

Identification de la Matière Noire à l'ère du grand relevé optique LSST

Auteur principal Johann Cohen-Tanugi

Institution LUPM, université de Montpellier et CNRS/IN2P3, Montpellier, France

email johann.cohen-tanugi@umontpellier.fr

Co-auteurs : Marc Moniez³, Eric Nuss¹

Endosseurs : Dominique Boutigny⁴, Céline Combet², Dominique Fouchez⁵, Emmanuel Gangler⁶, Julien Laval¹, David Maurin², Jérémy Neveu³, Vincent Poireau⁴, Vivian Poulin¹, Cécile Renault²

¹ LUPM, université de Montpellier et CNRS/IN2P3, Montpellier, France

² LPSC, université de Grenoble et CNRS/IN2P3, Grenoble, France

³ LAL, université Paris-Orsay et CNRS/IN2P3, Orsay, France

⁴ LAPP, université Savoie Mont Blanc et CNRS/IN2P3, Annecy-le-vieux, France

⁵ CPPM, université Aix-Marseille et CNRS/IN2P3, Luminy, France

⁶ LPC, université Clermont-Auvergne et CNRS/IN2P3, Aubière, France

Résumé

Les observations astrophysiques fournissent aujourd'hui encore la seule mesure empirique robuste de la matière noire. Dans la prochaine décennie, ces observations continueront de sonder de manière unique des régions de l'espace des paramètres, tout en guidant d'autres efforts expérimentaux. Cette contribution résume les nombreuses observations que LSST (Large Synoptic Survey Telescope) rendra possibles et qui pourront contraindre la nature de la matière noire. Elle dessine succinctement la richesse des résultats qui peuvent être obtenus, en étroite collaboration avec ces autres efforts expérimentaux, et souligne la pertinence de ce programme de recherche au sein de l'IN2P3.^{1 2}

Cette contribution fait l'objet d'une soumission au GT04 et au GT06.

Introduction

Près d'un siècle après la découverte de sa présence dans le cosmos, la matière noire demeure une énigme parmi les plus importantes de la physique fondamentale. Depuis plusieurs décennies, un très large programme expérimental sur plusieurs continents, auquel l'IN2P3 participe fortement, a cherché à déterminer la nature de cette matière noire. À ce jour, les seules observations probantes demeurent néanmoins les observations astrophysiques, qui révèlent les effets gravitationnels de sa présence. Toute révolution future dans notre compréhension de la nature de la matière noire s'appuiera à n'en pas douter sur les observations, outils, et expertises des trois communautés de la physique des particules, de la cosmologie, et de l'astronomie.

Dans ce contexte, le *Large Synoptic Survey Telescope* (LSST) fournira au milieu de la prochaine décennie une plateforme remarquable pour étudier la physique du secteur sombre. Initialement conçu comme un "*Dark Matter Telescope*" [3], LSST fournira de nombreuses observations pour tester de manière précise certains aspects du modèle Λ CDM et pour élucider la connection entre galaxies lumineuses et 'toile' cosmique (*cosmic web*) de

1. Cette contribution s'inspire largement du *science white paper for Astro 2020* [1], lui-même un résumé du livre blanc de la communauté [2], auxquels plusieurs des auteurs principaux de cette contribution ont participé.

2. Des informations supplémentaires sur le groupe de travail "Matière noire et LSST" sont disponibles à l'adresse suivante : <https://lsstdarkmatter.github.io/>.

la matière noire. Non seulement il n'est plus aujourd'hui possible d'isoler cette *distribution macroscopique* de la *description microscopique* de la matière noire, mais de surcroît certaines caractéristiques microscopiques ne sont accessibles que par des observations astrophysiques. Ainsi, l'étude de la matière noire, de l'énergie noire, des neutrinos massifs, de l'univers primordial etc..., nécessite pour la décennie à venir une approche complémentaire aussi bien du point de vue expérimental que du point de vue théorique. L'IN2P3, de par sa couverture thématique et technique, est idéalement placé pour participer efficacement à un programme global sur le sujet, en s'appuyant sur LSST pour tester un large éventail de modèles théoriques viables, tels que matière noire interagissant avec elle-même, matière noire froide ou 'tiède', matière noire avec interactions baryoniques, matière noire ultra-légère, modèles axioniques généralisés, et trous noirs primordiaux. LSST donnera accès à des observations de satellites locaux et de traînées stellaires de la Voie Lactée, de systèmes à lentillage fort, d'amas de galaxies isolés ou en interaction, de micro-lentillage, de populations stellaires et de la structure à grande échelle de l'Univers. L'IN2P3 est également engagé sur des projets qui fournissent les moyens ou bien de produire des particules de matière noire, ou bien de détecter directement ou indirectement leurs interactions, et peut donc assurer un rôle moteur pour maintenir la synergie adéquate entre ces axes expérimentaux fortement complémentaires. Il est utile de rappeler ici que cette vision globale où LSST jouera un rôle crucial a été identifiée dans plusieurs livres blancs et rapports outre-atlantique [4–11]. Après un bref rappel de la 'zoologie' actuelle des modèles de matière noire, nous faisons ci-dessous un tour d'horizon des sondes accessibles à LSST, puis nous concluons sur la pertinence d'un programme de l'IN2P3 sur l'identification de la matière noire qui s'appuie sur la contribution de l'institut à LSST.

