

# L'abondance déduite d'objets interstellaires d'origine technologique

Carson Ezell<sup>a,\*</sup>, Abraham Loeb<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Département d'astronomie, Université de Harvard, 60 Garden St, 02138, Cambridge, MA, USA

---

## Résumé

Le taux de détection locale des objets interstellaires peut permettre d'estimer le nombre total d'objets similaires liés au disque mince de la Voie lactée. Si des objets interstellaires d'origine artificielle sont découverts, le nombre total estimé d'objets peut être réduit d'un facteur d'environ  $10^{16}$  s'ils ciblent la zone habitable autour du Soleil. Nous proposons un modèle permettant de calculer la quantité d'objets interstellaires naturels ou artificiels d'intérêt en fonction de la vitesse de l'objet et de sa densité observée. Nous appliquons ensuite le modèle au cas des fusées à propulsion chimique des civilisations extraterrestres. Enfin, nous appliquons le modèle à trois objets interstellaires précédemment découverts - l'objet 'Oumuamua d'origine inconnue et les premiers météores interstellaires CNEOS 2014-01-08 et CNEOS 2017-03-09.

---

## 1. Introduction

Des études récentes ont permis de détecter les quatre premiers objets interstellaires connus au cours de la dernière décennie : les météores interstellaires CNEOS 2014-01-08

[1] et CNEOS 2017-03-09 [2], l'objet interstellaire 'Oumuamua [3, 4] et la comète interstellaire Borisov [5]. Le taux de détection des objets interstellaires dépend de la sensibilité de détection, compte tenu de la taille et de la distance des objets. On peut utiliser les taux récents de détection d'objets interstellaires et les capacités connues pour estimer la densité d'objets similaires dans le voisinage solaire et le nombre total de ces objets limités par le disque mince de la Voie lactée [1].

Les estimations de la densité et de la quantité d'objets interstellaires naturels liés au disque mince de la Voie lactée supposent que les objets interstellaires sont initialement éjectés de leurs étoiles hôtes dans des directions aléatoires [6], et qu'ils sont répartis verticalement par rapport au plan galactique en fonction de la hauteur d'échelle de leurs étoiles mères. Ces hypothèses restent valables si les objets sont artificiels et non dirigés, comme les débris spatiaux des civilisations technologiques extraterrestres (ETC). Cependant, supposer des directions aléatoires des objets interstellaires ne permet pas

---

\*Correspondant de l'auteur

Adresses électroniques : [carson.ezell@cfa.harvard.edu](mailto:carson.ezell@cfa.harvard.edu) (Carson Ezell),  
[aloeb@cfa.harvard.edu](mailto:aloeb@cfa.harvard.edu) (Abraham Loeb)

ar  
Xi  
v:  
22  
09  
.1  
12  
62  
v1  
[p  
hy  
sic  
s.p  
op  
-  
ph  
]  
22  
Se  
p  
20  
22

s'appliquent si les objets sont artificiels et dirigés vers des régions d'intérêt, telles que les zones habitables des étoiles. Pour estimer la fréquence et la densité des objets interstellaires étant donné qu'ils sont ciblés, il faut tenir compte de la quantité de cibles et du volume des régions ciblées.

En appliquant le principe de Copernic, qui suggère que la civilisation humaine sur Terre est un exemple typique de l'émergence d'une vie intelligente dans l'univers, nous avons un aperçu des cibles possibles des artefacts technologiques extraterrestres (ETA). La recherche traditionnelle d'intelligence extraterrestre (SETI), s'est concentrée sur les signaux électromagnétiques [7] qui s'échappent de la Voie lactée et ne peuvent être détectés un temps de traversée de la lumière après l'arrêt de la transmission. En effet, l'un des paramètres critiques de l'équation de Drake est la durée de vie d'une civilisation émettrice [8]. Cependant, les vaisseaux spatiaux propulsés par des propergols chimiques ne dépassent pas la vitesse d'échappement locale de la Voie lactée, restent gravitationnellement liés à celle-ci et s'accumulent dans le temps en additionnant l'ascension et la chute des civilisations qui s'échappent de l'espace.

