

Deuxième Appel d'Offres 2008  
du  
Groupement de Recherche  
Phénomènes Cosmiques de Haute Energie

**Formulaire groupe de travail**

**Titre du projet :** La connexion gamma / RCUHE / neutrino -  
Modèles hadroniques d'émission de Noyaux Actifs

**Renouvellement :** non

**Coordonnées du responsable :** *(personne qui gèrera les crédits alloués)*

Nom : Andreas Zech

Établissement : LTh, Observatoire de Paris (Meudon)

e-mail : Andreas.Zech@obspm.fr

Téléphone : 01 45 07 74 19

**Composition de l'équipe :** *(complétez toutes les colonnes du tableau et rajoutez des lignes si nécessaire ; pour la fonction choisissez parmi : chercheur permanent, enseignant-chercheur, post-doc, doctorant, visiteur étranger)*

(voir la page suivante)

Nom, Prénom	Laboratoire	Fonction
Allard, Denis	APC	chercheur permanent (Auger)
Baret, Bruny	APC	postdoc (Antares/KM3NeT)
Becherini, Yvonne	APC	postdoc (HESS/CTA, Antares)
Boisson, Catherine	LUTh	chercheur permanent (HESS/CTA)
Brown, Anthony	CPPM	postdoc (Antares/KM3NeT)
Coyle, Paschal	CPPM	chercheur permanent (Antares/KM3NeT)
Decerprit, Guillaume	APC	thésard (Auger)
Dornic, Damien	CPPM	postdoc (Antares/KM3NeT)
Halladjian, Garabed	CPPM	thésard (Antares/KM3NeT)
Kouchner, Antoine	APC	enseignant-chercheur (Antares/KM3NeT)
Lenain, Jean-Philippe	LUTh	doctorant (HESS/CTA)
Medina, Clementina	LUTh	postdoc (HESS/CTA , Auger)
Parizot, Etienne	APC	enseignant-chercheur (Auger)
Pita, Santiago	APC	chercheur permanent (HESS/CTA)
Romero, Gustavo E.	Universidad Nacional de La Plata (Argentine)	visiteur étranger (IAR - CONICET)
Ruppel, Jens	Ruhr-Universität Bochum (Allemagne)	visiteur étranger (HESS)
Sol, Hélène	LUTh	chercheur permanent (HESS/CTA)
VanElewyck, Véronique	APC	enseignant-chercheur (Antares/KM3NeT)
Venter, Louis	LUTh	postdoc (HESS/CTA)
Vila, Gabriela S.	Universidad Nacional de La Plata (Argentine)	visiteur étranger (IAR - CONICET)
Zech, Andreas	LUTh	enseignant-chercheur (HESS/CTA)

**Montant du soutien demandé :** *(renseignez le tableau et calculez le total)*

Missions	5 000 Euros / an
Moyens de calcul	
Divers / Autres	
<b>Total</b>	10 000 Euros (total pour 2 ans)

**Autres sources de financement :** *(complétez toutes les colonnes du tableau et rajoutez des lignes si nécessaire)*

Montant demandé	Montant obtenu	Organisme

## Présentation scientifique

### Les noyaux actifs de galaxies et l'origine des rayons cosmiques

Outre les sursauts gamma, certaines classes de noyaux actifs de galaxies (AGN) sont de très bons candidats pour la recherche des sources des rayons cosmiques d'ultra hautes énergies (RCUHE). En particulier, les chocs dans les lobes radio et les jets relativistes présentent des conditions favorables à l'accélération efficace de particules chargées aux plus hautes énergies. L'observation de l'émission de rayons gamma de très haute énergie ( $\approx$  TeV) de certaines de ces sources confirme l'existence de sites d'accélération dans des blazars et des radio-galaxies. Même si l'émission au TeV peut en général être expliquée par un jet d'électrons (modèles leptoniques), l'interprétation alternative qui est basée sur l'accélération de protons ou de noyaux (modèles hadroniques) reste une possibilité. Ce scénario a comme conséquence que le spectre observé au TeV est lié à un flux de RCUHE et de neutrinos de haute énergie. Les modèles hadroniques sont par conséquent d'un très grand intérêt pour les expériences dans les trois domaines de l'astrophysique gamma au TeV, de la physique des RCUHE et des neutrinos.

