

Sur les lois renversées de Maxwell comme source de monopôles magnétiques dans la matière noire

Russell Bagdoo
rbagdoo@gmail.com

Sommaire

Nous proposons le neutrino stérile magnétique comme candidat possible pour la matière noire. Après un bref rappel sur le rôle de la matière noire en cosmologie et du neutrino dans la physique des particules, nous apportons l'idée que la matière noire serait constituée de substances provenant de trous noirs, notamment les neutrinos stériles associés à une charge magnétique. Ceux-ci ne seraient pas sensibles uniquement à la force gravitationnelle. Premièrement, nous avons conjecturé pour expliquer la matière noire qu'elle est composée de particules du type neutrinos et antineutrinos associés à une charge magnétique et que ces neutrinos proviennent des trous noirs primordiaux et classiques. Nous avons supposé que lorsque la matière baryonique franchit l'horizon des événements, les lois de Maxwell s'inversent, la charge électrique se transforme en une charge magnétique. Des neutrinos magnétiques stériles seraient créés et émis, véritable monopôles magnétiques. Deuxièmement, nous discutons de la matière noire constituée de neutrinos stériles associés à la charge magnétique, du fond diffus cosmologique qui atteste une matière noire non baryonique, des mini-trous noirs primordiaux, et de la formation de trous noirs primordiaux de masse intermédiaire liés à la matière noire et à la formation des galaxies. Troisièmement, nous passons en revue différents mécanismes de la façon dont le neutrino magnétique stérile aurait pu s'échapper du trou noir pour devenir de la matière noire. Quatrièmement, nous étudions la possibilité que des neutrinos ordinaires puissent être produits par l'interaction faible si les neutrinos magnétiques stériles de la matière noire interagissent avec des neutrinos actifs de la matière ordinaires. Cinquièmement, après avoir examiné des interactions entre neutrinos magnétiques stériles et neutrinos standards, ainsi que des équations de production possible de rayons gamma à partir de l'annihilation des neutrinos-antineutrinos, nous proposons que les neutrinos magnétiques stériles puissent présenter une configuration de courant non rayonnant dans la matière noire, l'« anapole », qui serait faiblement sensible aux forces électromagnétiques. Avant de conclure, nous déplorons la méconnaissance de la masse absolue du neutrino régulier, nous soulignons la relation entre la distribution des champs magnétiques provenant de la matière baryonique et celle de la matière noire. Et nous faisons ressortir les lueurs des rayons gamma dans le noir pouvant être attribué à l'annihilation de la matière noire avec elle-même.

Mots clé : matière noire, horizon des événements, monopôle magnétique, équations de Maxwell inversées, code 137, magnétoélectrique, équation de Dirac, neutrino magnétique

stérile, trou noir intermédiaire, lagrangien, anapole, champ magnétique, halo, sursauts gamma.

[« *Sur les lois renversées de Maxwell comme source de monopôles magnétiques dans la matière noire* » est la version française de « *On Maxwell's Reversed Laws as Root of Magnetic Monopoles in Dark Matter* » sur vixra.org/abs/2106.0092]

Contenu

1 Introduction

2 Notre théorie pour la matière noire implique l'inversion des lois de Maxwell : on trouve la charge magnétique (pôle)

- 2,1 Violation du « code 137 »
- 2,2 Inversion des lois de Maxwell
- 2,3 Onde magnétoélectrique et force magnétoélectrique
- 2,4 Neutrino stérile « à charge magnétique »
- 2,5 Équation d'onde de matière noire et vide polarisé
- 2,6 Paradoxe d'une matière noire qui retrouve la lumière
- 2,7 Oscillations des neutrinos magnétiques stériles de la matière noire

3 Matière noire constituée de neutrinos magnétiques stériles provenant des trous noirs primordiaux et classiques

- 3,1 Le fond diffus cosmologique atteste une matière noire non baryonique dès le début de l'univers
- 3,2 La matière noire serait constituée de neutrinos stériles associés à la charge magnétique issus des trous noirs
- 3,3 Raisonnement cosmologique à partir des particules et des fluctuations
- 3,4 Les mini-trous noirs nés moins d'une seconde après le Big Bang se seraient vite évaporés, laissant une gerbe de lumière et de neutrinos magnétiques stériles
- 3,5 Formation des « trous noirs de masse intermédiaire »
- 3,6 Trous noirs primordiaux intermédiaires liés à la matière noire et à la formation des galaxies

4 Comment les neutrinos magnétiques stériles sont évaporés des trous noirs

- 4,1 Effet Hawking
- 4,2 Notre conception
- 4,3 Rayonnement thermique des corps noirs et des trous noirs
- 4,4 Selon la théorie de la Relation il y a une loi fondamentale entre l'émission thermique de Hawking du trou noir et le rayonnement thermique du corps noir
- 4,5 Rayonnement thermique de Hawking : création spontanée de particules près du trou noir

4,6 Effet tunnel quantique

5 Lagrangien de neutrinos droitiers (neutrinos magnétiques stériles) couplés à des neutrinos gauchers (neutrinos actifs) qui produisent des neutrinos réguliers

5,1 Les neutrinos magnétiques stériles droitiers.

5,2 Production de neutrinos ordinaires dans l'univers primitif par des neutrinos magnétiques stériles de matière noire à l'échelle du keV

5,3 Neutrino stérile associé à une charge magnétique

5,4 Mécanisme seesaw

5,5 Lagrangien de neutrinos droitiers (neutrinos magnétiques stériles) couplés à des neutrinos gauchers (neutrinos actifs)

5,5,1 Lagrangien dans l'univers primordial : neutrinos ordinaires issus de neutrinos magnétiques droitiers

5.5,2 Lagrangien dans le modèle standard

5,6 Interactions de jauge : interactions supplémentaires liées au mécanisme de production de masse des neutrinos

6 La matière noire pas si noire après tout ; hypothèses académiques

6,1 Interactions entre les neutrinos magnétiques stériles et les neutrinos actifs

6,1,1 Interactions faibles neutres

6,1,2 Interaction d'un neutrino magnétique stérile de la matière noire avec un neutrino actif de la matière ordinaire

6,1,3 Interaction d'un neutrino magnétique stérile de la matière noire avec un autre neutrino magnétique stérile de la matière noire

6,2 Neutrinos magnétiques stériles et production de rayons gamma

6,3 Anapole de la matière noire

6,3,1 Lagrangien de matière noire anapolaire (fermion de Dirac)

6,3,2 Anapole sensible aux autres forces

7 Le neutrino magnétique stérile interagit avec le magnétisme et la force faible

7,1 Valeur inconnue de la masse absolue du neutrino ordinaire

7,2 Le neutrino stérile à charge magnétique reçoit de l'énergie des champs magnétiques des étoiles ou des pulsars

7,3 Le neutrino magnétique stérile lié à la protection et à la distribution de la matière visible et invisible

7,4 Lueurs des rayons gamma dans le noir : matière noire ou pulsars

8 Conclusion

I Introduction

Selon les modèles cosmologiques, la matière noire représenterait plus de 80% de la matière de l'univers [1] pour constituer environ 27% de la densité d'énergie totale de l'univers observable [2, 3]. Elle a été imaginée pour expliquer la cohésion des galaxies et des amas de galactiques. Car il semble que les galaxies tournent trop vite pour être maintenue gravitationnellement par la seule masse de la matière visible que nous observons dans ces galaxies [4, 5]. La matière noire apporte le supplément d'attraction empêchant les galaxies en rotation d'éjecter le gaz et les étoiles de leurs régions les plus externes.

On attribue sa découverte à l'astronome suisse Fritz Zwicky au début des années 1930 [6]. Il a alors parlé du problème de la masse manquante, mais les astrophysiciens n'ont pas pris cette idée au sérieux. La question est revenue sur le tapis à la fin des années 1970 avec l'avènement de la radioastronomie et les travaux d'Albert Bosma, aux Pays-Bas [7], et de Vera Rubin, aux États-Unis [8-10]. À cette époque, on croyait que la masse manquante était de la matière ordinaire, dite « baryonique », cachée, faite majoritairement d'hydrogène, donc essentiellement de protons et de neutrons [11]. Depuis tout ce temps, les astronomes ont fini par se convaincre que les continents lumineux que l'on distingue sont répartis dans un disque aplati. Cette distribution aplatie de matière baryonique visible ne serait que la partie émergée d'un cocon sphérique cinq fois plus grand fait d'une matière noire qui exerce une influence gravitationnelle sur la matière ordinaire, mais qui n'interagit pas électromagnétiquement [12].

Le problème est que l'on ignore tout de sa nature. Cette matière noire semble être une nouvelle forme de matière jamais fabriquée ou détectée en laboratoire ou dans les accélérateurs de particules [13]. En fait, pour réconcilier théorie et observation, les cosmologistes doivent soit changer le contenu matériel de l'univers avec la matière noire, soit changer les lois de la gravitation elle-même. Ces deux options semblent *a priori* également recevables. Toutefois, l'hypothèse d'une forme inconnue de matière demeure, de loin, la plus simple et la plus conservatrice [14].

On a supposé une supersymétrie dès le début de l'univers et le neutralino s'est avéré le candidat attractif pour la matière noire [15]. Le but principal de la théorie de la supersymétrie, qui est une extension du modèle standard (MS) de la physique des particules, est de permettre un pas vers l'unification de l'interaction forte et de l'interaction électrofaible. Elle introduit une unification entre fermions et bosons. Si la nature est supersymétrique, la mer de particules quantiques contient tous les types de particules qui existent dans la nature, y compris les superpartenaires. Tout comme les neutrinos, les particules superpartenaires auraient été créées en grand nombre dans l'univers primitif, alors que les forces électromagnétiques, fortes et faibles auraient eu la

même force à une seule température très élevée. À mesure que l'univers se dilatait et se refroidissait, ces types de particules se désintégraient toutes en particules plus légères, à l'exception du neutralino [16]. La plus stable et la plus légère des particules superpartenaires, le neutralino, d'environ 10 à 10000 GeV, est le principal candidat à particules massives à interaction faible (WIMP : *weakly interacting massive particles*) à la matière noire [17, 18]. Pour l'observation directe, des expériences spéciales telles que la recherche cryogénique de matière noire (CDMS) ou le *Large Hadron Collider* (LHC) cherchent à détecter les rares impacts des WIMPs dans les détecteurs terrestres. Pour l'observation indirecte, les télescopes à rayons gamma et à neutrinos ont recherché des preuves de l'annihilation des neutralinos dans les régions à forte densité de matière noire comme le centre galactique ou solaire. Pour le moment, toutes les tentatives pour détecter des WIMPs ont échoué. Le fait est que la théorie de la supersymétrie n'est pas validée. D'autres pistes intéressent les expérimentateurs, comme les axions [19] ou les neutrinos stériles [20].

Dans l'article *What Connects Dark Matter and Black Holes* [21] l'auteur a proposé une autre piste qu'il poursuit dans ce papier avec un modèle théorique quantitatif pour étayer ses conclusions. L'idée est que la matière noire serait constituée de substances provenant de trous noirs, notamment les neutrinos stériles associés à une charge magnétique. Ces neutrinos n'auraient pas été créés lors du big bang comme les particules supersymétriques qui auraient supposément été créés dans des proportions identiques aux particules ordinaires lors des premières microsecondes du big bang pour évoluer à part depuis. La surprise est qu'ils proviendraient de l'intérieur des trous noirs, des trous noirs primordiaux jusqu'aux trous noirs présents. On connaît trois espèces de neutrinos dans l'univers : il suffirait qu'une quatrième existe, qu'elle se soit concentrée en halo jusqu'à immerger totalement les galaxies pour expliquer leur rotation accélérée et résoudre d'un coup le problème de la matière noire. Ces neutrinos à charge magnétique seraient des particules magnétiquement neutres qui n'interagiraient que rarement avec la matière ordinaire, sauf par le biais de la gravitation et éventuellement par l'interactions de la force électromagnétique (via les champs magnétiques) et la faible [22].

Certains neutrinos stériles à charge magnétique peuvent avoir presque aucune masse, comme le neutrino standard, ou ils peuvent être incroyablement lourds. Ils peuvent être lents et se rassembler en touffes denses, ou ils peuvent voyager à presque la vitesse de la lumière dans un nuage de matière plus ou moins uniformément réparti. Les neutrinos stériles à charge magnétique lents peuvent se comporter comme de la matière noire froide tandis que ceux qui sont suffisamment légers pour se déplacer à des vitesses légèrement inférieures à la vitesse de la lumière sont considérés comme de la matière noire chaude [23]. Ensemble, les neutrinos stériles à charge magnétique froids et chaud peuvent constituer la majeure partie de la masse manquante de notre univers. **Section 2** révèle

l'inversion des quatre lois de Maxwell appliquées au vide qui permet de permuter la charge électrique en charge magnétique. Nous avons effectué le même exercice avec les quatre lois écrites sous une forme différente dans un article précédent [21]. Ce renversement survient suite au franchissement de la matière et de l'énergie lumineuse de l'horizon des événements du trou noir. Il y a alors blackout, le « **code 137.03** » est violé, la charge e est transformée en charge g , la réalité devient inaccessible par la lumière et des monopoles magnétiques sont générés. Section 3 montre que la matière noire est constituée de neutrinos associés à la charge magnétique qui proviennent des trous noirs. Le fond diffus cosmologique indique une matière noire non baryonique dès le début de l'univers. De tout temps, y compris le nôtre, les trous noirs actifs auraient produit des neutrinos à charge magnétique. Ces neutrinos auraient proliféré avec les trous noirs intermédiaires qui seraient le chaînon manquant entre les trous noirs stellaires et les trous noirs supermassifs au cœur de presque toutes les galaxies. Section 4 décrit différentes façons qui permettent l'émission de neutrinos associés à la charge magnétique vers l'extérieur : effet Hawking, rayonnement thermique, effet tunnel. Des fluctuations sont occasionnées après l'absorption de la matière par le trou noir. Les forces quantiques se comportent comme si elles surpassent la force gravitationnelle et déclenchent des sorties de particules. Section 5 montre la nature des interactions de ces neutrinos stériles associés à la charge magnétique (ils sont magnétiquement neutres mais se chargent à haute énergie) émanant des trous noirs avec les neutrinos actifs de la matière ordinaire. Le résultat est la production de neutrinos actifs, contrairement à la croyance prédominante selon laquelle des états stériles interagissant avec des neutrinos actifs produisent des neutrinos stériles. Section 6 révèle que la matière noire n'est pas si sombre. Nous considérons d'abord des interactions entre les neutrinos de la matière noire et les neutrinos de la matière baryonique. Nous traitons ensuite des équations spécifiques pour la production possible de rayons gamma à partir de l'annihilation cosmique de neutrinos-antineutrinos. Puis nous proposons que les neutrinos magnétiques stériles puissent côtoyer des anapoles sensibles aux forces électromagnétiques, bien que faiblement dans l'univers actuel. Ceux-ci peuvent s'annihiler à grande vitesse. Section 7 donne une estimation approximative de la masse du neutrino et atteste que le modèle de neutrinos magnétiques stériles interagit avec le magnétisme et la force faible. Insistance sur l'importance des champs magnétiques par rapport à la protection et à la distribution de la matière visible et invisible. L'énergie des champs magnétiques des étoiles ou des pulsars agit sur les halos autour des objets célestes. Les halos forment un plasma protecteur. L'énergie transmise aux neutrinos par les vents de champs magnétiques peut atteindre un niveau de résultat capable de conduire à des lueurs détectables.

2 Notre théorie pour la matière noire implique l'inversion des lois de Maxwell : on trouve la charge magnétique (pôle)

Nous avons conjecturé pour expliquer la matière noire qu'elle est composée de particules du type neutrinos et d'antineutrinos associés à une charge magnétique et que ces neutrinos proviennent essentiellement des trous noirs primordiaux et des trous noirs classiques. Nous avons supposé que lorsque la matière baryonique franchit l'horizon des événements et qu'il y a black-out, les lois de Maxwell s'inversent, la charge électrique se transforme en une charge magnétique et c'est le courant magnétique qui induit le courant électrique. Dans les régions internes périphériques du trou noir, la densité et la température de matière baryonique sont très élevées. Les particules subiraient une transition de phase et se comporteraient comme des particules magnétiques. Il y a violation de la conservation de la charge électrique, que nous qualifions violation du « code 137 ». Les neutrinos standards deviennent des neutrinos magnétiques stériles, véritable monopôles magnétiques.

2,1 Violation du « code 137 »

La constante de structure fine α est une constante sans dimension

$$\alpha = \frac{ke^2}{\hbar c} = \frac{ee}{4\pi\epsilon\hbar c} = 7,297354118 \times 10^{-3} = \frac{1}{137,03597} \quad (1)$$

Par l'intermédiaire du facteur e^2 dans l'expression, α exprime la force du couplage électromagnétique entre particules chargées. C'est un nombre sans dimension formé à partir du rapport entre le carré de la charge de l'électron e^2 et le produit de la constante de Planck \hbar , de la vitesse de la lumière c et d'une constante dimensionnée, nommée permittivité du vide ϵ . Sa valeur numérique expérimentale $1/137.0359895$ caractérise l'amplitude des phénomènes électromagnétiques [24].

En jargon formaliste, la constante de couplage observée α^{-1} – l'amplitude d'émission ou d'absorption d'un photon réel par un électron réel – est un nombre énigmatique dont la valeur expérimentale tourne autour de $-0,08542455$. La majorité des physiciens retiennent plutôt l'inverse de son carré $[(-0,08542455)^2]^{-1}$, environ $137,03597$ avec une incertitude de l'ordre de 2 sur le dernier chiffre [25]. Avec une condition quantique purement électronique, on obtient la valeur α^{-1} (en système CGS) donnée approximativement par

$$\alpha^{-1} = \hbar c/e^2 = 137,03. \quad (2)$$

Ce nombre, que nous appellerons « code 137 », est un nombre magique et lumineux donné à l'homme par la Nature.

Paul Dirac démontra dans un article en 1931 que l'existence des monopôles magnétiques était compatible avec les équations de Maxwell dans l'hypothèse de la quantification de la charge électrique [26]. La plus petite charge électrique qui existait expérimentalement

était $e = 1.6 \times 10^{-19}C$ jusqu'à l'avènement des quarks qui ont une charge de $(e/3)$. Il existe des preuves qu'il existe des « quasiparticules » dans la physique de la matière condensée avec des charges inférieures à cela [27]. Cependant, l'électron (symbole e^-) avec une charge électrique élémentaire négative appartient à la première génération de la famille des particules leptoniques et sont généralement considérés comme des particules élémentaires car elles n'ont pas de composants ou de sous-structure connus. C'est pourquoi nous conservons $e = 1.6 \times 10^{-19}C$ comme la charge minimale possible, puisqu'elle est l'unité fondamentale attachées aux particules de matière, autant protons, électrons, muons etc. [21].

La théorie de Dirac s'avéra, lorsqu'elle fut élaborée, établir une connexion entre la charge élémentaire électrique et l'hypothétique charge élémentaire magnétique. Au lieu de trouver une condition quantique purement électronique, telle que (2), Dirac trouva une réciprocity entre la plus petite charge électrique et le plus petit pôle magnétique, soit l'équation

$$\hbar c / (eg) = 2. \quad (3)$$

(g : quantum de pôle magnétique, correspondant à la charge e).

Sa théorie a pour effet de créer le quantum de pôle magnétique qui est un monopôle magnétique. Elle montre une symétrie entre électricité et magnétisme qui est encore aujourd'hui tout à fait étrangère aux conceptions établies.

Si les charges et les pôles sont si semblables, pourquoi la nature ne nous a-t-elle pas fourni des pôles? (On n'a pas vu de pôles malgré des recherches minutieuses [28]). Cependant, si des pôles sont trouvés, ils doivent avoir des charges beaucoup plus grandes que les charges électriques unitaires présentes sur des particules élémentaires telles que l'électron. Donc, cet univers ne peut pas être complètement symétrique entre le pôle et la charge au niveau microscopique [29].

Et si l'univers était construit de telle sorte qu'il n'y ait pas de charge électrique mais uniquement des pôles magnétiques n'ayant pas la même valeur de force de pôle que la force de charge fondamentale, de sorte que le membre de gauche des équations (2) ou (3) ne corresponde plus à la valeur expérimentale 137 ou à la valeur théorique 2, nous pensons que nous serions dans un noir total qui aurait l'allure d'une matière noire.

En substituant une charge électrique élémentaire dans l'expression e^2 par g la force élémentaire du pôle magnétique, le code 137 est violé et on peut anticiper l'obtention d'un nombre où le noir remplace la lumière

$$\frac{keg}{hc} = \frac{eg}{4\pi\epsilon hc} \neq 7,297354118 \times 10^{-3} \neq \frac{1}{137,03597} \quad (4-a)$$

Ou, en substituant les deux charges électriques élémentaires dans l'expression e^2 par g^2 , le code 137 est pareillement violé

$$\frac{g^2}{hc} \neq 7,297354118 \times 10^{-3} \neq \frac{1}{137,03597} \quad (4-b)$$

Dans les deux cas on peut aussi anticiper l'obtention d'un nombre qui n'est pas lié à la charge minimale de Dirac ou à un multiple de cette charge, ce qui évince les ondes électromagnétiques et la lumière, d'où le noir. On aurait un système magnétoélectrique où la charge g est indétectable directement.

On peut imaginer que les éléments qui constituent cette matière noire seraient composés d'éléments chargés magnétiquement, avec l'électricité et le champ électrique considérés comme une conséquence relativiste du champ magnétique, ce qui implique l'inversion des lois de Maxwell [21].

2,2 Inversion des lois de Maxwell

La dissymétrie expérimentale des équations de Maxwell par rapport à la dualité électrique-magnétique est liée au fait que le champ électrique est généré par les charges usuelles qui lui donnent une divergence non nulle mais le champ magnétique est toujours de divergence nulle à cause de l'absence de charge ponctuelle correspondante. Expérimentalement, la seule source du champ magnétique provient de l'existence d'un courant électrique, c'est-à-dire un mouvement de charges électriques. Il existe des dipôles magnétiques (particules à spin intrinsèque) qui sont des sources de champ magnétique mais sans mouvement de charges électriques ou de charges magnétiques : il n'y a pas de monopôle magnétique élémentaire observable.

Nous affichons maintenant les équations de Maxwell telles qu'elles sont appliquées à l'espace libre, c'est-à-dire en l'absence de tout matériau diélectrique ou magnétique [30, 31]. Les quatre équations fondamentales de l'électromagnétisme sont

$$\oint E \cdot dA = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (5)$$

$$\oint B \cdot dA = 0 \quad (6)$$

$$\oint E \cdot ds = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (7)$$

$$\oint B \cdot ds = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (8)$$

[E : champ électrique ; B : champ magnétique ; A : surface fermée ; e : charge électrique ($e = Q = q$) ; g : charge magnétique ; Φ_B : flux magnétique ; Φ_E : flux électrique ; ϵ_0 : permittivité de l'espace ; μ_0 : perméabilité de l'espace ; I : courant de conduction]

La première forme de la loi de Gauss (Eq. 5) relie le champ électrique aux charges électriques. Pour le champ électrostatique, dont les lignes commencent et finissent sur des charges, il est équivalent à la loi de Coulomb. Cependant, Eq. 5 est une déclaration plus générale : le flux électrique total à travers toute surface fermée est égal à la charge nette à l'intérieur de cette surface divisée par ϵ_0 . Cette loi relie un champ électrique à la distribution de charge qui le crée ; elle s'applique également aux champs électriques induits dont les lignes sont des boucles fermées.