Dans cet article, nous développons un modèle pour calculer le nombre total d'objets interstellaires d'origine technologique liés par le disque mince galactique sur la base des données d'observation, et nous trouvons que la quantité d'objets est significativement réduite si les trajectoires des objets sont ciblées. Le plan de l'article est le suivant. Dans la section 2, nous calculons les vitesses attendues des objets interstellaires compte tenu de leurs caractéristiques de lancement. Dans la section 3, nous calculons la densité locale et la quantité totale d'objets interstellaires liés à la Voie lactée compte tenu de nos taux de détection. Dans la section 4, nous considérons les implications pour les objets interstellaires précédemment détectés.

## 2. Caractéristiques du lancement

Tout d'abord, considérons le mouvement d'un objet interstellaire intéressant éjecté d'un système stellaire. Un objet éjecté d'une planète ou d'un autre corps céleste en orbite autour d'une étoile centrale doit s'échapper du puits gravitationnel des deux étoiles.

the planet and the central star, ultimately achieving a velocity  $v_\infty$  at a large distance. The escape velocity from a planet is given as,

$$v_{esc}^p = \sqrt{\frac{2GM}{R}}, \quad (1)$$

où  $G$  est la constante gravitationnelle,  $M$  est la masse de la planète, et  $R$  est le rayon de la planète. La vitesse d'échappement d'un système stellaire est donnée par la formule suivante,

$$v_{esc}^s = \sqrt{\frac{2GM^*}{a^*}}, \quad (2)$$

où  $M^*$  est la masse de l'étoile centrale et  $a^*$  est le rayon orbital de la planète

autour de l'étoile.

En supposant que la vitesse initiale de l'objet est dans la même direction que le mouvement circulaire de la planète autour de l'étoile centrale, il partage la même vitesse de la

planète

$$v_{circ} = \sqrt{\frac{GM^*}{a}}. \quad (3)$$

Par conséquent, pour un objet éjecté de la surface d'une planète, l'incrément de vitesse nécessaire pour s'échapper à la fois du puits gravitationnel de la planète et du puits gravitationnel de l'étoile centrale est le suivant,

$$\Delta v = \sqrt{(v_{esc}^p)^2 + \left(\frac{1}{2} v_{esc}^s\right)^2}. \quad (4)$$

Supposons qu'un objet soit éjecté avec une vitesse initiale par rapport à la surface de la Terre, la planète de  $v_i$  où  $v_i > v_{esc}^p$ . Puis, après avoir échappé au puits gravitationnel de la planète, on a une vitesse par rapport à l'étoile centrale de,

$$v_s \approx \sqrt{v_{circ}^2 + (v_i - v_{esc}^p)^2}. \quad (5)$$

Si  $v_s > v_{esc}^s$  il s'ensuit que,

$$v_\infty \approx \sqrt{(v_s)^2 - (v_{esc}^s)^2}. \quad (6)$$

Étant donné la vitesse de sortie d'un objet d'intérêt de son étoile d'origine, nous considérons la dispersion moyenne des vitesses de tous ces objets liés par le disque mince de la Voie lactée [9].

Les vitesses moyennes des étoiles dans le disque mince de la Voie lactée sont données par  $(V_R, V_\phi, V_Z) = (-1, -239, 0) \pm (0.28, 0.21, 0.44) \text{ km s}^{-1}$ , et les dispersions de vitesse des étoiles dans le disque mince de la Voie lactée sont  $(\sigma_R, \sigma_\phi, \sigma_Z) = (31, 20, 11) (0.24, 0.17, 0.6) \text{ km s}^{-1}$  [10].

