

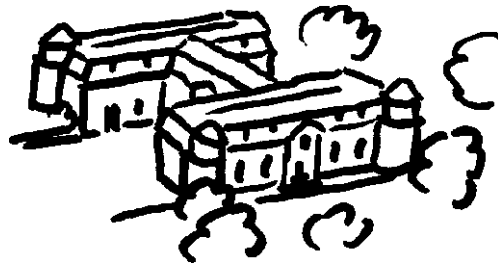
Goutelas 2003

PHYSIQUE ET ASTROPHYSIQUE
DU RAYONNEMENT COSMIQUE

Goutelas 2003

PHYSIQUE ET ASTROPHYSIQUE DU
RAYONNEMENT COSMIQUE

Ecole thématique du CNRS
Goutelas (Loire) – 2 au 6 juin 2003



Ouvrage collectif dirigé par
E. Parizot, A. Marcowith, V. Tatischeff,
G. Pelletier et P. Salati

Observatoire astronomique de Strasbourg,
GDR Phénomènes Cosmiques de Haute Énergie, et
Société Française d'Astronomie et d'Astrophysique (SF2A)

Table des Matières

Préface	iii
<i>Etienne Parizot</i>	
Présentation générale	v
<i>E. Parizot, A. Marcowith, V. Tatischeff, G. Pelletier et P. Salati</i>	
Remerciements	vii
<i>EP, AM, VT, GP et PS</i>	
Liste des participants	ix
Une brève histoire des rayons cosmiques	1
<i>Jacques Paul</i>	
The Interstellar Medium of our Galaxy	7
<i>Katia Ferrière</i>	
Rayonnement cosmique au-delà du genou : résultats expérimentaux	27
<i>Martin Lemoine</i>	
Galactic Magnetic Fields	41
<i>Katia Ferrière</i>	
Le Transport des Rayons Cosmiques	59
<i>Guy Pelletier</i>	
Modélisation multi-échelle du transport et de l'accélération des rayons cosmiques	75
<i>Fabien Casse</i>	
Accélération des particules : les mécanismes de Fermi	87
<i>Etienne Parizot</i>	
Aspects modernes de l'accélération : Chocs relativistes, effets non-linéaires, turbulence	145
<i>Yves Gallant</i>	
Interactions du rayonnement cosmique avec le milieu ambiant : aspects nucléaires	157
<i>Jürgen Kiener</i>	

La propagation des noyaux chargés dans la Galaxie	169
<i>David Maurin et Richard Taillet</i>	
Les antiprotons : une sonde pour la matière noire et les neutralinos	227
<i>Pierre Salati</i>	
Processus d'interaction continus du rayonnement cosmique . . .	243
<i>Alexandre Marcowith</i>	
Les émissions X et γ du rayonnement cosmique galactique . . .	267
<i>Vincent Tatischeff</i>	
Cosmic-ray acceleration in supernova remnants	281
<i>Jean Ballet</i>	
Les sursauts gamma	297
<i>Frédéric Daigne</i>	
Les noyaux actifs de galaxie et le rayonnement cosmique	361
<i>Alexandre Marcowith</i>	
Rayonnement cosmique de ultra-haute énergie : modèles théoriques	383
<i>Martin Lemoine</i>	

Préface

Le nom même des *rayons cosmiques* résonne, pour l'esprit qui se tourne enivré vers les cieux innombrables de la connaissance, comme un étrange appel à la rêverie, suivi des échos étouffés du mystère et de la magie. Rayons ... cosmiques ... L'inventeur de ce nom n'avait pourtant rien de l'auteur de science fiction inspiré. Robert Millikan le choisit en 1925 – 13 ans après l'étonnante découverte de Viktor Hess – convaincu que ces particules ionisantes en provenance du cosmos étaient essentiellement des photons de très haute énergie. Le fait qu'il ait eu tort ne retire rien à son immense talent de physicien expérimentateur, mais assure aux rayons cosmiques une place exceptionnelle au panthéon de l'astrophysicien : ils sont les seuls échantillons de matière qui nous parviennent de l'espace intersidérale, bien au-delà des limites de notre système solaire !

Que l'on y songe seulement : tout ce que nous savons du cosmos nous fut enseigné par la lumière ! Nous pesons les galaxies et les amas les plus lointains, mesurons la température des astres, déterminons la densité des nuages, leur vitesse, repérons les champs magnétiques, identifions des atomes à des milliards d'années-lumière... tout cela simplement par l'analyse éclairée – c'est bien le mot ! – de quelques photons. Que ne pourrions-nous faire, alors, avec de la matière ? Le rayonnement cosmique ne vient-il pas en effet alourdir la Terre chaque année de près d'un kilogramme de matière interstellaire, dont une partie infime, mais tellement précieuse, a même accompli jusqu'à nous le plus improbable des voyages à travers les grands vides intergalactiques ?