Modèles de Matière Noire

Si la décennie passée a cherché avant tout à détecter les signatures attendues d'un candidat de type WIMP (*weakly interactive massive particle*), la décennie qui s'ouvre devant nous fait face, du fait de l'échec de ces tentatives, à une pléthore de modèles phénoménologiques proposant une réponse à la question de la nature de la matière noire. S'il est essentiel de concevoir l'instrumentation dédiée à la détection du plus grand nombre possible de ces candidats, il est important de rappeler que les observations astrophysiques sondent la physique de la matière noire au travers de son impact sur la formation des structures tout au long de l'histoire de l'Univers. Aux larges échelles, les données d'observations sont très bien décrites par l'ajustement statistique d'un modèle cosmologique qui inclut une composante non relativiste, non collisionnelle, et froide (CDM pour *cold dark matter*). Toutefois, de nombreuses extensions au modèle standard fournissent des candidats matière noire viables, qui dévierait du scénario CDM standard, en particulier aux plus petites échelles. En effet les propriétés fondamentales d'une particule de matière noire -masse, sections efficaces d'interactions, couplage aux particules du modèle standard, évolution temporelle- peuvent laisser une trace détectable sur la distribution macroscopique de matière noire. Soutenu par la poursuite des efforts théoriques et l'appui de suivis observationnels sur d'autres télescopes, LSST sera sensible à plusieurs classes distinctes de modèles. Nous mentionnons ici quelques exemples.

Matière Noire de type particule LSST, combiné avec d'autres observations, pourra apporter des indices importants pour caractériser la section efficace d'auto-interaction et/ou de diffusion avec des baryons, la masse, le taux d'annihilation ou de désintégration, etc... De telles mesures viendront compléter et guider les efforts de détection directe, indirecte, et sur collisionneur.

Matière Noire de type ondes Les ALP (*Axion-Like Particles*) et autres candidats dits "ultra-légers" sont une alternative crédible aux candidats plus conventionnels. LSST sera en mesure d'apporter des contraintes distinctes sur la masse minimale de tels candidats, ainsi que sur le couplage ALP-particules du modèle standard.

Objets compacts Cette classe de candidats est fondamentalement différente des deux premières. En particulier les trous noirs primordiaux (PBH pour *Primordial Black Hole*)

ne sont accessibles à l'étude que par des observations astrophysiques, et des contraintes portées sur leur abondance fourniraient directement des contraintes sur l'amplitude des fluctuations de densité initiales, en plus de fournir des indices uniques sur la physique à ultra-haute énergie.

Sondes de Matière Noire

LSST pourra s'appuyer sur un grand nombre de sondes pour caractériser la nature de la matière noire. Une table interactive est disponible en ligne³, et nous n'évoquons ci-dessous que les grandes classes de sondes.

Masse minimale des galaxies, et caractérisation des halos Si on en croit le modèle cosmologique standard, le spectre de masse des halos devrait être invariant d'échelle jusqu'à des masses planétaires, voire en deçà [12–14, par exemple]. Ces petites échelles peuvent être supprimées dans le cadre de modèles alternatifs au paradigme CDM. Les observations actuelles contraignent de manière satisfaisante le spectre de masse des halos jusqu'à $10^{10}M_{\odot}$ environ, et les galaxies les plus petites connues permettent d'inférer l'existence de halos de masse $\sim 10^8M_{\odot} - 10^9M_{\odot}$ [15–20]. LSST va étendre le décompte du nombre de galaxies satellites très peu brillantes en orbite autour de la Voie Lactée, et va même permettre de chercher des systèmes très peu lumineux dans tout le volume local. Ces observations à la limite du seuil de formation stellaire permettront de contraindre l'abondance des halos de masse $\sim 10^8M_{\odot}$.

