

Les Savanturiers

19

MARS 2017

En mission avec les scientifiques du CEA



p. 2-3



> Preuves à l'appui

p. 4-5



> Trois méthodes pour débusquer les wimps

p. 6-7



> Pleins feux sur la matière noire

Lumière sur la matière noire

C'est un sujet qui fascine par son côté obscur. Comme elle échappe à la détection, on ne sait pas si elle existe... c'est une traque de longue date qui stimule chercheurs et ingénieurs pour trouver sa trace expérimentale. Car, si elle n'existait pas, ce serait la théorie d'Einstein qu'il faudrait alors revisiter !

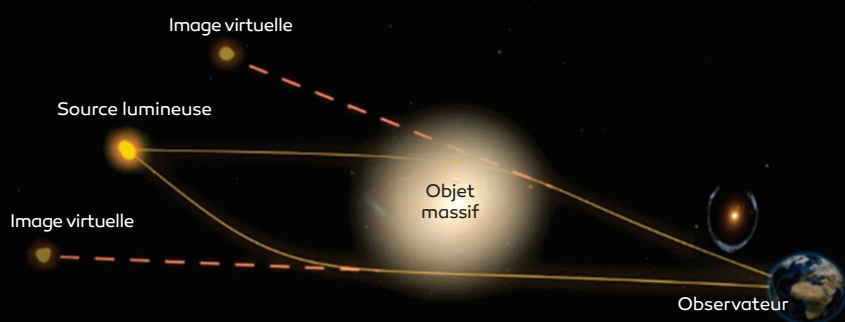
L'américaine Vera Rubin (23 juillet 1928 - 25 décembre 2016) a été une des premières femmes astronomes. Ses travaux ont permis de relancer la notion de « masse manquante ».

Preuves à l'appui

De nombreux physiciens, s'appuyant sur des calculs théoriques et des observations, sont convaincus de l'existence de la matière noire, qui représenterait 85 % de toute la matière de l'Univers.

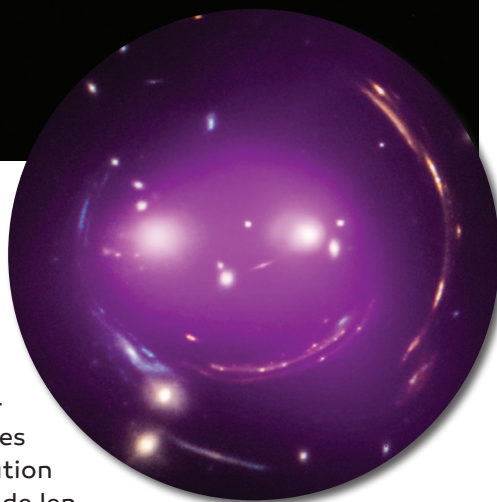
Pourtant, celle-ci est à ce jour encore mystérieuse car elle échappe à la détection. En effet, les caractéristiques des particules de matière noire font qu'elles n'interagissent que très faiblement avec elles-mêmes et avec les particules de matière ordinaire.

Les mirages gravitationnels

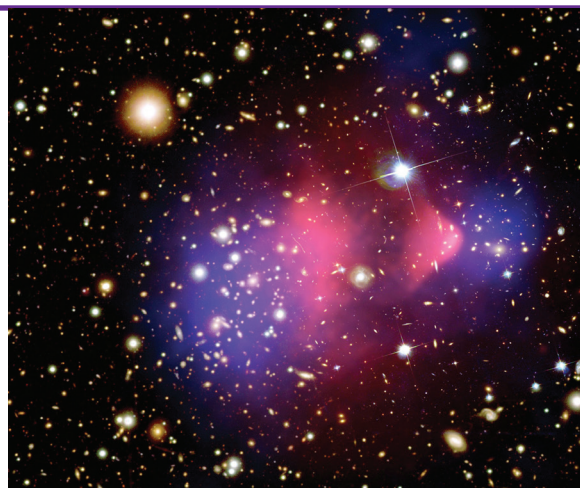


Selon la théorie de la relativité générale, les objets massifs déforment l'espace-temps : les rayons lumineux sont déviés. Une étoile, un trou noir, une galaxie ou un amas de galaxies peut provoquer une déviation de la lumière. C'est l'effet de lentille gravitationnelle. L'image d'une étoile située derrière une lentille nous parvient donc déformée. En étudiant cette déformation, les chercheurs peuvent déduire la masse totale de la lentille.

Or la masse de matière ordinaire mesurée en considérant les étoiles, le milieu interstellaire, les galaxies jusqu'aux amas de galaxies, ne suffit pas à reproduire la masse de la lentille. C'est une preuve indirecte de la présence de matière non lumineuse appelée matière noire.



Vue d'artiste des anneaux d'Einstein sur la constellation Ursa Major.



Superposition de trois images (restituées en fausses couleurs) de la collision de deux amas de galaxies.