L'équation (6), qui peut être considérée comme la loi de Gauss en magnétisme, indique que le flux magnétique net à travers une surface fermée est nul. C'est-à-dire que le nombre de lignes de champ magnétique qui entrent dans un volume fermé doit être égal au nombre de lignes qui sortent de ce volume. Cela implique que les lignes de champ magnétique ne peuvent ni commencer ni se terminer à aucun moment. S'ils le faisaient, cela signifierait que des monopôles magnétiques isolés existaient à ces points. Le fait que des monopôles magnétiques isolés n'aient pas été observés dans la nature peut être considéré comme une confirmation de l'équation (6).

L'équation 7 est la loi d'induction de Faraday, qui décrit la création d'un champ électrique par un flux magnétique changeant. Cette loi stipule que le champ électromagnétique, qui est l'intégrale de la ligne du champ électrique autour de tout chemin fermé, est égale à la vitesse de changement du flux magnétique à travers toute surface délimitée par ce chemin. Une conséquence de la loi de Faraday est le courant induit dans une boucle conductrice placée dans un champ magnétique variant dans le temps. Le signe négatif du membre droit signifie que le champ électrique induit est dans le sens opposé de celui de l'intégrale. Selon la loi d'Ampère-Maxwell, un champ magnétique est produit par un courant de conduction I et peut également être associé à un flux électrique changeant.

L'équation 8, généralement appelée loi d'Ampère-Maxwell, est la forme généralisée de la loi d'Ampère, qui décrit la création d'un champ magnétique par un champ électrique et des courants électriques. L'intégrale de la ligne du champ magnétique autour de tout chemin fermé est la somme de μ_0 fois le courant net passant par ce chemin et de $\epsilon_0 \mu_0$ fois le taux de variation du flux électrique à travers toute surface limitée par ce chemin. Le signe positif signifie que le champ magnétique est dans le même sens que celui de l'intégrale [32].

En supposant qu'il existe une charge magnétique (pôle) et un courant magnétique mais pas d'équivalent électrique correspondant, les équations seraient asymétriques étant entièrement soumises à la charge magnétique. Les équations de Maxwell deviennent alors:

$$\oint B \cdot dA = \frac{g}{\epsilon_0} \quad (9)$$

$$\oint E \cdot dA = 0 \quad (10)$$

$$\oint B \cdot ds = -\frac{d\Phi_E}{dt} \quad (11)$$

$$\oint E \cdot ds = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (12)$$

Les équations sont encore asymétriques mais en n'étant plus assujetties à la charge électrique. Les équations (10) et (11) semblent manquer quelque chose sur leurs côtés droits. Pour voir exactement ce qu'ils manquent, nous devons expliquer la signification de $\nabla \cdot E$, également appelé divergence de E ou simplement de $\text{div}E$. Soit V un volume entouré par une surface S dans l'espace. $\nabla \cdot E$ intégré sur le volume V donne 4π fois la quantité totale de charge électrique e contenue dans V . De même, $\nabla \cdot E$ évalué au point \times donne 4π fois la densité de charge électrique à \times . Par conséquent, l'équation (10) indique qu'il n'y a pas de charge électrique en aucun point de l'espace. En gros, les charges en mouvement sont équivalentes aux courants. Mais parce que les équations inversées de Maxwell ci-dessus supposent qu'il n'y a pas de charge électrique dans la matière noire, il n'y a pas de courant électrique J_e sur le côté droit de l'équation (11). Les équations (9) et (12) semblent avoir gagné quelque chose sur leurs côtés droits. Cela signifie que $\nabla \cdot B$ intégré sur le volume V entouré par une surface S dans l'espace donne 4π fois la quantité totale de charge magnétique g contenue dans V . De même, $\nabla \cdot B$ évalué au point \times donne 4π fois la densité de charge magnétique. De ce fait, l'équation (9) indique qu'il existe une charge magnétique à n'importe quel point de l'espace.

Parce que les équations Maxwell ci-dessus supposent qu'il existe une charge magnétique, il existe un courant magnétique J_g sur le côté droit de l'équation (12). Par conséquent, l'absence de charge électrique et la présence de charge magnétique inversent l'asymétrie.

En fait, la charge électrique deviendrait une charge magnétique, ce qui donnerait lieu à un renversement d'attribution, si bien qu'il faudrait considérer l'électricité comme un phénomène secondaire dont l'existence dépend du flux d'un courant magnétique. Le renversement, outre la noirceur provoquée, ferait en quelque sorte qu'il y aurait des pôles

magnétiques libres alors qu'il n'y aurait plus de charges électriques libres. Les monopôles magnétiques échangeraient des « photons noirs » [33-36].

Note : Ces lois « inversées » de Maxwell ne doivent pas être considérées dans un sens absolu, comme si la nature de la matière noire devait être conforme avec précision à ces lois. Ce n'est qu'est un schéma simpliste de la réalité, une sorte d'approximation, une image. En tant que tel, il correspond à la réalité, même s'il ne s'identifie pas à la réalité.

Ayant les lois de Maxwell « inversées », nous devons nous attendre à la conservation des « charges magnétiques ». Effectivement, s'il y a des charges magnétiques, généralement appelées pôles, ces pôles fourniraient une source de champ magnétique tout comme une charge électrique fournit une source de champ électrique. Les pôles magnétiques auraient des propriétés analogues à celles des charges électriques. Chaque pôle émettrait $4\pi g$ lignes de champ magnétique B , où g est la force du pôle (correspondant à la charge e). Si les charges et les pôles étaient similaires et symétriques en principe, nous pourrions avoir un univers composé de protons, qui n'ont pas de charge électrique mais qui ont une force de pôle magnétique unitaire, et des électrons sans charge mais avec une force de pôle magnétique opposée.

Nous pourrions observer que la charge magnétique est conservée ; la charge nette, ou la quantité de pôle positif moins la quantité de pôle négatif, sera conservée. Comme la charge électrique est conservée, la charge nette, ou la quantité de charge positive moins la quantité de charge négative, sera conservée dans un système isolé.

Cependant, s'il existe des monopôles, et les théories unifiées modernes des particules élémentaires suggèrent que des monopôles très lourds peuvent exister [37-40], ils doivent avoir des charges beaucoup plus importantes que les charges électriques trouvées sur les particules élémentaires telles que l'électron. Cet univers ne peut donc pas être complètement symétrique entre pôle et charge au niveau microscopique [29, 41, 42].

2,3 Onde magnétoélectrique et force magnétoélectrique

La violation du code 137 et l'inversion des équations de Maxwell (9)-(12) présentent des solutions d'ondes magnétoélectriques, c'est-à-dire un champ magnétique oscillatoire générant un courant électrique oscillatoire, et vice-versa, qui se propage en régions sans la présence d'aucune source magnétique. Par leur similitude avec les équations de Maxwell « régulières » (5)-(8), on pourrait supposer qu'elles présentent aussi des solutions d'ondes électromagnétiques, c'est-à-dire un champ électrique oscillatoire générant un champ magnétique oscillatoire, et vice-versa, qui se propage en régions sans la présence d'aucune source électrique (ou magnétique). Or, ce n'est pas notre hypothèse. Ainsi, l'onde électromagnétique générée par une particule chargée oscillante serait

discernable d'une onde magnétoélectrique générée par un monopôle magnétique oscillatoire ; les champs qui se couplent aux monopôles magnétiques sont différents des champs qui se couplent à la charge électrique. Il y a donc une onde magnétoélectrique différente de l'onde électromagnétique, et sa quantification donnerait lieu à des photons discernables des photons générés par les changements de mouvement des particules électriques chargées – et il y aurait des « photons sombres ». Et on peut dire qu'il y a une force magnétoélectrique noire avec une onde photonique noire, de même qu'il y a une force électromagnétique avec une onde photonique. La charge magnétique résultant de la métamorphose de la charge électrique remplacerait cette dernière : $E = 0, B \neq 0$. Nous suggérons l'existence d'une charge électrique (monopôle électrique connu) dans la matière ordinaire et une charge magnétique (monopôle magnétique non reconnu) dans la matière noire. Il n'y aurait pas de monopôle électrique dans la matière noire tout comme il n'y aurait apparemment pas de monopôle magnétique dans la matière ordinaire. En ce sens ces monopôles ne sont soumis qu'à l'interaction gravitationnelle et ils forment la matière noire.

Notons que, tout au contraire, la théorie de Dirac fait en sorte que le monopôle magnétique peut coexister de pair avec une charge électrique dans la matière ordinaire. Le monopôle découlerait de la « corde de Dirac » [43] reliant les pôles nord et sud qui peut s'étirer sans discontinuer au point de devenir invisible : le dipôle devient deux monopôles. C'est le seul moyen d'incorporer des monopôles magnétiques dans les équations de Maxwell, puisque le flux magnétique qui court le long de l'intérieur de la corde maintient leur validité. Si par contre les équations de Maxwell sont modifiées pour permettre des charges magnétiques au niveau fondamental, de façon à obtenir une parfaite symétrie ($E \neq 0, B \neq 0$), les monopôles magnétiques obtenus ne sont plus des monopôles de Dirac qui nécessitent des cordes qui les attachent.

Notons aussi que, malgré des recherches approfondies, il n'y a aucun signe expérimental ou observationnel de monopôles magnétiques [44, 45]. La loi de Gauss pour le magnétisme dit que « pour chaque source, il y a un puits », pour chaque pôle « nord » il y a un pôle « sud » (c'est-à-dire une source et un puits). Elle décrit un monde dans lequel ces monopôles sont inexistantes. Les lois de Maxwell ne sont peut-être pas basées sur le fait que les monopôles magnétiques n'existent pas, mais elles le prédisent, ce qui fait que les équations de Maxwell produisent que des ondes électromagnétiques.

2,4 Neutrino stérile « à charge magnétique »

Pour percer le mystère de la matière noire, nous pensons qu'elle est un électromagnétisme différent, une *magnétoélectrologie*, avec nécessité de qualifier de « nouvelle force » cette variante. Et qu'elle est aussi une nouvelle particule : le neutrino stérile associé avec une charge magnétique.

Les physiciens connaissent trois types de neutrinos. Début 2022, les chercheurs de l'expérience KATRIN déterminent que ces neutrinos sont plus légers que $0.8 \text{ eV}/c^2$ [46-48]. Depuis les années 1970, beaucoup de chercheurs supposent qu'il existerait un quatrième type, un neutrino « stérile », beaucoup plus lourd, mais qui interagirait encore moins que les autres avec la matière ordinaire. Sa masse est inconnue. Des indices d'anomalies d'oscillation des neutrinos et de rayonnement noir (eV), des scénarios de matière noire de neutrinos stériles (keV) et des théories expérimentalement testables de la baryogenèse (GeV à TeV) suggèrent des gammes de masses qui pourraient prendre n'importe quelle valeur entre moins d' 1 eV et 10^{15} GeV [49]. C'est un neutrino à chiralité droite ou bien un antineutrino à chiralité gauche qui peut s'ajouter au MS et peut prendre part aux phénomènes tels que le mélange des neutrinos.

Si ce neutrino stérile existe, nous conjecturons en plus l'existence d'un cinquième type de neutrinos : un neutrino stérile lié à une charge magnétique, qui appartiendrait à la matière noire et qui serait un monopôle magnétique. Le terme *neutrino magnétique* (v_g) stérile est utilisé pour le distinguer du *neutrino stérile*. Ce sont deux types hypothétiques de neutrino qui n'interagissent via aucune des interactions fondamentales du MS de la physique des particules, hormis la gravité. Mais tandis que le neutrino stérile est électriquement neutre vis-à-vis la charge e , et ne la remet pas en question, **le neutrino stérile magnétique provient de la permutation de la charge électrique en charge magnétique. Ce neutrino stérile dépendrait d'une charge magnétique g qui serait indétectable puisqu'elle n'est pas un multiple entier de la charge électrique classique. D'après notre conjecture, la matière noire serait constituée d'invisibles neutrinos magnétiques stériles qui fourmillent dans l'univers et exercent un peu partout une attraction gravitationnelle [21].**

2,5 Équation d'onde de matière noire et vide polarisé

Si on considère la matière noire comme un milieu matériel, des ondes de particules élémentaires noires peuvent s'y déplacer comme des ondes mécaniques dans un milieu matériel ordinaire. En toute simplicité, on peut comparer une onde de neutrino stérile magnétique à une corde tendue dans la matière noire qui sert de support. La période T est le temps dont l'onde a besoin pour parcourir une distance d'une longueur d'onde γ , de sorte que $\gamma = vT$ [32]. La vitesse d'une onde est fonction des propriétés du milieu qui lui sert de support telles que son inertie et son élasticité. Pour une corde tendue, l'élasticité est mesurée par la tension F ; plus la tension est élevée, plus la force élastique de rappel sur un élément de la corde est grande. Ce qui caractérise l'inertie est μ , c'est-à-dire la masse par unité de longueur de la corde. Le résultat de l'analyse des dimensions donne : $v = \sqrt{F/\mu}$. L'équation d'onde

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\mu \partial^2 y}{F \partial t^2} \quad (13)$$

est l'équation différentielle qui décrit la propagation d'une onde dans une corde de masse par unité de longueur μ et de tension F .

Lorsque la matière noire ne bouge pas : le neutrino magnétique stérile est comme une onde harmonique non-dispersive qui voyage sans changer de forme. Lorsqu'il y a un changement d'énergie, le neutrino magnétique stérile est comme une onde dispersive, la vitesse de chaque composante est différente pour chaque fréquence. On suppose une matière noire, au rayonnement magnétoélectrique invisible, mais dont l'action gravitationnelle « soude » les amas de galaxies.

2,6 Paradoxe d'une matière noire qui retrouve la lumière

Bien qu'il ne semble pas y avoir coexistence des deux charges dans la matière ordinaire ou dans la matière noire (sect. 2,3), et que les neutrinos stériles magnétiques n'interagiraient que par gravité avec la matière ordinaire, on lui attribue une petite aptitude à se mélanger avec les neutrinos familiers du MS. Ce qui veut dire que même si les champs magnétiques et électriques présents dans les équations (9)-(12) ne sont pas équivalents aux champs qui interagissent avec les particules chargées des équations (5)-(8), ils présentent un certain nombre de points de référence en commun qui font que les monopôles ne sont pas complètement découplés de la physique connue. Les champs impliqués sur les équations (9)-(12) non identiques aux champs décrits par les équations de Maxwell « régulières » peuvent aussi exceptionnellement agir avec la matière ordinaire par la force électromagnétique et la force faible.

Par exemple, on peut supposer qu'un neutrino stérile à charge magnétique puisse heurter (ou ricocher contre) un électron tout en demeurant un neutrino stérile à charge magnétique. Dès lors, on peut prédire que l'électron accéléré au cours du choc rayonne des photons dont certains se matérialisent en paire neutrinos-antineutrinos de la matière ordinaire, et dont les directions sont courbées dans des directions opposées par le champ magnétique.

Ainsi, de cette façon, les neutrinos stériles à charge magnétique (droitiers, électriquement et magnétiquement neutres) considérés comme de la matière noire, **pourraient interagir via l'interaction faible et l'électromagnétisme**, produire des neutrinos gauchers réguliers. Ce qui ouvre la possibilité d'être détectés indirectement - et c'est pourquoi ils apparaissent comme des candidats à la matière noire. Une matière noire qui en ce sens, strictement, ne serait pas si noire.

2.7 Oscillations des neutrinos magnétiques stériles de la matière noire

Si on considère que le vide de la Mécanique Quantique n'est que l'état d'énergie minimale de tout champ, de toute particule, ou de toute énergie, les neutrinos

magnétiques stériles sont dans le vide quantique comme des particules virtuelles d'autant plus qu'elles appartiennent à un code autre que le code 137 qui couvre tout le spectre des ondes électromagnétiques. Une grande densité d'énergie est nécessaire pour parvenir à les rendre « visibles » [50]. Il y aura récupération du code 137 si les neutrinos stériles magnétiques oscillent suffisamment pour se transformer en neutrinos ordinaires (cette transformation inclue que les nombres quantiques, différents selon leur chiralité, soient aussi transformés) [51]. Puisque toutes les formes d'énergie sont équivalentes à de la masse, peu importe leur nature – électrique, thermique, magnétique, gravitationnelle – peut convertir les particules noires en particules ordinaires. Supposons que l'on superpose au vide un champ de forces, par exemple un champ magnétique. Lorsqu'une paire virtuelle neutrino-antineutrino surgit du vide, le neutrino est dévié par le champ magnétique dans une certaine direction tandis que l'antineutrino est dévié dans la direction opposée. Si le champ magnétique est suffisamment puissant, le couple se sépare d'une distance telle qu'il devient incapable de se refondre pour s'annihiler. De virtuelles, les particules deviennent réelles : le vide s'est polarisé. La matière noire est peut être un océan de Dirac rempli de neutrinos magnétiques stériles qui demandent une grande densité d'énergie pour parvenir à séparer les couples virtuels et les matérialiser.

D'autre part, on peut envisager que les neutrinos magnétiques stériles, censé avoir une chiralité droite, pourraient osciller en neutrinos gauchers réguliers, ce qui ouvre une autre possibilité d'être détectés indirectement. Le phénomène d'oscillations est un processus permis en mécanique quantique qui transforme spontanément un type défini de neutrino en un type différent. Les oscillations de ces neutrinos mettent en jeu deux paramètres : la masse et la charge. La longueur d'onde ou période du phénomène dépend des masses carrées entre les deux neutrinos impliqués dans le phénomène et qu'on écrira δm^2 . L'amplitude de l'oscillation qui décrit le degré de mélange entre deux saveurs différentes de neutrinos, c'est-à-dire leur recouvrement, doit tenir compte que ces neutrinos ont été créés avec une saveur leptonique magnétique qui relève d'une charge magnétique.

C'est avec une vitesse relativiste que le neutrino magnétique stérile est expulsé du trou noir. Lorsqu'il se propage dans la matière ou dans le vide il peut changer de saveur en fonction de la distance parcourue et de son énergie initiale. Propulsés non loin du trou noir, beaucoup de neutrinos stériles magnétiques ont des chances de récupérer le code 137 et devenir des neutrinos actifs de la matière ordinaire. L'oscillation est un phénomène qui viole la conservation d'énergie dans la mesure où les neutrinos ont une masse, puisqu'un état de masse donné saute en un état de masse différent sans autre forme de procès. L'oscillation viole la conservation de la charge sans plus de façon dans la mesure où les neutrinos ont une charge associée autre qu'une charge électrique, puisqu'un état d'une charge donnée saute en un état d'une charge différente.

3 Matière noire constituée de neutrinos magnétiques stériles provenant des trous noirs primordiaux et classiques

Selon la plupart des cosmologistes, la matière noire était physiquement présente dans l'univers initial, mais elle n'a pas participé de manière significative à l'enchaînement des réactions qui a conduit à la production d'éléments primordiaux. Le taux d'expansion avait pour moteur le *rayonnement*, c'est-à-dire des particules relativistes comme les photons et les neutrinos. Cette présence physique de la matière noire était sous la forme *d'états stériles*. Tout l'appareil mathématique de l'hypothèse du neutrino stérile part de l'idée de la création de ces neutrinos stériles suite à l'interaction des neutrinos actifs de la matière ordinaire avec les états stériles.

Notre hypothèse diffère en ceci que les neutrinos stériles magnétiques proviennent des trous noirs et que leur interaction avec les neutrinos actifs ne fera que favoriser la production de neutrinos ordinaires. Quand l'univers en était encore à ses balbutiements, la matière noire n'existait pas et n'a pas joué le moindre rôle avant l'apparition des premiers trous noirs. Ce neutrino stérile magnétique aurait pu être produit par une désintégration au cœur d'un noyau d'atome au sein du trou noir, et ce processus complexe correspondrait à la mise en œuvre d'une interaction faible transmise par l'intermédiaire de bosons de masse très élevée (plus d'une centaine de GeV). De même que les bosons intermédiaires nommés W et Z^0 ont pu être observés quand les accélérateurs de particules ont délivré une énergie suffisante pour les produire et émettaient un neutrino en même temps qu'un électron, l'intérieur immédiat des trous noirs, en utilisant la relation masse-énergie d'Einstein, produirait une énergie plus que suffisante pour émettre un neutrino stérile associé à une charge magnétique en même temps qu'un neutrino « magnétique » (provenant d'une désintégration d'un électron « électrique »).

Étant donné l'extraordinaire faiblesse d'interaction des neutrinos magnétiques stériles hors des trous noirs, il est facile de comprendre, d'une part, que cela aura eu comme effet de faire apparaître les neutrinos stériles magnétiques qui se sont annihilés aussitôt, ou se sont divisés en d'autres neutrinos stériles, ou se sont transformés en neutrinos ordinaires. Cette dernière transformation implique la récupération du code 137 et pourrait contribuer à expliquer qu'on a dénombré plus de neutrinos que prévus dans la matière ordinaire. D'autre part, ces nombres énormes de neutrinos et d'antineutrinos à saveur magnétique rempliraient l'univers sans que nous ayons aucune indication de leur présence.

3,1 Le fond diffus cosmologique atteste une matière noire non baryonique dès le début de l'univers

Grâce aux observations astronomiques, les astrophysiciens en sont venus à écarter la piste baryonique pour la matière noire et à conclure que l'univers est rempli d'une substance inconnue fondamentalement différente de tout ce que les astronomes ont observé avec leurs télescopes, ou mesuré dans leurs laboratoires. Pour comprendre, il faut remonter aux débuts de l'univers, quand il était rempli d'un plasma très chaud de noyaux atomiques et d'électrons. Les photons étaient piégés, car ils interagissaient en permanence avec les particules chargées du plasma. Puis vers 380000 ans, la température, qui diminuait avec l'expansion de l'univers, est devenue assez basse pour que les noyaux et les électrons se combinent en atomes neutres. Les photons ont alors pu se propager et constituer un rayonnement encore détectable aujourd'hui et riche d'informations sur l'univers primordial, le fond diffus cosmologique [52, 53]. Bien que la température associée à ce rayonnement soit globalement homogène sur l'ensemble du ciel, les satellites *WMAP* [54] et *Planck* [55] ont détecté de petites fluctuations thermiques, d'amplitude relative atteignant 10^{-5} . Elles correspondent à des zones plus ou moins denses dans le plasma primordial. Les zones de surdensité ont attiré de plus en plus de matière au cours du temps et ont donné naissance aux grandes structures, les amas et les galaxies.

Cependant, vu la faiblesse des fluctuations initiales, et si l'on ne prend en compte que la matière baryonique, l'effet d'accumulation n'a pas été assez fort et rapide pour produire les grandes structures observées aujourd'hui. On sait, grâce à la nucléosynthèse primordiale, que la densité de la matière baryonique atteint au maximum 5% de la densité critique théorique qui ferait que l'univers serait globalement euclidien (plat), comme le suggèrent les observations. Il faut donc ajouter au plasma primordial une matière noire non baryonique [56].