Par ailleurs, LSST pourra descendre plus bas encore dans l'échelle des masses, en deçà du seuil de formation stellaire, grâce aux traînées stellaires et aux lentilles fortes. Dans le premier cas, des sous-structures galactiques de masse $10^5-10^6M_{\odot}$ seront détectables par leur perturbation de la structure des traînées stellaires [21, 22], et il est attendu que LSST découvre de nouvelles traînées, améliore le contraste de densité de celles qui sont connues, et surtout fournisse des cas individuels plus éloignés du cœur de la Galaxie. Dans le deuxième cas, LSST découvrira de nombreux nouveaux systèmes fortement lentillés, permettant d'atteindre un échantillon de plusieurs milliers de quasars lentillés [23] et plusieurs dizaines de milliers de galaxies lentillées [24], permettant d'accéder à l'abondance et à la distribution de masse des sous-halos des galaxies massives et des halos isolés le long de la ligne de visée.

Profils de Halo Les interactions non gravitationnelles de la matière noire avec elle-même, que prédisent certains modèles de physique des particules au-delà du modèle standard, pourraient produire des coeurs de halo dont la densité ne dépend pas du rayon [coeurs 'plats', 25] et/ou des profils strictement sphériques [26]. Dans ce contexte, le lentillage faible galaxie-galaxie devrait permettre à LSST de distinguer les coeurs plats pour des galaxies naines à faible décalage vers le rouge et de masse $M_{\text{halo}} = 3 \times 10^9 h^{-1} M_{\odot}$. Par ailleurs, l'étude des profils de densité des amas massifs de galaxies, ainsi que des systèmes de deux amas en coalescence, renseignera sur les sections efficaces de diffusion de l'ordre de $\sigma_{\text{SIDM}}/m_{\chi} \sim 0.1 - 1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ pour des candidats matière noire interagissant avec eux-mêmes. Enfin, l'étude des profils de halo en fonction de leur masse permettra de contraindre des mécanismes de diffusion qui dépendent de la vitesse.

Objets Compacts Le caractère synoptique du relevé de LSST offre la possibilité d'observer des passages d'objets compacts devant d'autres étoiles, soit par occultation, soit par effet de microlentille gravitationnelle, sur des échelles de temps courtes (~ 30 s) et longues ($\sim 1 - 10$ ans)[27]. Avec une cadence optimale, LSST pourrait également étendre les contraintes sur la fraction de PBH jusqu'à $\sim 0.03\%$ du budget matière noire, pour des masses $\gtrsim 10^{-1}M_{\odot}$. Des observations astrométriques seront extrêmement utiles pour lever la dégénérescence des paramètres et mesurer la masse de trous noirs individuels, si ils existent, et donc fournir une fenêtre d'observation sur l'Univers primordial.

Anomalie de perte d'énergie L'astrophysique stellaire modélise l'évolution des étoiles, et en particulier les mécanismes de transfert radiatif, de manière détaillée. L'observation des populations stellaires permet alors de confronter ces modèles et de déceler éventuelle-

3. à l'adresse <https://lsstdarkmatter.github.io/dark-matter-graph/>

ment des anomalies dans les pertes radiatives, qui signaleraient la présence d'un mécanisme non conventionnel de perte d'énergie, en particulier dû à la présence de matière noire. Par exemple des particules de faible masse couplées aux champs du modèle standard fournissent naturellement un canal supplémentaire de pertes radiatives. En particulier, des mesures de la fonction de luminosité des naines blanches, des géantes rouges, ou des supernovae gravitationnelles peuvent contraindre le couplage axion-électron.

Structure à grande échelle LSST produira la carte la plus large et la plus détaillée de l'évolution de la distribution de masse durant les derniers dix milliards d'années. Cette structuration à grande échelle dépend de la quantité totale de matière noire, de la fraction de reliques 'chaudes' qui la composent, et des couplages éventuels entre la matière noire et l'énergie noire. Sur ce dernier point, la taille et la profondeur du relevé de LSST pourrait permettre d'étudier les corrélations spatiales du secteur sombre en déterminant les paramètres de l'énergie noire indépendamment dans différentes régions du ciel [28].

Périmètre IN2P3 et synergies

La collaboration scientifique DESC a pris récemment acte du fait que la caractérisation de la matière noire avec LSST recouvre très largement les problématiques scientifiques et techniques qui se posent dans le cadre de la caractérisation de l'énergie noire, son sujet central. De la même manière, un programme de recherche soutenu par l'IN2P3 sur l'identification de la matière noire avec LSST est en parfaite adéquation avec son objectif principal de retour scientifique, qui porte également sur l'énergie noire. D'ailleurs deux des sondes discutées plus haut sont des sujets traités depuis longtemps au sein de l'institut.