L'amas du boulet

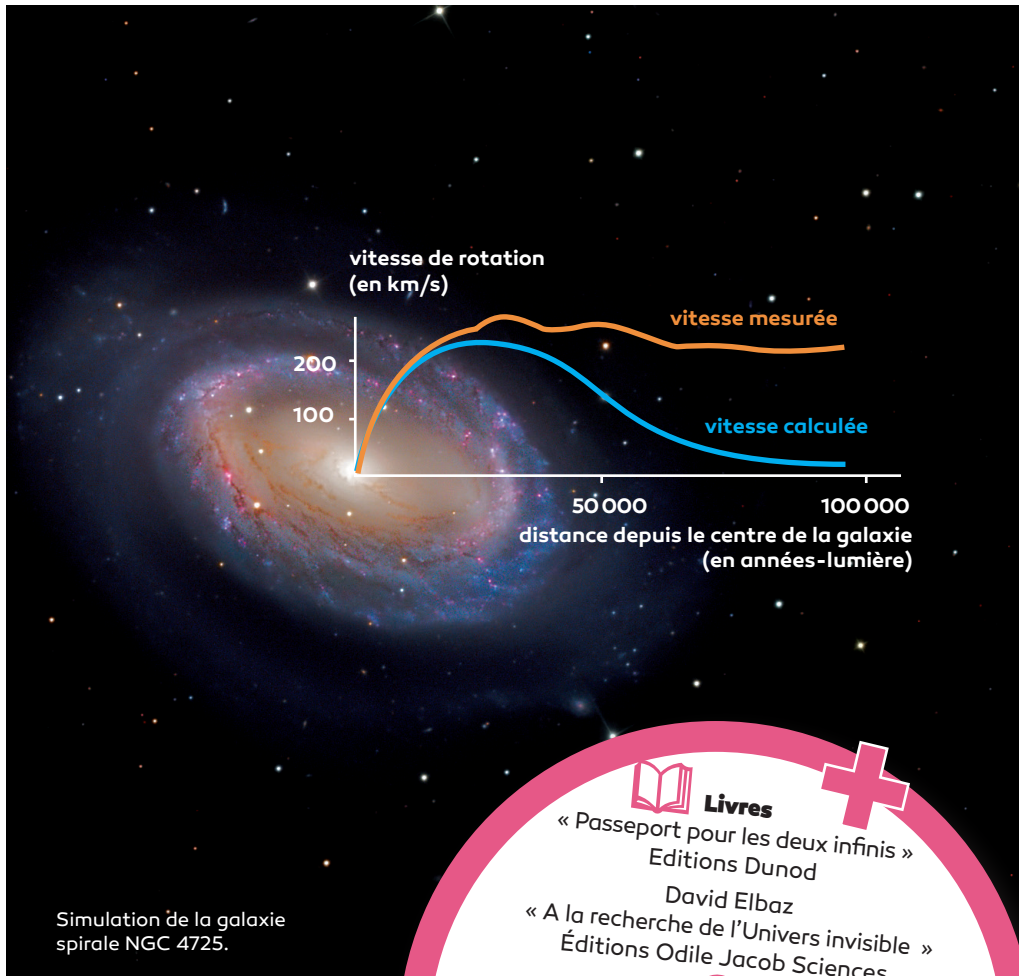
Il s'agit de la reconstitution d'une collision d'amas de galaxies survenue il y a quelques 150 millions d'années. Lorsque les deux amas se sont croisés, leurs composantes que sont les étoiles, le gaz et l'hypothétique matière noire se sont comportées différemment. Les gaz des amas, qui constituent l'essentiel de la masse ordinaire, ont interagi. Les multiples interactions entre les deux masses de gaz ont provoqué leurs ralentissements. Ces interactions sont visibles en rayons X (zones roses). La matière noire, qui interagit beaucoup plus faiblement, a été moins ralentie... Elle a été cartographiée grâce aux observations de lentilles gravitationnelles des galaxies d'arrière-plan. Les lentilles sont matérialisées par les zones bleutées. Pour les scientifiques, cette image est une preuve convaincante de l'existence de la matière noire.

Les vitesses des galaxies

Les galaxies tournent sur elles-mêmes. Les étoiles qui les composent sont soumises à deux phénomènes : la force de gravitation qui les attire vers le centre et l'effet centrifuge qui les en éloigne.

Plus la distance par rapport au centre de la galaxie augmente, plus la gravitation faiblit ; l'effet centrifuge devrait aussi diminuer. Les chercheurs s'attendaient à ce que les vitesses orbitales des étoiles externes décroissent (courbe bleue). Dans les années 1970, les données recueillies par l'astrophysicienne Véra Rubin sur des dizaines de galaxies montrent que cette vitesse mesurée (orange) est plutôt constante, et au-dessus de la **vitesse de libération** due à la masse visible.

