

Formation

HDR: Université Paris 7, Production de paire de leptons dans les collisions d'ions lourds. Laboratoire National Lawrence Berkeley (LBL), Berkeley Californie, États Unis et Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies (LPNHE, UMR 7585). 1992

Doctorat : Thèse de physique théorique, Université Paris 7, recherche d'oscillation de neutrinos. Effectuée au LPNHE et au Laboratoire National de Brookhaven (BNL), New-York, Etats Unis. 1987

Masters : Physique théorique (DEA ENS, Polytechnique, et universités P6,7 et 11) 1985.

Maitrise de physique (Université P7) et 3/4 de la Maitrise de Mathématique (Université P7). 1984

Licences : Licence de Mathématique et Licence de Physique (Université P7). 1983

Développement professionnel

Doctorant au LPNHE	1985-1987
Post-Doctorant au Lawrence Berkeley Laboratory	1987-1989
Chargé de Recherche au CNRS affecté au LPNHE	1988-2003
Directeur de Recherche au CNRS – LPNHE	Depuis 2003

Recherches

Oscillations de neutrinos	1985-1987 puis 1991-1995
Collision d'ions lourds et paire de leptons	1987-1989
Production du boson Z0 au LEP	1989-1991
Rayons cosmiques d'Ultra Haute Énergie	Depuis 1995
Recherche de matière noire (expérience DAMIC)	Depuis 2014

Expérience dans l'enseignement

Création du DEA Modélisation et Instrumentation en Physique (MIP). Université de Paris 6.	1992-1994
Cours de probabilités et Statistiques	1996-2002

Affiliations/Appartenances

Coordinateur Scientifique de la collaboration Auger (500 physiciens)	2008-2013
Responsable du groupe Auger du LPNHE	Depuis 2003
Coordinateur national de l'observatoire Auger	Depuis 2008
Membre du bureau de la collaboration Auger	Depuis 2008
Membre du Scientific Advisory Committee d'ASPERA	2009-2013
Membre extérieur du conseil scientifique du LAPP	2010-2014
Membre du conseil scientifique de l'Institut Lagrange de Paris	depuis 2011
Expert extérieur, représentant la Physique des particules et des hautes énergie de l'IN2P3 dans le groupe Brésil du MAE/ MENR	2012-2013
Président du conseil scientifique de COSMOS à l'école	Depuis 2013

Prix/Distinctions

Lauréat du programme européen Auger-Access (2006)

Chevalier de la Légion d'Honneur (2009)

Lauréat du Programme Interdisciplinaire Particule et Univers (2009)

Lauréat du programme Emergence de l'UPMC (2010)

Lauréat du programme blanc de l'ANR section SIMI5 (2012)

Activités de Recherches (2011-2015)

Coordinations : Membre fondateur de l'observatoire Auger et promoteur de son existence en France depuis 1992, je m'y consacre à plein temps depuis 1995. L'observatoire Auger, combine un réseau de capteurs de 1650 cuves Cherenkov et 4 télescopes à fluorescence pour une ouverture de près de 8.000 km² str. Il a été spécialement conçu pour étudier les caractéristiques des rayons cosmiques d'énergie supérieures à 10 EeV (environ 1 Joule). Je poursuis mes activités auprès de l'observatoire Auger au LPNHE de l'Université UPMC à Jussieu. Je suis responsable du groupe Auger de ce laboratoire (8 chercheurs 4 ingénieurs) et coordinateur national du projet (5 laboratoire, environ 40 chercheurs et 10 ITA, budget annuel de 400 k€). Au niveau international j'ai été coordinateur scientifique de l'observatoire de 2008 à fin 2013.

