

# Les particules candidates à la matière sombre

Remis au Professeur Luc Marleau

Dans le cadre du cours de Physique des Particules

PHY-3501

Par

Audrey-Maude Vézina

111 096 950

Le mercredi 5 avril 2017



# Table des matières

Introduction.....	1
La matière sombre.....	1
La supersymétrie.....	3
La matière sombre chaude .....	4
Les neutrinos.....	4
Origine et propriétés .....	4
Détection.....	5
La matière sombre froide.....	5
Les axions.....	5
Origine et propriétés .....	5
Détection.....	6
Les axinos.....	8
Origine et propriétés .....	8
Détection.....	9
Le neutralino.....	9
Origine et propriétés .....	9
Détection.....	10
La matière sombre tiède.....	11
Les neutrinos inertes.....	11
Origine et propriétés .....	11
Détection.....	11
Les gravitinos.....	12
Origine et propriétés .....	12
Détection.....	12
Conclusion.....	13
Bibliographie.....	iii

## Introduction

La matière sombre est un sujet qui anime la communauté scientifique depuis plusieurs années. Le premier scientifique à avoir suggéré l'existence d'une telle matière est l'astronome Jacobus Kapteyn en 1922. Le concept a été développé pour expliquer la formation d'amas et de superamas de galaxies suite au Big Bang. En effet, la matière observable n'est pas en mesure d'expliquer la force de gravité gardant les galaxies et les amas ensemble. Leur vitesse de rotation est trop grande pour que seule la matière observable soit responsable.

Dans les années suivant l'apparition du concept, de nombreuses particules exotiques et hypothétiques ont été mises de l'avant pour expliquer la matière sombre. Des particules comme les axions, les WIMP (Weakly Interacting Massive Particles) et les neutrinos pourraient former la matière sombre. Les particules considérées doivent être stables ou avoir une longue durée de vie et être électriquement neutre et de couleur<sup>1</sup> neutre [1].

Dans ce travail, les propriétés générales de la matière sombre seront abordées. Les théories sur sa composition seront expliquées et, par la suite, une description des différentes particules candidates associées à ces trois théories sera réalisée. Pour chaque particule, les moyens de détection et les instruments utilisés seront expliqués. La théorie de la supersymétrie (SUSY) sera abordée brièvement puisqu'elle est responsable de la prédiction de plusieurs particules associées à la matière sombre.

Le travail sera axé sur les axions, les particules provenant de SUSY, soient les WIMP et superWIMP, et les neutrinos. Les WIMP abordés sont les neutralinos et les axinos, et les superWIMP sont les gravitinos.

## La matière sombre

L'Univers est constitué de 68% d'énergie sombre, de 27% de matière sombre et le reste est de la matière ordinaire. La matière sombre et l'énergie sombre ne doivent pas être confondues.

---

<sup>1</sup> La couleur (rouge, vert et bleu) est un nombre quantique associé aux quarks et représentant leur charge colorée. Il s'agit d'une dégénérescence permettant de contourner le problème associé au principe d'exclusion de Pauli lors de la formation des hadrons. [27].

L'énergie sombre a été proposée pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers ; plusieurs scientifiques étaient persuadés que la gravité ferait ralentir ce processus, mais les observations du Télescope Hubble, en 1998, indiquaient le contraire [2].

La matière sombre permet d'expliquer la formation des amas de galaxies et la force qui les maintient. Elle est aussi responsable de l'amplification des petites fluctuations dans le fond diffus cosmologique (rayonnement électromagnétique issu du Big Bang qu'a connu l'Univers à ses débuts) permettant ainsi de créer les structures à grande échelle qui peuvent être observées aujourd'hui.

La matière sombre possède des interactions électromagnétiques très faibles. Les particules qui la composent doivent avoir une charge électrique nulle et un dipôle électrique et magnétique nuls, ou elles doivent avoir une masse très élevée. La matière sombre ne peut pas se refroidir par radiation de photons. Elle est dite optiquement sombre et sans dissipation [3].

Il y a trois théories principales sur les caractéristiques de la matière sombre: la matière est chaude (Hot Dark Matter (HDM)), froide (Cold Dark Matter (CDM)) ou tiède (Warm Dark Matter (WDM)). Une quatrième théorie proposant de la matière sombre interagissant avec elle-même (self-interacting dark matter (SIDM)) a été introduite, puis contredite. En effet, l'hypothèse des particules lourdes interagissant fortement et composant cette matière sombre a été écartée suite à l'observation de neutrinos au détecteur IceCube [4].