La vitesse d'une étoile étant dépendante de sa distance au centre et de la masse contenue à l'intérieur de son orbite, les travaux de Véra Rubin ont relancé l'idée d'une masse manquante, donc de matière noire.



Livres

« Passeport pour les deux infinis »
Editions Dunod

David Elbaz

« A la recherche de l'Univers invisible »
Éditions Odile Jacob Sciences



Animation

« Mirages gravitationnels »
<http://www.cea.fr/go/mirages-gravitationnels>

BD

« Ballade aveugle en matière noire »
« Je voudrais de la matière noire à Noël »
de Lison Bernet sur le site du LHC
<http://www.lhc-france.fr/l-aventure-humaine/la-bd-du-lhc/>

YHLEXIQUETGT

Matière ordinaire :

Particules élémentaires comme des quarks, des électrons, des neutrinos, des photons et les systèmes composés : protons, neutrons, noyaux et atomes, molécules..., jusqu'aux étoiles et galaxies !

Vitesse de libération :

Vitesse à partir de laquelle les étoiles ne restent plus liées à la galaxie.

Densité relique :

Au début de l'Univers, lorsque la matière noire a cessé d'interagir avec la matière ordinaire puis avec elle-même, sa densité s'est figée à une valeur appelée densité relique.

TeV, GeV : À l'échelle des particules, la masse s'exprime en unité d'énergie ($E=mc^2$) et en puissance de 10. Le proton a une masse d'environ 1 GeV.
1 GeV = 10^9 eV,
1 TeV = 10^{12} eV.

Carte d'identité d'un wimp

Parmi les particules candidates à la matière noire, les scientifiques recherchent des particules très massives baptisées wimp*. Une telle particule aurait les caractéristiques suivantes :

- Sa densité doit être compatible avec la **densité relique**, connue grâce aux observations cosmologiques, égale à 25 % du contenu total (masse et énergie) de l'Univers aujourd'hui ;
- Sa masse doit avoir une valeur comprise sur un large intervalle allant du GeV à 100 **TeV** ;
- Elle doit être neutre car elle n'émet pas de lumière ;
- Elle doit être stable car elle existe depuis le début de l'Univers ;
- Elle doit avoir peu d'interaction, contrairement à la **matière ordinaire**.

*WIMP est l'acronyme anglais pour Weakly Interactive Massive Particle.
En français, cette particule est une « mauviette ».

Victor Franz Hess (24 juin 1883-17 décembre 1964) est un physicien autrichien et américain. En 1936, il a reçu, avec Carl David Anderson, le prix Nobel de physique pour la découverte des rayons cosmiques.

3 méthodes pour débusquer les wimps

Différentes stratégies de découverte sont mises en œuvre depuis plusieurs dizaines d'années pour détecter ces particules de matière noire présentes depuis la nuit des temps. Il est aussi possible de les produire à partir de collisions de protons de hautes énergies. Ces observations complémentaires devraient permettre d'identifier et de caractériser les wimps, ou de les exclure. Les 10 prochaines années seront décisives !

Détecter

Lorsqu'une particule de matière noire frappe un noyau de matière ordinaire, elle provoque un recul de celui-ci. Détecter cet infime déplacement permettrait de signer son interaction. Pour être sûr de capter des événements si ténus, les détecteurs doivent être conçus dans un matériau très peu radioactif et protégés des radiations parasites, issues du cosmos et de l'environnement. Ces deux sources provoqueraient des signaux à distinguer d'une collision due à une particule de matière noire. Les détecteurs de l'expérience Edelweiss sont donc abrités

dans le laboratoire souterrain de Modane, à 1 700 mètres sous la montagne. L'expérience démarrée en 2002 n'a pas, à ce jour, détecté de signaux attribuables à des wimps. Mais elle continue de guetter des interactions qui prouveraient leur existence.

Pour avoir plus de chance d'observer des interactions avec des noyaux atomiques, il faut augmenter leur masse. D'autres expériences ont choisi de changer le matériau, remplaçant le germanium par du xénon liquide, et passant de quelques dizaines de kilos à une tonne.



Montage d'un détecteur de l'expérience Edelweiss.

Mais cette méthode ne permettra pas à elle seule de dresser la carte d'identité complète des wimps. Pour cela, il faut en produire en laboratoire ; des expériences sont en cours avec le collisionneur **LHC**.



Travaux sur le détecteur CMS.

Produire

Au sein du LHC, chaque collision de particules produit une myriade de nouvelles particules. L'énergie atteinte lors de la collision de protons permet, en théorie, de produire des wimps à l'échelle du TeV, qui ne seront pas détectables en eux-mêmes. Grâce aux détecteurs comme Atlas et CMS, qui enregistrent chaque collision, les chercheurs mènent les analyses qui permettent d'établir un bilan d'énergie et quantifier l'énergie manquante qui signerait la production d'un wimp et caractériserait sa masse. Depuis le début du LHC en 2009, aucun candidat n'a été trouvé. Grâce à la montée en énergie et en puissance à 13 TeV, les probabilités de produire ces événements rares augmentent et les expériences continuent leur traque.