Le microlensing Cette voie de détection de matière noire sous forme d'objets compacts a été initiée aux USA et en France, notamment par l'IN2P3 au début des années 1990 avec l'expérience EROS (Expérience de Recherche d'Objets Sombres). Les relevés passés (EROS, MACHO) et actuels (MOA et OGLE) à la recherche d'effets de microlentille gravitationnelle ont exclu que la matière noire galactique soit majoritairement constituée d'objets compacts de masse inférieure à $10M_{\odot}$ [29, 30]. Or, les premières détections d'ondes gravitationnelles ont mis en évidence l'existence d'objets plus lourds que cette limite [31, 32]. Le facteur limitant la sensibilité des relevés précédents à de tels objets est l'effondrement de l'efficacité de détection des effets de lentille de longue durée (plusieurs années) qu'ils induisent. Des travaux sont en cours actuellement à l'IN2P3 pour combiner les données des relevés passés, afin de bénéficier d'une plus grande couverture temporelle, et de récupérer une efficacité raisonnable de détection des événements dus à d'éventuels trous noirs de masse intermédiaire [33]. Ces travaux trouvent leur prolongement naturel dans la préparation de la stratégie d'échantillonnage et de l'analyse des données temporelles de LSST en direction des champs stellaires (LMC, SMC et plan galactique), dans le cadre des activités "transient" de LSST, en marge de DESC. Comme l'efficacité de détection pour des événements de longue durée dépendra peu des détails de l'échantillonnage temporel, il faudra essentiellement s'assurer que les intervalles entre mesures d'un même champ ne dépassent pas une saison. Nos études ont montré que, après 10 années consécutives d'observation, on s'attend à ce que les courbes de lumière mesurées dans LSST permettent d'estimer la contribution des objets de masse comprise entre 10 et $1000M_{\odot}$ à la masse noire de la Voie Lactée [33]. Le savoir-faire maintenu à l'IN2P3 permettra en plus de combiner les données de LSST avec celles des relevés historiques, ce qui fournira quelques millions de courbes de lumière étalées sur plus de 40 années, et constituera un atout décisif pour les études d'efficacité, particulièrement délicates dans la science du microlensing.

L'étude des galaxies naines sphéroïdes Ces systèmes sont parmi les plus intéressants pour rechercher un signal indirect de présence de matière noire, en particulier dans la gamme des rayons gamma de haute et très haute énergie. En effet, ils sont proches, ont de grands rapports masse sur luminosité, et sont supposés être dénués de bruit de fond astrophysique en gamma (e.g. peu ou pas de gaz, ni de formation stellaire). L'IN2P3 joue depuis longtemps un rôle important dans l'étude de ces objets avec le *Large Area Telescope*

à bord de l’observatoire *Fermi* [e.g. 34–37], avec les instruments Tcherenkov H.E.S.S. et le futur observatoire CTA [e.g. 38–40], ainsi que dans la phénoménologie de ces objets [e.g. 41]. Les contraintes les plus récentes ont d’ailleurs été obtenus en partenariat avec la collaboration *Dark Energy Survey* (DES), qui a découvert plusieurs nouvelles galaxies naines dans le ciel sud. Avec LSST, plusieurs centaines de nouvelles naines avec une luminosité inférieure à $10^3 L_{\odot}$ sont attendues [42], qui permettront à leur tour de mettre de nouvelles contraintes grâce aux données du LAT et de CTA. Outre la découverte de nouvelles naines pour enrichir les catalogues de sources gamma potentielles, le simple comptage de ces sous-structures ainsi que l’étude de leur espace des phases fournit des contraintes directes sur la nature de la matière noire (voir plus haut). Enfin, la détermination de leur profil de densité grâce à un suivi spectroscopique d’un sous-ensemble de galaxies naines sera également un outil discriminant important, par exemple entre SIDM et CDM [26, 43, 44]. L’enjeu des galaxies naines sphéroïdes et plus généralement des objets à faible luminosité de surface est donc de premier plan pour LSST, et l’IN2P3 a acquis une visibilité dans ce domaine, aussi bien observationnelle que théorique.

Les deux exemples précédents montrent qu’une activité matière noire à l’IN2P3 au sein de LSST-France peut s’appuyer sur une expertise existante et une volonté affichée de participer au groupe de travail correspondant de DESC. Et cela, sans préjuger naturellement des intérêts que ne manqueront pas de susciter d’autres sondes observables par LSST, depuis les traînées stellaires, sur lesquelles le satellite Gaia fournit d’ores et déjà des données remarquables [45, 46], jusqu’aux grandes structures, qui font l’objet de travaux français au sein de DESC [47–49].