### État actuel et perspectives des observations

Plusieurs indications qui relient les RCUHE à des classes de noyaux actifs existent à l'heure actuelle. Une corrélation a été trouvée entre les données du High Resolution Fly's Eye (HiRes) et un catalogue de BL Lac [1], mais n'a pas pu être confirmée avec de nouvelles données. L'observation récente d'une corrélation entre un catalogue d'AGN et la direction d'arrivée des rayons cosmiques des plus hautes énergies détectés par l'Observatoire Pierre Auger [2] constitue un autre indice, mais n'est pas encore une preuve pour une connexion causale. (Le fait que cette corrélation concerne en majorité des galaxies Seyfert proches, ainsi que l'absence d'une corrélation dans les RCUHE détectés par HiRes [3] compliquent encore l'interprétation.) Néanmoins, l'observation d'une anisotropie aux plus hautes énergies ensemble avec l'existence confirmée de la coupure GZK ([4], [5]) favorise une origine "locale" des RCUHE depuis des sources astrophysiques. Un autre point important est que dans les données d'Auger une forte concentration d'événements est vue autour de la direction de la radio-galaxie proche Centaurus A. Étant donné que la construction de l'Observatoire Pierre Auger Sud vient seulement d'être achevée, de nouveaux résultats avec une statistique significativement augmentée pourront bientôt clarifier la situation.

Les réseaux de télescopes Tcherenkov ont détecté à ce jour le rayonnement gamma de très haute énergie d'une vingtaine de blazars, d'une radio-galaxie (M87) et d'un quasar (3C 279). Des limites supérieures ont pu être établies pour un grand nombre de différentes classes d'AGN (voir par ex. [6]). Centaurus A est observée par les télescopes du High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.) depuis plusieurs années. Une détection ferme n'a pas encore pu être faite, mais l'analyse des dernières données est en cours. Les prédictions théoriques montrent que la détection en gamma devrait être accessible par cette expérience. [7]. H.E.S.S. entre cette année dans sa deuxième phase avec l'addition d'un cinquième télescope de plus grande surface (en construction), qui permettra d'observer des sources extra-galactiques plus faibles et à de plus grands décalages vers le rouge, augmentant le nombre de sources détectables. H.E.S.S. 2 arrivera aussi à baisser

le seuil en énergie pour connecter avec la couverture spectrale de GLAST.

La découverte de sites potentiels d'accélération de hadrons est également d'un très grand intérêt pour l'astronomie neutrino qui se développe avec l'expérience Antares (déjà en prise de données) et le projet KM3NeT pour les observations de l'hémisphère sud, et avec ICECUBE pour observer l'hémisphère nord. L'observation de neutrinos en corrélation avec des sources astrophysiques constitue l'un des buts majeurs de ces expériences. Les détecteurs situés dans l'hémisphère nord permettront notamment d'observer les sources potentielles de neutrinos de haute énergie que sont le Centre Galactique et Centaurus A avec une résolution angulaire de l'ordre du demi-degré. Par ailleurs, les limites supérieures obtenues sur le flux diffus de neutrinos cosmiques de haute énergie posent également des contraintes significatives sur les modèles d'émission des AGN [8]. Avec les télescopes neutrino de la nouvelle génération, une première détection de neutrinos venant d'AGN est très probable [9]. Aux très hautes énergies ( $10^{17} - 10^{20}$  eV), une limite supérieure sur leur flux des neutrinos a aussi été établie par Auger [10].

### **Interprétation des données avec des modèles leptoniques et hadroniques**

Les spectres des blazars observés aux TeV peuvent en général être expliqués par des modèles leptoniques qui se basent sur l'accélération d'une population d'électrons dans le jet, émettant un rayonnement synchrotron (contraint par les spectres observés en rayons X et UV/optique) et des rayons gammas jusqu'à quelques dizaines de TeV par diffusion Compton Inverse. On distingue différents types de modèles selon l'origine des photons sur lesquels diffusent les électrons: les modèles Synchrotron Self Compton (SSC) et modèles External Compton (EC). Les modèles leptoniques arrivent à bien expliquer les données des blazars sur une grande gamme de longueurs d'ondes (par ex. [11]) et permettent aussi de décrire l'émission observée de M87 [7]. Un problème grave pour ces modèles consiste dans la détection des "sursauts orphelins" de 1ES1959+650 [12] et peut-être de Mkn421 [13] qui ne sont apparemment pas accompagnés par une émission synchrotron.