Soit  $\sigma_Z^i$  soit la dispersion moyenne des vitesses des objets d'intérêt dans la verticale après s'être échappés de leur système stellaire parent. Si les objets sont éjectés dans des directions aléatoires, alors,

$$\sigma_Z^i = \frac{v_\infty^i}{\sqrt{3}}, \quad (7)$$

en supposant un ensemble d'objets tous éjectés à la même vitesse, ou limités à une certaine tranche de vitesse parmi l'ensemble de la population.

Pour un ensemble donné d'objets étiquetés par l'indice  $i$ , avec une vitesse relative à son étoile  $v_\infty$ , la dispersion verticale des vitesses est donnée par la formule suivante,

$$\sigma_Z^i = \sqrt{(\sigma_Z^i)^2 + (\sigma^i)^2}. \quad (8)$$

Pour les civilisations qui émergent dans des conditions similaires aux nôtres, nous supposons que les objets artificiels sont lancés depuis les zones habitables des systèmes stellaires, où les conditions adéquates existent pour qu'une planète rocheuse se présente et maintienne la température adéquate pour supporter l'eau liquide à sa surface [11]. La luminosité stellaire est

donnée par,

$$L^* = 4\pi R_*^2 \sigma_{SB} T_*^4, \quad (9)$$

où  $T^*$  est la température de l'étoile,  $R^*$  est le rayon de l'étoile, et  $\sigma_{SB}$  est la constante de Stefan-Boltzmann. En supposant que nous nous intéressons aux planètes dont la température de surface est similaire à celle de la Terre,

$$\sigma_{SB} T_{eq}^4 = \frac{L^*}{16\pi a^2} (1 - A), \quad (10)$$

où  $A$  est l'albédo de la planète et  $T_{eq}$  est la température d'équilibre de la planète. Si la planète a le même albédo que la Terre, on a ,

$$a_* = 1 \text{ AU} \left( \frac{L^*}{L} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (11)$$

où  $L_O$  est la luminosité du Soleil [11]. En utilisant la relation luminosité-masse pour les étoiles communes de faible masse  $L^* \propto M^3$  [12], nous avons ,

$$a_* = 1 \text{ AU} \left( \frac{M^*}{M} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (12)$$

où  $M_O$  est la masse du Soleil. En utilisant l'équation (2), comme,

$$v_{esc}^s = v_{esc}^O \left( \frac{M^*}{M_O} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (13)$$

où  $v_{esc}^O = 42,1 \text{ km s}^{-1}$  est la vitesse d'échappement à la séparation Terre-Soleil. En utilisant l'équation (1) et la relation masse-radius  $M \propto R^{3,7}$  pour les planètes rocheuses [13],

$$v_{esc}^p = v_{esc}^{\oplus} \left( \frac{R}{R_{\oplus}} \right)^{1,35}, \quad (14)$$

où  $R_{\oplus}$  est le rayon de la Terre et  $v_{esc}^{\oplus} = 11,2 \text{ km s}^{-1}$  est la vitesse d'échappement de la surface de la Terre. Ainsi, l'équation (4) donne,

$$\Delta v = \frac{v_{esc}^{\oplus}}{R} \left( \frac{R}{R_{\oplus}} \right)^{2,7} + \frac{1}{2} \left( \frac{M_O}{M^*} \right)^{\frac{1}{2}} v_{esc}^O. \quad (15)$$

En invoquant le principe de Copernic et en considérant le système solaire comme typique des systèmes stellaires où la vie intelligente émerge, nous adoptons des valeurs moyennes de  $R = R_{\oplus}$

et  $M^* = M_O$  avec  $v_{esc}^{\oplus} = 11,2 \text{ km s}^{-1}$  et  $v_{esc} = 42,1 \text{ km s}^{-1}$ . Nous considérons que l'exemple des sondes à propulsion chimique comme objets interstellaires artificiels de civilisations intelligentes que nous pouvons observer, où  $v_i = 30 \text{ km s}^{-1}$ . Équation

(6) donne alors  $v_{\infty} = 39,31 \text{ km s}^{-1}$ . De plus, en utilisant les équations (7) et (8), on trouve la dispersion moyenne de la vitesse verticale par rapport à la norme locale de

Rest (LSR) est de  $25,22 \text{ km s}^{-1}$  pour les fusées à propulsion chimique.