Ainsi, l’activité matière noire au sein de LSST-France entre naturellement dans la thématique “astroparticules”, dont l’IN2P3 soutient fortement les efforts portant sur la détection directe, indirecte, ou sur collisionneur. D’ailleurs, LSST fournit une complémentarité importante avec de tels efforts. Les recherches indirectes d’un signal de matière noire avec des télescopes neutrino ou gamma [50–52] pourront s’appuyer sur le gain en précision de la cartographie par LSST de la distribution de masse aux échelles galactiques et extra-galactiques. D’autres synergies entre ciel optique et ciel gamma sont d’ailleurs possibles, comme par exemple la recherche de corrélations entre relevé de galaxies et sources gamma [53]. Pour ce qui est des efforts de détection directe, LSST étendra les mesures de cinématique locales obtenues par Gaia à de bien plus grandes distances, et sondera avec les observations de structures à petite échelle un régime de masse et de section efficace des candidats particules de matière noire inaccessibles aux mesures de détection directe [2]. Notons également que LSST sera capable de suivre des événements extrêmes du ciel transitoire, parmi lesquels peut se cacher une signature de candidats matière noire comme les ALP (*axion-like particles*) [54]. Or ces phénomènes extrêmes sont également un sujet traité à l’IN2P3⁴.

Enfin, on ne saurait trop souligner l’importance d’encourager, en particulier au sein de l’IN2P3, les initiatives visant à réunir des communautés aux interfaces de l’astrophysique (dynamique galactique), de la cosmologie (formation des structures), et des astroparticules (modèles de matière noire et détections associées), comme l’atelier annuel “News From The Dark Side” du LUPM⁵.

Conclusions

LSST commencera les opérations de science vers 2022. La France est très largement impliquée dans le projet, au niveau de la construction de la caméra et de la charge de calcul pour la réduction et l’analyse des données. Cette implication a historiquement trouvé son ancrage scientifique au sein de la communauté française intéressée par la question

4. Nous mentionnons ici le livre blanc sur les synergies entre ondes gravitationnelles et matière noire [55]. Si le sujet n’est qu’indirectement lié à LSST, il souligne un peu plus à quel point l’IN2P3 par les projets qu’il soutient est au centre de la synergie à développer autour de la question transverse de l’identification de la matière noire.

5. Voir les sites des derniers ateliers pour plus d’informations : 2019, 2018, 2017, et 2013.

de l'énergie noire et membre de la *Dark Energy Science Collaboration* (DESC). DESC a récemment intégré un groupe de travail dédié à la matière noire, reconnaissant que cette thématique est indissolublement liée à celle de l'énergie noire⁶ et que les sondes ciblées et les outils d'analyse sont en grande partie semblables. De son côté, l'IN2P3 a une riche contribution à la question essentielle de la nature de la matière noire (recherches directe, indirecte, sur collisionneur, et phénoménologie associée), et est idéalement positionné pour jouer un rôle important dans cette thématique avec LSST. Dans ce contexte, nous sommes fortement convaincus de la pertinence de soutenir à la fois les efforts sur l'énergie noire et ceux sur la matière noire au sein de LSST-France. Nous souhaiterions également qu'une réflexion s'engage pour évaluer si une plus étroite structuration, au sein de l'institut, des différentes recherches associées à l'identification de la matière noire serait envisageable et profitable. L'émergence de la communauté LSST matière noire à l'origine du livre blanc [2], ainsi que l'initiative DARKMACHINE⁷ sont en effet autant d'exemples à l'étranger qui vont dans la direction d'une synergie accrue.