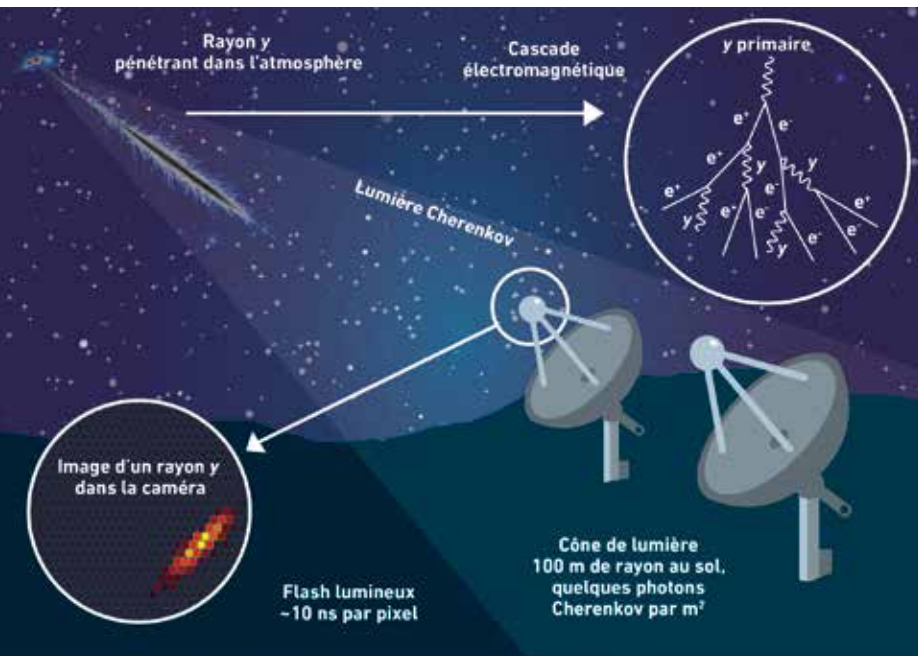
Si des particules de matière noire sont produites en laboratoire, encore faudra-t-il prouver qu'elles existent aussi dans l'Univers... et donc en trouver dans le cosmos à l'aide de télescopes.

VHLEXIQUETGT

Annihilation : Lorsqu'une particule et son antiparticule entrent en collision, on dit qu'elles s'annihilent. L'énergie de cette collision va créer de nouvelles particules. Les produits de l'annihilation des particules de matière noire seraient des particules ordinaires, détectables.

HESS : High Energy Stereoscopic System, réseau de télescopes imageurs à effet Cherenkov atmosphériques.

LHC : Large Hadron Collider. Accélérateur de particules du Cern, à Genève.



Observer

Grâce aux télescopes au sol (comme l'expérience **HESS**) ou aux satellites dans l'espace (comme l'expérience Fermi), les physiciens recherchent les produits d'**annihilation** de wimps, présents dans notre galaxie ou dans les galaxies naines proches. Ces annihilations produisent des particules dont des photons, tous d'énergie élevée (supérieurs à 100 GeV, ils sont appelés des rayons gamma). Ceux-ci sont particulièrement intéressants car ils se propagent en ligne droite, ce qui permet aux chercheurs de remonter à leur source (alors que les autres particules chargées sont déviées par les champs magnétiques

galactiques). Lorsque ces rayons gamma atteignent l'atmosphère terrestre, ils interagissent avec les atomes de l'atmosphère et produisent une gerbe de particules secondaires, qui émettent un flash très ténu de lumière bleutée, la lumière Cherenkov. C'est cette lumière, quasi-visible, qui est décelée par les caméras des télescopes au sol (voir schéma ci-dessus).

En théorie, d'importantes densités de matière noire sont concentrées au centre des galaxies. C'est donc en direction du centre de la Voie lactée que les physiciens pointent leurs télescopes.

Où se niche la matière noire ?



La Voie lactée.

A l'échelle de notre galaxie, les particules de matière noire se déplacent de façon aléatoire dans un halo de forme quasi-sphérique, passent au-dessus et en dessous du plan de la galaxie. En terme de densité, un humain est traversé environ 100 000 fois par seconde par un wimp.

A l'échelle des amas de galaxie, la matière noire se

logerait dans un nuage diffus distribué dans tout l'espace intergalactique. La contribution de la matière noire à la masse d'un amas est très grande. Elle est de l'ordre de 85 %, pour 15 % de matière ordinaire (12 % de gaz et 3 % pour les galaxies).

Pourquoi avez-vous choisi ce sujet de recherche ?