3,2 La matière noire serait constituée de neutrinos stériles associés à la charge magnétique issue des trous noirs

Nous avons imaginé un ingrédient non baryonique qui n'interagit pas avec la matière ordinaire autrement que par ses effets gravitationnels, mais qui contribue à augmenter l'efficacité de formation des grandes structures : les neutrinos stériles à charge magnétique. Ceux-ci proviendraient des trous noirs, autant des trous noirs jeunes, y compris ceux qui naissent encore aujourd'hui, que des trous noirs plus anciens et des trous noirs très anciens, dit primordiaux. Cependant, les trous noirs confirmés, soit les trous noirs stellaires [57] et les trous noirs supermassifs [58], seraient insuffisants pour fournir tous ces neutrinos magnétiques stériles nécessaires pour combler la masse manquante [59]. Il faut faire appel aux trous noirs primordiaux [60]: les trous noirs d'Hawking apparus dans la première seconde de l'univers, et les trous noirs massifs intermédiaires [61] apparus entre environ 50 jours et 380 000 ans, après la nucléosynthèse primordiale qui accoucha les premiers noyaux d'atomes. Notons que par

époque primordiale, nous ne parlons pas seulement ici de la première seconde d'âge qui a vu les grandes interactions, mais aussi de l'époque primordiale qui a suivi la nucléosynthèse primordiale. Pendant les premières dizaines de milliers d'années, avant la recombinaison, l'univers est encore très jeune, se trouve toujours dans un état de très grande énergie et de température, et est encore soumis à la gravité quantique.

3,3 Raisonnement cosmologique à partir des particules et des fluctuations

Avant la recombinaison [62], la matière ionisée était liée au rayonnement. Le rayonnement peut être considéré sous l'aspect d'un ensemble de particules, ou d'un gaz de photons. Or, ces photons sont constamment en collision avec les électrons libres de la matière ionisée. Par l'intermédiaire de ces rencontres, on peut dire qu'ils sont couplés. Cela signifie que tout ce qui peut se passer pour le rayonnement se passera aussi pour les électrons. D'autre part, comme les électrons sont chargés électriquement d'une façon négative, ils attirent aussi les noyaux qui, eux, sont chargés positivement – ce n'est pas un couplage aussi fort que si chaque électron était relié à un noyau à l'intérieur d'un atome, mais il y a quand même un couplage. Rien ne peut arriver à la matière sans que cela arrive aussi au rayonnement, et réciproquement. Si, par exemple, une multiplication de fluctuations pousse les photons à se concentrer dans une certaine région de l'univers, les électrons sont obligés de suivre le rayonnement

Les galaxies, qui sont des concentrations importantes de matière n'ont pas pu naître d'un seul coup. Il y aurait eu, bien avant la recombinaison, de petites concentrations de matière qui se seraient lentement amplifiées. Une fluctuation de matière, c'est-à-dire une future galaxie, doit non seulement avoir une force qui l'attire sur elle-même, mais elle doit, également, vaincre l'expansion qui, au contraire, a tendance à la diluer. Ces fluctuations devaient déjà être présentes à l'époque de la recombinaison et le rayonnement diffus cosmologique permet d'observer l'univers tel qu'il se présentait à ce moment. La carte du ciel du fond diffus cosmologique, publié en 2013 par l'équipe de la sonde cosmologique Planck, montre de subtiles fluctuations de température imprimées dans le ciel profond lorsque le cosmos avait environ 370 000 ans [63]. L'empreinte reflète des ondulations apparues tôt dans l'existence de l'univers qui, apparemment, ont donné naissance au vaste réseau cosmique actuel d'amas de galaxies. Même si les observations se sensibilisent de plus en plus, il apparaît que la masse que l'on peut mesurer sous sa forme habituelle (étoiles, galaxies, gaz) est insuffisante pour obtenir une amplitude relative plus grande et une concentration de fluctuations plus rapides. C'est la raison pour laquelle la masse noire résoudrait le problème sans que cela entre en conflit avec les observations qu'on en peut faire.

Des concentrations anormales de matière engendrent des trous noirs. Ceux-ci sont soumis au principe de contraction : pour que le trou noir contracte il faut qu'il perde de l'énergie

gravitationnelle et, pour qu'il puisse la perdre, il faut que celle-ci soit évacuée. Il n'y a plus de lumière [64] pour s'opposer à la contraction puisque par inversion des lois de l'électromagnétisme la charge électrique s'est transformée en charge magnétique, créant ainsi des neutrinos associés avec la charge magnétique. Ce sont ces derniers qui s'échapperont sans subir aucune interaction. Leur présence se traduira alors seulement par ce qu'ils emportent avec eux, une bonne quantité d'énergie et d'impulsion qui échappe à l'observation.

Ces neutrinos à charge magnétique augmentent la masse de l'univers. La formation des trous noirs est gouvernée par la gravitation, qui est une interaction due à la masse. Plus il y a de masse dans l'univers, plus la concentration des fluctuations de matière est rapide. Ces neutrinos pourraient accentuer les fluctuations des champs de particules. Ainsi les particules manquantes proviendraient des trous noirs eux-mêmes qui rejettent une matière invisible et indétectable, les neutrinos stériles à charge magnétique, véritables monopôles magnétiques.

Le fait que cette masse cachée soit stérile peut représenter un certain avantage. Même si, à l'époque de la recombinaison, il y avait des concentrations de cette composante massive, celles-ci n'auraient pas nécessairement laissé de traces sur le rayonnement, contrairement à la matière ordinaire qui était couplé au rayonnement. La masse manquante ou la « masse noire » a très bien pu être sujette à des fluctuations importantes à l'époque de la recombinaison sans que cela entraîne les fluctuations correspondantes sur le rayonnement, d'où l'on tire que cela ne contredit pas les observations dont on dispose du rayonnement cosmologique, dans lequel on ne voit pas ces fluctuations. Le problème d'observation serait de la sorte résolu, ainsi que celui de la nature de cette masse [65, 66].

3,4 Les mini-trous noirs nés moins d'une seconde après le Big Bang se seraient vite évaporés, laissant une gerbe de lumière et de neutrinos magnétiques stériles

En 1967, Yakov Zeldovich imagina que de petits trous noirs ont pu se former dans l'univers primordial [67, 68]. La densité était telle que de petites régions ont pu s'effondrer sur elles-mêmes en trous noirs sans passer par le stade étoile. La taille de ces trous noirs primordiaux est limitée par la causalité : dans les premiers instants du cosmos, des points trop distants n'ont pas eu le temps d'interagir ; ils ne peuvent donc être inclus dans l'effondrement d'une même région. Ainsi, un trou noir formé quelque 10^{-21} seconde après le big bang aurait un rayon d'à peine un milliardième de millimètre et une masse maximale de l'ordre de 10^{14} kilogrammes. S. Hawking découvrit que les trous noirs s'évaporent [69, 70]. Le mécanisme qu'il proposa conjugue mécanique quantique et gravitation. La température augmente à mesure que le trou noir perd de la masse, et donc de l'énergie. Lorsque le trou noir a perdu la quasi-totalité de sa masse,

l'évaporation s'emballer et l'objet disparaît dans une dernière bouffée de particules énergétiques [71].

Nous prétendons qu'ils auraient évacué majoritairement des neutrinos stériles à charge magnétique avant de disparaître dans le plasma primordial.

Dans les années 1990, des théoriciens ont alors pensé à des micro-trous noirs formés dans la première seconde de l'univers, de l'ordre du nanomètre, mais pesant un centième de la masse de la Lune, sauf que leur évaporation aurait été détectée par les satellites gamma dans les années 2000 [59].

Eux aussi auraient pu disparaître en évacuant des neutrinos magnétique stériles.

Ils ont également pensé à la formation de milliards de trous noirs massif primordiaux, seulement on n'a pas vu leur influence sur le mouvement des étoiles.

3.5 Formation des « trous noirs de masse intermédiaire »

Dans cet univers dominé par la physique des particules purent au tout début se créer des fluctuations qui auraient les caractéristiques nécessaires pour jouer le rôle de fluctuations pré-trous noirs intermédiaires. Les trous noirs primordiaux de masse intermédiaire seraient nés après la nucléosynthèse nucléaire primordiale, entre quelques semaines après le big bang et 380 000 ans. C'est à cette époque, considérée à tort comme non événementielle par la cosmologie actuelle, que seraient nés ces objets monstrueux de taille entre 100 et 1 million de masses solaires. D'immenses nuages de gaz, au lieu de se fragmenter pour fabriquer des étoiles, se seraient transformés directement en trou noir, dans des circonstances spécifiques, qui auraient fait retomber tout le gaz vers le centre et l'auraient entraîné dans un disque en rotation.

Les réactions nucléaires des gaz condensés à l'intérieur des trous noirs sont encore tellement énergétiques qu'un énorme flux de neutrinos magnétiques stériles est soufflé hors du trou noir en surpassant sa force de gravitation.

Les fluctuations, perdirent un peu de force avec l'expansion, et devinrent ensuite des fluctuations pré-galactiques. Dans de vastes nuages de gaz du jeune univers, dont les propriétés étaient différentes d'aujourd'hui, seraient nés des étoiles extrêmement massives et peu métalliques (pauvres en éléments chimiques autres que l'hydrogène et l'hélium). En s'effondrant sur eux-mêmes une fois leur carburant épuisé, ces astres n'éjectaient que très peu de matière et pouvaient donner naissance à des trous noirs de masse intermédiaire. On peut aussi supposer que ces étoiles peuvent fusionner et créer une étoile supermassive qui s'effondre en un trou noir de plusieurs dizaines de milliers de masses solaires.

Ces trous noirs agiraient comme des graines pour la formation des premières galaxies et quasars. Leur existence est soupçonnée au centre des galaxies naines et des amas

globulaires d'étoiles [72]. L'accrétion de matière ainsi que l'absorption de trous noirs moins massifs leur permettraient d'atteindre rapidement les caractéristiques des trous noirs supermassifs [73, 74]. Ceux-ci pèsent des millions, voire des milliards, de masses solaires. On les trouve au centre des quasars et des galaxies massives moins d'un milliard d'années après le Big Bang : ils ont pu acquérir une masse aussi gigantesque en un temps si court que grâce aux trous noirs intermédiaires formés très tôt dans l'histoire de l'univers. Ainsi, les trous noirs primordiaux intermédiaires pourraient être le chaînon manquant entre les trous noirs classiques de masse stellaire et les trous noirs supermassifs [75, 76].

La matière noire serait constituée de neutrinos magnétiques indétectables émanant de tous les trous noirs.

3,6 Trous noirs primordiaux intermédiaires liés à la matière noire et à la formation des galaxies

Les neutrinos magnétiques stériles issus des trous noirs formeraient donc une partie relativement grande de la matière noire. Des astronomes pensent que la matière noire serait principalement constituée de trous noirs primordiaux intermédiaires, ce qui est autre chose. Selon eux, les amas de trous noirs primordiaux pourraient régler le problème dit des galaxies naines, à savoir le manque apparent de petites galaxies satellites qui devraient théoriquement se former autour des galaxies massives telles que la Voie lactée. Leurs simulations prédisent l'existence de nombreux minihalos de matière noire en orbite autour des galaxies massives. Chacun de ces minihalos devrait abriter une galaxie naine, et il devrait y en avoir des centaines entourant la Voie lactée. Or les astronomes ont trouvé beaucoup moins de galaxies naines que prévu [77]. Les simulations de formation des galaxies prédisent également une population de galaxies de taille intermédiaire, entre les naines et les massives. De tels objets seraient assez gros pour former facilement des étoiles et seraient aisément visibles. Pourtant, ils n'ont pas été trouvés par les astronomes qui fouillent les environs de la Voie lactée. Des explications sont donnée : elles seraient bien présentes, mais difficiles à détecter car trop peu lumineuses ; ou les simulations surestimerait le nombre de ces galaxies naines, car elles ne reproduiraient pas correctement l'influence de la matière ordinaire sur la formation des galaxies naines ; on prédit qu'on en détectera des milliers supplémentaires en orbite autour de la Voie Lactée à l'aide de caméras ultra-sensible à grand champ [76].

Notre explication est que cette matière noire indétectable est composée de neutrinos magnétiques stériles issus des trous noirs. Des nuages chauds d'hydrogène ont formé des trous noirs intermédiaires qui ont soufflé vers l'extérieur des neutrinos à charge magnétique. Notre interprétation pour les galaxies manquantes, autant naines qu'intermédiaires, est que les trous noirs primordiaux massifs présents au cœur des galaxies de taille naine ou intermédiaire bloqueraient la formation des étoiles en raison de

l'accrétion du gaz, et éjecteraient des astres formés ainsi que des neutrinos stériles à charge magnétique. C'est pourquoi ces galaxies demeurent invisibles pour la plupart des relevés.

4 Comment les neutrinos magnétiques stériles sont évaporés des trous noirs

Nous avons postulé que les neutrinos rejetés par les trous noirs sont dans un état stérile et sous la dépendance d'une charge magnétique due à la violation du code 137. Nous avons profité de l'inversion des équations de Maxwell près de l'horizon des événements, par rapport à la « variance » des charges (charge électrique transformée en charge magnétique), pour construire un schéma paradoxal où la matière et l'énergie peuvent s'échapper du trou noir vers l'espace-temps. Si on se demande pourquoi avoir choisi seulement le neutrino pour s'évader du trou noir plutôt que les autres particules, la réponse est que les neutrinos sont les seuls sous-produits des annihilations qui parviennent à fuir le cœur du Soleil ; les photons comme toutes les particules d'antimatière sont vite absorbés par le milieu dense environnant. Pour des raisons similaires nous pensons que seul le neutrino peut fuir le trou noir. Ici, notre but est, d'abord, de montrer trois méthodes d'émission de particules de l'intérieur du trou noir vers l'extérieur et, ensuite, affirmer que ces particules forment de la matière noire.

4,1 Effet Hawking

En 1974, Stephen Hawking a supposé que les trous noirs ne sont pas complètement noirs mais rayonnent avec une température bien définie. La découverte de Hawking a révélé des liens conceptuels profonds entre la gravité, la théorie quantique et la thermodynamique. La conclusion de Hawking était que les trous noirs émettaient en fait quelque chose. Ils rayonnent, plutôt que d'être complètement « noirs », et ce faisant, ils perdent progressivement de la masse. Ainsi, un trou noir isolé dans l'espace « s'évaporera » en fait [78, 79]. Les idées de Hawking sur « l'évaporation des trous noirs » ont été une percée majeure dans notre compréhension de la nature [80].

4,2 Notre conception

Néanmoins, si nous avons l'impression que les lois de la physique des trous noirs sont désormais fondamentalement toutes « connues » et que le travail d'un physicien théoricien consiste uniquement à expliquer les phénomènes observés en fonction de ces lois connues, nous nous trompons largement. Le fait que la relativité générale cesse pour être relayée par la physique quantique et que les lois de conservation du baryon et du lepton sont violées signifie que les lois de la physique actuellement connues n'ont qu'une portée limitée de validité.

Nous supposons que la création de particules quantiques se produit non seulement à l'extérieur du trou noir, mais aussi à l'intérieur, près de l'horizon des événements. Qu'y a-t-il à l'intérieur d'un trou noir ? [81] Le théorème de singularité nous assure qu'une sorte de singularité d'espace-temps se trouvera à l'intérieur d'un trou noir. Pour le type de trou noir formé par l'effondrement sphérique, cette singularité de l'espace-temps englobe tout en ce sens que tout observateur qui pénètre dans le trou noir y sera entraîné. Cela doit-il être le cas pour tous les types de trous noirs ? La réponse est non. A l'intérieur d'un corps s'effondrant dans un trou noir, on pourrait s'attendre par la suite à observer la création de particules.

Notre investigation théorique du processus d'émission des particules suggère trois méthodes d'émission de particules de l'intérieur du trou noir vers l'extérieur : le **trou noir comme un corps noir** qui émet des particules avec un spectre caractéristique qui ne dépend que de sa température, **l'effet Hawking** (la création de particules quantiques à l'intérieur et à l'extérieur de l'horizon des événements), et **l'effet tunnel quantique**. À première vue, les théoriciens ne seront pas tous d'accord, voyant des antinomies, optant catégoriquement pour le rayonnement thermique du corps noir, ou pour le rayonnement Hawking, ou pour l'effet tunnel quantique. Nous pensons cependant que ces différentes versions ne s'excluent pas mutuellement [82].

4,3 Rayonnement thermique des corps noirs et des trous noirs

Lorsque Hawking a découvert la création de particules thermiques près d'un trou noir, il a constaté qu'à des moments tardifs, le taux d'« émission » de particules sur de grandes distances ne tombe pas à zéro, mais s'approche plutôt d'un taux stable et non nul. Plus surprenant encore, ce flux de particules constant a précisément le caractère d'émission thermique. Par émission thermique, nous entendons ce qui suit : si un corps ordinaire est maintenu dans un équilibre thermodynamique exact à la température T^0 , il émettra des particules avec un spectre caractéristique qui ne dépend que de sa température et non de la nature détaillée du corps. Un tel corps en équilibre exact est appelé corps noir [83]. Ce processus d'émission thermique du corps noir est d'un caractère complètement différent du processus de création spontanée de particules à proximité d'un trou noir.

En principe, les particules sont émises par un corps noir parfait et lorsque la température est extrêmement élevée (supérieure à un milliard de degrés centigrades) l'émission de particules massives sera importante et on observera toutes les espèces de particules massives. Un corps noir parfait à des températures inférieures à un milliard de degrés émettrait les particules peu massives, tel le neutrino, ce qui peut être le cas pour le trou noir formé par l'effondrement gravitationnel d'une étoile ou par l'effondrement d'un amas d'étoiles. Lorsque la température est extrêmement basse (quelques degrés centigrades), on n'observera que des photons, c'est-à-dire un rayonnement

électromagnétique et, vraisemblablement, le « graviton » ou « quantum du champ gravitationnel » [84, 82].

L'image photonique du rayonnement nous permet de comprendre facilement les propriétés qualitatives essentielles du corps noir. Premièrement, les principes de la mécanique statistique nous disent que l'énergie typique des photons est proportionnelle à la température ($E = KT^0$), tandis que la règle d'Einstein nous dit que la longueur d'onde de tout photon est inversement proportionnelle à l'énergie des photons ($\lambda E = hc$). Par conséquent, en réunissant ces deux règles, la longueur d'onde des photons dans le rayonnement du corps noir est inversement proportionnelle à la température ($\lambda KT^0 = hc$). En termes quantitatifs, la longueur d'onde typique à proximité de laquelle la majeure partie de l'énergie du rayonnement du corps noir est concentrée est de 0,29 centimètre à une température de 1 degré Kelvin ($1^0K (1K - 273.15 = -272.1C^0)$), et proportionnellement moins à des températures plus élevées [85].

4,4 Selon la théorie de la Relation il y a une loi fondamentale entre l'émission thermique d'Hawking du trou noir et le rayonnement thermal du corps noir

Nous avons vu précédemment dans l'article *L'équation de l'Univers* [86] que l'équation de base de la théorie de la Relation se réduit à

$$ke^2 = M_{VP}^2 t_0 c. \quad (14)$$

[ke^2 est la force électrostatique entre la charge au carré de deux protons dans un même noyau. La valeur de la constante de Coulomb k est $1/4\pi\epsilon_0 = 8,9875 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{coul}^2$. La valeur de la constante ϵ_0 appelée permittivité du vide est $8,8542 \times 10^{-12} \text{ coul}^2/\text{Nm}^2$. Le terme M_{VP}^2 représente la masse au carré de deux protons dans un même noyau soumise à la force gravitationnelle. M_{VP} est la masse relativisée du proton : $M_{op}/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$. Le terme t_0 représente le temps universel « irréversible » de l'univers en expansion qui s'écoule à la vitesse de la lumière.]

Cette équation peut aussi s'écrire

$$(ke^2 = M_{VP}^2 t_0 c = M_{VP}^2 2GM^0/c^2 = M_{VP}^2 h/m_0 c = M_{VP}^2 hc/KT^0; \quad ke^2/M_{VP}^2 = hc/KT^0), \quad (15)$$

$$\text{d'où } T^0 = M_{VP}^2 hc/ke^2 K \quad (16)$$

La température T^0 est proportionnelle à la masse gravitationnelle quantique (M_{VP}^2) ainsi qu'à la masse-énergie du photon m_0 ($KT^0 = m_0 c^2$).

Précisons que dans ce modèle, la vitesse des protons relativisés est identifiée avec la vitesse évaluée de la récession des galaxies et qu'elle détermine toutes les autres variables. Nous avons trouvé raisonnable d'adopter la vitesse $2/3c$. Comme celle-ci est

tributaire des données des observations astronomiques qui ne cessent d'évoluer, on ajustera la vitesse en conséquence.

$$ke^2 = [M_{op}/(1 - v^2/c^2)^{1/2}]^2 hc/KT^o \quad (17)$$

$$2,3 \times 10^{-28} \text{ kg m}^3 \text{ s}^{-2} = (2,2439 \times 10^{-2} \text{ kg})^2 hc/KT^o$$

$$T^o = [(2,2439 \times 10^{-2} \text{ kg})^2 hc/K] \div 2,3 \times 10^{-28} \text{ kg m}^3 \text{ s}^{-2} = \sim 1,3\text{K} \quad (18)$$

En considérant π

$$T^o = [(2,2439 \times 10^{-27} \text{ kg})^2 hc\pi/K] \div 2,3 \times 10^{-28} \text{ kg m}^3 \text{ s}^{-2} = \sim 4,2\text{K}$$

D'autre part, si on met $ke^2 = M_{VP}^2 t_0 c = M_{VP}^2 2GM^o/c^2$, on obtient

$$ke^2 c^2 / 2G = M_{VP}^2 M^o \quad (19)$$

$$(ke^2 / M_{VP}^2 = 2GM^o / c^2 ; ke^2 c^2 = 2GM_{VP}^2 M^o)$$

Nous voyons que M_{VP}^2 se transforme en M^o , et vice versa : la masse gravitationnelle quantique est inversement proportionnelle à la masse gravitationnelle classique. Cette dernière est la masse du trou noir, dans l'expression $2GM^o/c^2$ du rayon de Schwarzschild.

Selon la théorie de la Relation, il y a plus qu'une simple coïncidence entre l'émission thermique d'Hawking du trou noir et le rayonnement thermal du corps noir, il y a une correspondance déterminante, voire une loi fondamentale et profonde de la nature : la température s'élève lorsque le corps noir ou les trous noirs émettent des radiations. Le trou noir doit être considéré comme un corps noir.

4,5 Rayonnement thermique de Hawking : création spontanée de particules près du trou noir

L'évaporation du trou noir est basée sur des processus de mécanique quantique exotiques se produisant près de mini-trous noirs provoquant la création spontanée de particules. S.W. Hawking a suggéré que de petits trous noirs pourraient avoir été créés à l'époque de l'univers jeune par des fluctuations de densité, c'est-à-dire par les variations de densité d'un endroit à l'autre, que crée le mouvement chaotique et turbulent de la matière et du rayonnement. Selon sa théorie, chaque trou noir perd de la masse jusqu'au moment où, atteignant la masse de Planck, il disparaît dans une gerbe de rayonnement [87]. Mais ce processus concerne aussi bien les trous noirs stellaires que les mini-trous noirs. En fait, il a découvert que lorsque la mécanique quantique entre en jeu, tous les trous noirs cessent d'être parfaitement noir et rayonnent des quantités minimales d'énergie [88].