Références

- [1] K. Bechtol, A. Drlica-Wagner, K. N. Abazajian, M. Abidi, S. Adhikari, Y. Ali-Haïmoud et al., *Dark Matter Science in the Era of LSST*, BAAS **51** (2019) 207 [[1903.04425](#)].
- [2] A. Drlica-Wagner, Y.-Y. Mao, S. Adhikari, R. Armstrong, A. Banerjee, N. Banik et al., *Probing the Fundamental Nature of Dark Matter with the Large Synoptic Survey Telescope*, *arXiv e-prints* (2019) arXiv :1902.01055 [[1902.01055](#)].
- [3] J. A. Tyson, D. M. Wittman and J. R. P. Angel, *The Dark Matter Telescope*, in *Gravitational Lensing : Recent Progress and Future Goals*, T. G. Brainerd and C. S. Kochanek, eds., vol. 237 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 417, January, 2001, [astro-ph/0005381](#).
- [4] National Research Council, *New Worlds, New Horizons in Astronomy and Astrophysics*. National Academies Press, 2010, [10.17226/12951](#).
- [5] A. Kusenko and L. J. Rosenberg, *Snowmass-2013 Cosmic Frontier 3 (CF3) Working Group Summary : Non-WIMP dark matter*, *arXiv e-prints* (2013) arXiv :1310.8642 [[1310.8642](#)].
- [6] J. J. Beatty, A. E. Nelson, A. Olinto, G. Sinnis, A. U. Abeysekara, L. A. Anchordoqui et al., *Snowmass Cosmic Frontiers 6 (CF6) Working Group Summary –The Bright Side of the Cosmic Frontier : Cosmic Probes of Fundamental Physics*, *arXiv e-prints* (2013) arXiv :1310.5662 [[1310.5662](#)].
- [7] D. Bauer, J. Buckley, M. Cahill-Rowley, R. Cotta, A. Drlica-Wagner, J. L. Feng et al., *Dark matter in the coming decade : Complementary paths to discovery and beyond*, *Physics of the Dark Universe* **7** (2015) 16 [[1305.1605](#)].
- [8] S. Ritz, H. Aihara, M. Breidenbach, B. Cousins, A. de Gouvea, M. Demarteau et al., *Building for Discovery : Strategic Plan for U.S. Particle Physics in the Global Context*. HEPAP Subcommittee, 2014.
- [9] S. Dodelson, K. Heitmann, C. Hirata, K. Honscheid, A. Roodman, U. Seljak et al., *Cosmic Visions Dark Energy : Science*, *arXiv e-prints* (2016) arXiv :1604.07626 [[1604.07626](#)].
- [10] K. Dawson, J. Frieman, K. Heitmann, B. Jain, S. Kahn, R. Mandelbaum et al., *Cosmic Visions Dark Energy : Small Projects Portfolio*, *arXiv e-prints* (2018) arXiv :1802.07216 [[1802.07216](#)].

6. Le site de LSST considère le secteur sombre comme un seul axe thématique auquel LSST a été conçu pour répondre, voir <https://www.lsst.org/science>.