La théorie HDM est apparue en 1980. Dans cette théorie, les particules formant la matière sombre sont ultra-relativistes ; les neutrinos constituent les candidats pour la matière sombre chaude. Toutefois, cette théorie ne permet pas d'expliquer la formation individuelle des galaxies. En effet, une grande vitesse des particules implique l'absence de production à petite échelle ; la théorie CDM explique de façon plus adéquate les observations des galaxies.

La théorie CDM apparaît en 1984, soit quatre ans après la théorie HDM, pour mieux expliquer les observations et les comportements des galaxies. Elle implique des particules non-relativistes et permet d'expliquer le passage d'un état homogène initial à l'état d'aujourd'hui. Les axinos, les axinos et les WIMP, comme les neutralinos, sont largement considérés comme particules composant la matière sombre. Depuis les années 1990, il s'agit du modèle favori, mais il présente quelques lacunes. En effet, le modèle du CDM prédit un trop grand nombre de galaxies naines et

un moment angulaire galactique trop faible. Il prédit aussi des étoiles très massives (100 fois la masse du Soleil) qui auraient une courte durée de vie. Il serait préférable d'avoir une diminution des fluctuations de densité à petite échelle. Une vitesse de particules plus grande est alors nécessaire ; elle est prédite par la théorie WDM.

Au début des années 90, la théorie WDM, impliquant des particules dites semi-relativistes comme composantes, est introduite. La vitesse initiale des particules du WDM est plus grande que celle du CDM prédit un nombre adéquat de galaxies naines et la formation d'étoiles comme le Soleil qui auraient une longue durée de vie [5]. Les particules candidates sont les gravitinos et les neutrinos inertes (neutrinos de chiralité<sup>2</sup> droite interagissant seulement par gravité).

## La supersymétrie

Cette théorie est une extension du modèle standard qui permet de relier entre elles des particules de spins différents. Elle prédit que toutes les particules du Modèle standard possèdent une particule partenaire ; chaque fermion normal possède un superpartenaire qui est un boson et vice-versa. Ce superpartenaire interagit de la même manière que sa particule associée. Ces nouvelles particules permettraient de fixer la masse du boson de Higgs ; elles compenseraient la contribution de leur partenaire du Modèle standard à la masse du boson, rendant possible un boson de Higgs léger [6].

Avec cette nouvelle théorie, un nouveau nombre quantique est associé à ces superpartenaires, la parité  $R$ . Les particules associées au Modèle standard ont une parité  $R$  de  $+1$  et les superpartenaires ont une parité  $R$  de  $-1$ . Il se doit d'exister une *lightest supersymmetric particle* (LSP), une particule supersymétrique si légère qu'elle ne peut se désintégrer sans violer la conservation de la parité  $R$ . Celle-ci est stable, neutre et elle n'interagit pas fortement. Elle possède les caractéristiques recherchées dans la matière sombre ; il s'agit d'une bonne candidate. Le neutralino, l'axino et le gravitino sont considérés comme LSP.

---

<sup>2</sup> La chiralité est déterminée selon que la particule se transforme dans la représentation droite ou gauche du groupe de Poincaré (ensemble des isométries de l'espace-temps de Minkowski incluant le groupe des transformations de Lorentz et des translations) [27].

Dans les années 1980, le Modèle standard supersymétrique minimal (MSSM) a été proposé. Ce modèle comprend un terme de brisure douce (soft breaking) de la supersymétrie dans le Lagrangien. Cette rupture permet aux superpartenaires d'avoir une masse différente de leur particule associée dans le Modèle standard [3].

## **La matière sombre chaude**

### **Les neutrinos**

#### **Origine et propriétés**

L'existence des neutrinos a été postulée en 1930 par Wolfgang Pauli afin d'expliquer le spectre continu de la désintégration  $\beta$  (désintégration radioactive émettant un électron ou un positron) en plus de la non-conservation du moment cinétique apparente lors de celle-ci. La première confirmation expérimentale, par Frederick Reines et Clyde Cowan auprès d'un réacteur nucléaire, remonte à 1956. En 1962, Leon M. Lederman, Melvin Schwartz et Jack Steinberger détectent un neutrino muonique ; cette découverte implique l'existence de plusieurs saveurs leptoniques. Le neutrino tauique est annoncé par DONUT Collaboration (Direct Observation of the NU Tau), une expérience de Fermilab.

Les neutrinos sont les seules particules du Modèle standard considérées pour expliquer la matière sombre. Ces particules interagissent faiblement et sont électriquement neutre ; elles ne sont pas absorbées par la matière dans laquelle elles se déplacent. Les neutrinos ne sont pas affectés par le champ magnétique et ne subissent pas d'atténuation. Il s'agit de leptons (fermions de spin  $\frac{1}{2}$ ) qui peuvent être retrouvés en trois saveurs: électronique, muonique et tauique.