En astrophysique, les photons sont loquaces parce que chacun d'eux a ses attributs propres : une direction d'arrivée et une énergie spécifiques. On peut ainsi identifier des sources bien distinctes dans le ciel, en dresser le spectre de fréquences et appliquer à leur modélisation complexe toute la connaissance et le savoir-faire accumulés par le physicien au cours des siècles, dans des laboratoires bien plus tangibles que les confins extrasolaires. Le rayonnement cosmique, lui, ne se laisse pas saisir de manière analogue. Chaque rayon cosmique a bien son énergie propre, et nous pouvons certes tracer un spectre d'énergie – au demeurant fort instructif –, mais la direction d'arrivée des différentes particules ne trahit pas directement leur source. Les rayons cosmiques, parce qu'ils sont chargés, sont constamment défléchis par les champs magnétiques interstellaires, et se présentent à nous comme un flux essentiellement isotrope dont le spectre angulaire ne nous révèle pratiquement rien. Leurs sources nous échappent comme une source de lumière aux yeux d'un observateur plongé dans un profond brouillard...

Pour dépasser ce terrible handicap directionnel, les rayons cosmiques nous offrent cependant un recours inédit en astronomie photonique : une

dimension spectrale supplémentaire ! Tous les photons sont identiques, à leur énergie près. Mais les rayons cosmiques présentent toute la diversité des noyaux de l'univers. C'est donc essentiellement par l'étude de leur spectre de masse, en liaison étroite avec leur spectre d'énergie, que nous pourrions tirer du rayonnement cosmique toute l'information qu'il recèle.

Cette École avait pour objectif d'offrir un aperçu général des différentes activités de recherche autour du rayonnement cosmique à une communauté élargie de physiciens et d'astrophysiciens. Les progrès récents de l'astronomie photonique à haute énergie (X, gamma, TeV...) et les développements inattendus de la problématique des rayons cosmiques ultra-énergétiques ont conduit des chercheurs d'horizons et de formations très divers sur le chemin presque centenaire mais toujours mystérieux de ces particules énergétiques. Au moment où se cristallise la vaste thématique des astroparticules, c'est donc dans une optique résolument pluridisciplinaire que nous avons conçu cette série de cours, avec le souci particulier de présenter les bases de la science des rayons cosmiques de manière suffisamment simple et pédagogique pour retenir l'intérêt de chercheurs inexpérimentés dans cette discipline.

Convaincus de sa richesse et de sa beauté, nous espérons contribuer ainsi à l'émergence d'un élan concerté de recherches pluridisciplinaires autour de cette thématique, et encourager des chercheurs d'autres domaines à faire de même, chacun dans sa discipline, pour nous aider à accéder, nous aussi, aux merveilles qu'ils côtoient chaque jour...

Etienne Parizot

Présentation générale

Cet ouvrage regroupe les versions écrites, et parfois augmentées, des différents cours dispensés à l'École de Goutelas 2003, sur la Physique et l'Astrophysique du Rayonnement Cosmique. Il s'organise de la manière suivante.

Le livre s'ouvre sur une présentation historique, dans laquelle Jacques Paul introduit la problématique du rayonnement cosmique et met en lumière ses liens avec d'autres domaines importants de l'astrophysique. Les deux cours suivants sont consacrés aux données observationnelles sous-jacentes aux diverses études qui suivront : Katia Ferrière dresse d'abord un panorama général des différentes composantes du milieu interstellaire, dans lequel les rayons cosmiques se propagent et dont ils constituent une composante importante du point de vue énergétique ; Martin Lemoine présente ensuite les diverses observations relatives aux rayons cosmiques de haute énergie, ceux de plus basse énergie étant étudiés en plus grand détail dans des cours ultérieurs.

Les trois cours suivants abordent le problème central du transport des rayons cosmiques dans le milieu interstellaire. Dans la mesure où ce transport est totalement contrôlé par les champs magnétiques, et notamment par leur irrégularités, un premier cours, par Katia Ferrière, est consacré à la génération du champ magnétique dans l'univers, et aux méthodes observationnelles permettant d'en contraindre les propriétés. Guy Pelletier expose ensuite différents aspects théoriques du transport des rayons cosmiques, notamment en ce qui concerne les coefficients de diffusion, et Fabien Casse indique comment les paramètres du transport peuvent être étudiés au moyen de la modélisation numérique.

Dans les cours suivants, le problème de l'accélération des rayons cosmiques est abordé. Etienne Parizot décrit d'abord les mécanismes de Fermi et l'accélération par onde de choc dans le cas de la particule-test, en s'appuyant également sur les propriétés du transport des particules énergétiques, et Yves Gallant discute les principaux développements récents de la théorie de l'accélération, avec le cas des chocs relativistes et la rétroaction des rayons cosmiques sur le milieu accélérateur et les champs magnétiques ambiants.