Une explication alternative de l'émission gamma au TeV est donnée par les modèles hadroniques, dans lesquels l'accélération de hadrons chargés (protons ou noyaux) est la source principale de ce rayonnement, tandis que la composante leptonique est responsable du pic dans les rayons X. Le rayonnement au TeV est généré soit par effet synchrotron des hadrons, soit à la suite de la production de pions dans des interactions avec la matière ambiante, des champs de rayonnement ou des champs magnétiques (cf. par ex. [14], [15], [16], [17]). Les modèles hadroniques ont des difficultés à expliquer la variabilité très rapide observée dans certains blazars (par ex. [18]) et demandent des paramètres plus extrêmes pour décrire la source (par ex. pour la densité du plasma thermique et le champ magnétique dans la source). Néanmoins ils arrivent aussi à reproduire correctement les spectres observés (par ex. [11]) et proposent des mécanismes qui lient l'émission observée au TeV avec la question des sources des RCUHE. Les modèles hadroniques prédisent aussi un flux de neutrinos venant de la dégradation de pions, ce qui présente une signature unique qui les distingue des modèles purement leptoniques.

### **Objectifs scientifiques de notre groupe de travail**

Nous proposons de faire une étude comparative des différents modèles hadroniques et de leur application à l'émission de blazars et de radio-galaxies (et peut-être à d'autres classes d'AGN). Ce travail servira aussi à ouvrir un dialogue entre les communautés de l'astrophysique au TeV, des RCUHE et des neutrinos. Les objectifs scientifiques de ce

travail en collaboration seront les suivants:

- Une étude de l'état des lieux des quelques codes hadroniques actuellement disponibles.
- Une analyse des contraintes des données de Auger et de H.E.S.S. et des limites du flux de neutrinos sur les modèles hadroniques. Cette étude servira à mieux comprendre les mécanismes d'émission au TeV et les paramètres d'une population potentielle de hadrons dans les sources.
- Le travail proposé s'inscrit aussi dans la perspective des projets Cherenkov Telescope Array (CTA), Auger Nord, JEM/EUSO et KM3NeT. Les résultats de notre étude pourront servir au développement des programmes scientifiques de ces projets, voire avoir un impact dans les décisions prises lors des Design Studies.

## References

- [1] Finley et al., ApJ, 636 (2006) 680
- [2] Pierre Auger Collaboration, Science 318 (5852) 938 et Astropart. Phys. 29 (2008) 188
- [3] R.U. Abbasi et al. (HiRes Collaboration), astro-ph/0804.0382
- [4] R.U. Abbasi et al. (HiRes Collaboration), PRL 100 (2008) 101101
- [5] J.Abraham et al. (Auger Collaboration), astro-ph/0806.4302
- [6] F. Aharonian et al. (HESS Collaboration), A&A 478 (2008) 387
- [7] J.P. Lenain et al., A&A 478 (2008) 111L
- [8] J. Becker, Journal of Physics: Conference Series 60 (2007) 219222
- [9] F. Halzen et A. O'Murchadha, astro-ph/0802.0887
- [10] J. Abraham et al. (Pierre Auger Collaboration), Phys. Rev. Letters 100 (2008) 211101
- [11] F. Aharonian et al., A&A 442 (2005) 895
- [12] H. Krawczynski, et al., 2004, ApJ, 601, 151
- [13] M. Blazejowski, et al. 2005, ApJ, 630, 130
- [14] F. Aharonian et al., Phys. Rev. D 66 (2002) 023 005
- [15] M. Pohl et R. Schlickeiser, A&A 354 (2000) 395
- [16] A. Reimer et al., A&A 419 (2004) 89
- [17] K. Mannheim, A&A 269 (1993) 67
- [18] F. Aharonian et al. (HESS Collaboration) Astrophys. Journal Lett. 664 (2007) L71

# Programme de travail

## Le contexte actuel du groupe de travail

Nous proposons d'ouvrir un dialogue entre des chercheurs de H.E.S.S., de l'Observatoire Pierre Auger et d'Antares pour échanger les expertises complémentaires de trois expériences qui observent ou s'appêtent à observer des messagers différents des objets les plus énergétiques dans le ciel de l'hémisphère sud. Cette année est un moment très propice pour commencer un travail de collaboration entre ces trois expériences: la construction d'Auger Sud et celle d'Antares viennent d'être achevées et les statistiques des événements observés augmenteront rapidement; la deuxième phase de H.E.S.S. commencera et élargira nos données sur les blazars et les radio-galaxies au TeV; GLAST vient d'être lancé et complètera la couverture spectrale entre les rayons X et les TeV, en ajoutant des fortes contraintes aux modèles d'émission des sources. En même temps, les projets de la prochaine génération en astronomie gamma de très hautes énergies (CTA et Agis), des RCUHE (Auger Nord et JEM/EUSO) et des neutrinos (KM3NeT et ICECUBE) sont en préparation. Notre groupe de travail amènera à une meilleure compréhension des résultats des expériences existantes et des perspectives pour les futurs projets.