La majorité des neutrinos auraient été produits peu après le Big Bang et seraient responsable du rayonnement de fond cosmique. Cette particule ultra-relativiste peut être produite dans des collisions de haute énergie. Encore aujourd'hui, des neutrinos peuvent être produits par des accélérateurs de particules, des phénomènes atmosphériques et la fusion nucléaire dans le Soleil. La naissance et la mort des étoiles, comme l'explosion d'une supernova, sont de bonnes sources de neutrinos. Ces particules sont associées au HDM car, lors de leur production, elles étaient en équilibre thermique avec la matière chaude au début de l'Univers [7].

Le Modèle standard prédit des neutrinos sans masse. Toutefois, l'oscillation des neutrinos, c'est-à-dire la variation périodique de la probabilité de mesurer une certaine saveur pour un neutrino

produit avec une saveur différente, est un phénomène quantique impliquant que les neutrinos ont une masse non nulle. Cette masse est trop petite pour que les neutrinos soient les seuls constituants de la matière sombre. Les neutrinos datant du Big Bang en composent toutefois une certaine quantité. L'estimation de leur fraction de la densité masse-énergie de l'Univers varie d'un dixième à quelques points de pourcentage [8].

### **Détection**

L'expérience d'IceCube, l'observatoire de neutrino du Pôle Sud, est un détecteur d'un kilomètre cube se trouvant 2500 mètres sous terre. Fait de glace, la cavité est composée de 5160 modules optiques digitaux (MOD), chacun contenant un photomultiplicateur. Il y a 324 MOD situés sur une surface (IceTop) et les autres sont attachés à 86 cordes verticales suspendues à celle-ci. Une région plus dense en MOD est située à l'intérieur de la cavité (DeepCore).

IceCube détecte indirectement les neutrinos quand ceux-ci interagissent avec la glace. Une particule secondaire chargée est produite et une lumière appelée radiation de Tcherenkov est émise. Cet effet se produit lorsqu'une particule voyage plus vite que la lumière dans un milieu quelconque ; dans la glace, la lumière voyage à  $0,76c$ . Cet éclat est capté puis transféré à un ordinateur qui établit le trajet parcouru par la lumière. La direction et l'énergie des neutrinos peuvent alors être calculées [9].

L'Observatoire de Neutrino de Sudbury (SNO) utilise aussi la radiation Tcherenkov pour détecter les neutrinos. Situé 6800 pieds sous terre, l'expérience utilise de l'eau lourde (deutérium et oxygène  $D_2O$ ) avec laquelle les neutrinos interagissent pour produire de la radiation Tcherenkov. Cet éclat de lumière est capté par 9600 photomultiplicateurs disposés sur les parois du récipient [10].

## **La matière sombre froide**

### **Les axions**

#### **Origine et propriétés**

Les axions sont des particules hypothétiques postulées par la théorie Peccei-Quinn (PQ) en 1977 afin de résoudre le problème de symétrie CP pour les interactions fortes (aussi appelé le Strong CP

problem). En effet, la théorie de la chromodynamique quantique (QCD), décrivant l'interaction forte et donnant une propriété de couleur aux quarks confinés, pourrait contenir un terme violant la symétrie. Cette violation n'est toutefois pas observée et une des explications possibles est la présence d'une particule neutralisant ce terme, l'axion [11]. Il s'agit d'un boson pseudo-Nambu-Goldstone résultant de la brisure spontanée de la symétrie PQ.

Les propriétés de l'axion ont fait de la particule une candidate à la matière sombre. Celle-ci possède un spin nul et une charge neutre. Elle est légère et elle interagit très peu avec la matière baryonique. Ce type de particule pourrait avoir été produit en grande quantité peu après le Big Bang et elle serait encore présente aujourd'hui. En effet, puisque l'axion est une particule très légère, il n'y a pas de désintégration possible en particules encore moins massives. L'axion peut être produit par l'interaction entre deux photons, dont un peut être virtuel. Il s'agit de l'effet Primakoff ; la transformation de photons en axions est réversible. Cette propriété est fortement exploitée pour les stratégies de détection [12].

Deux hypothèses sur le moment de la formation non-thermique (la particule n'est pas à l'équilibre thermique avec son milieu) des axions ont été posées. La première considère que la production de la particule s'est faite avant l'inflation (brève période où l'Univers était en expansion exponentielle) et la masse attendue pour celle-ci est d'environ  $5 \mu\text{eV}$ . La seconde hypothèse place la formation des axions après l'inflation, entraînant une masse de  $50$  à  $1500 \mu\text{eV}$  [13]. Pour déterminer la masse de la particule, les scientifiques ont besoin des caractéristiques de l'expansion de l'Univers et des prédictions de la chromodynamique quantique à des températures extrêmement hautes. La théorie QCD prédit que la masse des axions dépend de la température et est proportionnelle à la racine de la susceptibilité topologique<sup>3</sup>. Avec l'expansion et le refroidissement de l'Univers, la masse devient constante et c'est pourquoi les deux notions sont nécessaires pour connaître la masse de l'axion aujourd'hui.