La théorie quantique des champs indique la création de particules près d'un trou noir en rotation. Les calculs montrent que des paires de particules (c'est-à-dire une particule et son antiparticule) seront créées spontanément dans le champ gravitationnel fort à l'extérieur d'un trou noir en rotation. Toutes les espèces de particules seront créées (paires électron-positon, paires neutrino-antineutrino, paires de photons, etc.), mais plus la particule est massive, moins elle sera produite copieusement. Cet effet de création de particules quantiques ne devait se produire que pour tous les trous noirs en rotation. Pour l'effondrement vers un trou noir de Schwarzschild, on s'attendait à ce qu'aucune création de particule ne se produise tard après l'effondrement. Cependant, Hawking a trouvé la création de particules thermiques près d'un trou noir non rotatif. Avec suffisamment de temps, ils libéreraient, sous forme de rayonnement, toute la matière et l'énergie qu'ils avaient avalée. Les trous noirs de masse stellaire prendraient 10^{66} ans à s'évaporer. Les trous supermassifs, restes de quasars morts depuis longtemps, prendraient encore plus de temps – plus de 10^{90} ans pour les plus grands découverts dans les noyaux galactiques.

Le paramètre R_S , dit rayon de Schwarzschild, d'un corps de masse M est défini par $R_S = 2GM/c^2$ [89]. La limite d'un trou noir est appelée l'horizon des événements. Par définition, une fois que l'on franchit l'horizon des événements et que l'on pénètre dans un trou noir, on ne peut plus jamais remonter dans la partie éloignée de l'espace-temps où le champ gravitationnel est faible. D'un autre côté, un observateur qui reste à l'extérieur du trou noir ne peut jamais rien voir de ce qui se passe à l'intérieur du trou noir. Le théorème de la singularité garantit qu'une sorte de singularité spatio-temporelle se trouvera à l'intérieur d'un trou noir, mais ce n'est pas tout ce qui entre dans le trou noir qui doit aller dans la singularité. En gros, il y a une quantité vraiment infinie d'espace-temps contenu dans le trou noir et, même si de nos jours le processus d'évaporation de Hawking n'est important que pour les trous noirs microscopiques, il s'avère que dans un univers en perpétuelle expansion même les plus grands trous seraient éventuellement affectés [80].

Une conséquence du processus de formation et d'évaporation des trous noirs est qu'il viole apparemment les lois de conservation des baryons qui énonce que dans tout processus, le nombre total de baryons moins le nombre total d'antibaryons ne peut pas être changé (même chose pour les leptons). Une autre conséquence est que dans la dernière étape du processus d'évaporation, les arguments dimensionnels indiquent que la relativité générale s'effondre et doit être remplacée par une théorie quantique de la gravitation.

La création de particules à proximité d'un trou noir se traduit par un flux de particules s'échappant sur de grandes distances. La température T^o de l'émission thermique est inversement proportionnelle à la masse M^o du trou noir. On suppose que les particules

obéissent aux principes de la théorie quantique, mais le champ gravitationnel qui provoque la création des particules est considéré comme une entité classique (c'est-à-dire non quantique) décrite par la théorie de la relativité générale. C'est ainsi qu'à proximité immédiate de l'horizon des événements, l'«émission» d'un trou noir de Schwarzschild de masse M^0 se révèle être identique en tous points à l'émission thermique d'un corps noir parfait à une température T^0 au-dessus du zéro absolu donné par

$$T^0 = hc^3/2GM^0K \quad (20)$$

$$(t_0c = 2GM^0/c^2 = h/m_0c = hc/KT^0 ; 2GM^0/c^2 = hc/KT^0; T^0 = hc^3/2GM^0K)$$

La température T^0 de l'émission thermique est inversement proportionnelle à la masse M^0 du trou noir. Trouvons la température pour la masse de Planck (Masse de Planck : $(hc/G)^{1/2} = 5,4 \times 10^{-8}kg$).

$$T^0 = hc^3/2GK 5,4 \times 10^{-8} = \sim 1,8 \times 10^{32}K. \quad (21)$$

On constate que la masse M diminue lorsque la température augmente. Ce qui est en parfait accord avec la théorie de la Relation. En supposant que la masse de l'univers soit environ $1,55 \times 10^{52}kg$, la température sera près de 2,7K.

$$T^0 = hc^3/(2GK 1,55 \times 10^{52}kg)/2,3069 \times 10^{-28} = \sim 2,7K. \quad (22)$$

Notons que dans ce dernier cas, nous divisons par $ke^2 = 2,3069 \times 10^{-28}$ alors que nous ne le faisons pas pour le premier cas. Cela s'explique dans la théorie de la Relation du fait que nous avons deux échelles d'ordres de valeur pour la même équation. Dans le premier cas, il y a 10^{60} entre la masse de Planck et la masse actuelle de l'univers. Dans le deuxième cas, qui concerne le rayonnement, il y a 10^{120} (valeur de la constante cosmologique) entre la « masse » du photon qui s'est étirée de 10^{60} à partir de la valeur de Planck pour s'établir à $10^{-68}kg$ ($t_0c = 2GM^0/c^2 = h/mc ; m = \sim 10^{-68}kg$) alors que dans l'autre direction mais pour le même temps la masse de Planck s'est « gonflée » de 10^{60} pour devenir la masse actuelle de l'univers ($\sim 10^{52}kg$), d'où une différence de l'ordre de 10^{120} entre le rayonnement et la matière actuelle [82, 86].

4,6 Effet tunnel quantique

En mécanique quantique il apparaît que des phénomènes interdits par les lois de la physique classique, tels que l'évasion d'une particule hors d'un trou noir, ont une chance de se produire. Cette chance est faible, certes, mais néanmoins réelle. Le mécanisme responsable de cette évasion porte le nom d'*effet tunnel* ; il permet à une particule de franchir une barrière « classique ». Par barrière « classique » nous entendons ce qui

constituerait un obstacle infranchissable si seules les lois de la physique classique étaient en jeu [90, 91].

Tout comme une étoile à neutrons peut se désintégrer spontanément et devenir un trou noir, de même tout morceau de matière-énergie à l'intérieur du trou noir peut connaître une évolution semblable, franchir une barrière de potentiel grâce à l'effet tunnel quantique, et ainsi perdre de la masse sous forme d'une énergie noire (ne pas confondre avec l'énergie noire supposée responsable de l'expansion ; masse et énergie sont liées par l'équation $E = mc^2$). Mais bien que cette matière noire n'ait pas suffisamment d'énergie pour sauter par-dessus la margelle du puits de potentiel que constitue l'horizon des événements et se retrouver hors du trou noir, elle peut se faufiler à travers la barrière au moyen de l'effet tunnel.

Le point important c'est qu'en toute hypothèse le trou noir qui provient de l'effondrement de la matière ordinaire (naine blanche, étoile à neutrons avec ou sans l'intervention de la gravité) jusqu'à l'état de trou noir, peut transformer la matière ordinaire en matière noire, à cause de la charge magnétique issue d'un renversement des lois de Maxwell, puis l'évacuer hors du trou noir par l'effet tunnel quantique [92]

5 Lagrangien de neutrinos droitiers (neutrinos magnétiques stériles) couplés à des neutrinos gauchers (neutrinos actifs) qui produisent des neutrinos réguliers

Dans cette section, nous étudions la possibilité que des neutrinos ordinaires puissent être produits par l'interaction faible si des neutrinos magnétiques stériles se mélangent à des neutrinos actifs. Les termes *ordinaire*, *régulier*, *habituel*, *standard*, *actif* sont employés pour désigner le neutrino du MS élargi (qui tolère l'oscillation du neutrino). Le neutrino *actif* est un nom alternatif pour le neutrino du MS : il est parfois commode d'appeler actifs les neutrinos gauchers habituels par opposition aux neutrinos magnétiques stériles de la matière noire, homologues droitiers des neutrinos habituels. La principale différence est que les neutrinos magnétiques stériles, en raison de l'aliénation du code 137, ne sont pas chargés d'une même façon définie par rapport aux interactions de jauge du MS. Strictement parlant, les neutrinos actifs sont des états propres de charge. En effet, les neutrinos peuvent être décrits comme les *états propres de masse*, c'est-à-dire les états propres de l'hamiltonien définissant la propagation de ces particules, ou comme les *états propres de charge*, c'est-à-dire les états ayant des charges définies par rapport aux interactions faibles du MS. Pour chacune des deux sortes de neutrinos, les états propres de charge pure sont créés via des interactions faibles et les états propres de masse ont des fréquences de propagation définies. **Selon nous, les opérateurs de masse et de charge commuteraient parfois lors des interactions entre les neutrinos magnétiques stériles et les neutrinos actifs, et ce fait serait responsable de la reconstitution du code 137.**

Au cours des trois dernières décennies, un nombre croissant d'expériences sur les neutrinos ont observé des changements de saveur des neutrinos, ce qui indique que les neutrinos sont massifs et oscillent. Ils forment des neutrinos actifs (neutrinos ordinaires qui ressentent l'interaction faible à pleine puissance) dans l'extension du MS qui portent une charge isospin de $\pm 1/2$ sous interaction faible [51]. Une grande question est de savoir comment les masses de neutrinos apparaissent. Dans le MS de la physique des particules, les fermions n'ont de masse qu'en raison des interactions avec le champ de Higgs. Ces interactions impliquent à la fois des versions gauchers et droitiers du fermion. Cependant, seuls les neutrinos gauchers ont été observés jusqu'à présent. Comme nous l'avons exprimé, les neutrinos magnétiques stériles pourraient constituer ces neutrinos droitiers qui interagissent avec les neutrinos gauchers et le champ de Higgs de manière analogue au reste des fermions. **Ils auraient été produits par le champ de Higgs à l'intérieur du trou noir avant d'être expulsés.** Ils interagiraient avec les autres fermions de cette manière, ne seraient donc pas directement observables et ne pourraient pas être exclus phénoménologiquement. Par contre, nous excluons la supposition qu'il n'y a que des neutrinos gauches et que leur source de masse proviendrait du type de masse de Majorana (faisant du neutrino sa propre antiparticule) qui s'applique aux particules électriquement neutre.

Sous l'hypothèse que les neutrinos stériles magnétiques forment la matière noire et qu'elles seraient des particules de Dirac droitiers (ν_R), ces particules ne sont pas des neutrinos quantiques d'énergie bien définie (états propres de masse). **Nous considérons la possibilité que leurs états propres d'interactions avec les neutrinos actifs produisent des neutrinos du MS contrairement à la tendance qui veut que l'interaction des neutrinos actifs avec des « états stériles » de la matière noire donne des neutrinos stériles.**

5,1 Les neutrinos magnétiques stériles droitiers.

Nous considérons que le neutrino magnétique stérile est le « partenaire » chiral droit du neutrino observé chiral gauche. Notons que nous employons les abréviations anglaises *L* (left) pour gaucher et *R* (right) pour droitier. Soulignons en outre que les termes « neutrino stérile », « neutrino droitier », « neutrino dextrogyre », « neutrino chiral droit », « lepton neutre lourd » et « fermion singulet » (particule dont le spin disparaît ou état de particules corrélées dont le moment angulaire total est nul) sont souvent utilisés de manière interchangeable dans la littérature. Nous avons vu auparavant que les neutrinos rejetés par les trous noirs sont dans un état stérile et sous la dépendance d'une charge magnétique due à la violation du code 137. Les neutrinos magnétiques stériles ne portent (par définition) aucune charge de jauge du MS, c'est-à-dire qu'ils ne ressentent aucune des forces connues de la nature, à l'exception de la gravité. Mais pour être des candidats

viables de la matière noire, ils doivent avoir des interactions avec d'autres particules. Cela peut être réalisé d'au moins trois manières différentes. Les deux premières voies peuvent être qualifiées de « production thermique », car elles impliquent la diffusion de particules dans le plasma primordial qui sont en bonne approximation en équilibre thermique. La désintégration de la troisième voie peut être considérée comme un mécanisme de production non thermique si elle se produit longtemps après que la particule en décomposition a gelé.

1) Dans l'univers primitif, si les états stériles des neutrinos magnétiques se mélangent aux neutrinos actifs, alors des neutrinos « ordinaires » peuvent être produits par l'interaction faible à travers ce mélange. Et ces neutrinos magnétiques droitiers peuvent donner de la masse à ces tout nouveaux neutrinos actifs gauchers.

2) Les états de neutrino qui semblent stériles aux énergies actuellement accessibles expérimentalement peuvent avoir de nouvelles interactions de jauge à des énergies plus élevées.

3) Dans l'univers primordial, des neutrinos ordinaires peuvent être produits lors de la désintégration hors d'équilibre thermique de neutrinos magnétiques stériles (issus des trous noirs primordiaux) plus lourds que les neutrinos actifs qui peuvent interagir avec eux. Il existe probablement d'innombrables possibilités pour mettre en œuvre l'idée dans des modèles spécifiques que des neutrinos ordinaires peuvent être produits lors de la désintégration de pratiquement n'importe quel neutrino magnétique stérile plus lourd que les neutrinos actifs qui peuvent interagir avec lui.

5,2 Production de neutrinos ordinaires dans l'univers primitif par des neutrinos magnétiques stériles de matière noire à l'échelle du keV

Pour la majorité des cosmologistes, les particules étaient en équilibre thermique dans l'univers primitif, c'est-à-dire que les processus dans lesquels les particules plus légères se combinent pour former des particules lourdes et vice-versa se sont produits au même rythme. À un certain moment, les conditions requises pour l'équilibre thermique ont été enfreintes parce que la densité de certaines espèces de particules est devenue trop faible. Ces particules sont qualifiées de « gelées » et elles ont une densité constante appelée densité relique, car l'abondance des particules reste la même [93]. Les recherches sur les neutrinos stériles comme candidats possibles à la matière noire ont examiné différents mécanismes expliquant comment des neutrinos stériles auraient pu être produits dans l'univers primitif. Le mécanisme de production le plus efficace a semblé être via les oscillations de neutrinos, car ils sont droitiers et le seul couplage direct de ces états stériles est avec les neutrinos gauchers ou actifs ($\nu_L \rightarrow \nu_R$). Dans l'univers primitif, ce sont donc les neutrinos actifs qui seraient à l'origine de la production de neutrinos stériles à l'échelle du keV de la matière noire [94, 95].

Dans l'hypothèse des neutrinos magnétiques stériles comme candidats possibles à la matière noire que nous proposons, c'est l'inverse : des neutrinos magnétiques stériles, issus de trous noirs, se couplent à des neutrinos actifs, récupèrent leur code 137 et se convertissent en neutrinos réguliers. Ces particules « converties » ont une densité non constante qualifiée densité « cumulative », car leur abondance ne cesse d'augmenter.

Selon nous, les neutrinos actifs en interaction avec les neutrinos magnétiques stériles font apparaître les neutrinos magnétiques stériles (ou plutôt les révèlent, puisqu'ils existent déjà) qui se transforment aussitôt en neutrinos ordinaires ($\nu_R \rightarrow \nu_L$). Ainsi ce sont les neutrinos stériles magnétiques qui produiraient des neutrinos ordinaires par le biais d'oscillation, et non l'inverse.

Cela devrait contribuer à expliquer une surabondance de neutrinos. Bien que la population de neutrinos ne soit pas bien connue, elle devrait être à peu près similaire à celle des photons. On observerait dans le cosmos, en moyenne, un milliard de photons lumineux pour chaque atome, ce qui est inexplicable [96].

5,3 Neutrino stérile associé à une charge magnétique

La découverte du Boson de Higgs en 2012 au CERN LHC a renforcé la théorie des basses énergies du MS expliquant la dynamique des particules fondamentales et leurs interactions. Toutefois il reste encore des questions sans réponse telles que l'origine de la masse des neutrinos et de la matière noire. Dans le SM, les neutrinos sont sans masse car le champ de Higgs ne peut pas se coupler aux neutrinos en raison de l'absence de neutrinos droitiers. Malgré cela, des expériences d'oscillation de neutrinos ont montré à un haut niveau de signification statistique que les neutrinos ont une masse non nulle mais minuscule, et que les états propres de saveur et de masse se mélangent, donnant lieu à des phénomènes mécaniques quantiques d'oscillations de neutrinos. Paradoxalement, la masse du neutrino et le neutrino droitier sont devenus le prolongement du MS.

Il existe plusieurs scénarios pour l'extension du MS avec un neutrino droitier. Par exemple des mécanismes de seesaw (basculé), qui peuvent expliquer l'origine d'un opérateur de dimension cinq (tel l'opérateur Weinberg qui peut générer la minuscule masse de Majorana pour les neutrinos avec le champ Higgs du MS) et peuvent expliquer l'origine dynamique des minuscules masses de neutrinos de Majorana en étendant de manière appropriée le champ contenu du MS. Ce scénario au-delà du MS nécessite un réglage fin non naturel des couplages Yukawa pour générer des masses de neutrinos inférieures à eV [53].

Dans les deux sections suivantes, nous étudions la possibilité que des neutrinos stériles associés à une charge magnétique puissent produire des neutrinos actifs, et aussi, bien que ce ne soit pas le motif, la possibilité que des neutrinos dextrogyres et des antineutrinos lévogyres puissent exister en tant que particules distinctes. Les résultats expérimentaux jusqu'ici montrent que les neutrinos produits et observés sont lévogyres (spin antiparallèle au moment), et que les antineutrinos ont une hélicité dextrogyre. Nous excluons le modèle de Majorana qui assume qu'une particule ne nécessite pas d'être différente de son antiparticule [94]. Nous utilisons le modèle de Dirac qui accepte qu'une particule doit être différente sous certains aspects de son antiparticule. Le neutrino stérile associé à une charge magnétique est un fermion de Dirac et, s'il est massif, il doit avoir des moments magnétique et électrique différents de zéro.

5,4 Mécanisme seesaw

Le mécanisme seesaw permet de générer des petits nombre à partir de nombres plus grands. Le modèle de type 1 produit un neutrino léger, pour chacune des trois saveurs de neutrinos connues, et un neutrino très lourd correspondant pour chaque saveur, qui n'a pas encore été observé. Mathématiquement, en théorie quantique des champs, le mécanisme seesaw correspond au fait que la matrice 2×2 est définie comme

$$A = \begin{pmatrix} 0 & D \\ D & M \end{pmatrix}. \quad (23)$$

(La matrice A est essentiellement la matrice de masse des neutrinos droits. M est la masse du neutrino stérile associé à une charge magnétique ; elle est comparable à l'échelle de grande unification et viole le nombre de leptons. D sont les composantes de masse de Dirac d'ordre de l'échelle électrofaible beaucoup plus petite, ou valeur attendue du vide). Il a deux valeurs propres :

$$\lambda_{(+)} = (M + \sqrt{M^2 + 4D^2})/2 \quad (24)$$

$$\lambda_{(-)} = (M - \sqrt{M^2 + 4D^2})/2. \quad (25)$$

La moyenne géométrique de $\lambda_{(+)}$ and $\lambda_{(-)}$ égale $|D|$, puisque le déterminant est égal à $\lambda_{(+)}\lambda_{(-)} = -D^2$. Si l'une des valeurs propres augmente, l'autre diminue, et *vice versa*. Le neutrino magnétique stérile M est considéré comme beaucoup plus grand que D . Alors la plus grande valeur propre, $\lambda_{(+)}$, est approximativement égale à M , tandis que la plus petite valeur propre est approximativement égale à $\lambda_{(-)} \approx -D^2/M$. La plus petite valeur propre conduit alors à une très petite masse de neutrinos, comparable à 1 eV [97].

5,5 Lagrangien de neutrinos droitiers (neutrinos magnétiques stériles) couplés à des neutrinos gauchers (neutrinos actifs) qui produisent des neutrinos réguliers

L'auteur s'est inspiré de la conjecture des physiciens qui ont considéré les neutrinos stériles droitiers couplés avec les neutrinos actifs gauchers [95, 98]. Conjecture qui veut que les neutrinos actifs entrent en interaction avec le neutrino de Majorana considéré comme le neutrino stérile et que cette interaction produirait des neutrinos stériles droitiers. **Nous avons pris la liberté d'utiliser le neutrino magnétique stérile issue des trous noirs à la place du neutrino de Majorana. Nous supposons que ce sont des neutrinos réguliers (ou actifs) qui résultent de cette interaction et non des neutrinos stériles. Et advenant que soient des neutrinos stériles droitiers qui en résultent, ceux-ci seraient en majorité spontanément transformés en neutrinos réguliers, recouvrant ainsi le code 137.**

Pour simplifier, nous ne considérons qu'une seule génération de neutrinos. Le terme de masse pour un modèle avec des neutrinos droitiers est donné par le lagrangien

$$\mathcal{L} = D \left(\frac{\phi}{v} \right) \bar{\nu}_L \nu_R + M \bar{\nu}_L \nu_R + h. c., \quad (26)$$

où (ν_L, ν_R) est une seule génération de champs de neutrinos, D est la masse de Dirac, M est la masse magnétique stérile pour les composantes droites (c'est aussi une masse de Dirac et non une masse de Majorana), ϕ est le champ de Higgs et v sa valeur d'attente du vide. Le cas habituel de la matière noire chaude, dans lequel les neutrinos actifs constituent la matière noire, correspond à $[D \sim 90h^2 eV \text{ et } M \ll D]$ ou $[D^2/M \sim 90h^2 eV \text{ and } M \gg D]$.

Lorsque les neutrinos magnétiques stériles sont des candidats pour la matière noire, M est la masse pertinente [98]. Au niveau de l'arborescence, ν_R se couple uniquement à ν_L et donc le moyen le plus efficace de produire des neutrinos magnétiques stériles est via des oscillations $\nu_L \rightarrow \nu_R$ [99 - 101].

La probabilité d'observer un neutrino magnétique stérile droitier au bout d'un temps t étant donné qu'on part d'un neutrino gaucher monoénergétique pur est $\sin^2 2\theta_M \sin^2 vt/L$ où θ_M est « l'angle de mélange », L est la longueur d'oscillation et v est la vitesse des neutrinos. **Ici, nous avançons que le neutrino droitier est un neutrino magnétique stérile qui dès son apparition se transforme en un neutrino régulier, récupérant ainsi le code 137. Dans le vide, et avec $M \ll D$ (voir 5,4 : mécanisme seesaw) $\theta_M = D/M$ et $L = 4E/(M^2 - D^2)$ où E est l'énergie des neutrinos.** Dans l'univers primordial, le temps d'observation t est remplacé par le temps d'interaction pour les neutrinos gauchers. Des travaux [102 - 104] ont affiné cette image en tenant compte de l'effet de la densité finie et de la température sur l'angle de mélange [95].

