en particulier lors du spiralement et de la fusion de deux étoiles à neutrons ou de deux trous noirs. Ces prédictions sont utilisées dans l'analyse du signal d'ondes gravitationnelles par les détecteurs [LIGO](#) et [Virgo](#), et dans le futur par l'observatoire spatial [LISA](#). Par ailleurs il s'investit activement dans l'enseignement et la diffusion des connaissances auprès du grand public.



Les rayons cosmiques (P. Salati)

C'est en découvrant puis en étudiant les radiations nous venant de l'espace que la physique des particules est née. Un siècle plus tard, l'étude des rayons cosmiques est plus que jamais d'actualité. Certes, nous pensons comprendre désormais comment ces particules cosmiques sont produites et comment elles voyagent au sein des champs magnétiques de la Voie Lactée. Mais au fur et à mesure que les observations se précisent, les modèles doivent s'affiner. D'autre part, la mystérieuse matière noire qui constitue un tiers de l'univers pourrait laisser des empreintes dans le spectre en énergie de certaines espèces cosmiques. Il est alors crucial de bien comprendre les fonds astrophysiques dans lesquels le signal se niche, et donc de mieux cerner les mécanismes de production et de transport des rayons cosmiques.

Après un rappel historique sur la découverte des rayons cosmiques, je détaillerai le modèle de la boîte qui fuit qui fut le premier à décrire leur propagation au sein de la galaxie. Cette théorie simpliste est efficace pour reproduire les observations, notamment le rapport du flux de bore à celui de carbone. Elle nous enseigne aussi que les particules chargées diffusent dans les champs magnétiques de la Voie Lactée et ne se propagent pas en ligne droite comme la lumière. Nous affinerons alors notre description

grâce à un modèle où la diffusion joue un rôle central. Nous nous aiderons de certaines données de la radio-astronomie. Nous nous attaquerons ensuite à l'accélération des rayons cosmiques. Je décrirai le mécanisme de Fermi selon lequel les particules diffusent sur des noeuds magnétiques en mouvement, engendrant ainsi une accélération et une diffusion en énergie. Ce processus n'est cependant pas suffisant. Nous nous pencherons alors sur la manière dont un choc, issu par exemple de l'explosion d'une étoile massive, peut accélérer les noyaux du milieu interstellaire aux énergies observées. Je conclurai en présentant des travaux récents portant sur les sujets évoqués pendant le cours.

Notice biographique :

Ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure, Pierre Salati est professeur à l'Université Savoie Mont Blanc et effectue ses recherches au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique Théorique (LAPTh). Il s'intéresse tout d'abord au problème de la matière noire en cherchant des candidats sous forme de particules élémentaires. Il est Miller Fellow à l'Université de Berkeley en Californie où il travaille avec Joseph Silk sur les signatures stellaires de la matière noire. Il est ensuite boursier de la division Théorie du CERN de Genève où il collabore avec John Ellis. Depuis une vingtaine d'années, ses recherches glissent vers le rayonnement cosmique et notamment l'antimatière qu'il est susceptible d'abriter. Il est l'un des animateurs de la Cosmic Ray Alpine Collaboration, un groupe de recherche dédié à l'interprétation des observations récentes, notamment celles effectuées à bord de la station spatiale internationale par le spectromètre AMS.



Les rayons gamma (Thierry Stolarczyk)

Radiation mystérieuse découverte en 1900 à la suite des radioactivités alpha et bêta, le rayonnement gamma est une lumière à l'extrémité du spectre électromagnétique, au-delà des rayons X, avec des énergies caractéristiques des réactions nucléaires et bien au-delà.