La phase d'accélération n'est qu'une étape dans la longue vie mouvementée des rayons cosmiques. Leur propagation depuis leurs sources jusqu'à la Terre où ils sont détectés fait intervenir de nombreux processus : le transport dans les champs magnétiques, déjà abordé, mais aussi toute une série d'interactions avec le milieu interstellaire, au cours desquelles ils subissent des pertes d'énergie et des réactions nucléaires qui donnent lieu à la production de noyaux secondaires. Le cours de Jürgen Kiener décrit l'ensemble de ces processus nucléaires, dont font ensuite

usage David Maurin et Richard Taillet pour discuter les différents aspects de la propagation du rayonnement cosmique de basse énergie, et confronter les données observationnelles aux résultats de divers modèles. Puis Pierre Salati reprend l'étude de la propagation pour l'appliquer au cas des antiprotons, qu'ils soient produits en vol par l'interaction des protons énergétiques avec le milieu interstellaire ou en tant que particules primaires par annihilation de neutralinos, candidats intéressants pour composer la matière noire.

Un autre aspect très important de l'étude du rayonnement cosmique est l'émission de photons lors de diverses interactions avec le milieu interstellaire. Alexandre Marcowith passe en revue les différents processus produisant un rayonnement photonique continu, et calcule au passage les pertes d'énergie associées, tandis que Vincent Tatischeff se concentre sur les émissions interstellaires dans les domaines X et gamma, et trace le bilan des contraintes observationnelles et des questions qui demeurent en suspens dans ce domaine.

Le reste de l'ouvrage est consacré à l'étude de certaines sources énergétiques dans l'univers, présentant un intérêt particulier en tant que sources de rayons cosmiques ou dont la modélisation requiert la prise en compte des processus d'accélération et de rayonnements induits par les particules énergétiques. Jean Ballet se concentre sur les restes de supernova, dans leurs aspects théoriques et observationnelles. Frédéric Daigne fait de même avec les sursauts gamma, et Alexandre Marcowith avec les noyaux actifs de galaxie.

Ces deux derniers types de sources ont été proposés comme responsables de la production des rayons cosmiques ultra-énergétiques, s'étendant jusqu'à des énergies vertigineuses, au-delà de 10^{20} eV, qui représentent aujourd'hui l'élément le plus mystérieux de la vaste problématique du rayonnement cosmique. C'est donc avec ces rayons cosmiques de l'extrême que se termine cet ouvrage, à travers le cours de Martin Lemoine qui présente les observations, les paradoxes et les différentes idées astrophysiques, de cosmologie et de physique des particules qui sont le plus souvent avancées dans ce domaine.

Nous avons souhaité aborder les différents aspects physiques et astrophysiques de la science des rayons cosmiques, qui forme un domaine à la fois vaste et intriqué. La durée de l'École nous a toutefois contraints à faire des choix, et nous avons dû laisser de côté certains aspects très importants, comme la régulation des processus physico-chimiques du milieu interstellaire par les rayons cosmiques (ionisation, chauffage, astrochimie...), l'influence de l'irradiation sur le taux de formation d'étoiles, donnée centrale de l'astrophysique galactique générale, ou encore les aspects

d'astrobiologie, en plein développement, sans parler des recherches de physique fondamentale et de cosmologie théorique en marge de la problématique du rayonnement cosmique ultra-énergétique. Nous invitons cependant le lecteur à s'enquérir de ces différents développements et, d'une manière générale, nous l'encourageons à considérer le rayonnement cosmique dans sa globalité, comme un objet d'étude multidimensionnel, dont chacun des aspects (physique, astrophysique, galactique, extragalactique, haute et basse énergie, primaire et secondaire...) contribuera à en percer le mystère et dans le même temps à en faire un outil de premier plan pour l'astrophysique et la physique.

Les organisateurs :

E. Parizot, A. Marcowith, V. Tatischeff, G. Pelletier et P. Salati

Remerciements

Les organisateurs souhaitent adresser leurs sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à l'existence et au bon déroulement de cette École.

Tout d'abord, un grand merci à Jacques Paul, qui encouragea ce projet dès sa genèse et suggéra le cadre de Goutelas pour l'accueillir. Merci aussi à l'équipe de l'Observatoire astronomique de Strasbourg, responsable des Écoles de Goutelas, qui accepta de dédier la version 2003 au rayonnement cosmique et de nous en confier l'organisation. Nous remercions plus particulièrement Daniel Egret pour sa disponibilité et son aide constante dans l'organisation pratique de cette École, ainsi que dans la constitution du présent ouvrage. Anita Grasset, responsable du bureau de la formation permanente de la Délégation Alsace du CNRS, fut également d'un grand secours et d'un grand dévouement. Nous lui en sommes très reconnaissants.