La conjecture de la plupart des physiciens considère que les neutrinos actifs entrent en interaction avec le neutrino de Majorana considéré comme le neutrino stérile, ou avec un « état stérile », qui produirait des neutrinos stériles : $v_L \rightarrow v_R$. **Mais selon l'auteur, ces neutrinos stériles seraient immédiatement transformés en neutrinos réguliers. Conséquemment, des neutrinos réguliers sont principalement produits par des oscillations de neutrinos entre neutrinos actifs et neutrinos magnétiques stériles :**

$$v_L \rightarrow v_R \rightarrow v_L. \quad (27)$$

5,5,1 Lagrangien dans l'univers primordial : neutrinos ordinaires issus de neutrinos magnétiques droitiers

Dans l'univers primordial, lorsque la température était suffisamment élevée pour que des particules de Higgs soient présentes dans le plasma primordial ($T > T_{EW} \sim 140 \text{ GeV}$ pour une masse de Higgs $m_H \sim 125 \text{ GeV}$ [105, 106], le lagrangien suivant, dans lequel les champs v_R n'interagissent que via le couplage Yukawa F , a permis aux particules v_R de participer à divers processus de diffusion différents. Ce Lagrangien est décrit par Marco Drewes dans son article "*The Phenomenology of Right Handed Neutrinos*" [49]. **Nous avons pris la liberté de remplacer M_M , un terme de masse de Majorana pour les neutrinos droitiers v_R , par M_M , un terme de masse de neutrino magnétique stérile pour les neutrinos droitiers v_R . Notre objectif est la production de neutrinos ordinaires par des neutrinos magnétiques stériles de matière noire dans l'univers primordial.**

On ajoute n fermions droitiers $v_{R,i}$ au MS qui sont singulets sous toutes les interactions de jauge et se couplent aux neutrinos gauchers de la même manière que les leptons chargés droitiers se couplent aux leptons chargés gauchers, c'est-à-dire via les interactions de Yukawa [107]. On désignera ces champs sous le nom de *neutrinos droitiers* et l'indice i qui les désigne sous le nom d'*indice de saveur*. Ensuite, le lagrangien renormalisable le plus général dans l'espace de Minkowski qui ne contient que des champs du MS et v_R se lit

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + i\bar{v}_R \not{\partial} v_R - \bar{l}_L F v_R \Phi - \bar{v}_R F^\dagger l_L \Phi^\dagger - \frac{1}{2} (\bar{v}_R^c M_M v_R + \bar{v}_R M_M^\dagger v_R^c). \quad (28)$$

Ici, les indices de saveur et d'isospin sont supprimés. \mathcal{L}_{SM} est le Lagrangien du MS. F est une matrice de couplages de Yukawa et M_M **un terme de masse magnétique pour les neutrinos droitiers v_R** . $l_L = (v_L, e_L)^T$ sont les doublets de leptons gauchers dans le MS et Φ est le doublet de Higgs. $\Phi = (\varepsilon\Phi)^\dagger$, où ε est le tenseur antisymétrique SU(2), et $v_R^c = C\bar{v}_R^T$, où la matrice de conjugaison des charges est $C = i\gamma_2\gamma_0$ dans la représentation de Weyl [49].

Ces considérations impliquent des diffusions de particules dans le plasma primordial, qui sont en bonne approximation en équilibre thermique et peuvent être classés dans la production « thermique ». L'équilibre thermique initial suppose implicitement que l'échelle de rupture de symétrie du nouveau groupe de jauge sous laquelle ν_R est chargé est inférieure à la température maximale à l'époque cosmologique dominée par le rayonnement. Cette température est inconnue. La seule contrainte observationnelle est qu'elle doit être supérieure à quelques MeV pour produire les quantités manifestes d'éléments légers dans le milieu intergalactique dans la nucléosynthèse du big bang [108].

Soulignons qu'une image physiquement assez différente émerge si nous supposons que des neutrinos ordinaires peuvent être produits lors de la désintégration hors équilibre de neutrinos magnétiques stériles plus lourds dans l'univers primitif. On aurait alors un véritable mécanisme de production non thermique. Des neutrinos lourds peuvent être produits lors de la désintégration de pratiquement n'importe quelle particule plus lourde. Dans le modèle seesaw minimal plus bas (12), ils sont par exemple produits lors de la désintégration des pions [109 - 111], du boson de Higgs [112] et des bosons W [113]. Similairement, il s'agit d'une production non thermique si cette désintégration de neutrinos magnétiques stériles massifs issus de trous noirs en neutrinos ordinaires lourds se produit loin de l'équilibre thermique (par exemple, longtemps après que la particule en décomposition ait gelé ou avant même qu'elle n'atteigne l'équilibre thermique) [94].

5.5,2 Lagrangien dans le modèle standard

On choisit une base de saveur où les couplages lepton chargé Yukawa et M_M sont diagonaux et les interactions des neutrinos se couplant aux courants faibles ont la forme lagrangienne dans le MS

$$-\frac{g}{\sqrt{2}}\bar{\nu}_L\gamma^\mu e_L W_\mu^+ - \frac{g}{\sqrt{2}}\bar{e}_L\gamma^\mu \nu_L W_\mu^- - \frac{g}{2\cos\theta_W}\bar{\nu}_L\gamma^\mu \nu_L Z_\mu \quad (29)$$

où g est la constante de couplage de jauge SU(2) et θ_W l'angle de mélange faible. Le terme lagrangien qui décrit les interactions dans le MS définit la base des états propres d'interaction faible (électron, muon et neutrino du tau) [49].

5.6 Interactions de jauge : interactions supplémentaires liées au mécanisme de production de masse des neutrinos

Les états de neutrinos qui semblent stériles aux énergies actuellement accessibles expérimentalement peuvent avoir de nouvelles interactions de jauge à des énergies plus élevées. De nombreuses extensions du MS invoquent des symétries de jauge supplémentaires qui sont « brisées » à une certaine échelle d'énergie au-dessus de la portée du LHC. Cela donne des masses de l'ordre de l'échelle de rupture de symétrie aux

bosons de jauge, éteignant efficacement ces interactions de jauge à des énergies plus basses. Si la température maximale dans l'univers primordial dépasse la masse des nouveaux bosons de jauge, les neutrinos « stériles » peuvent être produits thermiquement par les nouvelles interactions de jauge [94].

Les neutrinos stériles ne sont par définition chargés sous aucun groupe de jauge du MS. Dans le modèle de seesaw minimal (12), les ν_R ne se couplent au MS que via leurs interactions Yukawa F , et les états propres de masse à basse énergie N ne peuvent être produits que via leur interaction faible θ supprimée. Il n'y a cependant aucune raison pour que le ν_R ne soit pas chargé sous de nouvelles interactions de jauge si le modèle (12) est intégré dans un cadre plus général de physique des particules. Cette possibilité d'une production thermique par le biais de nouvelles interactions de jauge (« freeze out ») pourrait s'exprimer par les interactions de Yukawa dans le Lagrangien seesaw

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + i\overline{\nu_{Ri}}\not{\partial}\nu_{Ri} - \frac{1}{2}(\overline{\nu_{Ri}}(M_D)_{ij}\nu_{Rj} + \overline{\nu_{Ri}}(M_D)_{ij}\nu_{Rj}) - F_{ai}\overline{l_{La}}\epsilon\overline{\phi}^*\nu_{Ri} - F_{ai}^*\overline{\nu_{Ri}}\phi^T\epsilon l_{La} \quad (30)$$

Pour les physiciens, il n'est pas clair si les neutrinos sont des particules de Dirac ou de Majorana. Nous considérons que les neutrinos sont des particules de Dirac (neutrinos actifs), ce qui nécessite l'existence de neutrinos droitiers ν_R pour construire le terme de masse $\overline{\nu_L}M_D\nu_R + h.c.$ M_D est une matrice de masse de Dirac pour les champs singulets ν_{Ri} . Le terme de masse de Dirac M_D est autorisé pour ν_R car les ν_R sont des singulets de jauge. \mathcal{L}_{SM} est le Lagrangien du MS. L est un neutrinos gaucher. R correspond aux neutrinos droitiers. ν_i est les états de masse ; trois neutrinos légers ν_i peuvent être identifiés avec les neutrinos connus. ν_{Ri} est l'état de masse des neutrinos droitiers : pour nous, ce sont des neutrinos magnétiques stériles provenant de trous noirs. $l_L = (\nu_L, e_L)^T$ sont les doublets de leptons gauchers. Ici ϕ est le champ de Higgs et $\overline{\phi} = \epsilon\phi^*$, où ϵ est le tenseur antisymétrique SU(2)-invariant et F est une matrice d'interactions de Yukawa. Les F_{ai} sont des couplages de Yukawa entre les ν_{Ri} , le champ de Higgs ϕ et les leptons l_{La} du MS.

Les théories de jauge essaient d'expliquer le classement et les interactions entre particules élémentaires. Le cadre général de ces théories est la théorie quantique des champs qui quantifie de façon symétrique particules et champs d'interaction dans un cadre relativiste [114]. Notre but est d'essayer à travers le mécanisme des théories de jauge de saisir que ce ne sont pas des neutrinos actifs en interactions avec des états stériles qui produisent des neutrinos stériles mais **des neutrinos stériles magnétiques en interaction avec des neutrinos actifs qui se transforment en neutrinos réguliers.**

6 La matière noire pas si noire après tout ; hypothèses académiques

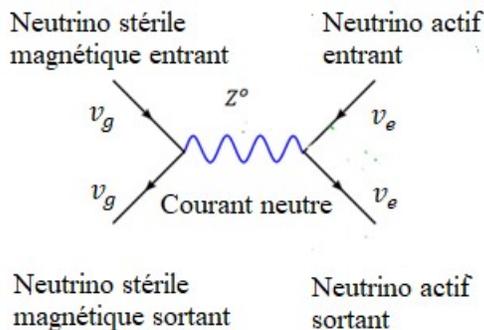
Les diagrammes et schémas explicatifs suivants sont partiellement schématiques, et ne sont pas des images du monde microscopique réel. Ils illustrent les relations entre différents processus, mais ne peuvent pas se substituer aux mathématiques détaillées. Nous commençons par montrer les interactions des neutrinos magnétiques stériles de la matière noire entre eux et avec les neutrinos actifs de la matière ordinaire. Puis, nous ne résistons pas à la tentation de traiter des équations spécifiques de production possible de rayons gamma à partir de l'annihilation cosmique des neutrinos-antineutrinos. Finalement, nous présentons l'« anapole » qui a déjà été suggéré comme modèle de particules élémentaires décrivant la matière noire dans l'univers [115, 116]. Ici, nous proposons que les neutrinos magnétiques stériles puissent présenter une configuration de courant non rayonnant dans la matière noire. Un mode anapole peut être considéré comme un chevauchement de moments dipolaires électriques et toroïdaux ayant entraîné une interférence destructive des champs de rayonnement. Lorsqu'un tel anapole (composé de neutrinos de Dirac) se déplace à grande vitesse dans un champ électromagnétique il se couple à celui-ci d'autant plus sensiblement qu'il est en mouvement rapide. En ce sens, la matière noire possède une pâle lueur.

6,1 Interactions entre les neutrinos magnétiques stériles et les neutrinos actifs

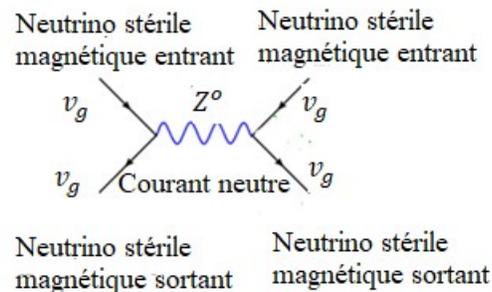
6,1,1 Interactions faibles neutres

La présence de Z^0 dans la théorie électrofaible implique qu'il y a des interactions faibles neutres, des échanges de Z^0 sans altération des identités ou des charges des particules. Ces processus ne mettant pas en jeu la charge (électrique ou magnétique) des particules impliquées sont désignés du nom de « courant neutre ».

1 a)



1 b)



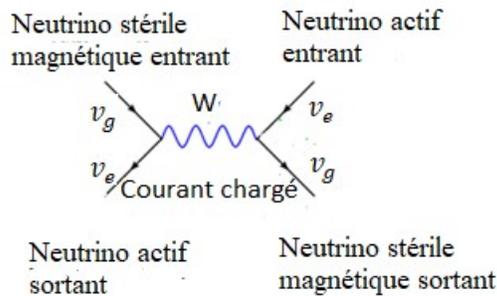
1 a) Un neutrino stérile magnétique de la matière noire passant à proximité d'un neutrino actif de la matière ordinaire ne perturbe pas ce dernier et engendre aucune création de particules, les neutrinos étant eux-mêmes simplement déviés.

1 b) Un neutrino stérile magnétique de la matière noire passant à proximité d'un autre neutrino stérile magnétique de la matière noire ne perturbe pas ce dernier et engendre aucune création de particules, les neutrinos étant eux-mêmes simplement déviés.

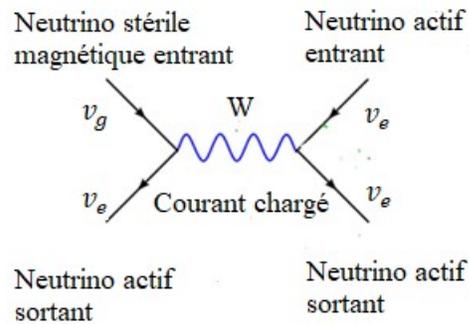
6,1,2 Interaction d'un neutrino magnétique stérile de la matière noire avec un neutrino actif de la matière ordinaire

L'analogie avec les interactions électromagnétiques, de Yukawa et des interactions faibles suggère que les interactions des neutrinos magnétiques stériles de la matière noire, entre eux ou avec des neutrinos actifs de la matière ordinaire, seraient dues à l'échange de particule messagère (quantum virtuel d'un champ) analogue à W^\pm . L'interaction entre deux « courants faibles », similaire à la force entre deux courants électriques, est transportée par une particule ressemblant à W . Ce type de W porte une charge magnétique ou électrique, positive (W^+) lorsque l'interaction transporte une charge positive de gauche à droite, ou négative (W^-) dans l'autre sens.

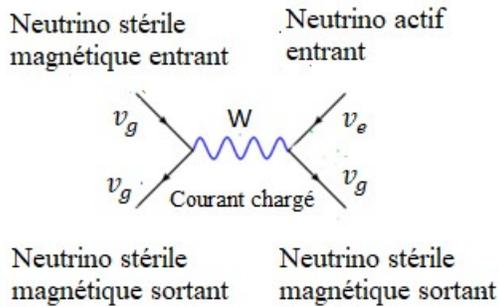
2 a)



2 b)



2 c)

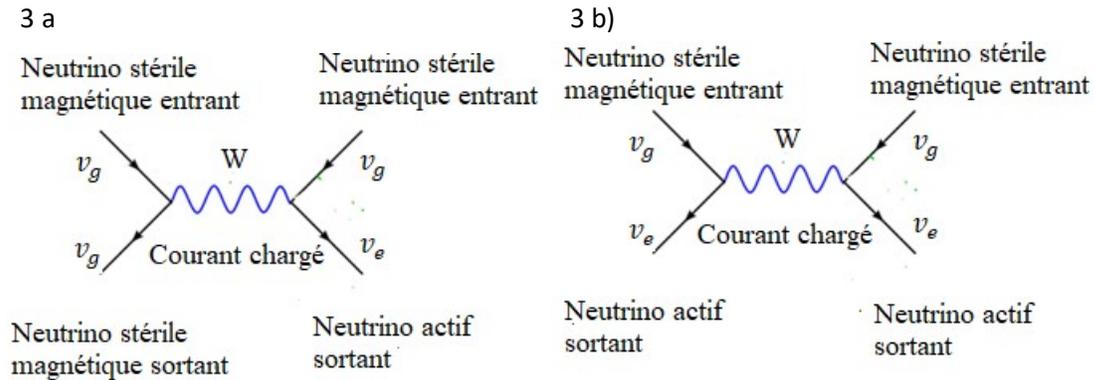


2 a) Nous pouvons considérer que les courants faibles chargés circulent dans les deux sens (W^\pm) et que, simultanément, le neutrino magnétique stérile est transformé en neutrino actif du côté gauche tandis que le neutrino actif est transformé en neutrino magnétique stérile du côté droit.

2 b) Nous pouvons considérer qu'un courant faible négatif (W^-) transforme un neutrino magnétique stérile en neutrino actif du côté gauche.

2 c) Nous pouvons considérer qu'un courant faible positif (W^+) transforme un neutrino actif en neutrino magnétique stérile du côté droit.

6,1,3 Interaction d'un neutrino magnétique stérile de la matière noire avec un autre neutrino magnétique stérile de la matière noire



3 a) Nous pouvons considérer qu'un courant faible positif (W^+) transforme un neutrino magnétique stérile en neutrino actif du côté droit.

3 b) Nous pouvons considérer que les courants faibles chargés circulent dans les deux sens (W^\pm) et que le neutrino magnétique stérile est transformé en neutrino actif du côté gauche tandis que le neutrino magnétique stérile est également transformé en neutrino actif du côté droit.

Notons que la force faible diffère des autres forces en ce qu'elle change plus volontiers le « type » de la matière que son mouvement ; ainsi elle peut changer la matière noire en matière ordinaire et vice versa. La théorie électrofaible implique des processus d'interaction faible qui mettent en jeu la charge électrique ou magnétique des particules impliquées. Les bosons W provoquent des processus d'interaction faible modifiant les charges. Pour comprendre l'interaction faible comme explication de la transmutation des particules, il faut considérer que les courants faibles chargés entre les neutrinos magnétiques de la matière noire et les neutrinos de la matière ordinaire ont cette faculté à travers les transformations de décoder ou de rétablir le code 137.

6,2 Neutrinos magnétiques stériles et production de rayons gamma

Dans la présente section, qui est un prolongement de la sous-section 2,5,2 traitant du vide polarisé, nous traitons des équations spécifiques de production possible de rayons gamma, à la fois interstellaires et intergalactiques, à partir de l'annihilation cosmique des neutrinos-antineutrinos. Ces équations sont d'autant plus hautement spéculatives qu'elles proviennent de neutrinos magnétiques stériles. Néanmoins, elles sont justifiées par l'importance de la quête de preuves de l'existence de la matière noire et de sources des rayons-gamma [117].

Les rayons gamma subissent une absorption négligeable dans la plupart des cas d'intérêt astrophysique et ils voyagent en lignes droites à partir de leurs sources. En cela, ils

diffèrent des rayons cosmiques qui, étant des particules chargées, voient leurs mouvements continuellement modifiés par les interactions avec les champs magnétiques cosmiques. Les rayons gamma sont composés de photons ultra-énergétiques qui ne peuvent pas pénétrer loin dans l'atmosphère terrestre car ils interagissent vite avec les hautes couches de l'air en faisant jaillir une cascade de particules. En conséquence, les détecteurs de rayon gamma doivent opérer au-dessus de l'atmosphère, à bord de satellites en orbite autour de la Terre. Par conséquent, on peut en apprendre beaucoup sur les sources et les interactions des rayons cosmiques en étudiant la distribution spatiale et énergétique des rayons gamma (γ) qu'ils produisent.

Production de rayons gamma à partir de l'annihilation de neutrino-antineutrino cosmique.

Les neutrinos et les antineutrinos peuvent interagir magnétoélectriquement et ainsi s'annihiler pour produire des rayons γ . Cette annihilation peut se produire des manières suivantes.

1— Un antineutrino libre peut s'annihiler avec un neutrino libre pour produire, le plus souvent, deux rayons γ :

$$\bar{\nu}_g + \nu_g \rightarrow \gamma + \gamma \quad (31)$$

2—Un neutrino et un antineutrino de faible énergie peuvent d'abord se combiner pour former un système de type positronium, constitué d'un neutrino et d'un antineutrino liés ensemble en un atome exotique et instable que nous appellerons « antineutrinium » (que nous désignerons par le symbole $\dot{\nu}$). Le système peut alors s'annihiler en deux, trois rayons γ ou plus (ζ est le nombre de rayons γ) :

$$\bar{\nu}_g + \nu_g \rightarrow \dot{\nu}_g \rightarrow \zeta\gamma \quad (32)$$

Absorption des rayons gamma par interaction avec la matière noire

Il existe deux types d'interactions à considérer ici. Le premier implique la conversion d'un rayon γ en une paire neutrino-antineutrino dans le champ magnéto-statique d'une particule magnétique chargée ou d'un neutrino stérile à charge magnétique. Si nous désignons un tel champ de charge par le symbole MCC, une telle interaction peut être symboliquement écrite comme

$$\gamma + MCC \rightarrow \bar{\nu}_g + \nu_g + MCC \quad (33)$$

L'interaction de conversion, ou production de paires comme on l'appelle habituellement, a une section efficace (terme technique pour appeler la probabilité d'interaction) qui implique un facteur supplémentaire de la constante de structure fine, soit $\alpha_g = keq/\hbar c$

(g est une charge magnétique) relié à l'équation (4-a), ou $\alpha_g = g^2/hc$ relié à l'équation (4-b), car elle implique une interaction intermédiaire avec un champ magnétostatique.

Le deuxième type de processus d'absorption des rayons γ dans la matière est l'interaction de diffusion

$$\gamma + \nu_g \rightarrow \gamma + \nu_g \quad (34)$$

La diffusion Compton n'élimine pas le rayon γ en soi, mais entraînera selon toute probabilité le transfert d'une partie de l'énergie du rayon γ vers le neutrino, absorbant ainsi l'énergie du rayon γ . Pour le rayon γ d'énergie $E_\gamma \ll mc^2$, la quasi-totalité de l'énergie du rayon γ est absorbée, et alors on peut considérer que le rayon γ a « disparu ». L'idéal serait de définir une « section efficace d'absorption » σ_a , telle que

$$\sigma_a = (\Delta E_\gamma / E_\gamma) \sigma_c \quad (35)$$

où ΔE_γ est la quantité moyenne d'énergie transférée du rayon γ au neutrino.

Dans le cas de l'annihilation $\bar{\nu}_g - \nu_g$ à haute énergie, les réactions de la forme

$$\bar{\nu}_g + \nu_g \rightarrow \text{bosons} \rightarrow \text{photons} + \gamma \quad (36)$$

peut être envisagée, ainsi que l'annihilation des types

$$\bar{\nu}_g + \nu_g \rightarrow \bar{\nu}_g + \nu_g + \gamma. \quad (37)$$

6,3 Anapole de la matière noire

Nous avons dit que les neutrinos stériles associés à une charge magnétique (comme les neutrinos électroniques sont associés à une charge électrique) n'étaient sensibles qu'à la force gravitationnelle. Ils proviendraient de l'intérieur des trous noirs où, comme nous l'avons montré, il y aurait eu une inversion des charges, la charge magnétique s'étant substituée à la charge électrique. Mais alors, comment ces neutrinos associés à une charge magnétique, qui ont donc une amorce de structure magnétique et électrique, peuvent-ils être insensibles aux forces électromagnétiques, électriques et magnétiques ? Il existe une configuration de champs électriques et magnétiques très particulière, l'anapole, qui peut leur être associée. Le terme anapole signifie « sans pôle » en grec. Un anapole magnétique pour un fermion de Dirac a été proposé en physique nucléaire la première fois par le physicien et cosmologiste Iakov Zeldovich en 1958 [118]. La première mesure expérimentale d'un moment anapolaire dans les noyaux atomiques a été notée par Woods

et al. [119]. Le couplage de la matière noire anapolaire à un photon noir a déjà été envisagé par Fitzpatrick et Zurek [120]. Contrairement aux moments dipolaires électriques et magnétiques qui ont été considérés par divers auteurs pendant plusieurs années comme la manière dont la matière noire pourrait interagir électromagnétiquement avec la matière ordinaire, le moment anapolaire a été considéré comme une forme possible de couplage électromagnétique à la matière noire [121] qui n'a pas d'analogie classique, car il ne correspond pas à une distribution multipolaire.