## Détection

Il y a plusieurs instruments conçus pour la détection des axions. Au CERN, l'expérience *Optical Search for QED Vacuum Birefringence, Axions and Photon Regeneration* (OSQAR) est utilisée pour la détection des axions et l'étude des propriétés du vide. Un faisceau laser est exposé à un

---

<sup>3</sup> Il s'agit de la façon dont  $F\tilde{F}$  (intégré sur une variété) change en réponse au changement de  $\theta$ .  $F$  correspond au tenseur du champ de gluon, et  $\tilde{F}$  à son dual.

champ magnétique de 9 Tesla. Deux aimants dipolaires supraconducteurs semblables à ceux du Grand Collisionneur de Hadrons (LHC) produisent ce champ (le plus fort utilisé jusqu'à maintenant). Le faisceau se propage à travers une chambre à vide de 55 mètres de longueur et de 40 millimètres de diamètre contenant une barrière bloquant les photons (voir figure 1). Si des photons sont détectés de l'autre côté, cela implique qu'ils se sont transformés en axions pour passer la barrière puis se sont retransformés en photons ensuite. La probabilité de transformation des photons en axions est proportionnelle à la force du champ magnétique. L'expérience est parfois référée par le sobriquet « light shining through a wall » [14]. Le même principe est utilisé dans l'expérience *Any Light Particle Search* (ALPS) en collaboration avec DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron).

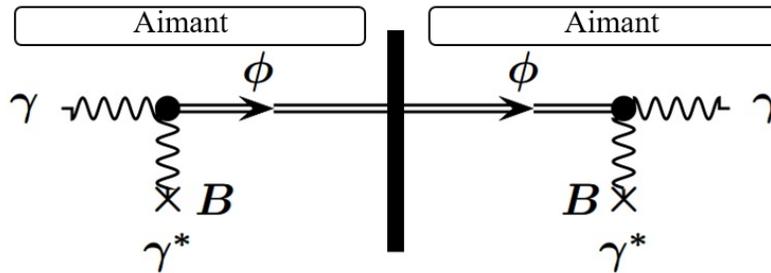


Figure 1: Fonctionnement pour la détection d'axions avec OSQAR et ALPS (Audrey-Maude Vézina)

Le CERN travaille aussi sur un autre instrument de détection, *CERN Axion Solar Telescope* (CAST). Celui-ci permettrait de détecter les axions produits à l'intérieur du Soleil. Des aimants dipolaires supraconducteurs permettraient le changement des particules en rayons-X. Le télescope est constitué d'un système de miroirs focalisant pour rayons-X, d'un détecteur à chaque extrémité et d'une plateforme mobile [15]. Une nouvelle génération de cet instrument, l'*International Axion Observatory* (IAXO), est en développement et aurait une sensibilité supérieure à son prédécesseur [16].

Le *Axion Dark Matter eXperiment* (ADMX), à l'Université de Washington, essaie de détecter les axions provenant du halo galactique local de matière sombre à l'aide de micro-ondes. L'expérience utilise une cavité résonnante dont la fréquence est ajustée à la masse de l'axion ; elle tente de détecter la conversion d'axions en micro-ondes. La cavité se trouve à l'intérieur d'un aimant supraconducteur de 8 Tesla. Deux tiges servant au réglage de la fréquence sont mobiles dans la

cavité ; leur déplacement permet d'atteindre la fréquence correspondant à la masse de la particule. Un récepteur de micro-ondes extrait le signal d'interaction de l'axion du bruit dans la cavité. L'expérience est réalisée à une température de 4,2 Kelvin à l'aide d'un système de refroidissement à l'hélium. Le récepteur est sensible à une certaine plage de fréquence correspondant à une masse de l'axion de  $0.5 \mu\text{eV}$  à  $40\mu\text{eV}$  [17].

Puisqu'il ne s'agit peut-être pas de la bonne valeur de masse (reliée au moment de la formation), une expérience similaire est en développement par le *Max Planck Institute for Physics*. L'expérience MADMAX serait sensible à une masse allant de 40 à 400  $\mu\text{eV}$  et donc une plage de fréquence des photons émis allant de 10 à 100 GHz. Un aimant de 10 Tesla serait utilisé et un système constitué de 80 disques semi-transparents permettrait une interférence constructive facilitant la détection [18].