### 3. Densité locale et taux de détection

Compte tenu de la vitesse moyenne  $v_{\infty}$  des objets interstellaires d'intérêt,

nous pouvons utiliser le taux de détection dans une région donnée pour estimer la densité des objets. Soit  $r_d$

le taux de détection des objets, et que  $A_d$  soit la surface effective de la section transversale de la région étudiée où la détection est possible. Pour toute classe d'objets ayant une vitesse  $v_\infty$  par rapport au Soleil, nous pouvons calculer la densité du nombre de ces objets.

$$\rho_i^o \approx \frac{rd_i}{v_\infty A_d} \quad (16)$$

L'estimation de la densité en nombre des objets liés par le disque mince est également affectée par la hauteur d'échelle des objets. L'estimation de la densité pour les objets à une hauteur  $z$  au-dessus du plan galactique est la suivante,

$$\rho_i^z = \rho_0 e^{-\frac{\phi_z}{\sigma_z^2}} \quad (17)$$

où  $\rho_0$  est la densité des objets d'intérêt dans le plan galactique et  $\phi_z$  est le potentiel gravitationnel à une distance verticale  $z$  du plan galactique. Nous considérons le cas d'un disque galactique mince comme un rasoir avec une densité de surface locale,  $\Sigma$ , et une hauteur d'échelle stellaire,

$$h \approx \frac{\sigma^2}{G\Sigma} \quad (18)$$

La relation entre la hauteur d'échelle et la dispersion verticale de la vitesse est  $h \propto \frac{1}{\sigma^2}$ . Ainsi, la hauteur d'échelle moyenne des objets considérés est,

$$h_i = h_* \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_*}\right)^2 \quad (19)$$

Alors, la densité des objets d'intérêt à une hauteur donnée  $z$  est,

$$\rho_i^z = \rho_0 e^{-\frac{z}{h_i}} \quad (20)$$

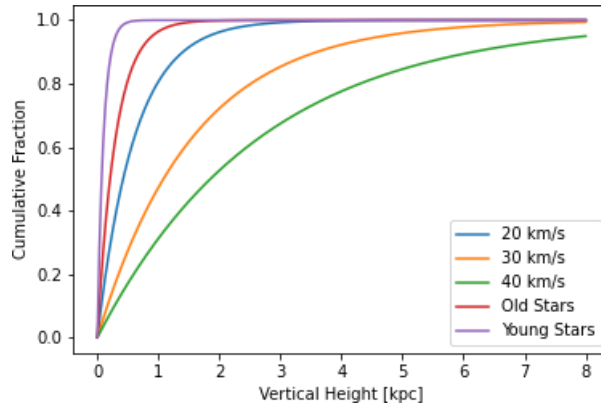


Figure 1 : Fraction cumulée d'étoiles jeunes, d'étoiles anciennes [9] et de sondes lancées à différentes vitesses initiales liées par le disque mince de la Voie lactée en fonction de la



hauteur verticale  $z$  au-dessus du plan galactique.

Nous supposons une densité locale du nombre d'étoiles de  $\rho^*$ . Si les objets ne sont pas ciblés, nous estimons l'abondance des objets d'intérêt par étoile dans la région solaire.

le quartier en  $\frac{\rho^*}{\rho^*}$ . Cependant, si les objets interstellaires sont dirigés, nous devons tant que considérer leurs concentrations plus élevées dans les régions ciblées. Nous supposons que les régions de

Les intérêts sont des systèmes stellaires ou des régions au sein de systèmes stellaires (par exemple, des zones habitables).