Sa représentation la plus simple est celle que l'on obtient avec une bobine magnétique, un solénoïde, refermée sur elle-même et collée à ses deux extrémités pour former un tore. Les courants électriques circulants selon les petits cercles du tore génèrent alors un champ magnétique le long des grands cercles intérieurs du tore, et à cet endroit uniquement. À l'extérieur du tore il n'y a ni champ électrique ni champ magnétique.

On peut ainsi illustrer le champ magnétique à l'intérieur du tore :

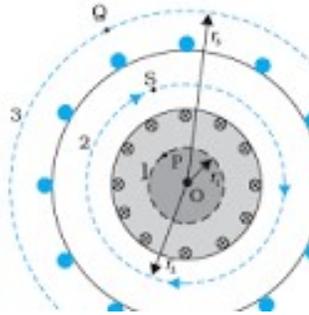


Figure. Le champ magnétique dans l'espace ouvert à l'intérieur (point P) et à l'extérieur du tore (point Q) est nul. Le champ B à l'intérieur du tore est **d'amplitude constante pour le tore idéal de spires étroitement enroulées**. La direction du champ magnétique à l'intérieur est dans le sens des aiguilles d'une montre selon la règle du pouce droit pour les boucles circulaires [122].

Alors que les dipôles électriques peuvent être compris comme des charges séparées et les dipôles magnétiques comme des courants circulaires, les dipôles toroïdaux axiaux (ou électriques) décrivent des arrangements de charges toroïdales tandis que le dipôle toroïdal polaire (ou magnétique) -- également appelé anapole -- correspond au champ d'un solénoïde plié en un tore. L'anapole est une superposition équilibrée de dipôles électriques et toroïdaux. Il émerge lorsque les champs rayonnés par les dipôles électriques et toroïdaux s'annulent. Parce que la boucle ne contient aucun courant, le moment magnétique du tore est nul. Étrangement, on obtient une configuration de courant non rayonnant.

C'est ainsi qu'en 2013, deux physiciens américains [123, 124] ont proposé un modèle de particules de matière noire qui contredit l'affirmation selon laquelle la matière noire

n'émet pas de lumière car elle ne peut pas interagir avec le champ électromagnétique. Ces particules sont des anapoles sensibles aux forces électromagnétiques, bien que très faiblement dans l'univers actuel. Dans leur article, ils considèrent la matière noire comme un fermion de Majorana avec spin 1/2. Les neutrinos seraient leur propre antiparticule qui peut être décrite par l'équation de Dirac [125].

Après que Zeldovitch ait proposé en 1957 la possibilité que des particules puissent avoir un moment anapolaire, on a considéré la matière noire comme étant surtout un fermion de Majorana de spin 1/2. Pour la première fois expérimentalement dans des atomes de césium en 1997 [119] on a mesuré que l'interaction moment anapolaire rompt C et P, mais préserve CP. D'après cela, l'opérateur d'interaction pour ce moment anapolaire est de la forme

$$\bar{\chi}\gamma^\mu\gamma^5\chi\partial^\nu F_{\mu\nu} \quad (38)$$

où χ est la matière noire et $F_{\mu\nu}$ est le tenseur de résistance au champ électromagnétique. Dans leur modèle, le fermion de Majorana a un couplage direct avec les photons du MS.

6,3,1 Lagrangien de matière noire anapolaire (fermion de Dirac)

Notre modèle diffère de tous les autres en ce que nous considérons la matière noire comme des neutrinos magnétiques stériles et comme des fermions de Dirac neutres. Le neutrino magnétique stérile peut être modélisé par l'anapole, c'est-à-dire par un tore, qui est un solénoïde fermé autour duquel des courants électriques comme des méridiens génèrent des champs magnétiques parallèles, confinés à l'intérieur du tore. Nous remarquons que l'opérateur d'interaction anapole correspondant pour un fermion Dirac prend exactement la même forme que pour un fermion de Majorana [123]. Les neutrinos magnétiques de la matière noire ont aussi un couplage avec les photons du MS. Le modèle avec le fermion de Dirac a un lagrangien différent en conséquence.

L'interaction avec les photons d'un fermion de Dirac χ de spin 1/2 en raison de son moment anapolaire peut être exprimée sous une forme invariante de Lorentz comme

$$L = \frac{1}{2} \frac{g}{\Lambda^2} \bar{\chi} \gamma^\mu \gamma^5 \chi \partial^\nu F_{\mu\nu}. \quad (39)$$

où g est une constante de couplage sans dimension et Λ est la nouvelle échelle de masse physique. Dans la limite non relativiste, cela contient l'interaction du spin des particules avec la boucle du champ magnétique,

$$H = - \left(\frac{g}{\Lambda^2} \right) \sigma \cdot \nabla \times B \quad (40)$$

Notez que $\bar{\chi} \gamma^u \chi$ sont pour les fermions de Dirac [126, 127]. En principe, il reste que ces anapoles puissent exister sous la forme d'états neutralisés. On peut penser qu'ils possèdent une charge magnétique presque non active (ou tout autre type de charge) qui minimise leur taux d'interaction avec la matière ordinaire.

6,3,2 Anapole sensible aux autres forces

Comment une particule uniquement anapolaire peut-elle être sensible aux forces électromagnétique, électrique ou magnétique ? Il n'est pas interdit de penser que le dipôle toroïdal polaire (ou magnétique), qui correspond au champ d'un solénoïde plié en tore, peut aussi interagir avec les courants externes. Autrement dit, il peut présenter un mode anapole avec un certain rayonnement dans le visible. Lorsqu'un tel anapole se déplace, en particulier à grande vitesse, dans un champ électromagnétique, il se couple à celui-ci d'autant plus fortement qu'il est en mouvement rapide. La section efficace d'interaction diminue à mesure que la vitesse des particules ralentit [122]. Si la matière noire est composée de fermions de Dirac sous forme d'anapoles, en l'occurrence des neutrinos magnétiques stériles issus de trous noirs, elle peut donc être sensible aux champs électromagnétiques, aux champs électriques et aux champs magnétiques. En quelque sorte, à proprement parler, elle n'est pas tout à fait noire, même si elle ne peut toujours pas rayonner comme la matière normale. De même que le terme « stérile » de l'expression « neutrino stérile magnétique » peut vouloir dire absence de charge que présence d'une charge « neutre » potentiellement active, le terme « matière noire » peut signifier autant absence de courant rayonnant que présence de courant non rayonnant faiblement sensibles aux forces électromagnétiques.

Comme nous l'avons dit au début de l'introduction, les modèles cosmologiques ont établi que la matière noire représenterait plus de 80% de la matière de l'univers pour constituer environ 27% de la densité d'énergie totale de l'univers observable. Ces chiffres proviennent de cosmologistes qui ont adopté une méthodologie qui ne repose pas sur une théorie physique mais sur une confiance aveugle en des modèles numériques trop schématiques qui manipulent les concepts de matière noire et d'énergie noire sans rapport avec la réalité. L'énergie noire, telle que présentée avec l'accélération de l'expansion de l'espace, n'a été prévue par aucune théorie. Elle repose sur la distance mesurée de la distance de supernovæ très lointaines dont on ne peut faire confiance en de telles mesures, et sur la supposition gratuite et impossible à prouver que la luminosité intrinsèque des supernovæ est la même pour toutes, indépendante de l'objet mesuré [128, 129]. Les cosmologistes ont décrété que la matière noire existait dans sa totalité dès le début de l'univers. Les particules de matière noire peuvent s'annihiler en particules du MS et les particules du MS s'annihilent en matière noire [74]. Ainsi, lorsque l'univers était plus dense et plus chaud, ces particules de matière noires se déplaçaient rapidement, entraînent donc en interaction avec la matière normale et les champs

électromagnétique plus fortement que de nos jours. En fait, plus l'univers se refroidit, plus les vitesses de ces particules diminuent, et moins elles sont sensibles à ces champs, le nombre de particules de matière noire demeure alors constant.

Selon notre hypothèse, la matière noire proviendrait des trous noirs qui se sont formés tout au long de l'expansion. Même si le taux d'annihilation dans l'univers diminue en moyenne, que les réactions qui transforment les particules de matière noire en particules du MS ne sont plus aussi efficaces, le nombre de particules de matière noire augmente graduellement ainsi que la transformation des particules de matière noire en particules du MS. Certaines *annihilations résiduelles* pourraient se produire dans des régions de l'univers affichant une surdensité, à l'instar des halos galactiques, y compris le nôtre. Le rayonnement produit par l'annihilation de la matière noire pourrait être observé avec des télescopes à rayon gamma.

Une autre alternative pourrait être que l'anapole toroïdal magnétique ne soit pas simplement courbé, mais aussi tordu sur lui-même, un peu comme une *bande de Möbius* [130]. Si on considère une sorte de ruban retourné à moitié dont les deux bouts ont été joints comme une route, le courant peut voyager dessus sans cesse, se retrouvant tantôt sur sa surface intérieure, tantôt sur sa surface extérieure. Un tore de Möbius est un modèle efficace afin de voir comment un courant peut se trouver en même temps à l'intérieur et à l'extérieur [131]. La gravité, qui passe au travers de tout, est liée au tore. Il en est de même du magnétisme jusqu'à un certain point. Les faibles champs magnétiques qui proviennent de la matière ordinaire pénètrent la surface magnétique extérieure du tore. Cette fois-ci, il y a un mode anapole avec rayonnement dans le visible.

Bien que de telles solutions restent hautement spéculatives et, surtout, difficiles à tester expérimentalement, on dispose néanmoins d'un nouveau modèle de particule de matière noire ayant des possibilités d'interactions supplémentaires avec la matière normale, qui ne repose pas sur l'introduction de nouvelles forces exotiques.

7 Le neutrino magnétique stérile interagit avec le magnétisme et la force faible

Le concept de champ pour la force électrique peut être étendu à la force magnétique et aussi à la force gravitationnelle. La charge électrique ou le pôle magnétique est la source du champ, dont l'intensité diminue progressivement avec la distance à la source. Ces champs sont à longue portée et s'étendent à l'infini. Les charges et le courant de la force faible sont très voisins des charges et des courants électriques, des pôles et des courants magnétiques. La principale différence est la courte portée de l'interaction, portée gouvernée par la masse des particules W et Z [132]. Nous constatons dans la section 7,1 une masse du neutrino probablement inférieure à 1 eV. Les sections suivantes font appel

à des neutrinos magnétiques stériles dont certaines masses pourraient être largement supérieures. Il est magnétiquement et électriquement neutre et, malgré sa charge associative qui le rend moins enclin à réagir avec la matière que le neutrino ordinaire, il a quelque chose à voir avec ce dernier. Nous avons plus haut esquissé d'un point de vue phénoménologique la façon dont ils interagissaient ensemble. Bien que son interaction avec la lumière et la matière ordinaire soit très faible, cette hypothèse minimale d'une interaction a le pouvoir de rapprocher et concilier des observations diverses, couvrant des échelles de la taille d'une galaxie à une fraction de l'univers observable. Tout cela, y compris des lueurs de désintégration observées et les résultats de simulations numériques, ne constitue pas une preuve de l'existence de neutrinos magnétiques stériles mais lui confère de la crédibilité.

7,1 Valeur inconnue de la masse absolue du neutrino ordinaire

Le MS de la physique des particules supposait que les neutrinos n'avaient pas de masse [133]. Le phénomène expérimentalement établi d'oscillation des neutrinos, qui mélange les états de saveur des neutrinos avec des états de masse des neutrinos exige que les neutrinos aient des masses non nulles [134]. En 1998, les résultats de la recherche au détecteur de neutrinos Super-Kamiokande ont déterminé que les neutrinos peuvent osciller d'une saveur à l'autre [135]. Si les expériences semblent confirmer que le neutrino a bien une masse, elle n'en donne pas la valeur. En mesurant la longueur de ces oscillations, elles se contentent de livrer la différence de masse entre les différentes familles : plus l'oscillation mesurée est longue, plus cette différence est petite. On améliore le cadre de base pour tenir compte de leur masse en ajoutant un lagrangien droitier. L'échelle de masse absolue des neutrinos n'est toujours pas connue : les oscillations des neutrinos ne sont sensibles qu'à la différence des carrés des masses [136, 137]. À partir de 2020, la valeur la mieux ajustée de la différence des carrés des masses des états propres de masse 1 et 2 est $|\Delta m_{21}^2| = 0.000074 eV^2$, alors que pour les états propres 2 et 3 c'est $|\Delta m_{32}^2| = 0.00251 eV^2$. Puisque Δm_{32}^2 est la différence de deux masses au carré, au moins l'une d'entre elles doit avoir une valeur qui est au moins la racine carrée de cette valeur, soit $0,05 eV$ [138, 139].

La limite supérieure la plus forte sur les masses de neutrinos vient de la **cosmologie** : le modèle du Big Bang prédit qu'il existe un rapport fixe entre le nombre de neutrinos et le nombre de photons dans le fond diffus cosmologique. Si l'énergie totale des trois types de neutrinos dépassait en moyenne $50 eV$ par neutrino (la densité estimée de la masse noire divisée par le nombre estimé de neutrinos fossiles), il y aurait tellement de masse dans l'univers qu'il s'effondrerait [140].

Une contrainte stricte provient d'une analyse minutieuse des données cosmologiques, telles que le rayonnement de fond cosmique micro-ondes, les relevés de galaxies et la

forêt Lyman-alpha. L'analyse des données du télescope spatial à micro-ondes WMAP a révélé que la somme des masses des trois espèces de neutrinos doit être inférieure à $0,3 \text{ eV}$ [141]. En 2018, la collaboration Planck a publié une limite plus forte de $0,11 \text{ eV}$, qui a été dérivée en combinant leurs observations d'intensité totale, de polarisation et de lentille gravitationnelle CMB avec des mesures d'oscillation Baryon-Acoustic provenant d'enquêtes sur les galaxies et des mesures de supernova de Pantheon. Une réanalyse de 2021 qui ajoute des mesures de distorsion spatiale du décalage vers le rouge de l'enquête SDSS-IV eBOSS obtient une limite supérieure encore plus stricte de $0,09 \text{ eV}$ [142]. Cependant, plusieurs télescopes au sol avec des barres d'erreur de taille similaire à celles de Planck préfèrent des valeurs plus élevées pour la somme de masse des neutrinos, ce qui indique une certaine tension dans les ensembles de données [143]

Un certain nombre d'efforts sont en cours pour déterminer directement l'échelle de masse absolue des neutrinos dans des **expériences de laboratoire**, en particulier en utilisant la désintégration bêta nucléaire. Les limites supérieures des masses effectives des neutrinos électroniques proviennent de la désintégration bêta du tritium. L'expérience de masse des neutrinos de Mainz a fixé une limite supérieure de $m < 2,2 \text{ eV}/c^2$ à un *niveau de confiance* de 95% [144]. Depuis juin 2018, l'expérience KATRIN recherche une masse comprise entre $0,2 \text{ eV}$ et 2 eV dans les désintégrations du tritium [145]. La limite supérieure de février 2022 est $m < 0,8 \text{ eV}/c^2$ à un niveau de confiance de 90% en combinaison avec une précédente campagne de KATRIN de 2019 [146, 147].

Ainsi, les données du CMB et d'autres méthodes indiquent que la masse moyenne des trois saveurs connues des neutrinos ne dépasse probablement pas $0,3 \text{ eV}/c^2$. Ce qui est loin de la moyenne collective de $50 \text{ eV}/c^2$ qu'il faudrait pour saturer toute la masse manquante. Si les estimations livrées par *Sudbury Neutrino Ontario* sont exactes, la somme de tous les neutrinos ne peut représenter qu'entre 0,1% et 18% de la masse de l'univers.

Avec une masse aussi faible, loin, du total espéré, les neutrinos observés ne peuvent pas expliquer la matière noire. [130]. Même dans le cas le plus favorable obtenus après quelques décennies comme $m(\nu_{e,\mu,\tau}) < 2 \text{ eV}/c^2$, il faudra faire appel à d'autres particules. Nous avons exposé que notre candidat est le neutrino magnétique stérile. Il est appelé « stérile » parce qu'il est associé à une charge magnétique au lieu d'une charge électrique, et viole ainsi le code 137 – (on se surprendra de ce que la charge magnétique se substitue à la charge électrique, ce qui est une violation de la conservation de la charge, mais on ne se surprend plus de l'oscillation qui est un processus qui viole la conservation de l'énergie). Contrairement au neutrino ordinaire, il est généralement un lent et un lourd qui se laisse entrevoir par ses seuls effets gravitationnels. Il pourrait faire partie des WIMPs, extensions du MS de la physique des particules. Il semble

incontournable pour rendre compte des halos sombres des galaxies. Il reste piégé dans ces masses énormes entourant les structures et qui n'émettent aucun rayonnement. En s'y agglutinant, il ne cesse de les renforcer.

7,2 Le neutrino stérile à charge magnétique reçoit de l'énergie des champs magnétiques des étoiles ou des pulsars

Des champs magnétiques ont été détectés presque partout dans l'univers : planètes, étoiles, galaxies, et les plus grandes toiles peuvent couvrir des amas de galaxies. Bien que ces lignes de champ magnétique galactique ne soient qu'un milliardième de la puissance d'un aimant de réfrigérateur typique, elles compensent largement cette lacune avec leur grande taille [148].

La galaxie de la Voie lactée a son propre champ magnétique. Il est des milliers de fois plus faible par rapport à la Terre. Dans une étoile en rotation ou un disque d'accrétion (capture gravitationnelle de masse), les électrons et les ions ont tendance à se déplacer à des vitesses différentes et sur des trajectoires différentes. Cela entraîne une séparation des charges électriques et l'apparition d'un champ électrique. Selon la loi de l'induction, un champ électrique engendre un champ magnétique. Le milieu interstellaire accueillant de la matière des étoiles, grâce aux vents stellaires ou aux explosions de supernovæ, acquerrait ainsi un champ magnétique. Il est possible que ces champs stellaires injectés puissent être amplifiés par une nouvelle « dynamo » (champ magnétique faible amplifié par le transfert d'une partie de l'énergie mécanique d'un gaz en rotation) et finisse par ressembler à un champ galactique. Lorsqu'une galaxie expulse le gaz interstellaire, le milieu intergalactique pourrait êtreensemencé par ces champs magnétiques avec une dynamo jouant le rôle d'amplificateur pour amener leur intensité à celle qu'on observe dans les amas de galaxies. Les astronomes ont découvert que les intensités des champs magnétiques à proximité des trous noirs supermassifs au centre de ces galaxies peuvent être aussi fortes que leurs champs gravitationnels intenses. En général, les forces magnétiques ne sont importantes que si la densité d'énergie dans le champ magnétique est du même ordre de grandeur que l'énergie interne du gaz. En fait, les disques d'accrétion entourant les trous noirs engendreraient des champs magnétiques capables d'expulser de la matière du voisinage pour former des sorties très énergétiques appelées « jets ». Ces derniers emporteraient aussi des champs magnétiques vers les galaxies environnantes et l'espace intergalactique [149, 150].

Il semble y avoir une relation entre la distribution des champs magnétiques provenant de la matière baryonique et celle de la matière noire. Or une telle corrélation peut permettre de détecter dans le cosmos la trace de cette matière noire au-delà de sa seule présence gravitationnelle. L'idée est de supposer que les champs magnétiques, même s'ils sont distribués de façon diffuse, comporte des zones suffisamment intenses pour que des

particules de matière noire puissent parfois interagir par la force faible [151]. En postulant que la matière noire est composée d'un neutrino à charge magnétique positive (pôle +) et d'un neutrino à charge magnétique négative (pôle -), alors une collision entre deux de ces neutrinos produit une paire de photons ou bien une autre paire particule-antiparticule, par exemple un électron et un positon. Dans le premier cas, l'objectif est de chercher un excès de photons. Or comme les particules de matière noire sont sans doute dotées d'une vitesse faible, on s'attend que leur annihilation mutuelle donne naissance à des photons situés dans une bande d'énergie relativement étroite. C'est à la recherche d'une sorte de raie d'émission plus ou moins marquée que se consacrent de nombreux astrophysiciens, mais là encore, la difficulté est d'extraire un signal de matière noire du « bruit » de haute énergie produit par des processus astrophysiques bien plus conventionnels.

À l'échelle galactique, beaucoup de chercheurs pensent que les rayons X proviennent de sources conventionnelles telles des éléments ionisés, tandis que les rayons gamma proviennent plutôt de sources plus ordinaires, telles que des **pulsars**. Sans nous hasarder à affirmer que la piste des neutrinos magnétiques stériles est la seule bonne voie, nous lui accordons autant de crédit, sinon plus, que la piste des pulsars ou celle des processus atomiques faisant intervenir du phosphore, du soufre ou du chlore fortement ionisés.

Il y aurait un grand nombre de galaxies ultra-diffuses dans l'univers. Ce sont des galaxies dont la densité est basse. Une telle galaxie ayant une taille similaire à la Voie lactée compterait en moyenne cent fois moins d'étoiles visibles, ayant une très faible luminosité. Le télescope Subaru en a détecté un grand nombre dans l'amas de la Chevelure de Bérénice. On suppose qu'elles doivent contenir des quantités importantes de matière noire (jusqu'à 98%) pour que leur structure résiste aux forces de marées engendrées par les galaxies normales voisines, sans contenir beaucoup d'étoiles et de matière visible. Cependant deux galaxies ultra-diffuses contenant très peu de matière noire dans le groupe NGC 1052-DF2 semblent avoir été découverte en 2018 et 2019, remettant potentiellement en cause les modèles théoriques de matière noire [152, 153].

En périphérie de la Voie Lactée, il existe des « galaxies naines ultradiffuses ». Autrement dit, des galaxies de très petite taille et très pauvres en étoiles, comme Eridamus 11 [154]. Il y aurait dans ces galaxies naines mille fois plus de matière noire que de matière visible qui constitue le gaz et les étoiles. Si cette matière noire est faite de neutrinos magnétiques stériles, ils doivent de temps à autre être plongés dans un **champ magnétique provenant des étoiles**. Les charges magnétiques des neutrinos reçoivent alors de l'énergie cinétique de ces champs magnétiques, ce qui amène tôt ou tard à l'annihilation de ces particules et à l'apparition d'une lueur de rayons X.

Dans ce cas-ci, un processus d'amplification dynamo des champs magnétiques peut être à l'œuvre : au début de 2020, le XMM-Newton de l'ESA a découvert du gaz brûlant dans le halo de la Voie Lactée : le gaz qui se cache dans le halo atteint des températures beaucoup plus chaudes que ce que l'on pensait auparavant et a une composition chimique différente de celle prévue [155]. Le halo de la Voie lactée (et de n'importe quelle galaxie) contiendrait non pas un mais trois composants différents de gaz chaud, le plus chaud d'entre eux étant un facteur dix plus chaud que ce que l'on pensait auparavant.

De faibles lueurs de rayons gamma ont été détectés au cœur de la Voie Lactée ou en provenance du centre des amas de galaxies. Ce qui peut laisser supposer des neutrinos à charge magnétique qui possèdent une masse faible (de l'ordre du KeV). Un neutrino magnétique peut se désintégrer spontanément. La rencontre de la matière noire avec un champ magnétique pourrait en outre accentuer cette désintégration. Tout comme elle pourrait engendrer des collisions neutrinos-antineutrinos.