## **Les axinos**

### **Origine et propriétés**

Les axinos sont les superpartenaires des axions et entrent dans la catégorie des WIMP. Cette catégorie comporte de bons candidats pour les matières sombres froide et tiède. Les WIMP sont des particules hypothétiques prédites par la conservation de la parité R dans la théorie supersymétrique. Elles auraient été produites thermiquement, c'est-à-dire en équilibre thermique avec l'Univers primitif (à l'état d'un plasma thermique chaud). Au début, la densité de WIMP était de l'ordre de celle des photons, mais, avec le refroidissement, la densité de WIMP a diminué exponentiellement. La faible quantité de particules dans l'Univers rendait la possibilité d'annihilation assez faible pour considérer les WIMP restant comme étant stables ; il s'agit du « gel ». Ces particules sont généralement constituées de matière non-baryonique et ont une masse variant de 1 GeV à 1 TeV. Elles n'interagissent que par gravité et interactions faibles [19].

L'axino, électriquement neutre, de couleur neutre et stable, pourrait être la LSP. La particule peut être produite par la désintégration non-thermique de superpartenaires plus lourds tels que les neutralinos et les gravitinos. Les axinos peuvent être produits thermiquement si les particules se désintégrant sont en équilibre thermique, mais les axinos eux-mêmes ne le sont pas. En effet, ces particules ont très peu de couplage avec la matière ordinaire. Initialement, les axinos sont

relativistes, mais leur grande masse (entre 10 MeV et plusieurs GeV dépendamment du scénario de formation) leur permet de devenir non-relativistes avec le refroidissement de l'Univers. Les axinos pourraient aussi constituer la matière sombre tiède si leur masse est plus faible et si la température de réchauffe (température à atteindre suite à l'inflation qui correspond aussi à la température pré-inflation) est plus grande que  $5 \times 10^{14}$  GeV (température pour avoir du CDM) [20].

## Détection

Des détecteurs pour les WIMP peuvent être utilisés pour détecter les axinos. L'expérience *LUX-ZEPLIN* (LZ) utilise 7 tonnes de xénon liquide. Les axinos et autres WIMP entrent en collision avec les noyaux de xénon et forcent leur recul. Ce mouvement du noyau entraîne un éclat de lumière, suivi d'un éclat d'électroluminescence. Ces signaux lumineux sont ensuite captés par 494 tubes photomultiplicateurs.

À l'aide du LHC, il serait possible d'observer la seconde particule supersymétrique la plus légère (*Next to lightest superpartner* (NLSP)) se désintégrer en axinos. Les NLSP paraissent presque stables, mais elles se désintégreraient éventuellement en axinos. La plupart des désintégrations prennent place à l'extérieur du détecteur dû à la longue durée de vie, mais il pourrait y avoir la possibilité de capturer les NLSP pour observer leur désintégration. Ce procédé pourrait aussi fonctionner pour la détection des gravitinos s'il s'agit du LSP [21].

## Le neutralino

### Origine et propriétés

Le neutralino est une particule entrant dans la catégorie des WIMP. Il y a quatre types de neutralino ; le plus léger est considéré comme le LSP du MSSM. La particule est neutre et stable ; elle ne peut se désintégrer en particule plus légère. Ce superpartenaire des bosons neutres serait produit par la désintégration de gravitinos et d'axinos (inversement au cas où l'axino est le LSP). Il correspond à une combinaison linéaire du photino (superpartenaire du photon), du zino (superpartenaire du boson Z) et du higgsino (superpartenaire du boson de higgs neutre).

## Détection

Pour détecter le neutralino le plus léger (meilleur candidat à la matière sombre), plusieurs techniques sont utilisées. Au LHC du CERN, l'expérience du solénoïde compact à muons (CMS) essaie de détecter indirectement les neutralinos. Le principe utilisé est la conservation de l'énergie cinétique et de la quantité de mouvement lors de la désintégration de particules massives. Ces particules vont se désintégrer en leptons, en quarks et en neutralinos. Les détecteurs seront traversés par le LSP sans que celui-ci ne laisse de trace entraînant un déséquilibre dans la quantité de mouvement et une apparente non conservation de l'énergie lors de la désintégration. Les détecteurs permettent de capter les particules dans toutes les directions pour s'assurer que l'énergie manquante correspond au neutralino [22].

L'expérience PICASSO (*Project In Canada to Search for SuperSymetric Objects*) est aussi à la recherche des neutralinos. Situé au laboratoire souterrain SNOLAB à Sudbury (Ontario), PICASSO utilise des millions de gouttelettes surchauffées de liquide actif à base de fréon ( $C_4F_{10}$ ). Ces minuscules gouttes, extrêmement instables, se trouvent dans un milieu visqueux. Lorsqu'un neutralino du halo sphérique de WIMP de la Voie Lactée entre en collision avec un atome de fluor (F), il y a un transfert d'énergie cinétique. Une proto-bulle se forme, grossit dans la gouttelette et la transforme en vapeur (voir figure 2). Ce processus est accompagné d'un signal acoustique qui sera détecté par neuf capteurs piézoélectriques. Les événements sont localisés par triangulation [23].