J'ai créé en 2003 puis coordonné jusqu'en 2008 (pour devenir coordinateur scientifique) le groupe d'études des anisotropies) ponctuelles ou grandes échelles de l'Observatoire. De nombreux résultats ont été produits par ce groupe, de la recherche de sources ponctuelles avec les corrélations avec les AGN proches publiée en 2007/2008 aux études à grandes échelles publiées en 2011, 2012 et 2013. Aujourd'hui je suis l'un des coordinateurs de l'analyse conjointe des données du Telescope Array et d'Auger pour la recherche d'anisotropies grandes échelles au dessus de 10 EeV. Les deux collaborations ont mis en commun leurs données et nous avons mis au point une méthode originale de meta-analyse. La publication de nos résultats a été faite en 2014, *The Pierre Auger and Telescope Array Collaborations*, *ApJ*, 794, 172 (2014).

A partir de 2009 je me suis attaché à améliorer les capacités de l'observatoire pour la mesure de la masse des RCUHE primaires. J'ai suivi plusieurs pistes dont trois ont abouties à des R&D dont j'assure la coordination. Les R&D radio MHz du programme EASIER (Extensive Air Shower Identification with Electron Radiometers) financées par le programme P&U du CNRS puis le programme Émergence 2010 de l'UPMC. Les R&D radio GHz du programme GIGAS (Gigahertz Identification of Giant Air Showers) financés pas le programme Blanc SIMI5 de l'ANR. Les R&D LSD (Layered Surface Detector) qui proposent un modification des cuves Cherenkov d'Auger pour mesurer indépendamment les composantes électromagnétiques et muoniques des cascades atmosphériques. Les résultats de ces R&D sont évoqués dans le paragraphe "Composition des RCUHE" ci-dessous.

Neutrinos : En 2000, j'ai proposé une méthode originale de détection des neutrino τ de très hautes énergies en utilisant la terre comme cible et le (futur à l'époque) réseau de surface d'Auger comme détecteur. Dans le cas d'un mélange maximum entre les neutrinos μ et τ , ces derniers sont, à la surface de la terre, aussi nombreux que les autres espèces de neutrinos. Cependant, après une interaction courant chargée, les τ produits dans la terre peuvent la traverser sur plusieurs kilomètres sans perte d'énergie notable et ensuite se désintégrer dans l'atmosphère au dessus du détecteur. Ce canal d'observation unique au neutrino τ est aujourd'hui connu sous le nom de "Earth skimming", il est d'un facteur presque 10 supérieur en sensibilité aux autres canaux d'études standard qui reposent sur l'interaction des neutrinos dans l'atmosphère. C'est à partir de cette idée que les meilleurs limites autour de 1 EeV ont été produites et publiées par l'observatoire Auger. Notons que c'est dans le

groupe que je coordonne au LPNHE que ces travaux ont été réalisés puis écrit pour être soumis et publiés au nom de la collaboration.

Composition des RCUHE, interactions hadroniques : Le spectre des rayons cosmiques d'énergie ultime (au delà de 0.1 Joule) a été mesuré par l'observatoire Auger avec une très grande précision. Deux caractéristiques spectrales sont clairement visibles dans ces mesures. L'une appelée "cheville" correspond à un changement de l'indice de la loi de décroissance du spectre qui passe de -3.23 à -2.67 à une énergie d'environ 1 J. L'autre correspond à l'extinction du flux qui décroît exponentiellement au delà d'une énergie d'environ 8 J. L'origine de ces particularités n'est pas connue avec certitude. Elles peuvent provenir soit des caractéristiques des sources soit d'un effet lié aux interactions des rayons cosmiques avec le CMB lors de leur voyage dans l'Univers. Dans le second cas et si les rayons cosmiques au delà de 8 J sont des protons, ces interactions produisent des pions chargés ou neutres. En retour, les pions chargés produisent des neutrinos et les neutres des photons d'énergies autour de 1 J. Ces neutrinos ou ces photons sont dit cosmogéniques car ils sont produits le long de la trajectoire des protons dans le cosmos.