C'est un sujet excitant, la matière noire constitue l'essentiel de la matière dans l'Univers et pourtant on ne connaît pas grand-chose. De nombreuses expériences essaient de la détecter, mais jusqu'à présent on n'a aucune idée de son identité. J'ai travaillé pendant ma thèse sur la détection directe de matière noire, et depuis 2006 en astronomie gamma avec les télescopes Cherenkov au sol HESS pour la détection indirecte. Je travaille maintenant dans le projet CTA.

Comment savez-vous où pointer vos télescopes ?

L'Univers dans ses débuts était très homogène, aujourd'hui il est très structuré, des étoiles aux galaxies et jusqu'aux amas de galaxies. La stratégie optimale de détection dépend que l'on soit au sol ou via un satellite. Nous attendons une forte densité de matière noire au centre des galaxies ; nous pointons donc nos télescopes au sol vers ces régions et en particulier au centre de notre galaxie. Pour les satellites, les meilleures contraintes proviennent de l'observation des galaxies naines satellites de la Voie lactée.

En théorie, existe-t-il plusieurs sortes de particules de matière noire ?

Nous pensons qu'il existe une grande zoologie dans les candidats de particules ; les wimps, mais aussi des plus légères comme les neutrinos stériles, et encore plus légères, comme les axions.

Et si vous ne les trouvez pas ?

La décennie à venir va être primordiale pour les candidats particules comme les wimps. Si d'ici là aucun n'a été trouvé, il faudra revoir le concept de matière sous forme de particules massives et s'orienter très probablement vers des théories modifiées de la gravité d'Einstein. C'est quand même une époque formidable. Le boson de Higgs, qui avait été prédit il y a près de 30 ans, a été découvert il y a quelques années. La théorie d'Einstein a d'autres succès indéniables, comme la détection l'an passé des ondes gravitationnelles prédites au début du XX^e siècle. Indépendamment de ce qu'il se passe en cosmologie, les particules de matière noire, si elles sont massives et à l'échelle de l'interaction électrofaible, vont naturellement donner, par leur couplage et leur masse, la densité mesurée par le satellite Planck. C'est le miracle des wimps. Ça n'est peut-être qu'une coïncidence, mais c'est une motivation intéressante.

“C'est une époque formidable !”



Emmanuel Moulin

Astrophysicien des particules

Formation :

- > Bac S
- > Classe Préparatoire en physique
- > Magistère (3 ans) de physique
- > Thèse sur la détection directe de matière noire

Lancé en 2008 initialement pour 5 ans, le satellite *Fermi Gamma-ray Space Telescope* de la Nasa est destiné à l'étude des rayons gamma de haute énergie émis par les objets célestes.

Pleins feux sur la matière noire

Des télescopes spécifiques sont nécessaires pour détecter les rayons gamma de haute énergie issus de l'annihilation de deux particules de matière noire. Ils nécessitent de mettre au point des miroirs qui collectent puis focalisent les photons sur des caméras ultra-rapides, composées de photomultiplicateurs disposés dans une grille en nid d'abeille.

HESS

L'observatoire HESS est un réseau de 5 télescopes imageurs à effet Cherenkov atmosphériques. Son implantation en Namibie, à 1 800 m d'altitude, permet d'observer le centre galactique avec une meilleure sensibilité en flux que les autres réseaux au sol.

Les quatre premiers télescopes, de 12 m de diamètre, fonctionnent depuis 2004. Leurs caméras, récemment mises à jour, sont pourvues d'une électronique capable de détecter la lumière Cherenkov avec un temps d'exposition de quelques milliardièmes de secondes, une rapidité quasiment un million de fois supérieure à celle d'une caméra normale. Mis en service en 2012, le cinquième est équipé d'un miroir de 28 m de diamètre et d'une caméra de trois tonnes, suspendue à 36 m au-dessus du miroir principal, équivalent à la hauteur d'un immeuble de vingt étages !



Les 5 télescopes de l'observatoire HESS sur les hauts plateaux Khomas, en Namibie.

Depuis sa mise en service en 2003, HESS observe chaque année le centre galactique. A ces observations s'ajoutent celles des galaxies naines satellites de la Voie lactée. Ces données sont au cœur du programme de recherche de matière noire de HESS. L'interprétation de ces images permettra de remonter aux propriétés des rayons gamma primaires

(énergie, direction en particulier). Elles seront analysées puis comparées à celles fournies par d'autres instruments, du satellite Fermi en particulier sur 15 **galaxies naines satellites**.

La collaboration HESS réunit actuellement 180 chercheurs issus de 28 laboratoires de 12 pays différents.

Interview

Quel est votre rôle au sein de ce service ?

Je suis étudiante en 1^{re} année de thèse depuis octobre 2016. J'analyse des données pour la recherche de matière noire, en particulier dans le centre galactique.

D'où proviennent ces données ?