Pour les sondes fonctionnelles des missions ciblées, nous considérons que  $V_t$  est le volume moyen d'une région ciblée autour d'une étoile. Ensuite, la densité locale estimée des objets ciblés dans le voisinage solaire est réduite par un facteur de  $\rho^* V_t$ . Les objets ciblés peuvent être lancés vers des systèmes stellaires particuliers, comme ceux qui contiennent des planètes habitables. La densité locale moyenne estimée des objets est alors réduite par un autre facteur de  $p_t$ , ou la probabilité qu'un système planétaire donné soit ciblé parce qu'il abrite des planètes rocheuses habitables.

Nous adoptons  $p_i = 1$  si les objets sont dirigés, et  $p_i = 0$  sinon. Sur la base de nos observations de la densité des objets dans le voisinage solaire, nous estimons la quantité totale d'objets d'intérêt liés par le disque mince comme,

$$n_i = \int_0^\infty \int_0^\infty (p_t \rho_t V_t)^{p_i} \frac{r_d}{v \infty A d} e^{-\frac{(z-z_0)^2}{r_0^2}} dz) 2\pi r e^{-(r-r_0)} dr, \quad (21)$$

où  $z_0$  est la distance verticale du Soleil au-dessus du plan galactique,  $r_0$  est la distance du Soleil au centre galactique le long du plan médian, et  $r_0$  est le rayon d'échelle de la Voie lactée. Nous adoptons les valeurs de  $z_0 = 20,8$  pc [14],  $r_0 = 3$  kpc, et  $r_0 = 8$  kpc basées sur les données existantes [9].

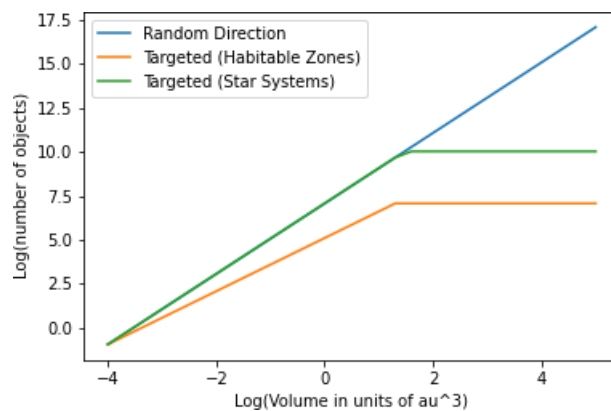


Figure 2 : Abondance déduite des technosignatures dans une région d'étude sphérique autour du Soleil en fonction de son volume pour les sondes aléatoires et ciblées.

Supposons que les observations astronomiques aient conduit à la découverte

de sondes à propulsion chimique dans la zone habitable de notre système solaire avec une densité locale observée  $\rho^0$ . La densité locale du nombre d'étoiles est  $\rho^* \approx 0,1 \text{ pc}^{-3}$ [15]. Pour les objets ciblés vers les zones habitables, on a  $V_t \approx 1 \text{ UA}$  ou  $\approx 10 \text{ pc}$ . De plus,

Une estimation courante de la fraction de systèmes stellaires avec des planètes semblables à la Terre dans des zones habitables est  $p_t \approx 0,1$  [11], et il est plausible que seuls ces systèmes stellaires soient ciblés par des sondes à la recherche de vie extraterrestre.

Compte tenu des propriétés susmentionnées des fusées à propulsion chimique et d'un taux de détection hypothétique de  $\rho^O = 0,1 \text{ an}^{-1}$  pour les météores interstellaires de la taille d'un mètre qui entrent en collision avec la Terre, l'équation (21) estime un total de  $3,65 \cdot 10^{34}$  de ces météores. objets liés au disque mince de la Voie lactée s'ils ne sont pas ciblés, ou  $3,65 \cdot 10^{18}$  objets s'ils sont ciblés.