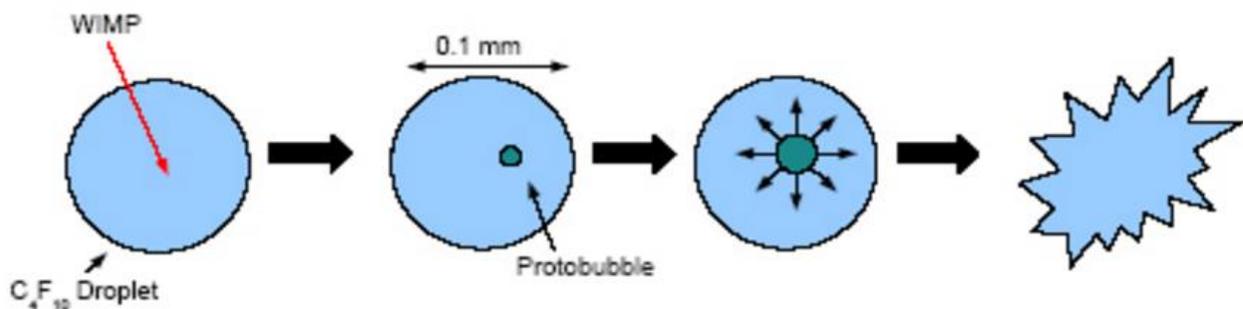


Figure 2: Principe de l'expérience PICASSO (Courtoisie PICASSO)

## La matière sombre tiède

### Les neutrinos inertes

#### Origine et propriétés

Les neutrinos inertes sont des neutrinos de chiralité droite. Il s'agirait de la quatrième saveur de neutrinos. Ces neutrinos ont une masse différente des trois autres saveurs et ils n'interagissent que par gravité. Comme mentionné précédemment, les neutrinos peuvent changer d'une saveur à une autre en voyageant ; un neutrino pourrait passer de muonique à inerte causant ainsi sa « disparition ». Théoriquement, le changement à un neutrino inerte est favorisé par le passage au travers de matière très dense tel le centre de la Terre. Cette propriété est exploitée dans les expériences de détection.

#### Détection

L'équipe de détecteur IceCube tente de détecter indirectement le neutrino inerte. Les chercheurs se concentrent sur une trajectoire traversant le centre de la Terre (matière dense) pour la détection de ces particules. Si un neutrino devient inerte, la différence de masse va modifier légèrement la fréquence d'oscillation des faisceaux de neutrinos. Il y aura alors résonance à une valeur d'énergie spécifique. L'équipe n'a pas encore détecté le neutrino inerte, mais les recherches continuent [24].

Plusieurs expériences au cours des dernières années ont indiqué la possible existence du neutrino inerte. Par exemple, au *Liquid Scintillator Neutrino Detector*, un faisceau de neutrinos électroniques a semblé apparaître dans un faisceau de neutrinos muoniques. À Fermilab, au *Mini Booster Neutrino Experiment* (MiniBooNE), un excès de neutrinos et d'antineutrinos électroniques a été détecté. Plusieurs autres mesures indiquent la disparition de neutrinos muoniques et l'apparition de neutrinos électroniques.

La construction du programme *Short-Baseline Neutrino* (SBN) par Fermilab est en cours. Constitué d'un accélérateur de faisceau neutronique et de trois détecteurs, le SBN sera utilisé pour observer l'apparition et la disparition des neutrinos. La région étudiée est de 1 à 2 eV<sup>2</sup> (valeurs déterminées par IceCube) [25].

## Les gravitinos

### Origine et propriétés

Les gravitinos sont des superWIMP ; ils héritent de la densité résiduelle (la densité d'une particule au moment du « gel ») par la désintégration de WIMP métastables (théoriquement instables, mais de très longue durée de vie). Ces particules, interagissant très faiblement, sont les superpartenaires des gravitons (particules hypothétiques agissant comme médiateur de la force gravitationnelle dans la théorie quantique des champs). Elles ont été produites lors de la diffusion thermique dans l'Univers primitif, à la fin de la période d'inflation. Le gravitino est instable puisqu'il ne respecte pas la parité R, mais sa durée de vie très longue en fait tout de même un bon candidat pour la matière sombre.

### Détection

Puisque la particule est instable, elle peut être indirectement détectée par la production de rayons cosmiques à hautes énergies lors de sa désintégration. La détection peut être faite à travers les recherches de rayons gammas, de neutrinos ou d'antimatière. Le rapport de branchement (probabilité d'emprunter un mode de désintégration parmi ses possibilités) et la durée de vie du gravitino déterminent la trace pour la détection indirecte. Le gravitino peut se désintégrer en deux ou trois corps.