La lumière que produit l'annihilation de la matière noire est composée de photons ultra-énergétiques, les rayons gamma, dont l'énergie serait comparable à la masse des particules de matière noire. Une lueur plus grande de rayons gamma au cœur de la Voie Lactée pourrait émaner des neutrinos magnétiques stériles de masse plus forte de la matière noire. Dans le cas de l'hypothèse des WIMPs, cette masse est comprise entre environ dix et dix mille fois la masse d'un proton, ce qui correspond à une énergie entre 10 GeV et 10 TeV [49]. L'éclat de ces désintégrations pourrait également signifier que l'état de charge est restauré, le code 137 est réintégré et l'électromagnétisme est reconstitué.

Même si le taux d'annihilation dans l'univers est très faible en moyenne, certaines *annihilations résiduelles* pourraient se produire dans des régions de l'univers affichant une surdensité, à l'instar des halos galactiques. Des astrophysiciens ont suggéré que le rayonnement produit par l'annihilation de la matière noire pouvait être observé avec des télescopes à rayon gamma, ce qui est un moyen indirect de prouver l'existence de la matière noire. Cette dernière est plus grande dans les amas de galaxies, principalement dans la partie centrale de l'amas. Dans ces amas, il y a plus d'étoiles, et certainement plus de trous noirs [74].

Nous supposons que ces trous noirs ont émis des neutrinos magnétiques stériles qui forment cette matière noire dominante. Ils sont la poussière des trous noirs.

Les astrophysiciens ont observé que c'est à proximité d'objets célestes massifs - naines blanches, étoiles à neutrons, supernova, quasar, pulsar- que les halos de matière noire sont presque inexistants. Néanmoins, en raison de la charge magnétique des neutrinos stériles, on pourrait s'attendre à une **concentration de halos** autour de ces objets célestes

qui ont une densité élevée et un champ magnétique puissant. Comme ce n'est pas le cas, on pourrait voir un danger mortel pour la thèse de la charge magnétique associée aux neutrinos stériles. Cet argument est spécieux parce que quelle que soit la nature des particules sombres, leurs nuages de faible densité sont immédiatement absorbés par la gigantesque attraction gravitationnelle de ces objets célestes ultra massifs. Et si nous faisons temporairement abstraction de l'attraction gravitationnelle, la charge magnétique des neutrinos stériles ne forcerait-elle pas la matière noire à se concentrer autour de ces objets magnétiques ? Certainement pas, parce que le champ magnétique B de l'étoile, s'étendant sur la distance L du halo, transférerait la fraction gBL de son énergie totale aux neutrinos magnétiques stériles relativement au repos. Ces derniers gagneraient une énergie cinétique considérable et s'écarteraient dans un sens ou dans l'autre. Ainsi, la charge magnétique des neutrinos stériles ne pourrait pas forcer la matière noire à façonner un halo autour d'un objet magnétique dense comme une étoile à neutrons, un pulsar ou un magnétar [156], et c'est ce qui est trouvé.

7,3 Le neutrino magnétique stérile lié à la protection et à la distribution de la matière visible et invisible

1) La forme du champ gravitationnel de la Galaxie, reliée à la distribution de la matière visible et invisible, est plutôt sphérique. Or la matière visible de la Voie Lactée, y compris le gaz d'hydrogène moléculaire, est répartie dans un disque aplati. La matière ordinaire ne peut donc pas conférer au potentiel gravitationnel de la Galaxie sa sphéricité. L'hypothèse de la matière noire s'impose donc, non seulement en ce qui concerne la sphéricité du potentiel gravitationnel de la Voie Lactée, mais aussi pour expliquer la dynamique des galaxies et des structures à plus grande échelle [157].

Cette distribution supposée de matière noire fonctionne pour un bon nombre de galaxies spirales. Les simulations numériques de formation des galaxies et de leur halo de matière noire montrent que ce dernier présente une densité sphérique et inversement proportionnelle à la distance r au centre de la galaxie, c'est-à-dire un profil de densité en $1/r$. En toute rigueur, la densité ne devient pas infinie au centre : elle est remplacée par un petit cœur de densité constante [158, 159]. En supposant ce halo de matière noire doté d'un petit cœur et d'un profil en $1/r$, on obtient le bon profil de vitesse du gaz dans certaines galaxies.

Nous pouvons imaginer que le halo de matière noire, qui est un composant hypothétique d'une galaxie qui enveloppe le disque galactique et s'étend bien au-delà des limites visibles de la galaxie, forme une sorte de ceinture protectrice à l'instar des ceintures Van Allen. On peut penser que les neutrinos associés à un pôle magnétique positif et les neutrinos associés à un pôle magnétique négatif qui constituent la matière noire se sont polarisés pour modeler un champ magnétique

noir autour de la galaxie. Des vents de matière noire, composés de neutrinos magnétiques stériles, arrivent des autres galaxies. De tels vents sont des plasmas. Lorsque ces vents ionisés plus ou moins chauds traversent le halo, ils ne sont autres que des pôles magnétiques, positifs et négatifs, coupant des lignes de force. Ils sont donc capables de produire de l'électricité noire. En piégeant les vents de matière noire, le champ magnétique noir dévie ces monopôles magnétiques énergétiques et protège l'atmosphère gazeuse de la galaxie de la destruction. On peut aussi anticiper des vents qui passent à travers le halo et ajoutent de l'énergie qui accélère les neutrinos non polarisés près de la galaxie. Lorsque ces particules à charge magnétique interagissent avec les gaz d'hydrogène qui enveloppent la galaxie, elles transmettent leur énergie et font briller les gaz.

2) Mais cette distribution de matière noire ne fonctionne pas pour un grand nombre de galaxies, notamment celles dites à faible brillance de surface [160- 162]. Les astrophysiciens ont remarqué, depuis le début du siècle, une corrélation entre la taille du cœur de densité constante de matière noire nécessaire pour obtenir la bonne dynamique de rotation du gaz et la taille du disque de matière baryonique [163]. En d'autres termes, plus la galaxie est diffuse et étendue, plus son cœur de densité constante de matière noire est lui-même étendu [164]. Il semble donc y avoir une relation directe entre la distribution de la matière ordinaire et celle de la matière noire. Or une corrélation aussi forte est difficile à expliquer si la matière noire et la matière baryonique n'interagissent que par la gravitation ou d'autres forces très faibles.

Pour expliquer la corrélation entre le cœur de la matière noire et la distribution de la matière ordinaire, il faut un couplage entre ces deux composantes de la matière. Dans le cadre de notre modèle sur les neutrinos magnétiques stériles, ces derniers pourraient être sensibles aux champs magnétiques ordinaires. Ces galaxies sont très diffuses et très peu d'étoiles s'y forment ; le gaz y prédomine, des gaz chauds, tel l'hydrogène moléculaire (H_2), difficiles à observer [56].

Selon nous, ces gaz peuvent renfermer beaucoup de poussière ferromagnétique qui peuvent interagir avec les neutrinos magnétiques stériles de la matière noire. Nous supposons que, dans les galaxies à faible brillance de surface, l'aspect magnétique des baryons et l'aspect magnétique des neutrinos stériles issus des trous noirs s'attirent, se harponnent et échangent de l'énergie.

C'est ce genre d'interaction, ou de cramponnement (agrippement), à l'échelle cosmologique, non prévu par les simulations de formation galactique, qui explique la relation directe entre la répartition de la matière ordinaire et celle de la matière noire. Une forte corrélation devient facile à expliquer si la matière baryonique et la

matière noire interagissent avec la force magnétique noire, et non seulement par la gravitation ou d'autres forces faibles.

3) Mais pour comprendre la relation entre les champs magnétiques et les neutrinos stériles à charge magnétique, revenons dans les années 1940, au moment où des savants (H. Alvin [165], F. Hoyle [166], Bondy & Gold [167], etc.) comprirent que les forces électromagnétiques devaient avoir joué un rôle important dans la formation des systèmes astronomiques. Avant que fut prouvé l'existence d'un champ magnétique dans les galaxies, l'astronome soviétique V. Dombrovski [168] et son collègue américain W.A. Hiltner [169] observèrent indépendamment un phénomène curieux : la lumière d'une étoile, passant par le rayon visuel, c'est-à-dire suivant la ligne qui va de l'astre à l'œil d'un observateur, s'avérait polarisée, et cela d'autant plus que le rayon de lumière rencontrait plus de matière sombre sur son chemin. Les astrophysiciens se demandèrent pourquoi en est-il ainsi. Qu'importe que la matière sombre retienne la lumière, ne doit-elle pas simplement l'affaiblir au lieu de la polariser ? La seule explication que purent concevoir les spécialistes était que la matière sombre consistait peut-être en une accumulation de grains de poussière ferromagnétique. Sous l'effet du champ magnétique, les grains de poussière polarisaient la lumière [170].

Notre explication est que la matière noire consiste en une accumulation de neutrinos magnétiques stériles effilés comme de minuscules aiguilles. Sous l'effet du champ magnétique, les neutrinos s'orientent pareillement dans l'espace et polarisent la lumière.

7,4 Lueurs des rayons gamma dans le noir : matière noire ou pulsars

En 2009, Dan Hooper, théoricien du Laboratoire national des accélérateurs de Fermi (Fermilab) à Batavia, Illinois et sa collègue Lisa Goodenough ont découvert la lueur inexpliquée des rayons gamma tout en étudiant les données du télescope spatial à rayons gamma Fermi de la NASA [171]. Un excès de rayons gamma à une énergie de 130 GeV dans la direction du centre galactique. Une explication difficile à trouver dans le cadre de modèles astrophysiques classiques, mais qui fait écho à des modèles de physique des particules dits « modèles supersymétriques ». Ils ont immédiatement suggéré que cette lueur qui enveloppe le cœur de la galaxie pourrait être une preuve de matière noire [172]. L'idée inverse est d'attribuer une origine astrophysique à ces photons de haute énergie et de présupposer qu'ils proviendraient d'un ensemble de sources individualisées comme les pulsars. En 2015, Tracy Slatyer [173], astrophysicienne des particules au Massachusetts Institute of Technology (MIT) à Cambridge, et ses collègues ont semblé démontrer que tout l'excès du centre galactique pourrait provenir d'une population de pulsars trop faibles pour que Fermi puisse les résoudre individuellement, ce qui eut l'effet de refroidir l'intérêt pour la matière noire. Toutefois, en 2019, Slatyer et postdoc MIT Rebecca Leane

ont trouvé un problème avec les différents modèles spatiaux ou modèles utilisés pour soustraire les autres contributions au flux de rayons gamma, ravivant l'espoir d'un vrai signal de matière noire [174].

Distinguer entre matière noire ou matière ordinaire nécessite de pouvoir cartographier un éventuel excès de photons de haute énergie avec une bonne résolution angulaire, mais malheureusement les télescopes qui pourraient convenir comptent parmi les plus myopes qui soient. Des théoriciens des particules disent que l'excès du centre galactique restera probablement trop ambigu pour être analysé de manière décisive. Néanmoins, plus récemment, on a observé des rayons de l'ordre du keV qui implique des particules plus légères. Ce résultat a été obtenu dans une bande d'énergie jusque-là assez peu explorée, dans le domaine du kiloelectronvolt. Entre 2014 et 2016, plusieurs équipes d'astrophysiciens ont observé en provenance du centre des amas de galaxies une raie spectrale de rayons X (gamma) à l'énergie d'environ 3,5 keV. Ces excès d'énergie ont été détectés par plusieurs télescope X, l'europpéen *XMM-Newton* puis le japonais *Hitomi* [175]. Cette raie spectrale précise ne correspond à rien de connu et semble bien réelle, c'est-à-dire statistiquement significative. Selon Kevork Abazajian, un physicien américain qui travaille à l'université de Californie, la seule hypothèse restante pour expliquer l'existence de ces photons semblant provenir de là où il y a le plus de matière noire, est qu'ils proviendraient de la désintégration de neutrinos **stériles**. Il considère que toute la matière noire est constituée de tels neutrinos stériles de 7 keV, Comme ils sont un peu lourds, ils se désintégreraient en produisant des neutrinos « normaux » et des photons. Il a démontré dans un article par quel mécanisme des neutrinos stériles de 7 keV peuvent être produits et être à l'origine des raies gamma inconnues observées à 3,5 keV, une énergie qui serait la moitié de leur masse [176].

Dessert *et al.* [177] ont testé l'hypothèse d'une ligne d'émission de rayons X astronomique non identifiée, interprétée comme étant causée par la désintégration d'une particule de matière noire, à l'aide d'observations du télescope spatial XMM-Newton (mission de rayons multiples à rayons X). En analysant les régions de ciel blanc avec un temps d'exposition total d'environ un an, ils n'ont trouvé aucune preuve de la ligne prévue, ce qui exclue l'interprétation de la matière noire précédemment proposée.

8 Conclusion

L'existence ou la non-existence de matière noire dans l'univers est une question d'importance dans les domaines de la cosmologie et de la physique des particules. Depuis que l'existence de grandes quantités de matière noire dans l'univers a été proposée afin de rendre compte de la condensation de la matière en galaxies, les physiciens ont trouvé de plus en plus de preuves qu'elle est réelle, mais pas un seul signe de la substance elle-

même. Omniprésente à travers le cosmos et insaisissable, elle a résisté à toute tentative de détection, que ce soit celles des astronomes ou des physiciens des particules. Loin d'abandonner, ils essaient beaucoup de choses jusqu'à ce qu'ils trouvent quelque chose qui fonctionne, en ayant à l'esprit que les résultats négatifs sont tout aussi importants que les résultats positifs. Depuis une quarantaine d'années, la plupart s'accordent sur le fait que l'essentiel de la masse manquante ne se trouve pas sous forme condensée (Mach). L'idée communément admise depuis est qu'une grande partie de la masse noire est constituée d'une substance non baryonique. À cet égard, nous avons proposé pour la matière noire l'existence d'une grande quantité de neutrinos et d'antineutrinos associés à la charge magnétique. Et comme l'existence de ce type de neutrino magnétique stérile est inexplicable dans l'état actuel de nos connaissances, nous avons modifié les lois de l'électromagnétisme connu pour expliquer la métamorphose de la charge électrique en charge magnétique dans le trou noir. **Selon notre modèle, ces neutrinos proviendraient des trous noirs : ce ne sont pas les trous noirs qui constituent la matière noire mais essentiellement les neutrinos à charge magnétique engendrés par ces trous noirs** [8]. Outre que cette provenance indique son mode de production et ses propriétés physiques (sect. 4), **notre modèle tente de définir la nature des interactions de ces neutrinos magnétiques issus des trous noirs avec la matière ordinaire : elles aboutissent à une production de neutrinos standards**, contrairement à la pensée dominante actuelle où des états stériles en interaction avec des neutrinos actifs produisent des neutrinos stériles (sect. 5). Notre modèle tente aussi de savoir si la matière noire peut s'annihiler avec elle-même: les rayons gamma peuvent être un sous-produit de l'annihilation ; l'anapole, la bande de Möbius ainsi que des neutrinos, des particules d'antimatière peuvent avoir des énergies très inférieures à celle des rayons gamma (sect. 6). Les neutrinos stériles magnétiques interagiraient avec la force faible par le biais des champs magnétiques qui façonnent le cosmos. Ces neutrinos constituent les halos qui ceignent les galaxies. Ils reçoivent l'énergie des champs magnétiques provenant des étoiles des galaxies extérieures ou des pulsars et seraient liés à la distribution de la matière visible et invisible. L'énergie magnétique, convertie en énergie cinétique, qu'ils reçoivent des champs magnétiques pourrait provoquer des lueurs de rayons gamma dans le noir (sect. 7).

Ce modèle peut-il être prouvé scientifiquement ? Notre modèle est loin d'être parfait. Mais aucune construction actuelle avec d'autres particules ne permet d'interpréter de façon cohérente tous les faits observationnels expliqués par l'hypothèse de la matière noire. Démontrer l'existence de la matière noire de cette façon est bien plus qu'un caprice académique, c'est la manifestation d'un changement décisif de paradigme de la physique. Nous pensons, malgré qu'on n'ait trouvé aucune particule, que la matière noire existe dans la mesure où elle fournit l'échafaudage invisible qui maintient ensemble toutes les structures astrophysiques de l'univers. Mais nous réfutons le cadre théorique ayant mené

à croire que cette matière noire existait depuis le début de l'univers. Rêvons que la physique mettra en évidence plusieurs prédictions qui découlent de l'existence des neutrinos magnétiques stériles et qu'elles seront inexplicables dans toute théorie qui ne fait pas cette hypothèse.

Références

- [1] Dobrescu, B., Lincoln, D., Pour la science, Hors-série no 97, p. 26 (2017).
- [2] NASA, *WMAP Produces New Results* (2015).
- [3] Bahcall, N.A., Fan, X. (1998) *A lightweight universe?* Proc Natl Acad Sci USA 95(11), p. 5956–5959.
- [4] Roberts, M.S., Rots, A. H. (1973) *Comparison of Rotation Curves of Different Galaxy Types*, Astronomy and Astrophysics, Vol. 26, p. 483-485.
- [5] Bagdoo, R. (2022) *Galaxy Rotation Curves Traced Out by the Theory of Relation*, European Journal of Applied Sciences, Vol. 10, No. 2.
DOI:10.14738/aivp.102.11906
- [6] Zwicky, Fritz (1929) PNAS, 15, 773-779. <https://doi.org/10.1073/pnas.15.10.773>
- [7] Bosma, A. (1998) *The Dark Matter problem*. arXiv:astro-ph/9812015v1
DOI: 10.1023/A:1008366614769
- [8] Rubin, Vera C., Ford, W. Kent Jr. (1970) *Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions*, Astrophysical Journal, vol. 159, 379-403
DOI: 10.1086/15031
- [9] Rubin, Vera C., Ford, W. Kent Jr., Thonnard, Norbert (1978) *Extended rotation curves of high- luminosity spiral galaxies. IV. Systematic dynamical properties, Sa through Sc*, The Astrophysical Journal, 225:L107-L111.
- [10] Rubin, Vera C., Ford, W. Kent Jr., Thonnard, Norbert (1980) *Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605 (R=4kpc) to UGC 2885 (R=122kpc)*, The Astrophysical Journal, 238:471–487.
- [11] Ikonoff, R., Rey, B., *L'Univers caché*, Science & Vie. No. 1224, 60-81 (2019).
- [12] White S.D.M., Navarro J.F., Evrard A.E., Frenk C.S. (1993) *The baryon content of galaxy clusters: a challenge to cosmological orthodoxy*, Nature, 366, p. 429–433.
- [13] Riazuelo, A. (2011) Pour la Science, Dossier, No. 71, 66.
- [14] Bahcall, N.A. (2015) *Dark matter universe*, PNAS, 112 (40) 12243-12245.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1516944112>
- [15] Peskin, M.E. (2015) *Supersymmetric dark matter in the harsh light of the Large Hadron Collider*, PNAS, 112:12256–12263.
- [16] Hooper, Dan (2006) *Dark Cosmos in Search of our Universe Missing Mass and Energy*, Smithsonian Books, 75-79, 95-99.
- [17] Martin, S.P., *A Supersymmetry Primer*, 95-114, 144 (2016)
[arXiv:hep-ph/9709356v7](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9709356v7) doi: [10.1142/9789812839657_0001](https://doi.org/10.1142/9789812839657_0001)
- [18] Funk S. (2015) *Indirect detection of dark matter with γ rays*, PNAS, 112, 12264–12271.
- [19] Rosenberg, L.J. (2015) *Dark matter QCD-axion searches*, Proceedings of the

- National Academy of Sciences USA, 112, 12278–12.
- [20] Tracy, M. (2021) *MicroBooNE experiment's first results show no hint of a sterile neutrino*, Fermilab, media@fnal.gov, 224-290-7803.
- [21] Bagdoo, R. (2020) What Connects Dark Matter and Black Holes? *Journal of Modern Physics*, **11**, 168-195.
<https://doi.org/10.4236/jmp.2020.112011>
- [22] Panek, R. (2011) *The 4% Universe*, First Mariner Books, 192, 193.
- [23] Chui, Glenda (2021) *Is dark matter cold, warm or hot?*, Symmetry.
<https://www.symmetrymagazine.org/article/is-dark-matter-cold-warm-or-hot>
- [24] Ratner, P. (2018) *Why the number 137 is one of the greatest mysteries in physics*, *Hard Science*. <https://bigthink.com/hard-science/number-137-physics/>
- [25] Feynman, Richard (1987) *Lumière et matière*, InterÉditions, 171.
- [26] Dirac, P.A.M. (1931) *Quantised Singularities in the Electromagnetic Field*.
 Proceedings of the Royal Society of London. Series A 133, 60, p. 9.
- [27] Ronen, Y., Cohen, Y., Kang, J.-H., Haim, A., Rieder, M.-T., Heiblum, M., Mahalu, D., Shtrikman H. (2016) Charge of a quasiparticle in a superconductor, PNAS, 113 (7) 1743-1748. <https://doi.org/10.1073/pnas.1515173113>
- [28] Siegel, E. (2014) *Nature is not symmetric*.
<https://medium.com/starts-with-a-bang/nature-is-not-symmetric->
- [29] Adair, R. K. (1987) *The Great Design*, Oxford University Press, New York, 247 Note 2.
- [30] Équations de Maxwell, Wikipédia.
https://fr.wikipedia.org/wiki/équations_de_Maxwell
- [31] Serway, Raymond A., *Électricité et magnétisme*, Les Éditions HRW Itée, 248, 249 (1986).
- [32] Benson, H. (1991) *University Physics*, John Wiley & Sons, Inc., 330, 681, 682, 691.
- [33] Dark photon, Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Dark_photon
- [34] Alonso-Álvarez, G., Ertas, F., Jaeckel, J., Kahlhoefer, F., Thormaehlen, L. J. (2020) *Hidden Photon Dark Matter in the Light of XENON1T and Stellar Cooling*.
 arXiv:2006.11243v3 [hep-ph]
- [35] Fabbrichesi, M., Gabrielli, E., Lanfranchi, G. (2020) *The Dark Photon*,
 SpringerBriefs in Physics. DOI:10.1007/978-3-030-62519-1
 arXiv:2005.01515v3 [hep-ph]
- [36] Essig, R., *et al.* (2013) *Dark Sectors and New, Light, Weakly-Coupled Particles*.
 arXiv:1311.0029v1 [hep-ph]
- [37] Rajantie, A. (2016) *The search for magnetic monopoles*, *Physics Today* 69, 10, 40 ;
 doi: 10.1063/PT.3.3328 <https://doi.org/10.1063/PT.3.3328>
- [38] *Why Magnetic Monopoles SHOULD Exist* (2021) YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=dw1sek6SUY>
- [39] 't Hooft, G. (1974) *Magnetic Monopoles in Unified Gauge Theories*, *Nucl.Phys.B* 79, 276-284. • DOI: 10.1016/0550-3213(74)90486-6
- [40] Manton, N.S. (1977) *The Force Between 't Hooft-Polyakov Monopoles*,
Nucl.Phys.B 126, 525-541. DOI: 10.1016/0550-3213(77)90294-2

- [41] Cameron, R.P., Barnett, S.M. (2012) *Electric–magnetic symmetry and Noether's theorem*, New Journal of Physics, Vol. 14, 123019.
- [42] Agullo, I., et al. (2017) *Electromagnetic Duality Anomaly in Curved Spacetimes*, Physical Review Letters. DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.111301
- [43] Cownden, B., Frey, A.R. (2018) *Variations on the Dirac string*, Phys. Rev. D 98, 105013. DOI:10.1103/PhysRevD.98.105013. arXiv:1807.07401v2 [hep-th]
- [44] Danger Julius, T'. (2016) *The mysterious missing magnetic monopole*, The Conversation. <https://phys.org/news/2016-08-mysterious-magnetic-monopole.html>
- [45] Rajantie, A. (2012) *Magnetic monopoles in field theory and cosmology*, Philosophical Transactions of the Royal Society A, 370, 5705–5717. doi:10.1098/rsta.2011.0394
- [46] MIT News (2022) A new upper limit on the mass of neutrinos. <https://news.mit.edu/2021/new-upper-limit-mass-neutrinos-0214>
- [47] Rini, M. (2022) *Maximum Neutrino Mass Drops Again*, Physics, Feb. 14, 15, 25. <https://physics.aps.org/articles/v15/25>
- [48] de Salas, P.F., Gariazzo, S., Mena, O., Ternes, C.A., Tortola, M. (2018) *Neutrino Mass Ordering from Oscillations and Beyond: 2018 Status and Future Prospects*, Frontiers in Astronomy and Space Sciences. Doi.org/10.3389/fspas.2018.00036
- [49] Drewes, M. (2013) *The Phenomenology of Right Handed Neutrinos*, International Journal of Modern Physics E, 22, 1330019. DOI: 10.1142/S0218301313300191. arXiv:1303.6912v3 [hep-ph]
- [50] Luminet, Jean-Pierre (1987) *Trous Noirs*, Belfond/sciences, p. 224-226, 244.
- [51] Wikipédia, *Neutrino stérile*. Site :france2.wiki
- [52] Wikipedia, *Cosmic microwave background*. https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_microwave_background#cite_note-35
- [53] Harrison, E. R. (1970). *Fluctuations at the threshold of classical cosmology*. Physical Review D. 1 (10): 2726–2730. doi:10.1103/PhysRevD.1.2726
- [54] Hinshaw, G., et al. (2007) *Three-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: temperature analysis*, Astrophysical Journal Supplement Series. 170 (2): 288–334. arXiv:astro-ph/0603451. doi:10.1086/513698. S2CID 15554608.
- [55] Planck Collaboration Team (2016). *Planck intermediate results. XXX. The angular power spectrum of polarized dust emission at intermediate and high Galactic latitudes*. Astronomy & Astrophysics. 586 (133): A133. arXiv:1409.5738. doi:10.1051/0004-6361/201425034. S2CID 9857299.
- [56] Famaey, B. (2020) *La matière noire*, Pour la Science, Hors-Série, No 106, 3, 46-49.
- [57] *Stellar Black Hole*, Cosmos. <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/s/Stellar+Black+Hole>
- [58] *Supermassive Black Hole*, Cosmos. <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/s/supermassive+black+hole>
- [59] Fontez, M. Ikonikoff, R. Grousson, M. Rey, B. (2018) Science & Vie. No. 1204, 40-56.