En parallèle aux mesures de spectre l'observatoire Auger a mesuré la composition des RCUHE jusqu'à environ 5 J grâce à la technique de la fluorescence qui permet la mesure de la profondeur du maximum des gerbes dans l'atmosphère (X_{max}). Ces mesures indiquent, si l'on se base sur les extrapolations actuelles des modèles hadroniques, un alourdissement de la composition avec l'énergie. Cependant la mesure, aujourd'hui partielle, du contenu en muons des gerbes n'est, en utilisant ces mêmes modèles, pas compatible avec cette X_{max} . Ainsi une modification des modèles est-elle sans doute nécessaire.

Pour lever ces ambiguïtés il convient de pouvoir mesurer avec une plus grande statistique et jusqu'au plus hautes énergies (au delà de 10 J) la composition des RCUHE. La technique de la fluorescence qui n'a qu'un cycle utile de 10% ne le permet pas. Je me suis donc engagé dans la recherche de techniques alternatives permettant à la fois la mesure de X_{max} et celle du contenu en muons des cascades jusqu'aux plus hautes énergies.

EASIER: La détection de l'émission radio des cascades atmosphériques promettait de pouvoir mesurer le développement longitudinal de la composante électromagnétique avec un cycle utile de 100%. Depuis les années 1970 un signal dans la bande décimétrique (10-100 MHz) avait été identifié et de nouveaux développements depuis 2005 avaient permis de mieux caractériser ce signal. L'un des facteurs limitant l'utilisation de la radio à grande échelle est sa portée car le signal décroît de manière exponentielle sur une distance caractéristique de 200m. Un second facteur est l'importance des bruits de fond transitoires dans cette gamme de fréquences. Le principe d'EASIER consiste à associer une antenne décimétrique à chacune des cuves d'Auger pour profiter de son trigger et combiner la mesure de la composante électromagnétique des cascades faite par l'antenne à celle de la composante électromagnétique et muonique faite par les cuves Cherenkov afin de restituer les deux composantes. Sur ce principe nous espérons nous soustraire du problème de bruits de fonds et également détecter des signaux à plus grande distances et voir si une composante à grande portée existait dans cette bande de fréquences. Un prototype d'EASIER composé de 10 détecteurs a été développé en 2010 et installé sur site au printemps 2011 (puis démantelé en automne de la même année car la mécanique des antennes n'avait pas survécu aux vents violents de la Pampa). Ce prototype a parfaitement fonctionné (jusqu'à destruction des antennes par le vent). Durant cette courte période, en fait durant les 2 premier mois, nous avons collecté 36 événements radio en coïncidence avec des gerbes atmosphériques d'une énergie allant de quelques dixièmes à quelques dizaines d'EeV. Ce lot constituait à l'époque le lot des plus hautes énergies jamais observées. Cependant ces mesures ont confirmées la décroissance exponentielle du signal sur 200m et sa dépendance vis-à-vis de l'orientation de la cascade par rapport au champ géomagnétique et vis-à-vis des conditions atmosphériques, deux obstacles à l'exploitation sereine de cette technique aux plus hautes énergies. Les développements dans cette voie ont été interrompu, cependant la groupe AERA (Auger Engineering Radio Array) d'Auger a repris à son compte les idées d'EASIER et l'intégration

d'un trigger basé sur les particules (en associant des scintillateurs ou en connectant leurs antennes aux cuves d'Auger) pour poursuivre leurs R&D.