Avec les observatoires de rayons gamma tels que l'expérience *Alpha Magnetic Spectrometer* (AMS-02) et le *Payload for AntiMatter Exploration and Light-nuclei Astrophysics* (PAMELA), il y a possibilité de détecter indirectement les gravitinos. La détection directe pose toutefois quelques problèmes. Elle est basée sur les observations de mouvements de recul nucléaire, dus au processus de diffusion des noyaux avec les particules de matière sombre traversant la Terre, dans les détecteurs sous-terrains. Les processus de diffusion produisent un neutrino ; le gravitino se transforme en neutrino et la différence de masse lui est transmise en énergie. Ces processus se font par l'échange d'un boson de Higgs léger, d'un boson Z ou d'un photon. Les diffusions inélastiques pourraient être observées, mais, pour l'instant, la sensibilité des détecteurs n'est pas assez bonne [26].

## Conclusion

Dans ce travail, plusieurs particules hypothétiques ont été étudiées en tant que candidates pour composer la matière sombre. La matière sombre serait composée en partie de matière sombre chaude, froide et tiède, la matière sombre froide étant en plus grande proportion.

Le HDM est probablement composé de neutrinos, des particules du Modèle standard interagissant faiblement et électriquement neutre. Ils auraient été produits peu après le Big Bang et seraient responsable du rayonnement de fond cosmique. Ces particules ultra-relativistes sont majoritairement détectées par radiation Tcherenkov, comme c'est le cas à l'expérience IceCube et l'*Observatoire de Neutrino de Sudbury (SNO)*.

Le CDM serait probablement composé d'axions, particules hypothétiques postulée par la théorie PQ. Ces particules, produites en grand nombre peu après le Big Bang (avant ou après l'inflation), peuvent se transformer en photons par effet Primakoff. Cette propriété est utilisée pour la détection aux expériences OSQAR, CAST et IAXO. Les expériences ADMX et MADMAX tentent de détecter les axions à l'aide de micro-ondes et d'une cavité résonnante pour des plages de masses différentes (selon le moment de la production de la particule). Le CDM pourrait aussi être constitué du LSP. Le rôle de la particule supersymétrique la plus légère se partage principalement entre l'axino, le neutralino et le gravitino (WDM). L'axino pourrait être détecté par la désintégration du NLSP dans les collisionneurs comme le LHC, ou par l'observation d'éclats de lumière lorsque l'axino entre en collision avec un noyau de xénon à l'expérience LZ. Le neutralino le plus léger pourrait aussi composer le CDM. Il pourrait être détecté indirectement, par l'apparente non-conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement, comme c'est le cas au CMS, ou directement, par le signal acoustique produit lors de la collision du neutrino avec un atome de fluor à l'expérience PICASSO.

Le WDM pourrait être composé de neutrinos inertes. Ce type de neutrinos serait détecté indirectement par la disparition ou l'apparition de neutrinos muoniques et électroniques due à l'oscillation des neutrinos vers leur saveur inerte suite à son passage dans de la matière dense. Les expériences IceCube et SBN tentent encore de détecter ce quatrième type de neutrino. Le gravitino serait aussi une option comme candidat pour la matière sombre malgré son instabilité ; sa durée de vie très longue le rend assez stable. La détection de cette particule se ferait indirectement par l'observation des rayons cosmiques à hautes énergies lors de sa désintégration. Des observatoires

tels qu'AMS-02 et PAMELA pourraient détecter indirectement les gravitinos ; la détection directe ne pourra pas être réalisée avec la présente résolution des détecteurs souterrains.

Les scientifiques ne sont pas en accord sur la particule la plus probable quant à la composition des trois types de matière sombre. Parmi ces candidates, seul le neutrino actif a été détecté ; les particules hypothétiques restent encore dans l'ombre.