Les rayons gamma d'origine cosmique permettent de sonder l'Univers sur de très grandes distances. Observés dès les années 60, ils ont depuis permis de répertorier des milliers de sources émettant à très haute énergie, sièges de phénomènes cataclysmiques dans la Galaxie ou aux confins de l'Univers. Nous verrons qu'ils témoignent des explosions d'étoiles ou des turbulences agitant la matière près des trous noirs, comment ils peuvent nous éclairer sur la nature de la matière noire et pourraient enfin nous révéler l'origine du rayonnement cosmique.

Notice biographique :

Chasseur de particules cosmiques, CEA, Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)

Site web : <http://neutrini.free.fr>

Après avoir traqué les neutrinos solaires sous une montagne en Italie, puis étudié leurs propriétés au CERN à Genève, Thierry Stolarczyk a recherché les neutrinos cosmiques avec Antares, un télescope dans les abysses Méditerranéennes. Il est aujourd'hui au service d'astrophysique du CEA de Saclay, à la tête de l'équipe CTA, une nouvelle génération d'observatoire de rayons gamma destiné à élucider le mystère de l'origine du rayonnement cosmique. Épris depuis toujours de la diffusion de la Science, il participe à de nombreuses actions de popularisation et publie plusieurs ouvrages à destination du grand public.



Les neutrinos (Alessandra Tonazzo)

Le neutrino joue un rôle-clé à la frontière de la physique des particules et de l'astrophysique. Il est un incomparable messager de l'infiniment petit et de l'infiniment grand.

Le neutrino existe en trois saveurs. Un des résultats les plus importants de ces dernières années en physique est la découverte du phénomène d'« oscillation » d'une saveur à l'autre pendant la propagation, ce qui a démontré que les neutrinos avaient une masse non nulle (Prix Nobel 2015). Or, tout n'est pas encore connu... Quelle est la masse des neutrinos ? Cela a de fortes

implications en physique des particules, car elle ouvre une porte vers les théories au-delà du modèle standard, et en cosmologie, en liaison avec la matière noire. La nature même du neutrino n'est pas établie : est-il ou pas sa propre antiparticule ?

La faible probabilité d'interaction du neutrino lui permet de s'extraire aisément des milieux émissifs les plus denses: centre du Soleil, couches profondes des supernovas, noyaux actifs de galaxies. Plusieurs expériences présentes et futures tentent de révéler les neutrinos liés à ces événements astrophysiques, pour mieux comprendre leurs sources.

Notice biographique :

Alessandra Tonazzo est professeur à l'Université Paris-Diderot. Elle participe à des expériences pour la mesure des paramètres des neutrinos (Double Chooz, en France) et pour la recherche de matière sombre (DarkSide, en Italie) et prépare un projet futur pour un observatoire de neutrinos de grande taille (DUNE, aux USA).

Les ondes gravitationnelles (Nicolas Leroy)

Prédites en 1916 par Albert Einstein comme l'une des conséquences de la théorie de la Relativité Générale, les ondes gravitationnelles n'ont été détectées pour la première fois qu'un siècle plus tard après une traque expérimentale de plus de 50 ans. Seuls les événements les plus violents de l'Univers, comme l'effondrement d'une étoile massive en supernovae ou la fusion de deux trous noirs, sont à même de produire ce phénomène de manière suffisamment intense pour qu'il soit détectable sur Terre. Toutefois pour y arriver il faut avoir recours aux instruments parmi les plus grands et les plus précis jamais construits.

Je reviendrais sur les différents aspects de la découverte des ondes gravitationnelles tant du point de vue des instruments mis en place que des conséquences théoriques et astrophysiques des premiers objets détectés.

Notice biographique :

Nicolas Leroy est chargé de recherche au CNRS au laboratoire de l'Accélérateur Linéaire d'Orsay (LAL, CNRS/IN2P3 – Université Paris-Sud). Il travaille depuis 13 ans sur l'interféromètre Virgo dont le but est la détection des ondes gravitationnelles (OG) en commun avec les instruments américains LIGO. Il s'intéresse aux différents aspects de ce type d'expérience tant du point de vue du détecteur, de l'analyse des données ou du suivi par d'autres instruments des événements par d'autres instruments des événements d'OG. Il est également impliqué depuis plusieurs années dans la mission spatiale Franco-Chinoise SVOM qui décollera en 2021 dédiée à l'étude des sursauts gamma et qui sera un outil central pour l'astronomie multi-messagers.