#### 4. Discussion

Nous estimons la quantité totale d'objets interstellaires similaires à ceux que nous avons déjà détectés, y compris l'objet interstellaire d'origine inconnue 'Oumuamua et les météores interstellaires CNEOS 2014-01-08 (IM1) et CNEOS 2017-03-09 (IM2).

Oumuamua a un diamètre estimé à environ 200 mètres [3]. Le télescope Pan STARRS, qui a détecté Oumuamua, a fonctionné en effectuant 6 600 opérations "quad" (4 revisites) sur des périodes de 80 jours, chaque période donnant lieu à un volume de détection de  $0,3 \text{ UA}^3$  pour un objet ayant la taille et les autres propriétés suivantes de Oumuamua [16]. Il en résulte un volume de détection de  $\sim 1,37 \text{ UA}^3 \text{ yr}^{-1}$ . Compte tenu des capacités du relevé Pan-STARRS et de l'absence de détection d'autres objets semblables à Oumuamua, l'abondance des objets semblables à Oumuamua dans le voisinage solaire est approximativement de  $\rho^O = 0,1 \text{ AU}^{-3}$ , ou  $10^{15} \text{ pc}^{-3}$  [17].

Sur la base de l'équation (21), notre estimation de la quantité totale d'objets similaires à Oumuamua

Le nombre d'objets liés au disque mince s'ils ne sont pas ciblés est de  $1,91 \cdot 10^{26}$ , ce qui correspond aux estimations précédentes de l'abondance d'objets similaires [18]. Cette estimation s'applique aussi bien dans le cas où Oumuamua est d'origine naturelle, que dans le cas où Oumuamua est un débris spatial artificiel qui n'est pas ciblé vers un endroit particulier de l'espace.

Cependant, l'abondance déduite des sondes est nettement différente dans le cas d'objets semblables à Oumuamua dirigés vers des régions particulières de la galaxie, notamment des zones habitables contenant des planètes. Oumuamua a été détecté à une distance de  $0,2 \text{ UA}$  de la Terre, et il a traversé la zone habitable de notre système solaire [19]. Le nombre total estimé d'objets semblables à Oumuamua serait alors de  $1,91 \cdot 10^{10}$ .

Le météore interstellaire IM1 avait un diamètre estimé à  $0,45 \text{ m}$  et une taille de  $1,5 \text{ m}$  de  $60 \text{ km s}^{-1}$ , mais il était détectable lorsqu'il est entré et s'est consumé dans l'atmosphère de la Terre [1]. Le taux de détection estimé pour les météores interstellaires similaires à CNEOS est d'au moins  $0,1 \text{ an}^{-1}$  [1], ce qui donne une densité locale de  $0,1 \%$ .

estimation de  $\rho^O = 10^6 \text{ AU}^{-3} = 10^{22} \text{ pc}^{-3}$ . Nous estimons alors  $7,59 \cdot 10^{34}$  objets de type IM1 liés par le disque mince de la Voie lactée. Cependant, si les objets de type

Les propriétés de IM1 étaient ciblées sur les zones habitables contenant des planètes, nous estimons à  $7,59 \cdot 10^{18}$  le nombre de ces objets. IM2 avait une densité numérique déduite similaire à celle de IM1 et une vitesse de  $40 \text{ km s}^{-1}$  par rapport à l'étalon local de repos [2].

Nous estimons à  $2,78 \times 10^{34}$  les objets de type IM2, et notre estimation serait réduite à  $2,78 \times 10$  si ces objets étaient ciblés vers les zones habitables.

## 5. Conclusion

L'abondance des ISOs dépend de leur taille et peut être calibrée grâce à de futurs relevés tels que le Legacy Survey of Space and Time (LSST) sur la Vera C. Rubin au Chili.<sup>1</sup> Les données du télescope spatial James Webb pourraient permettre d'identifier la nature et la trajectoire en 3D d'autres objets de type 'Oumuamua ou d'autres objets interstellaires traversant le système solaire ou piégés dans celui-ci [6, 20]. Le projet Galileo<sup>2</sup> a été établi en 2021 [21] pour rechercher des artefacts astro-archéologiques potentiels provenant de CTE, y compris des objets interstellaires anormaux qui pourraient être révélés par le télescope Webb de Vera C. Rubin.