## Bibliographie

- [1] G. Lazarides, "Particle Physics Approach to Dark Matter," in *The Invisible Universe: Dark Matter and Dark Energy*, Heidelberg, Springer, 2007.
- [2] Nasa Science, "Dark Energy, Dark Matter," NASA, [Site Web]. <https://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/what-is-dark-energy>. [Consulté le 12 Mars 2017].
- [3] E. A. Baltz, "Dark Matter Candidates," *SLAC Summer Institute on Particle Physics*, 2-13 Août 2004.
- [4] Symmetry Magazine, "Strongly interacting dark matter ruled out by observations," *Symmetry, Dimensions of particle physics*, 22 Janvier 2010. [Site Web]. <http://www.symmetrymagazine.org/breaking/2010/01/22/strongly-interacting-dark-matter-ruled-out-by-observations>. [Consulté le 20 Mars 2017].
- [5] J. Drexler, "Chapter 25 : Cosmic Newswire #23," in *Discovering Postmodern Cosmology*, Boca Raton, Universal Publisher, 2008, p. 291.
- [6] CERN, "Supersymmetry," CERN, [Site Web]. <https://home.cern/fr/about/physics/supersymmetry>. [Consulté le 20 Mars 2017].
- [7] IceCube, South Pole Neutrino Observatory, "All about neutrinos," University of Wisconsin-Madison, [Site Web]. <https://icecube.wisc.edu/info/neutrinos>. [Consulté le 17 Mars 2017].
- [8] C. Quigg, "Cosmic Neutrinos," *Cornell University Library*, p. 27, 8 Février 2008.
- [9] IceCube, South Pole Neutrino Observatory, "Detector," University of Wisconsin-Madison, [Site Web]. <https://icecube.wisc.edu/science/icecube/detector>. [Consulté le 17 Mars 2017].
- [10] The Sudbury Neutrino Observatory, "The Sudbury Neutrino Observatory," The Sudbury Neutrino Observatory, 2015. [Site Web]. <http://www.sno.phy.queensu.ca/>. [Consulté le 17 Mars 2017].
- [11] M. P. Lombardo, "Axions exposed," *NATURE | VOL 539 |*, pp. 40-41, 3 Novembre 2016.
- [12] L. D. D. a. K. v. Bibber, "Axions as dark matter particles," *New Journal of Physics* 11, pp. 1-20, 16 Octobre 2009.
- [13] D. Castelvechi, "Axion alert! Exotic-particle detector may miss out on dark matter," *Nature*, 2 Novembre 2016.
- [14] CERN, "OSQAR," CERN, [Site Web]. <https://home.cern/about/experiments/osqar>. [Consulté le 22 Mars 2017].
- [15] CERN, "CAST," CERN, [Site Web]. <https://home.cern/about/experiments/cast>. [Consulté le 22 Mars 2017].

- [16] CERN, " IAXO, The International Axion Observatory," Cern, [Site Web].  
<http://iaxo.web.cern.ch/content/physics>. [Consulté le 22 Mars 2017].
- [17] ADMX, The Axion Dark Matter eXperiment, "About Us," The Axion Dark Matter eXperiment (ADMX), [Site Web]. <http://depts.washington.edu/admx/about-us.shtml>. [Consulté le 22 Mars 2017].
- [18] Max Planck Institute for Physics, "MADMAX: Max Planck Institute for Physics takes up axion research," Max Planck Institute for Physics, 16 Novembre 2016. [Site Web].  
<https://www.mpp.mpg.de/en/what-s-new/news/detail/madmax-max-planck-institut-fuer-physik-steigt-in-axionforschung-ein/>. [Consulté le 22 Mars 2017].
- [19] Caltech Astronomy, "WIMPs and MACHOs," *ENCYCLOPEDIA OF ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS*, pp. 1-6, 2002.
- [20] H. B. K. J. E. K. a. L. R. Laura Covi, "Axinos as Dark Matter," *Cornell University Library*, p. 37, 20 Avril 2001.
- [21] L. C. K. H. L. R. a. F. S. A. Brandenburg, "Signatures of Axinos and Gravitinos at Colliders," *Cornell University Library*, p. 20, 7 Juin 2005.
- [22] Unknown, "Detecting Dark Matter," Compact Muon Solenoid, 17 Février 2012. [Site Web].  
<http://cms.web.cern.ch/news/detecting-dark-matter>. [Consulté le 21 Mars 2017].
- [23] The Picasso Experiment, "Neutralino Dark Matter," The Picasso Experiment, [Site Web].  
[http://www.picassoexperiment.ca/dm\\_neutralino.php](http://www.picassoexperiment.ca/dm_neutralino.php). [Consulté le 21 Mars 2017].
- [24] C. Cofield, "Still No Sign of 'Sterile Neutrino' Particle, Candidate for Dark Matter," Space.com, 8 Août 2016. [Site Web]. <http://www.space.com/33670-sterile-neutrino-not-found-antarctica-experiment.html>. [Consulté le 23 Mars 2017].
- [25] D. W. Schmitz, "Viewpoint: Hunting the Sterile Neutrino," *Physical Review Letters*, 8 Août 2016.
- [26] M. Greife, "Unstable Gravitino Dark Matter, Prospects for Indirect and Direct Detection," *Cornell University Library*, p. 206, 31 Juillet 2014.
- [27] L. Marleau, Introduction à la physique des particules, Québec: Département de physique, de génie physique et d'optique, Université Laval, 2017.