Informations pratiques

La première édition de l'école EφD est hébergée par l'APC, laboratoire mixte CNRS-Université Paris Diderot.

L'ensemble des cours auront lieu à l'Université Paris Diderot. dans l'amphithéâtre 1A de la Halle aux Farines, et les ateliers dans le laboratoire APC.



Un cocktail de bienvenue est offert aux participants et intervenants de l'école lundi 28 à partir de 18h. Il aura lieu sur la péniche du CROUS, amarrée en face de la BNF.

Présentation des ateliers

Les ateliers sont organisés en 2 sessions d'1h30 vendredi 30 après-midi (13h30-15h et 15h30-17h).

Le nombre de personnes pouvant participer à chacun des ateliers est limité. Les participants à l'école EφD sont invités à classer par ordre de priorité les ateliers auxquels ils veulent participer (par exemple 1 : B, 2 : C, 3 : A, etc) et à transmettre ces vœux sur papier libre (en indiquant leur nom) à Clémence Epitalon, Alessandra Tonazzo ou Olivier Martineau dans la journée de lundi.

Vous serez informés avant mardi soir des 2 sessions auxquels vous participerez.

A- Table Ronde : Les femmes et les sciences physiques

Au CNRS/IN2P3, les femmes ne représentent que 30% des chargés de recherche en physique. Ce constat est assez représentatif des laboratoires de recherche en physique en France comme en Europe. Pourtant à la fin du collège, les filles ont des résultats légèrement meilleurs que les garçons en sciences.

Pourquoi les filles s'orientent-elles moins vers les sciences physiques que les garçons ? Quelles peuvent-être les raisons historiques ou sociologique ? Quelles sont les modèles féminins célèbres en sciences ? Quelles sont les pratiques qui peuvent être mises en œuvre en classe pour promouvoir les orientations scientifiques et techniques auprès des filles ?

Nous débiterons la séance par une présentation des femmes de science d'hier et d'aujourd'hui, ainsi que d'une vue d'ensemble de leur rôle et de leur présence dans la recherche européenne.

Puis les participants seront amenés à intégrer le groupe de réflexion de leur choix afin de faire émerger des questionnements et/ou des méthodes qui participeront à faire évoluer les pratiques en classe face à l'auto-sélection des filles.

La troisième et dernière partie de la séance consistera en un échange de questions/réponses entre les participants.

Cette table ronde aboutira à un document de synthèse réalisé par les organisateurs qui recensera les réflexions, outils et méthodes qui en auront émergés et qui seront mis à disposition sur le site internet d'EPHYD.

Animatrices : Alessandra Tonazzo enseignante-chercheuse à l'Université Paris Diderot à l'APC, Hajer Graya, ingénieure et Médiatrice scientifique, Clémence Epitalon, collaboratrice du projet européen GENERA et experte de médiation scientifique.

Nombre maximal de participants par session: 25

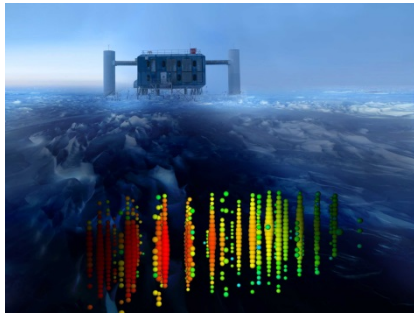
B- Table ronde : la démarche scientifique, du laboratoire à la classe.