- [60] Klesman, A. (2019) *What are primordial black holes?*
<https://astronomy.com/news/2019/07/primordial-black-holes>
- [61] Park, J. (2019) *What are intermediate-mass black holes?*
<https://astronomy.com/news/2019/07/what-are-intermediate-mass-black-holes>
- [62] *Reionization*, Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Reionization>
- [63] Planck Collaboration, Ade, P.A.R., *et al.* (2014) *Planck 2013 results. XIII. Galactic CO emission*, Astronomy & Astrophysics, Volume 571, A1.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321529>. arXiv:1303.5073v2 [astro-ph.GA]
- [64] Benmakhlouf, M. (2021) *Inédit : de la lumière détectée derrière un trou Noir*, National Geographic.
<https://www.nationalgeographic.fr/espace/inedit-de-la-lumiere-detectee-derriere-un-trou-noir>
- [65] Habib, S. (1997) *Dark Matter and Massive Neutrinos*, Los Alamos Science No 25.
<https://sgp.fas.org/othergov/doe/lanl/pubs/00326616.pdf>
- [66] Lachièze-Rey, M. (1986) *Chaos et Cosmos*, Le Mail, 62-68.
- [67] Zeldovich, Y., Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Yakov_Zeldovich
- [68] Zel'dovich, Y.B., Novikov, I.D. (1971) *Stars and Relativity*, Dover Pub., Inc., p. 70, 144-151.
- [69] Hawking, S. (1989) *Une Brève Histoire du Temps*, Flammarion, 129-144.
- [70] Hawking, S. (1971) *Gravitationally collapsed objects of very low mass*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 152, Issue 1, p. 75–78.
doi:10.1093/mnras/152.1.75.
- [71] Barrau, A., Gorecki, A. (2011) *Pour la Science*, Dossier, No. 71, 30-36.
- [72] *A New Kind of Black Hole*. NASA's Goddard Space Flight Center
https://www.nasa.gov/vision/universe/starsgalaxies/Black_Hole.html
- [73] O'Callaghan, J. (2019) *How did supermassive black holes grow so fast?*, Horizon
<https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/how-did-supermassive-black-holes-grow-so-fast>
- [74] Bertone, G. (2013) *Le mystère de la matière noire*, Dunod, 100-102, 148-9, 160-163.
- [75] Muezca, M. (2020) *Ciel & Espace*, No 570, 53-56.
- [76] Bellido, J.G., Clesse, S. (2020) *La piste des trous noirs*, Pour la Science, Hors-Série, No **106**, 64-71.
- [77] Guo, Q., *et al.* (2019) *Further evidence for a population of dark-matter-deficient dwarf galaxies*, Nature Astronomy. DOI: 10.1038/s41550-019-0930-9
- [78] *Hawking radiation*, Wikipedia.
https://www.cs.mcgill.ca/~rwest/wikispeedia/wpcd/wp/h/Hawking_radiation.htm
- [79] Fore, M. (2019) *Stephen Hawking Was Right: Black Holes Can Evaporate, Weird New Study Shows*, Livescience.
<https://www.livescience.com/65683-sonic-black-hole-spews-hawking-radiation.html>
- [80] Begelman, M., Rees, M. (1998) *Gravity's fatal attraction*, Scientific American Library, 223-225.
- [81] Rovelli, C. (2020) *Where does the stuff that falls into a black hole go?* NewScientist,

- Space, 28 October. <https://www.newscientist.com/article/mg24833060-500-carlo-rovelli-where-does-the-stuff-that-falls-into-a-black-hole-go/>
- [82] Wald, M. Robert (1992) *Space, Time, and Gravity*, The University of Chicago Press, 86-89, 127, 130-139.
- [83] Black-body radiation, Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Black-ody_radiation
- [84] Bennett, C. L. (2013) *Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Final Maps and Results*. arXiv:1212.5225v3 [astro-ph.CO] <https://doi.org/10.1088/0067-0049/208/2/20>
- [85] Weinberg, Steven (1978) *Les trois premières minutes de l'univers*, Éditions du Seuil, Points, 78.
- [86] Bagdoo, R. (2019) *The Equation of the Universe* (According to the Theory of Relation). *Journal of Modern Physics*, 10, 310-343. <https://doi.org/10.4236/jmp.2019.103022>
- [87] Hawking, S.W. (1975) *Particle creation by black holes*, *Communications in Mathematical Physics* vol. 43, p. 199–220.
- [88] Wikipedia, *Hawking radiation*. https://en.wikipedia.org/wiki/Hawking_radiation#:
- [89] Wikipedia, *Schwarzschild radius*. en.wikipedia.org/wiki/Schwarzschild_radius
- [90] Nimtz, G. (2011) *Tunneling Violates Special Relativity*, *Foundations of Physics*, 41, 1193-1199. arXiv:1003.3944v1. <https://doi.org/10.1007/s10701-011-9539-2>
- [91] Davies, P. C. W. (2005). *Quantum tunneling time*, *American Journal of Physics*, 73 (1): 23–27. arXiv:quant-ph/0403010. doi:10.1119/1.1810153. S2CID 119099861.
- [92] Islam, J. N. (1983) *Le destin ultime de l'univers*, Cambridge University Press 104, 109, 113-117.
- [92] Verma, Rishu, Kashav, Monal, Verma, Surender, Chauhan, B. C. (2021) *Scalar Dark Matter in A4 based texture one-zero neutrino mass model within Inverse Seesaw Mechanism*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.03074>
- [94] Boyarsky, A., Drewes, M., Lasserre, T., Mertens, S., Ruchayskiy, O. (2018) *Sterile Neutrino Dark Matter*, p. 14, 31, 40. 42. arXiv:1807.07938v2 <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2018.07.004>
- [95] Dodelson, S., Widrow, L. M. (1994) *Sterile Neutrinos as Dark Matter*, *Phys.Rev.Lett.*72:17-20. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.72.17> arXiv:hep-ph/9303287v1
- [96] Reeves, H. (1988) *Patience dans l'azur*, Éditions du Seuil, Points, p. 275.
- [97] Wikipédia, *Mécanisme de see-saw*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Mécanisme_de_see-saw
- [98] Peter, P., Uzan, J.-P. (2009) *Primordial Cosmology*, Oxford University Press, p. 432.
- [99] P. Langacker (1989) University of Pennsylvania Report No. UPR 0401T. <https://web.sas.upenn.edu/pgl/selected-publications/>
- [100] Dolgov, A. (1981) *Neutrinos in the Early Universe*, *Soviet Journal of Nuclear Physics*, 33, p. 700.
- [101] Manohar, A. (1987) *Statistical Mechanics of Noninteracting Particles*, *Physics*

- Letters B 186, 370 (1987). DOI: 10.1016/0370-2693(87)90310-8
- [102] Barbieri, R., Dolgov, A. (1990) *Bounds on sterile neutrinos from nucleosynthesis*, Physics Letters B, Vol. 237, Issues 3–4, p. 440-445.
- [103] Enqvist, K., Kainulainen, K., Maalampi, J. (1992) *Stringent cosmological bounds on inert neutrino mixing*, Nuclear Physics B, Vol. 373, Issue 2, p. 498-528.
- [104] Cline, J.M. (1992) *Constraints on almost-Dirac neutrinos from neutrino-antineutrino oscillations*, Physical Review Letters, 68, p. 3137.
- [105] Aad, G. *et al.* (2012) *Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC*, ATLAS Collaboration, Phys.Lett.B, 716, 1-29. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020> [arXiv:1207.7214].
- [106] Chatrchyan, S. *et al.* (2012) *Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC*, The CMS Collaboration, Phys. Lett. B 716, 30. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021> [arXiv:1207.7235 v2].
- [107] nLab, *Yukawa coupling*. <https://ncatlab.org/nlab/show/Yukawa+coupling>
- [108] Barenboim, G., Park, W.-I., *Lepton number asymmetries and the lower bound on the reheating temperature*, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (2017). arXiv:1708.04899, doi:10.1088/1475-7516/2017/12/037.
- [109] Asaka, T., Laine, M., Shaposhnikov, M. (2007) *Lightest sterile neutrino abundance within the nuMSM*, Journal of High Energy Physics. Doi:10.1088/1126-6708/2007/01/091.
- [110] Lello, L., Boyanovsky, D. (2016) *The case for mixed dark matter from sterile neutrinos*, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. arXiv:1508.04077v2 doi:10.1088/1475-7516/2016/06/011.
- [111] Lello, L., Boyanovsky, D. (2015) *Cosmological Implications of Light Sterile Neutrinos produced after the QCD Phase Transition*, Physical. Review D. arXiv:1411.2690v2, doi:10.1103/PhysRevD.91.063502.
- [112] Bezrukov, F., Gorbunov, D., Shaposhnikov, M. (2009) *On initial conditions for the HotBig Bang*, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. arXiv:0812.3622, doi:10.1088/1475-7516/2009/06/029.
- [113] Lello, L., Boyanovsky, D., Pisarski, R. D. (2017) *Production of heavy sterile neutrinos from vector boson decay at electroweak temperatures*, Phys. Rev. D. arXiv:1609.07647, doi:10.1103/PhysRevD.95.043524.
- [114] Wikipedia, *Théorie de jauge*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Théorie_de_jauge
- [115] Miroschnichenko, A.E., *et al.*, *Seeing the unseen: observation of an anapole with dielectric nanoparticles nanoparticles* (2014). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.0299>
- [116] Gamboa, J., Mendez, F., Tapia, N. *Anapole Dark Matter Quantum Mechanics* (2019). arXiv:1909.04073v3. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.015013>
- [117] Stecker, F.W. (1971) *Cosmic Gamma Rays*, NASA, 3, 41, 47, 77-81.

- [118] Zel'Dovich, Y. B. (1958) *Electromagnetic Interaction with Parity Violation*, Soviet Phys. JETP, Vol: 6, 1184.
- [119] Wood, C. S., *et al.* (1997) *Measurement of Parity Nonconservation and an Anapole Moment in Cesium*, Science, 275, 1759-63. Doi: 10.1126/science.275.5307.1759.
- [120] Fitzpatrick, A. L., Zurek, K. M. (2010) *Dark Moments and the DAMA-CoGeNT Puzzle*, Physical Review D, Vol. 82, Iss. 7, 075004. arXiv:1007.5325
- [121] Frandsen, M. T., *et al.* (2013) *The unbearable lightness of being: CDMS versus XENON*, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. doi.org/10.1088/1475-7516/2013/07/023. arXiv:1304.6066
- [122] Wikipedia, *Toroidal moment*. https://en.wikipedia.org/wiki/Toroidal_moment
- [123] Ho, C. M., Scherrer, R. J. (2013) *Anapole Dark Matter*, Physics Letters B, 722, 341. arXiv:1211.0503v3. doi.org/10.1016/j.physletb.2013.04.039
- [124] Vanderbilt University Research News (2013) *New, simple theory may explain mysterious dark matter*. <https://news.vanderbilt.edu/2013/06/10/dark-matter/>
- [125] Heo, J. H. (2010) *Minimal Dirac Fermionic Dark Matter with Nonzero Magnetic Dipole Moment*, Physics Letters B 693, 255-258, arXiv:0901.3815v2. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2010.08.035>
- [126] Del Nobile, E., *et al.* (2014) *Direct detection of Light Anapole and Magnetic Dipole DM*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1401.4508> <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2014/06/002>
- [127] Gao, Y., Ho, C., Scherrer, R.J. (2014) *Anapole dark Matter at the LHC*, Physical Review D 89, 045006. doi.org/10.1103/PhysRevD.89.04500. arXiv:1311.5630v2
- [128] Bagdoo, R. (2011) *Inconstante cosmologique, Supernovæ Ia et décélération de l'expansion*, General Science Journal, viXra, ResearchGate, Internet Archive <http://archive.org/details/InconstanteCosmologiqueSupernovIaEtDclrationDeLexpansion>
- [129] Magnan, C. (2011) *Le théorème du jardin*, amds édition, 244, 262.
- [130] Wikipédia, *Ruban de Möbius*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Ruban_de_M%C3%B6bius
- [131] Müller, X. (2018) *Dark Matter, Elusive as Ever*, CNRS News. <https://news.cnrs.fr/articles/dark-matter-elusive-as-ever>
- [132] Davies, P. (1988) *Les forces de la nature*, Armand Colin, 10, 12, 104.
- [133] Cottingham, W.N., Greenwood, D.A. (2007) *An Introduction to the Standard Model of Particle Physics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- [134] Schechter, J., Valle, J. W. F. (1980) *Neutrino masses in SU(2) \otimes U(1) theories*, Physical Review D. 22 (9): 2227–2235. Bibcode:1980PhRvD..22.2227S. doi:10.1103/PhysRevD.22.2227.
- [135] Fukuda, Y., *et al.* (1998) *Measurements of the solar neutrino flux from Super-Kamiokande's first 300 days*. Physical Review Letters. 81 (6): 1158–1162. arXiv:hep-ex/9805021.

- [136] Bouquet, A., Monnier, E. (2008) *Matière sombre et énergie noire*, Dunod, 178.
- [137] Mohapatra, R. N., et al. (2007) *Theory of Neutrinos: a White Paper, Reports on Progress in Physics*. 70 (11): 1757–1867. arXiv:h ep-ph/0510213v2. doi:10.1088/0034-4885/70/11/R02. S2CID 119092531.
- [138] Esteban, I., et al. (2020) *The fate of hints: updated global analysis of three-flavor neutrino oscillations*. arXiv:2007.14792v1 <https://doi.org/10.1007/JHEP09%282020%29178>
- [139] Amsler, C., et al. (2008) *Review of Particle Physics*. Physics Letters B. Volume 667, Issues 1–5. p. 1-6. Bibcode:2008PhLB..667....1A. doi:10.1016/j.physletb.2008.07.018.
- [140] Hut, P., Olive, K. A. (1979) *A cosmological upper limit on the mass of heavy neutrinos*, Physics Letters B. 87 (1–2): 144–146. Bibcode:1979PhLB...87..144H. doi:10.1016/0370-2693(79)90039-X.
- [141] Goobar, A., Hannestad, S., Mörtsell, E., Tu, H. (2006) *The neutrino mass bound from WMAP 3 year data, the baryon acoustic peak, the SNLS supernovae and the Lyman- α forest*, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 0606:019, 2006. arXiv:astro-ph/0602155v2 doi:10.1088/1475-7516/2006/06/019. S2CID 119535760.
- [142] Di Valentino, E., Gariazzo, S., Mena, O. (2021) *On the most constraining cosmological neutrino mass bounds*, Physical Review D. 104: 083504. arXiv:2106.15267v3. doi:10.1103/PhysRevD.104.083504. S2CID 235669844.
- [143] Di Valentino, E., Melchiorri, A. (2021) *Neutrino Mass Bounds in the era of Tension Cosmology*, The Astrophysical Journal Letters, Volume 931, Number 2. arXiv:2112.02993
- [144] *The Mainz Neutrino Mass Experiment* (Press release). Archived from the original on 3 March 2016. http://www.physik.uni-mainz.de/exakt/neutrino/en_experiment.html
- [145] *Die Neutrino-Waage geht in Betrieb* Physik Journal. Physik News. pro-physik.de (Press release(in German)). 12 June 2018. Archived from the original on 16 June 2018. Retrieved 15 June 2018.
- [146] The KATRIN Collaboration (2022) *Direct neutrino-mass measurement with sub-electronvolt sensitivity*, Nature Physics 18, 160–166 . doi:10.1038/s41567-021-01463-1
- [147] Castelvechi, D. (2022) *How light is a neutrino? The answer is closer than ever*, Nature. doi:10.1038/d41586-022-00430-x. PMID 35165410. S2CID 246827702.
- [148] Kunze, K. E., *Cosmological Magnetic Fields*, Plasma Phys.Control.Fusion 55 (2013) 124026. doi.org/10.1088/0741-3335/55/12/124026. arXiv:1307.2153v1.
- [149] Zweibel, E. (1998) *De l'importance des champs magnétiques*, Recherche, Hors-Série, avril, 10, 90-93.
- [150] Zweibel, E., Heiles, C., *Magnetic fields in galaxies and beyond*, Nature, Vol. 385,

- p. 131-136 (1997).
- [151] Riazuelo, A. (2020) *Pour la Science*, Hors-Série, No **106**, 54.
- [152] Van Dokkum P. *et al.* (2018) *A galaxy lacking dark matter*. *Nature* 555, 629-632.
- [153] Van Dokkum P. *et al.* (2019) *A second galaxy missing dark matter in the NGC 1052 group*. *Astrophysical Journal Letters*, Vol. 874, No 1, L5-L13 (2019).
- [154] Wikipedia, *Eridanus II*. https://en.wikipedia.org/wiki/Eridanus_II
- [155] The European Space Agency (ESA) (2020) *XMM-Newton discovers scorching gas in Milky Way's halo*. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/XMM-Newton_discovers_scorching_gas_in_Milky_Way_s_halo
- [156] Wikipedia, *Magnétar*. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Magnétar>
- [157] Navarro, J.F., Frenk, C.S., White, F.D.M. (1996) *The Structure of Cold Dark Matter Halos*, *The Astrophysical Journal*, vol. 463, p. 563. DOI 10.1086/177173, arXiv astro-ph/9508025
- [158] Einasto, J. (1965), *Kinematics and dynamics of stellar systems*, Trudy Inst. Astrofiz. Alma-Ata 5, 87
- [159] Merritt, D., Graham, A., *et al.* (2006) *Empirical Models for Dark Matter Halos*, *The Astronomical Journal*, 132 (6): 2685–2700. arXiv:astro-ph/0509417. doi:10.1086/508988. S2CID 14511019.
- [160] Bothun, G., Impey, C., McGaugh, S. (1997) *Low-surface-brightness galaxies: hidden galaxies revealed*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 109: 745-758.
- [161] Gong, X., Tang, M., Xu, Z. (2021) *The Possible Equation Of State Of Dark Matter in Low Surface Brightness Galaxies*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.02583v3>
- [162] Jackson, R.A., *et al.* (2021) *The origin of low-surface-brightness galaxies in the dwarf regime*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.06581v2>
- [163] Kovacs, O.E., Bogdan, A., Canning, R.E.A. (2019) *Constraining the dark matter halo mass of isolated low-surface-brightness galaxies*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.05867>
- [164] de Blok, W. J. G., McGaugh, S. S. (1997) *The dark and visible matter content of low surface brightness disc galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical*
- [165] Hannes, A. (1942) *On the cosmogony of the solar system*, *Stockholms Observatorium Annuler*, vol. 14, pp.2.1-2.33 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1942StoAn..14....2A/abstract>
- [166] Hoyle, F. (1949) *On the Cosmological Problem*, *Journal: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 109, p365. <https://adsabs.harvard.edu/full/1949MNRAS.109..365H>
- [167] Bondi, H., Gold, T. (1948). *The steady-state theory of the expanding Universe*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 108 (3), 252-270.
- [168] Dombrovski V.A. (1949), *Doklady Akad. Nauk Armenia*, 10, 199
- [169] Wikipedia, *Hiltner, W.A.* https://en.wikipedia.org/wiki/W._Albert_Hiltner

- [170] Tomoline, A. (1975) *La Cosmogonie récréative*, Éditions de Moscou, 220, 221.
- [171] NASA's *Fermi Gamma-ray Space Telescope*. <https://fermi.gsfc.nasa.gov/>
- [172] Goodenough, L., Hooper, D. (2009) *Possible Evidence For Dark Matter Annihilation In The Inner Milky Way From The Fermi Gamma Ray Space Telescope*. arXiv:0910.2998
- [173] Sokol, J. (2016) *A Seeker of Dark Matter's Hidden Light*, Quanta Magazine. <https://www.quantamagazine.org/tracy-slatyer-searches-for-dark-matters-hidden-light-20160901/>
- [174] Cho, A. (2019) *Physicists revive hunt for dark matter in the heart of the Milky Way*, Science. doi:10.1126/science.aba1956.
- [175] Cartlidge, E. (2015) *X-ray signal from outer space points to dark matter*, Science. www.science.org/content/article/x-ray-signal-outer-space-points-dark-matter
- [176] Abazajian, K. N. (2014) *Resonantly-Produced 7 keV Sterile Neutrino Dark Matter Models and the Properties of Milky Way Satellites*, Physical Review Letters, 112, 161303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.161303>
- [177] Dessert, C., Rodd, N.L., Safdi, B.R. (2020) *The dark matter interpretation of the 3.5-keV line is inconsistent with blank-sky observations*, Science, Vol. 367, Issue 6485, pp.1465-1467. DOI: 10.1126/science.aaw3772