Les groupes français de H.E.S.S. ont une forte expertise sur l'astrophysique des AGN et sur les modèles leptoniques. Les participants de H.E.S.S. apporteront aussi des connaissances sur l'interprétation des données multi-longueur d'ondes. Les participants d'Auger et d'Antares ont une forte expertise sur les processus hadroniques, l'accélération de hadrons et sur la propagation des particules entre la source et l'observateur. Tous les participants du groupe de travail proposé visent à renforcer les connaissances sur les modèles hadroniques par le travail avec les autres participants et par l'invitation d'experts extérieurs.

## Les étapes clé

Nous envisageons que le travail proposé soit réparti initialement sur deux années. Pendant cette période, nous prévoyons certaines étapes clé lors de la progression de notre projet:

- La première étape consistera en un échange de connaissances sur l'état actuel des trois expériences (H.E.S.S., Auger, Antares) et une revue des données sur les blazars, les radio-galaxies et d'autres AGN (spectres et flux limites en gamma, limites sur le flux des RCUHE et des neutrinos). Nous chercherons aussi le dialogue avec les astrophysiciens spécialistes de l'émission à toutes longueurs d'onde, ce qui nous permettra de faire l'état des lieux des différentes classes d'AGN.
- En parallèle, nous voudrions commencer une revue des scénarios hadroniques existants. Dans ce but, des séjours de travail entre les participants et aussi avec des experts invités sont prévus. Ce travail amènera à une étude comparative des différents modèles et de leurs prédictions sur l'espace de paramètres qui décrivent les sources potentielles (par ex. extension de la région d'accélération, champ magnétique, facteur Doppler des jets, etc.).
- On cherchera ensuite, dans une troisième étape, à évaluer les contraintes des données actuelles aux hautes énergies et des limites supérieures sur le flux des neutrinos et des

rayons cosmiques pour les modèles. L'interprétation des données de H.E.S.S. inclue aussi régulièrement l'étude d'autres données sur une grande gamme de longueurs d'ondes (gammas mous, X, UV/optique), ce qui est nécessaire pour prendre en compte toutes les contraintes de la distribution spectrale sur les modèles. Les données de GLAST joueront sans doute un rôle essentiel en couvrant la partie du spectre entre les rayons X et gamma qui était jusqu'à maintenant peu accessible.

- L'étape finale sera le travail sur les perspectives pour les projets de la prochaine génération dans les différents domaines. Les connaissances que notre équipe aura gagnées serviront à faire des prédictions pour les observations à venir de CTA, KM3NeT, Auger Nord et JEM/EUSO. Comme ces projets se trouvent dans des phases de Design Study ou "R et D", des prédictions faites par notre groupe de travail auront certainement un impact sur le développement de ces projets ou leurs objectifs scientifiques.

### Fonctionnement du groupe de travail

Notre groupe sera ouvert à tout(e) intéressé(e). La méthode principale pour garantir l'échange de connaissances entre les chercheurs des différentes expériences consistera dans des réunions de travail ainsi que des séminaires et séjours de travail de chercheurs externes. La participation de deux chercheurs de l'Université de La Plata en Argentine nous apportera une expertise importante sur les modèles hadroniques. C'est aussi le cas pour Jens Ruppel de la Ruhr-Universität Bochum en Allemagne, qui fait partie de l'équipe du Pr. Schlickeiser.

### Calendrier

période	étapes de travail	réunions prévues
2008/09	étapes 1 et 2: revue des données actuelles et des modèles existants	au moins 3 réunions de travail , 2 séjours de travail ou séminaires (avec des experts invités)
2009/10	étapes 3 et 4: évaluation des contraintes des données sur les modèles et perspectives pour CTA, KM3NeT, Auger Nord et JEM/EUSO	au moins 3 réunions de travail, 2 séjours de travail ou séminaires (avec des experts invités)

### Délivrables

- Création d'un site web avec les présentations faites lors des réunions et des séminaires. Ce site sera accessible à tous les chercheurs intéressés.
- Publication d'une étude comparative des modèles hadroniques existants et des contraintes des données actuelles.
- Publications sur des prédictions pour CTA, KM3NeT, Auger Nord, JEM/EUSO et contributions aux Design Studies.