GIGAS: La mesure sur un faisceau d'électrons du Bremsstrahlung moléculaire (MBR) des cascades électromagnétiques entre 1 et 10 GHz a motivé l'extension d'EASIER dans cette gamme. En conservant les mêmes principes, intégration et asservissement aux cuves Cherenkov d'Auger et électronique d'intégration similaire, mais en changeant les capteurs par des récepteurs de télévision satellite en bande C [3.4-4.2] GHz nous avons équipés 7 nouvelles cuves sur site en 2011. C'est avec ce prototype que nous avons réalisé la première détection mondiale d'une gerbe atmosphérique dans cette bande de fréquence. Ce premier succès nous a incité à proposer pour un financement ANR blanc la construction d'un réseau prototype de 100 à 300 km², ce projet a été financé en 2012. Nous avons aujourd'hui 61 cuves équipées constituant le plus grand réseau radio mondial (~100 km²). A ce jour nous avons collecté 4 événements associés à des grandes gerbes, un chiffre qui reste faible eut égard à la zone instrumentée. J'ai encadré une thèse (Romain Gaïor) soutenue fin 2012 sur ce sujet nous avons poursuivi nos R&D selon 3 voies distinctes : 1- Une amélioration de la sensibilité des capteurs (bande C avec des récepteurs haut de gamme) 2- La conception d'une nouvelle série de capteur dans la bande L entre 1-2 GHz), 3- Un calcul semi-analytique détaillé prédisant de manière plus précise et plus complète le signal attendu pour les cascades car les calculs publiés jusqu'à présent utilisaient une série d'approximations en principe inapplicables au cas des gerbes atmosphériques. Un papier soumis à NIM (2017) détaille nos efforts expérimentaux et nous avons présenté nos résultats à plusieurs conférences (en particulier l'ICRC). Les calculs analytiques ont fait l'objet de deux publications (Phys. Rev. D 93, 052004 (2016), Astroparticle Physics 67 (2015) 26-32) une 3ème est en préparation.

LSD: Le détecteur de surface en couche ou Layered Surface Detector (LSD) est une modification des cuves Cherenkov que j'ai proposé à la collaboration fin 2011. Le principe de ce détecteur repose sur la différence des longueurs d'absorption dans l'eau des muons, des électrons/positrons et des photons issus des cascades atmosphériques. En isolant la collection de lumière Cherenkov dans deux volumes d'eau superposés à l'intérieur de chaque cuve il est possible de remonter indépendamment au signal électromagnétique (e⁺/e⁻ photons) et au signal des muons qui sont entrés ou ont traversés la cuve. Ce détecteur a de remarquables propriétés d'universalité car la reconstruction des signaux muoniques et électromagnétiques repose sur l'inversion d'une simple matrice 2x2 dont seuls deux coefficients sont à déterminer. Ces coefficients se calculent à partir de techniques éprouvées de simulations aussi bien pour le détecteur que pour les interactions des électrons/positrons, photons et muons qui entrent dans les cuves. Ces deux coefficients ne dépendent essentiellement que de la géométrie de la cuve et sont indépendants des modèles hadroniques utilisés pour les cascades, de l'énergie et de la masse du primaire ou du point de mesure de la cuve par rapport à l'axe de la gerbe. Le LSD est ainsi un détecteur universel dont l'analyse est extrêmement simple. Le pouvoir de séparation entre proton et fer du réseau d'Auger transformé en LSD est supérieur à 1.5 (indice de Fisher) pour des énergies au-dessus de 10 EeV. Un tel pouvoir de séparation permet d'extraire dans un mélange à part égale de proton et de fer l'une des deux populations avec une efficacité meilleure que 50% et une pureté supérieure à 95%. Un prototype de LSD a été construit début 2014 et installé sur site. Dès la première semaine de mise en route il nous a permis de confirmer les caractéristiques prévues par les simulations. Nous avons même à partir de 530 événements collectés cette première semaine reconstruits les distributions latérales moyennes des composantes électromagnétiques et muoniques de ces événements. Le LSD finaliste des détecteurs prévu pour l'upgrade d'Auger n'a finalement pas été retenu. Un projet ERC pour un réseau de 200 capteurs a été étudié et a montré son intérêt malheureusement il n'a pas pu être soumis car la collaboration Auger a considéré cela inopportun. La description de ce détecteur a été publiée dans NIM (NIM A 767 (2014) 41-49) et son utilisation est à l'étude au Japon.

Recherche de matière noire : Lors de la biennale du LPNHE en 2014 il est ressorti de nos discussions que le laboratoire aurait avantage à s'investir autour de la recherche directe de matière

noire. Un groupe de physiciens s'est engagé à explorer différentes voies et à faire éventuellement des propositions. C'est dans ce cadre que j'ai, entre autre, étudié l'expérience DAMIC.