Les données viennent de l'expérience HESS, située en Namibie. Ce réseau de cinq télescopes détecte et mesure les photons qui viennent de différentes sources de l'Univers. Pour le moment, j'ai analysé les données de la première phase de l'expérience, qui a duré 10 ans, et je continuerai avec l'analyse des données de la phase 2. J'utilise un langage de programmation et j'écris mes propres codes pour effectuer les analyses et l'interprétation en terme de matière noire des données. En 2012, un 5^e télescope plus puissant a été ajouté, il peut aller à plus basse énergie. C'est important, car cela permettra de les confronter avec les données recueillies à plus basse énergie et en particulier avec celles prises par le satellite Fermi.

Irez-vous en Namibie effectuer des observations ?

Oui, le départ est prévu pour juillet 2017. J'irai

sur place lors de l'hiver austral, pendant 28 jours (une lunaison). Je ne vais pas seulement effectuer des observations mais aussi voir comment on les étalonne. Mon travail se fera de nuit, sur ce site où il y a très peu de pollution lumineuse, ce qui permet de ne pas trop perturber la détection de la lumière Cherenkov. Lors de notre séjour, nous devons contrôler que tout marche, réchauffer l'électronique. Lorsqu'il n'y a plus de Soleil ni de Lune, nous pouvons pointer les télescopes vers le ciel et démarrer la prise de données scientifiques. Nous partons toujours par groupe de deux et rencontrons des personnes de différents instituts de recherche du monde. C'est l'occasion de confronter nos travaux avec d'autres physiciens.

Avez-vous une anecdote ?

Dans mon groupe de recherche, plusieurs personnes sont déjà allées en Namibie et ils m'ont raconté que les singes vont sur les télescopes faire les fous, il faut donc vite les faire descendre. Parfois, des serpents tombent des arbres, il faut faire attention et bien faire du bruit !

Qu'espérez-vous pour la suite ?

J'espère qu'un jour quelqu'un détectera de la matière noire, car pour l'instant seules des contraintes

peuvent être mises sur la probabilité que deux particules de matière noire interagissent et s'annihilent en photons ou autres produits secondaires. Après ma thèse de recherche avec les observations de HESS, j'espère travailler sur CTA, qui devrait commencer dans 3 ans.

“ Confronter nos travaux avec d'autres physiciens ”



Lucia Rinchiuso

Étudiante en 1^{re} année de thèse

Formation :

- > Licence en physique et astrophysique
- > Master en physique nucléaire, sub-nucléaire en Italie
- > Dans le cadre d'Erasmus à Paris-Sud, thèse sur les noyaux, particules, astro-particules et cosmologie



Tests en chambre noire dédiée à la caractérisation et le calibrage des caméras NectarCAM.

Interview

Quelle est votre fonction ?

Je travaille au sein d'une équipe constituée d'électroniciens, de mécaniciens, de physiciens, d'informaticiens. Nous avons en charge l'assemblage, le test et la calibration des caméras développées pour le projet CTA et initiées à l'Irfu*. Elles seront installées sur les télescopes des différents sites dans l'hémisphère nord et l'hémisphère sud. Nous sommes aussi intervenus sur le développement des miroirs, des hexagones d'environ un m², qui sont maintenant en production chez la société Kerdry, et sur la conception du système de refroidissement. Côté électronique, l'équipe a conçu le circuit intégré Nectar qui est le cœur de lecture et d'acquisition des caméras, ainsi que le développement et la mise au point de cartes électroniques pour la caméra et son équipement de test.

Pouvez-vous nous préciser votre travail sur les caméras ?

Nous assemblons les différents éléments développés au sein de l'Institut et ceux de collaborations (des cartes électroniques, de la mécanique, des modules optiques et des logiciels d'acquisition). Après assemblage, il faut s'assurer que la caméra fonctionne, qu'il n'y a pas d'élément défectueux et qu'elle répond aux spécifications et aux besoins. La calibration est la partie la plus importante : quand on développe un objet scientifique aussi complexe, il faut vérifier que tout soit ajusté au niveau électronique et optique. Les résultats de la première caméra vont permettre de voir si celles de la série doivent être identiques ou si des améliorations sont à apporter. C'est pour cela qu'il y a beaucoup de tests différents. Pour les réaliser, nous avons dû créer une chambre noire de grande hauteur et longueur (respectivement 4,5 et 16 m) pour simuler la position de la caméra sur le télescope, en respectant un maximum de distance entre la caméra et la source de lumière.

Quelle est la particularité de ces télescopes ?

Chacun est constitué d'une structure qui porte les miroirs réfléchissants et la caméra, avec un système qui permet les déplacements pour pointer là où on veut dans le ciel. La caméra est d'une taille impressionnante : 3 x 3 x 1,5 m pour un poids total de 2 tonnes. Elle sera située à 16 m au-dessus de la surface réfléchissante de 12 m de diamètre.

Irez-vous sur site ?