**Justification de la demande financière :** (*précisez vos besoins financiers par objet – missions, achats, etc. – et donnez les montants estimés ; rajoutez après le tableau toute information complémentaire que vous jugez utile pour l'évaluation de votre demande*)

Objet	Montant
missions 2008/09	5 000 Euros
missions 2009/10	5 000 Euros

Notre demande concerne principalement les coûts de déplacement pour les participants français, ainsi que les frais de missions (déplacement et séjours) pour les participants étrangers et les chercheurs invités.

- Frais pour les participants: nous avons estimé des frais de transport et de séjour permettant au moins trois réunions de travail par an. Les réunions sont prévues principalement dans la région parisienne, au LUTh ou à l'APC, pour minimiser les frais de déplacement pour la plupart des participants. Il restent les frais de mission pour les participants français en dehors de la région parisienne et pour les participants étrangers. Gustavo E. Romero séjournera au LUTh en Novembre et Décembre 2008 (couvert par l'Observatoire de Paris et le LEA "ELGA") pour commencer une collaboration avec nous. Il a une forte expertise des modèles hadroniques, surtout dans l'application aux micro-quasars <sup>1</sup>, et travaille à présent sur l'application aux blazars et radio-galaxies avec son équipe. Il nous semble très important d'avoir son expertise sur les modèles hadroniques. Notre demande inclut par conséquent une participation aux frais d'une mission trans-atlantique par an pour lui ou son étudiante Gabriela S. Vila. Le Pr. Romero travaille aussi en Europe à d'autres occasions, ce qui lui permettra de suivre régulièrement les activités de notre groupe de travail. Nous prévoyons aussi la participation à quelques missions pour Jens Ruppel d'Allemagne pour lui permettre d'assister aux réunions et pour des séjours de travail additionnels.
- Nous envisageons par ailleurs d'inviter des experts sur les modèles hadroniques et sur des sujets liés aux recherches proposées pour des séminaires et des séjours de travail dans des laboratoires des participants. Les frais de transport et les frais de séjour de ces visiteurs font partie de notre demande. Nous pensons par exemple à inviter Karl Mannheim, Paolo Lipari, Felix Aharonian ou Francis Halzen.

---

<sup>1</sup>cf. par ex.:

Romero, G. E.; Vila, G. S.: The proton low-mass microquasar: high-energy emission, *A&A*, 485, 623, 2008

Romero, G. E.; Christiansen, H. R.; Orellana, M.: Hadronic High-Energy Gamma-Ray Emission from the Microquasar LS I +61 303, *ApJ*, 632, 1093, 2005

Romero, G. E.; Orellana, M.: Gamma-ray and neutrino emission from misaligned microquasars, *A&A*, 439, 237, 2005

## Utilisation des crédits de l'année précédente

(à remplir au cas d'un renouvellement)

**Titre du projet :**

**Équipe concerné :** (complétez toutes les colonnes du tableau et rajoutez des lignes si nécessaire ; pour la fonction choisissez parmi : chercheur permanent, enseignant-chercheur, post-doc, doctorant, visiteur étranger ; si l'équipe est identique à l'équipe de la présente demande, vous pouvez remplacer le tableau par la mention "équipe inchangée")

Nom, Prénom	Laboratoire	Fonction

**Soutien accordé :** (complétez toutes les colonnes ; rajoutez une ligne par Appel d'Offres pour lequel vous avez obtenu un soutien financier)

Année	Montant
2008 (AO1)	
2007	

**Utilisation de la dernière subvention :** (détaillez vos dépenses par objet – missions, achats, etc. – pour le dernier soutien que vous avez obtenu dans le cadre du projet du GdR PCHE)

Objet	Montant
<b>Total</b>	

**Rapport d'activité :** (maximim 3 pages) (précisez le travail effectué depuis la dernière demande financière ; le rapport peut être éventuellement joint en pièce annexe)

**Publications :** (donnez la liste complète des publications soumises ou acceptées qui relèvent du programme financé)