7. <https://darkmachines.org/>

- [11] M. Battaglieri, A. Belloni, A. Chou, P. Cushman, B. Echenard, R. Essig et al., *US Cosmic Visions : New Ideas in Dark Matter 2017 : Community Report*, *arXiv e-prints* (2017) arXiv :1707.04591 [[1707.04591](#)].
- [12] A. M. Green, S. Hofmann and D. J. Schwarz, *The power spectrum of SUSY-CDM on subgalactic scales*, *MNRAS* **353** (2004) L23 [[astro-ph/0309621](#)].
- [13] J. Diemand, B. Moore and J. Stadel, *Earth-mass dark-matter haloes as the first structures in the early Universe*, *Nature* **433** (2005) 389 [[astro-ph/0501589](#)].
- [14] A. H. Guth, M. P. Hertzberg and C. Prescod-Weinstein, *Do dark matter axions form a condensate with long-range correlation ?*, *Phys. Rev. D* **92** (2015) 103513 [[1412.5930](#)].
- [15] J. I. Read, G. Iorio, O. Agertz and F. Fraternali, *The stellar mass-halo mass relation of isolated field dwarfs : a critical test of Λ CDM at the edge of galaxy formation*, *MNRAS* **467** (2017) 2019 [[1607.03127](#)].
- [16] P. Behroozi, R. Wechsler, A. Hearin and C. Conroy, *UniverseMachine : The Correlation between Galaxy Growth and Dark Matter Halo Assembly from $z=0-10$* , *arXiv e-prints* (2018) arXiv :1806.07893 [[1806.07893](#)].
- [17] P. Jethwa, D. Erkal and V. Belokurov, *The upper bound on the lowest mass halo*, *MNRAS* **473** (2018) 2060 [[1612.07834](#)].
- [18] S. Y. Kim, A. H. G. Peter and J. R. Hargis, *Missing Satellites Problem : Completeness Corrections to the Number of Satellite Galaxies in the Milky Way are Consistent with Cold Dark Matter Predictions*, *Phys. Rev. Lett.* **121** (2018) 211302.
- [19] E. O. Nadler, Y.-Y. Mao, G. M. Green and R. H. Wechsler, *Modeling the Connection Between Subhalos and Satellites in Milky Way-Like Systems*, *arXiv e-prints* (2018) arXiv :1809.05542 [[1809.05542](#)].
- [20] J. I. Read and D. Erkal, *Abundance matching with the mean star formation rate : there is no missing satellites problem in the Milky Way*, *arXiv e-prints* (2018) arXiv :1807.07093 [[1807.07093](#)].
- [21] D. Erkal, V. Belokurov, J. Bovy and J. L. Sanders, *The number and size of subhalo-induced gaps in stellar streams*, *MNRAS* **463** (2016) 102 [[1606.04946](#)].
- [22] J. Bovy, D. Erkal and J. L. Sanders, *Linear perturbation theory for tidal streams and the small-scale CDM power spectrum*, *MNRAS* **466** (2017) 628 [[1606.03470](#)].
- [23] M. Oguri and P. J. Marshall, *Gravitationally lensed quasars and supernovae in future wide-field optical imaging surveys*, *MNRAS* **405** (2010) 2579 [[1001.2037](#)].
- [24] T. E. Collett, *The Population of Galaxy-Galaxy Strong Lenses in Forthcoming Optical Imaging Surveys*, *ApJ* **811** (2015) 20 [[1507.02657](#)].
- [25] D. N. Spergel and P. J. Steinhardt, *Observational Evidence for Self-Interacting Cold Dark Matter*, *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 3760 [[astro-ph/9909386](#)].
- [26] A. H. G. Peter, M. Rocha, J. S. Bullock and M. Kaplinghat, *Cosmological simulations with self-interacting dark matter - II. Halo shapes versus observations*, *MNRAS* **430** (2013) 105 [[1208.3026](#)].
- [27] Ł. Wyrzykowski, Z. Kostrzewa-Rutkowska, J. Skowron, K. A. Rybicki, P. Mróz, S. Kozłowski et al., *Black hole, neutron star and white dwarf candidates from microlensing with OGLE-III*, *MNRAS* **458** (2016) 3012 [[1509.04899](#)].
- [28] R. Scranton, A. Albrecht, R. Caldwell, A. Cooray, O. Dore, S. Habib et al., *The Case for Deep, Wide-Field Cosmology*, in *astro2010 : The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey*, vol. 2010, p. 269, January, 2009, [0902.2590](#).
- [29] P. Tisserand, L. Le Guillou, C. Afonso, J. N. Albert, J. Andersen, R. Ansari et al., *Limits on the Macho content of the Galactic Halo from the EROS-2 Survey of the Magellanic Clouds*, *A&A* **469** (2007) 387 [[astro-ph/0607207](#)].
- [30] Ł. Wyrzykowski, S. Kozłowski, J. Skowron, A. Udalski, M. K. Szymański, M. Kubiak et al., *The OGLE view of microlensing towards the Magellanic Clouds - III. Ruling out subsolar MACHOs with the OGLE-III LMC data*, *MNRAS* **413** (2011) 493 [[1012.1154](#)].