Oui ! Etant centre d'assemblage et de test, nous sommes également responsables du transport, de l'installation et de l'intégration de la caméra sur le site. Les miroirs et les différents éléments de la caméra seront emmenés dans des containers puis assemblés sur place. 16 télescopes sont prévus pour les deux sites de CTA Observatory. Une première caméra devrait être installée fin 2018 ; ensuite, la fabrication se déroulera sur 5 ans.

* Irfu : Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers.

“ Vérifier que tout soit ajusté au niveau électronique et optique ”



Frédéric Louis

Ingénieur chercheur

Formation :

- > Bac S – option mécanique
 - > IUT en électronique
 - > NFI - Nouvelle formation d'ingénieur
- Formation continue sur 3 ans

CTA

HESS a ouvert la voie à la réalisation du Cherenkov Telescope Array (CTA) qui sera installé sur deux sites, le premier dans l'hémisphère sud, au Chili, et le second dans les îles Canaries. Composé de plus de 100 télescopes au total, il permettra d'élargir la gamme en énergie accessible, donc de gagner en performance et en sensibilité et d'affiner la résolution des résultats. Ses composants (miroirs et caméras) ont fait l'objet de développements spécifiques et son déploiement est prévu à partir de 2018.

Dans le cadre de ce consortium international (1 350 membres issus de 32 pays), les programmes d'observations prioritaires ont été définis. Plus de 500 heures de temps d'exposition ont été allouées, durant les trois premières années, à l'observation des 5 degrés autour du centre galactique, la région la plus prometteuse pour détecter un signal de matière noire.

YHLEXIQUE TXG FJ LKH JSKLJMLKLUMK

Galaxie naine satellite : Dans une galaxie naine, il y a très peu de gaz et d'étoiles (de l'ordre de quelques millions à quelques centaines de millions d'étoiles, un nombre relativement faible par rapport aux 200 à 400 milliards dans la Voie lactée). Ce sont les objets qui contiennent la plus forte proportion de matière noire dans l'Univers.

EUCLID

Euclid va dresser une cartographie en 3 dimensions de l'Univers à différentes époques : plusieurs centaines de millions de galaxies et la matière noire environnante. L'évolution dans le temps de cette mystérieuse matière

permettra de mieux comprendre l'autre composante inconnue appelée énergie noire, responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers dans le cadre de la théorie de la gravitation d'Einstein.

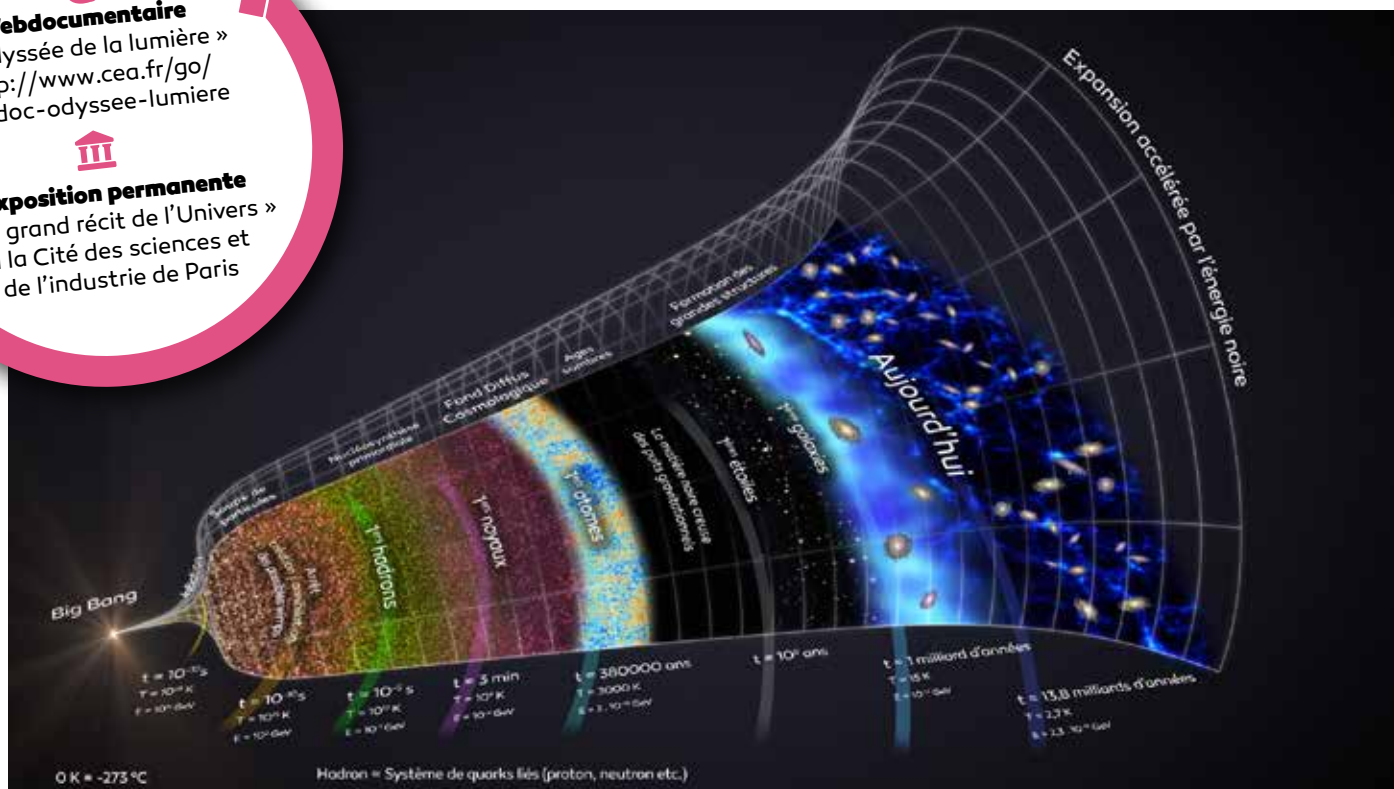
Le lancement de cette ambitieuse mission est prévu en 2020. Elle est menée par un consortium international auquel participent dix laboratoires français.