La démarche scientifique occupe depuis maintenant plusieurs années une place importante au sein des programmes de physique et chimie du secondaire. Au cours de cet atelier, plusieurs questions seront abordées: Que peut recouvrir l'expression "démarche scientifique" dans le monde de la recherche scientifique? Mais aussi dans l'enseignement primaire et secondaire? Pourquoi est-il important de former les élèves à la démarche scientifique? Comment inclure la démarche scientifique aux enseignements dans le secondaire? Quelle place pour les modèles dans la démarche scientifique?

Animateurs : Pierre Salati, chercheur au CNRS (LPTHE), et Pascal Sauvage, enseignant de physique-chimie et formateur académique à l'académie de Créteil.

Nombre maximal de participants par session: 25

C- Atelier "Analyse de données de l'observatoire de neutrinos IceCube"



Cet atelier propose l'analyse des données de l'expérience IceCube, qui a publié en 2013 la première évidence de neutrinos d'origine cosmique. Ces particules interagissant très faiblement, elles sont susceptibles de nous apporter des informations sur l'Univers très lointain. Après avoir compris comment les neutrinos sont observés, nous allons apprendre à les distinguer des autres particules – beaucoup plus nombreuses- qui interagissent dans le détecteur, et à extraire les informations physiques importantes (direction d'origine, énergie, etc). Nous pourrons ainsi reproduire ce résultat historique de la découverte de neutrinos de très haute énergie.

Encadrants : , Romain Gaior, post-doctorant au LPNHE, Simon Bourret et Andrea Scarpelli, doctorants à l'APC.

Responsable de l'atelier : Alessandra Tonazzo, enseignante-chercheuse à l'université Paris Diderot et au laboratoire APC.

Nombre maximal de participants à l'atelier : 60

D- La roue cosmique



A l'aide d'un détecteur dédié, nous allons mettre en évidence et compter les muons, particules issues des interactions des rayons cosmiques avec l'atmosphère et qui bombardent la surface de la Terre. Nous expliquerons et vérifierons le fonctionnement du détecteur, déterminerons une méthode d'identification des muons et ferons une mesure du nombre de muons en fonction de leur direction d'arrivée dans le ciel. Enfin, nous mettrons en évidence l'arrivée de gerbes de muons au niveau du sol, reproduisant ainsi l'expérience historique de Pierre Auger en 1937.

Encadrant : Gérard Tristram, ancien chercheur CNRS à l'APC.

Nombre maximal de participants par session: 5

E- Réalisation d'un interféromètre gravitationnel



Les premières ondes gravitationnelles venues de fond de l'espace ont été détectées il y a tout juste deux ans grâce aux interféromètres géants de l'expérience Ligo. L'atelier vous propose de découvrir ou de redécouvrir l'interféromètre de Michelson, technologie qui a rendue possible cette prouesse. Vous y découvrirez comment, grâce à du matériel de TP, il est possible d'observer des infimes déplacements bien plus petits que la taille d'un atome !

Au programme : laser, interférences et filtrage numérique du signal

Matériel utilisé : diode laser, oscilloscope et générateur basse fréquence numérique, composants optiques et photo-détecteur.

Animateurs : Tristan Briant et Laurent Le Guillou, enseignants chercheurs à l'Université Pierre et Marie Curie et aux laboratoires LKB et LPNHE.

Nombre maximal de participants par session: 20

F- Radio-astronomie amateur



Avec l'évolution de la téléphonie mobile et des télécommunications, il est aujourd'hui possible pour les astronomes amateurs de réaliser des mesures remarquables dans le domaine radio pour un coût raisonnable. A travers une introduction à la radioastronomie et des exemples pratiques, j'illustrerai les possibilités qui nous sont offertes pour détourner de leur utilisation première certains systèmes de télécommunications et en faire de véritables instruments d'observation avec une sensibilité tout à fait raisonnable.

Animateur : Michel Piat, enseignant-chercheur à l'université Paris Diderot et au laboratoire APC.

Nombre maximal de participants par session: 15