DAMIC: L'expérience DAMIC de recherche de matière noire type WIMPS dans la gamme de 1 à 10 GeV utilise comme détecteur des CCD épaisses (aujourd'hui 600 μm et jusqu'à 1 mm ultérieurement). L'intérêt de ce type de détecteur est le seuil très faible de détection (de l'ordre d'une dizaine d'eV) qui permet de sonder de manière plus sensible les candidats matière noire de masse inférieure à 10 GeV. La localisation en 3D des dépôts d'énergie (la troisième dimension est obtenue en analysant la dispersion (variance) des électrons qui est proportionnelle à la distance de dérive) permet une réduction efficace du bruit de fond ainsi que le suivi des chaînes de désintégration de certains polluants. Bien que les résultats récents du satellite Planck défavorisent les WIMPS relique thermique de masse inférieure à 10 GeV l'existence de telle particule (même non dominante d'un point de vue cosmologique) reste importante à sonder. Par ailleurs le développement de CCD épaisses et à très faible bruit de lecture est une voie intéressante en instrumentation et pourrait offrir la possibilité de mesurer la diffusion cohérente de neutrinos de faible énergie sur les noyaux du silicium. J'ai présenté un projet de participation à cette expérience au LPNHE en juillet 2015 et celui-ci a été accepté. Nous nous sommes engagés d'une part à contribuer à l'analyse des données (un papier a été publié sous la responsabilité de Mariangela Settimo Phys. Rev. D 94, 082006 (2016)) et d'autre part au développement d'une technique numérique pour la lecture des CCD. Cette responsabilité en micro-électronique correspond bien aux compétences du LPNHE dans ce domaine puisque nous avons fourni une partie du système de lecture des CCD de LSST et ouvre aussi des perspectives intéressantes de valorisations. Notre objectif est de fournir un système de contrôle et lecture de CCD rapide et très bas bruit (moins d'un électron) qui pourra s'adapter au besoin de DAMIC 1-kg où il nous faudra lire de l'ordre de 3G pixels mais aussi à tout autre application où un faible bruit de lecture serait primordial.

Travaux interdisciplinaires

En 2015 j'ai rencontré Laurent Bessières, préparateur des pianos de concert de la Philharmonie de Paris. Tous deux passionnés de musique et de pianos nous avons commencé une réflexion sur les possibilités d'extensions des mécaniques de pianos de concert. A la suite de nos études et après avoir rencontré Stephen Paulello, le dernier facteur de piano de concert Français, qui vient de produire un merveilleux instrument de 102 notes et de plus de 3m de long (l'Opus 102 que nous avons testé à la Philharmonie), nous avons rédigé une lettre d'intention pour l'étude d'une mécanique assistée qui permet de lever certains verrous cinématiques habituellement contraint par les capacités physiques des pianistes. Ce projet, bien accueilli par la direction de mon laboratoire, a été soutenu par la mission interdisciplinaire du CNRS qui nous a attribué 30 k€ pour sa première phase qui se terminera en mars 2018.

Encadrement thèses et post doctorants

J'ai encadré les thèses de Victor Uros, Boris Popov, Xavier Bertou, Pierre Da Silva, Olivier Deligny, Silvia Gambetta, Moritz Munchmeyer, Romain Gaior et Miguel Blanco-Otano, Laura Collica et les post doctorants Cyril Lachaud, Carla Bonifazi, Edivaldo Moura Santos, Oscar Blanch Bigas, Ioana Maris, Carla Macolino. J'encadre aujourd'hui 2 post-docs Mariangela Settimo (depuis 2013) et Imen Al Samarai (depuis 2015) un troisième, Romain Gaior, arrivera en juillet 2016. Une thèse sur l'expérience DAMIC est prévu et financée pour Joao Da Rocha et démarrera en octobre 2016.