Le financement de cette École fut assuré par la Formation Permanente du CNRS, dont nous saluons l'efficacité, avec le concours du GDR "Phénomènes Cosmiques de Haute Énergie" qui a confirmé par son soutien l'intérêt de cette École pour la communauté qu'il représente.

Nous souhaitons aussi remercier avec émotion l'ensemble des participants, auditeurs et orateurs, qui par leur enthousiasme constant et leur humeur chaleureuse auront permis à chacun de garder de cette semaine, au programme scientifique très chargé, un souvenir particulièrement agréable et enrichissant.

L'accueil irréprochable de l'équipe du Centre Culturel de Goutelas n'y fut certes pas étranger, et c'est à eux tous qu'iront pour finir nos remerciements chaleureux. Surtout, ne vous séparez jamais de vos boules

de pétanque, sans lesquelles nous n'aurions pu éliminer le stress accumulé au cours de longues journées studieuses, ou bien plus nuitamment autour des tables de poker ornées parfois de parfumés breuvages locaux ou de plus lointaine origine...

Enthousiasmés par cette aventure,

les organisateurs (EP, AM, VT, GP, PS)

Liste des Participants

ALLARD Denis (Institut de Physique Nucléaire d'Orsay)
ANDRÉ Nicolas (Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse)
BALLET Jean (Service d'Astrophysique de Saclay, CEA)
BEAU Tristan (Collège de France, Paris)
BENEST Daniel (Observatoire de Nice)
BRION Elisabeth (Centre d'Études Nucléaires de Bordeaux Gradignan)
BRITTO Richard (Groupe d'Astroparticules de Montpellier)
CASSAM-CHENAÏ Gamil (Service d'Astrophysique de Saclay, CEA)
CASSE Fabien (Institut de Physique des Plasmas, Utrecht, Pays-Bas)
COLIN Pierre (Labo. d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules)
COUPÉ Séverine (Observatoire Astronomique de Marseille-Provence)
CREUSOT Alexandre (Institut de Physique Nucléaire d'Orsay)
DAIGNE Frédéric (Institut d'Astrophysique de Paris)
DA SILVA Pierre (Lab. Physique Nucléaire et de Hautes Énergies, Paris)
DJANNATI-ATAÏ Arrache (PCC/APC, Collège de France, Paris)
DORNIC Damien (Institut de Physique Nucléaire d'Orsay)
FERRAND Gilles (École Centrale)
FERRIÈRE Katia (Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse)
GALLANT Yves (Groupe d'Astroparticule de Marseille)
GODET Olivier (Centre d'Étude Spatiale des Rayonnements, Toulouse)
HAMILTON Jean-Christophe (Lab. Phys. Nucl. et Hautes Én., Paris)
KIENER Jürgen (CSNSM, Orsay)
LACHAUD Cyril (PCC/Collège de France, Paris)
LAVIELLE Bernard (Centre d'Études Nucl. de Bordeaux Gradignan)
LEBRUN François (Service d'Astrophysique de Saclay, CEA)
LEMOINE Martin (Institut d'Astrophysique de Paris)
MAURIN David (Service d'Astrophysique de Saclay, CEA)
MAURIN Gilles (PCC/Collège de France, Paris)
MARCOWITH Alexandre (CESR, Toulouse)
MEYER-VERNET Nicole (LESIA, Obs. de Paris, Meudon)
MONNIER RAGAIGNE Delphine (LAL, Orsay)
PAUL Jacques (Service d'Astrophysique de Saclay, CEA)
PARIZOT Etienne (Institut de Physique Nucléaire d'Orsay)
PELLETIER Guy (Laboratoire d'Astrophysique de Grenoble)
PITA Santiago (PCC/APC, Collège de France, Paris)
PLAYEZ Nathalie (Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Orsay)
RANCHON Stéphane (Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Orsay)
RENAUD Matthieu (Service d'Astrophysique de Saclay, CEA)
REVENU Benoît (Institut d'Astrophysique de Paris)

SAJJAD Saeeda (Groupe d'Astroparticule de Marseille)
SALATI Pierre (Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique Théorique)
TAILLET Richard (Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Phys. Th.)
TATISCHEFF Vincent (CSNSM, Orsay)
TERRIER Régis (Service d'Astrophysique de Saclay, CEA)
ZOUGANELIS Ioannis (LESIA, Obs. de Paris, Meudon)



Photo de groupe, dans la cour du château.

Les éditeurs remercient vivement Richard Britto, auteur de toutes les photos illustrant ce volume.