- [31] LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION AND VIRGO COLLABORATION collaboration, *Gw151226 : Observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence*, *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) 241103.
- [32] S. Bird, I. Cholis, J. B. Muñoz, Y. Ali-Haïmoud, M. Kamionkowski, E. D. Kovetz et al., *Did ligo detect dark matter ?*, *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) 201301.
- [33] A. Mirhosseini and M. Moniez, *The MEMO project : Combining all microlensing surveys to search for intermediate-mass Galactic black holes*, *A&A* **618** (2018) L4 [1711.10898].
- [34] M. Ackermann, M. Ajello, A. Albert, W. B. Atwood, L. Baldini, J. Ballet et al., *Constraining Dark Matter Models from a Combined Analysis of Milky Way Satellites with the Fermi Large Area Telescope*, *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 241302 [1108.3546].
- [35] M. Ackermann, A. Albert, B. Anderson, W. B. Atwood, L. Baldini, G. Barbiellini et al., *Searching for Dark Matter Annihilation from Milky Way Dwarf Spheroidal Galaxies with Six Years of Fermi Large Area Telescope Data*, *Phys. Rev. Lett.* **115** (2015) 231301.
- [36] V. Bonnivard, C. Combet, M. Daniel, S. Funk, A. Geringer-Sameth, J. A. Hinton et al., *Dark matter annihilation and decay in dwarf spheroidal galaxies : the classical and ultrafaint dSphs*, *MNRAS* **453** (2015) 849 [1504.02048].
- [37] A. Chiappo, J. Cohen-Tanugi, J. Conrad, L. E. Strigari, B. Anderson and M. A. Sánchez-Conde, *Dwarf spheroidal J-factors without priors : A likelihood-based analysis for indirect dark matter searches*, *MNRAS* **466** (2017) 669 [1608.07111].
- [38] H.E.S.S. collaboration, *Search for dark matter annihilation signatures in H.E.S.S. observations of Dwarf Spheroidal Galaxies*, *Phys. Rev.* **D90** (2014) 112012 [1410.2589].
- [39] L. Oakes, *Combined Dark Matter Searches Towards Dwarf Spheroidal Galaxies with Fermi-LAT, HAWC, HESS, MAGIC and VERITAS*, in *36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019)*, vol. 36 of *International Cosmic Ray Conference*, p. 539, Jul, 2019, 1909.06310.
- [40] L. Rinchuso, E. Moulin, C. Armand and V. Poireau, *Dark Matter Search with H.E.S.S. Towards Ultra-faint Dwarf Nearby DES Satellites of the Milky Way*, in *36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019)*, vol. 36 of *International Cosmic Ray Conference*, p. 542, Jul, 2019, 1908.04311.
- [41] V. Bonnivard, C. Combet, D. Maurin and M. G. Walker, *Spherical Jeans analysis for dark matter indirect detection in dwarf spheroidal galaxies - impact of physical parameters and triaxiality*, *MNRAS* **446** (2015) 3002 [1407.7822].
- [42] J. R. Hargis, B. Willman and A. H. G. Peter, *Too Many, Too Few, or Just Right ? The Predicted Number and Distribution of Milky Way Dwarf Galaxies*, *ApJ* **795** (2014) L13 [1407.4470].
- [43] M. Vogelsberger, J. Zavala and A. Loeb, *Subhaloes in self-interacting galactic dark matter haloes*, *MNRAS* **423** (2012) 3740 [1201.5892].
- [44] H. Nishikawa, K. K. Boddy and M. Kaplinghat, *Accelerated core collapse in tidally stripped self-interacting dark matter halos*, *arXiv e-prints* (2019) arXiv :1901.00499 [1901.00499].
- [45] P. Jethwa, D. Erkal and V. Belokurov, *The upper bound on the lowest mass halo*, *MNRAS* **473** (2018) 2060.
- [46] N. Banik, G. Bertone, J. Bovy and N. Bozorgnia, *Probing the nature of dark matter particles with stellar streams*, *JCAP* **2018** (2018) 061 [1804.04384].
- [47] P. Baratta, J. Bel, S. Plaszczynski and A. Ealet, *High-precision Monte-Carlo modelling of galaxy distribution*, *arXiv e-prints* (2019) arXiv :1906.09042 [1906.09042].

- [48] R. Ansari, A. Choyer, F. Habibi, C. Magneville, M. Moniez, S. Plaszczyński et al., *Impact of photometric redshifts on the galaxy power spectrum and BAO scale in the LSST survey*, *A&A* **623** (2019) A76 [[1902.03004](#)].
- [49] J. E. Campagne, S. Plaszczyński and J. Neveu, *The Galaxy Count Correlation Function in Redshift Space Revisited*, *ApJ* **845** (2017) 28 [[1703.02818](#)].
- [50] E. Charles, M. Sánchez-Conde, B. Anderson, R. Caputo, A. Cuoco, M. Di Mauro et al., *Sensitivity projections for dark matter searches with the Fermi large area telescope*, *Phys. Rep.* **636** (2016) 1 [[1605.02016](#)].
- [51] A. Albert, B. Anderson, K. Bechtol, A. Drlica-Wagner, M. Meyer, M. Sánchez-Conde et al., *Searching for Dark Matter Annihilation in Recently Discovered Milky Way Satellites with Fermi-Lat*, *ApJ* **834** (2017) 110 [[1611.03184](#)].
- [52] M. Shirasaki, S. Horiuchi and N. Yoshida, *Cross correlation of cosmic shear and extragalactic gamma-ray background : Constraints on the dark matter annihilation cross section*, *Phys. Rev. D* **90** (2014) 063502 [[1404.5503](#)].
- [53] S. Ammazzalorso, D. Gruen, M. Regis, S. Camera, S. Ando, N. Fornengo et al., *Detection of cross-correlation between gravitational lensing and gamma rays*, *arXiv e-prints* (2019) arXiv :1907.13484 [[1907.13484](#)].
- [54] M. Meyer, M. Giannotti, A. Mirizzi, J. Conrad and M. A. Sánchez-Conde, *Fermi Large Area Telescope as a Galactic Supernovae Axionscope*, *Phys. Rev. Lett.* **118** (2017) 011103 [[1609.02350](#)].
- [55] G. Bertone, D. Croon, M. A. Amin, K. K. Boddy, B. J. Kavanagh, K. J. Mack et al., *Gravitational wave probes of dark matter : challenges and opportunities*, *arXiv e-prints* (2019) arXiv :1907.10610 [[1907.10610](#)].