Production scientifique et vulgarisation

J'ai écrit plusieurs revues, publié 204 articles dont 3 revues et 151 dans des journaux à comité de lecture pour un total d'environ 10300 citations. J'ai participé à environ 40 conférences internationales et mon indice de Hirsch (h-index) est de 59. J'ai écrit et participé à des publications grand public (la Recherche, Ciel et Espace, Sciences et Avenir, ...) des conférences, dont l'organisation d'une

manifestation pour les 100 ans de la découverte des rayons cosmiques par Victor Hess. Cette manifestation s'est tenue en juin 2012 au collège de France sous le parrainage de l'Académie des Sciences, du Collège de France et de l'Institut Lagrange de Paris. J'ai participé à trois documentaires de la télévision nationale française (Arte, France-3 et TF1) et trois documentaires pour les télévisions Brésiliennes et Argentines. Je participe régulièrement au "speed science" organisé par l'Académie des Sciences.

Pour l'édition 2013 de l'International Cosmic Ray Conférence (ICRC 2013, Rio de Janeiro) la collaboration Auger m'a confié la conférence plénière de présentation de nos résultats.

J'ai été Rédacteur en Chef Invité (RCI) pour un numéro spécial des Comptes Rendus de Physique de l'Académie des Sciences dédié aux rayons cosmiques d'ultra-hautes énergies. Ce numéro est paru en mai 2014.

Suite à une commande des éditions du CNRS j'ai écrit en 2016 un livre sur les rayons cosmiques (Kosmos, l'épopée des particules) qui a été publié au printemps 2017 et a reçu de nombreuses critiques positives dans les journaux spécialisés (Science et Vie, Ciel et Espace, Astronomie, AFIS) dans les quotidiens nationaux (Le Monde, Le Figaro, Les Echos) à la radio (France Inter, Radio France Internationale, France Culture) et même une lettre très élogieuse de Michel Bauer, petit fils de Pierre Auger.

Publications les plus citées (2006-2016)¹ :

1. Correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extragalactic objects. Pierre Auger Collaboration, Science 318 (2007) 938-943 [571 citations].
2. Observation of the suppression of the flux of cosmic rays above 4×10^{19} eV. Pierre Auger Collaboration, Published in Phys.Rev.Lett. 101 (2008) 061101.[511 citations]
3. Measurement of the Depth of Maximum of Extensive Air Showers above 10^{18} eV. Pierre Auger Collaboration, Phys.Rev.Lett. 104 (2010) 091101. [448 citations]
4. Correlation of the highest-energy cosmic rays with the positions of nearby active galactic nuclei. Pierre Auger Collaboration, Astropart.Phys. 29 (2008) 188-204, [373 citations]
5. Measurement of the energy spectrum of cosmic rays above 1018 eV using the Pierre Auger Observatory. Pierre Auger Collaboration, Phys.Lett. B685 (2010) 239-246 . [349 citations]
6. Update on the correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extragalactic matter. Pierre Auger Collaboration, Astropart. Phys. 34 (2010) 314-326, [275 citations]
7. Tau neutrinos in the Auger Observatory: A New window to UHECR sources. Xavier Bertou, Pierre Billoir, O. Deligny, C. Lachaud, A. Letessier-Selvon, Astropart.Phys. 17 (2002) 183-193. [193 citations]
8. Upper limit on the cosmic-ray photon flux above 10^{19} eV using the surface detector of the Pierre Auger Observatory, Pierre Auger Collaboration., Astropart.Phys. 29 (2008) 243-256 [173 citations]
9. Upper limit on the diffuse flux of UHE tau neutrinos from the Pierre Auger Observatory, Pierre Auger Collaboration, Phys.Rev.Lett. 100 (2008) 211101 [155 citations]
10. Measurement of the proton-air cross-section at $\sqrt{s}=57$ TeV with the Pierre Auger Observatory, Pierre Auger Collaboration, Phys.Rev.Lett. 109 (2012) 062002 [132 citations]

production scientifique	Total	10 ans	4 ans
Journaux avec comité	151	70	38
Conférences internationales	45	20	10

¹ Je suis l'auteur principal et le correspondant des publications 1, 4 et 7.

Organisation de conférences internationales	-	-	4
---	---	---	---