**Thesis defence - Savina Pierpaolo**

**Search for photons in the EeV sky at the Pierre Auger Observatory using Universality**

The search for photons of ultra-high energy (UHE), above 10^18 eV, lies in the highest energy range of gamma-ray astronomy, a prominent discipline in multimessenger astronomy, as at high energies it is pursued primarily in the context of the astrophysics of cosmic rays, the progenitors of the gamma rays. The highest energy cosmic rays  are expected to produce UHE gamma-rays, either in interactions with the source ambient, or with the soft universal background photons in their propagation to Earth.
These cosmogenic photons probe ultra-high energy cosmic rays as their flux depends on the characteristics of the sources, as well as on the nature of the parent nuclei. UHE-photons could also probe new physics, as their detection could be a smoking gun for dark matter composed of super-heavy particles decaying in photons. At UHE, cosmic rays and photons are measured through the extensive air showers produced when entering the Earth's atmosphere. The key signatures to distinguish photons showers from the overwhelming background due to hadrons are a larger atmospheric depth at the shower maximum (Xmax) and a lower number of muons.
These two observables can be measured at the Pierre Auger Observatory, which combines, into a hybrid instrument, a fluorescence detector (FD) with a ground array of particle detectors (SD). In hybrid events, FD measures Xmax, while from the SD the muon content can be estimated. In this thesis, developed in the Auger Collaboration, we have conceived a new mass-sensitive variable, Fμ, related to the muonic content of the shower, by exploiting the air-shower universality property, in combination with the reconstruction of hybrid events.
This new variable is then combined with Xmax, the mass-sensitive observable by excellence, into an analysis method that increases the photon/hadron separation power for the search of photons with energies above 10^18 eV.
In chapter 1, we discuss the phenomenology of UHE gamma rays, in terms of their production and propagation, as well as the principle of their detection through the discrimination of photons showers from hadron ones.  Chapter 2 will focus on the Pierre Auger Observatory, describing its technical features and some of the key results obtained in more than 15 years of operation. In chapter 3 we explain the universality concept and how it is applied to build a universality-based model of the signals in the detectors of the ground array.  Chapter 4 introduces the first part of this thesis work: the building of the simulations and of the data sets that are used in the following chapters. Particular attention is devoted to the simulation procedure, and to the event selection. In chapter 5, we use the universality concept, in combination with the hybrid reconstruction, to set up a technique to derive Fμ from the signal recorded in individual SD stations. The potential of Fμ as photon-hadron discriminator is also assessed.  Chapter 6 describes the combination of Xmax and Fμ, by using multivariate analysis techniques. A data-driven approach for the estimation of the background expected is exploited to derive the photon selection cut.
Finally, in chapter 7 the photon selection cut is applied to the hybrid data. As no UHE photons are observed, upper limits to their flux are set, and the physics implications are discussed.

**Recherche de photons dans le ciel à l'EeV à l'Observatoire Pierre Auger en utilisant l'universalité**

Les photons d’énergie supérieure à 10^18 eV, dits photons d'ultra-haute énergie, se situent dans la gamme d'énergie la plus élevée de l'astronomie gamma, une discipline emblématique de l'astronomie multi messagers. La recherche de tels photons à de telles énergies est poursuivie principalement dans le contexte de l'astrophysique des rayons cosmiques, en tant que progéniteurs des gammas.
Les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie peuvent produire des gammas ultra énergétiques via leurs interactions avec les particules présentes dans les environnements de leurs sources, ou avec les photons de basse énergie constituant des fonds diffus dans l’Univers lors de leur propagation vers la Terre. La détection de tels photons cosmogéniques permettrait de sonder davantage les rayons cosmiques de très haute énergie car leur flux dépend des caractéristiques des sources ainsi que de la nature des noyaux parents. D’autre part, les photons d’ultra haute énergie pourraient également sonder de la nouvelle physique, car leur détection pourrait montrer la présence de matière noire composée de particules super lourdes se désintégrant en photons.
Aux énergies les plus hautes, les rayons cosmiques et les photons sont mesurés grâce aux gerbes atmosphériques produites lors de leur interaction dans l'atmosphère terrestre. Les signatures clés permettant de distinguer les gerbes de photons du fond dominant dû aux hadrons sont une plus grande profondeur atmosphérique du maximum de la gerbe (Xmax) et un nombre plus faible de muons.
Ces deux observables peuvent être mesurées à l'Observatoire Pierre Auger, qui combine, dans un instrument hybride, un détecteur de fluorescence (FD) et un réseau au sol de détecteurs de particules (SD). Dans les événements hybrides, le FD mesure Xmax, tandis que le SD permet d'estimer le contenu en muons. Dans cette thèse, développée au sein de la Collaboration Auger, nous avons conçu une nouvelle variable sensible à la masse, Fμ, liée au contenu muonique de la gerbe, en exploitant la propriété d'universalité des gerbes atmosphériques, en combinaison avec la reconstruction des événements hybrides. Cette nouvelle variable est ensuite combinée avec Xmax, l'observable sensible à la masse par excellence, dans une méthode d'analyse qui augmente le pouvoir de séparation entre photons et hadrons primaires afin de pouvoir identifier des photons d'énergies au-delà de 10^18 eV.
Dans le chapitre 1, nous discutons de la phénoménologie des rayons gamma d'ultra-haute énergie, en termes de leur production et de leur propagation, ainsi que du principe de leur détection par la discrimination entre les gerbes atmosphériques generées par des photons et celles produites par des hadrons.  Le chapitre 2 se concentre sur l'Observatoire Pierre Auger, décrivant ses caractéristiques techniques et une sélection des principaux résultats obtenus en plus de 15 ans de fonctionnement. Dans le chapitre 3, nous expliquons le concept d'universalité des gerbes atmosphériques et comment il est appliqué pour construire un modèle, basé sur cette universalité, des signaux dans les détecteurs du réseau au sol.  Le chapitre 4 introduit la première partie de ce travail de thèse : la construction des simulations et de l’ensemble des données qui sont utilisées dans les chapitres suivants. Une attention particulière est accordée à la procédure de simulation et à la sélection des événements. Dans le chapitre 5, nous utilisons le concept d'universalité, en combinaison avec la reconstruction hybride, pour mettre en place une technique permettant de dériver Fμ à partir du signal enregistré dans les stations SD individuelles. Le potentiel de Fμ comme discriminateur photon-hadron est également évalué.  Dès lors, le chapitre 6 décrit la combinaison de Xmax et de Fμ, en utilisant des techniques d'analyse multivariée. Une approche basée sur les données pour l'estimation du fond attendu est exploitée pour dériver la sélection des photons. Enfin, dans le chapitre 7, la sélection des photons est appliquée aux données hybrides. Comme aucun photon d’ultra haute énergie n'est observé, des limites supérieures de leur flux sont obtenues et discutées.