Assemblage des capteurs d'Euclid.

Webdocumentaire
« L'odyssée de la lumière »
<http://www.cea.fr/go/webdoc-odysee-lumiere>

Exposition permanente
« Le grand récit de l'Univers »
à la Cité des sciences et de l'industrie de Paris



L'histoire de l'Univers

Depuis 13,7 milliards d'années, l'Univers n'a cessé d'évoluer. Contrairement à ce que nous disent nos yeux lorsque l'on contemple le ciel, ce qui le compose est loin d'être statique. Les physiciens disposent des observations à différents âges de l'Univers et réalisent des simulations dans lesquelles ils rejouent sa formation et son évolution. Il semblerait que la matière noire ait joué un grand rôle depuis le début de l'Univers jusqu'à la formation des grandes structures observées aujourd'hui.

Découvrez cette histoire, étape par étape, grâce à l'animation.



L'Univers et ses secrets

Vous rêvez d'être astrophysicien au CEA ; mais connaissez-vous réellement l'Univers qui vous entoure et les instruments qui permettent de le sonder ?

1. Sous quel effet les rayons lumineux sont-ils déviés ?

- a. La lentille gravitationnelle
- b. Le noyau de la Terre
- c. La lentille de contact
- d. Le noyau gravitationnel

2. Quelle est la proportion de matière noire dans la matière de l'Univers ?

- a. 25 %
- b. 45 %
- c. 65 %
- d. 85 %

3. Depuis 2009, combien de wimps ont été créés au LHC ?

- a. 0
- b. 5
- c. 10
- d. 15

4. Que veut dire HESS ?

- a. High Energy Stereoscopic System
- b. Hautes Expériences en Système Solaire

- c. Hélicoptères Européens pour la Sécurité Sismique
- d. Hippocampes Électromagnétiques Sous Surveillance

5. Que veut dire CTA ?

- a. Centre des Technologies Automobiles
- b. Cherenkov Telescope Array
- c. Centrale de Traitement d'Air
- d. Constructions Tubulaires d'Azote

6. Quel est le temps d'exposition des caméras des télescopes HESS ?

- a. Quelques milliardièmes de seconde
- b. Quelques millièmes de seconde
- c. Quelques centièmes de seconde
- d. Quelques dixièmes de seconde

7. Quand est prévu le lancement de la mission Euclid ?

- a. 2050
- b. 2040
- c. 2030
- d. 2020

Sites

- **CEA** : www.cea.fr
- **CEA jeunes** : www.cea.fr/jeunes
- **Irfu** : <http://irfu.cea.fr/>
- **Retrouvez les Savanturiers en version web, les vidéos et les interviews** : <http://cea.fr/go/savanturiers>



Éditeur : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, RCS Paris B 775 685 019

Directeur de la publication : Xavier Clément

Conseiller scientifique : Emmanuel Moulin
Ont participé à ce numéro : April Allal, Quentin Bauduin, Sophie Kerhoas-Cavata, Florence Klotz, Lucia Le Clech, Estelle Lemaître, Frédéric Louis, Lucia Rinchuso.

Crédits photos : Animéa : p.2 - p.8 - JJ. Bigot/CEA : p.4 haut - S. Brunier : p.5 - Collaboration HESS : p.1 - L. Godart : p.5 - p.7 haut - C. Medina : p.6 haut - NASA/CXC/CfA/M. Markevitch et al. : p.2 - X-ray - NASA/CXC/J. Irwin et al. : p.2 - M. Pugh : p.3 - P. Stroppa : p.4 bas

Création, réalisation et impression : FILcom
www.filcom.fr - Février 2017 - ISSN 2271-6262

Nous remercions Fabienne Chauvière d'avoir accepté que nous empruntions le titre de son émission.



Ne peut être vendu

Réponses : 1a, 2d, 3a, 4a, 5b, 6a, 7d