Observatoire. Le projet Galileo recherchera également des phénomènes aériens non identifiés (UAP) dans l'atmosphère de la Terre [21]. Au fur et à mesure que des objets d'origine inter stellaire seront découverts par le projet Galileo, les estimations de la densité numérique pourront être améliorées en fonction des taux de détection. Si des équipements extraterrestres sont découverts lors d'une étude de l'espace, nous pouvons estimer la quantité totale de ces objets selon qu'il s'agit de débris spatiaux défectueux ou de sondes fonctionnelles.

En outre, la quantité d'ISOs permet de calculer le budget de masse nécessaire par étoile pour produire les objets. Si les objets interstellaires proviennent de disques protoplanétaires, nos estimations de la quantité peuvent imposer des contraintes supplémentaires sur la fraction de masse que les disques doivent éjecter pour obtenir une population donnée d'objets [22]. L'analyse des ISO peut également fournir des informations sur des phénomènes rares ou inattendus, notamment une composition inhabituelle des matériaux ou la possibilité qu'ils transportent des matériaux prébiotiques ou biotiques sur des distances interstellaires [23]. L'expédition prévue par le projet Galileo pour récupérer les fragments interstellaires de CNEOS 2014-01-08 permettra d'en savoir plus sur la force des matériaux rares, les abondances isotopiques et la nature de ces objets [24].

## 6. Remerciements

Ce travail a été soutenu en partie par le projet Galileo de l'Université de Harvard.

## Références

- [1] A. Siraj, A. Loeb, The 2019 Discovery of a Meteor of Interstellar Origin, arXiv:1904.07224 [astro-ph] (avril 2022). doi:10.48550/arXiv.1904.07224. URL <http://arxiv.org/abs/1904.07224>
- [2] A. Siraj, A. Loeb, Interstellar Meteors are Outliers in Material Strength, arXiv:2209.09905 [astro-ph] (sept. 2022). URL <http://arxiv.org/abs/2209.09905>

<sup>1</sup><https://www.lsst.org/about><sup>2</sup>  
<https://projects.iq.harvard.edu/galileo/home>

- [3] K. J. Meech, R. Weryk, M. Micheli, J. T. Kleyna, O. R. Hainaut, R. Jedicke, R. J. Wainscoat, K. C. Chambers, J. V. Keane, A. Petric, L. Denneau, E. Magnier, T. Berger, M. E. Huber, H. Flewelling, C. Waters, E. Schunova-Lilly, S. Chastel, A brief visit from a red and extremely elongated interstellar asteroid, *Nature* 552 (7685) (2017) 378-381, numéro : 7685 Publisher : Nature Publishing Group.  
doi:10.1038/nature25020.  
URL <https://www.nature.com/articles/nature25020>
- [4] M. Micheli, D. Farnocchia, K. J. Meech, M. W. Buie, O. R. Hainaut, D. Prialnik, N. Schörghofer, H. A. Weaver, P. W. Chodas, J. T. Kleyna, R. Weryk, R. J. Wainscoat, H. Ebeling, J. V. Keane, K. C. Chambers, D. Koschny, A. E. Petropoulos, Non-gravitational acceleration in the trajectory of 1I/2017 U1 ('Oumuamua), *Nature* 559 (7713) (2018) 223-226, numéro : 7713 Publisher : Nature Publishing Group.  
doi:10.1038/s41586-018-0254-4.  
URL <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0254-4>
- [5] P. Guzik, M. Drahus, K. Rusek, W. Waniak, G. Cannizzaro, I. Pastor-Marazuela, Initial characterization of interstellar comet 2I/Borisov, *Nature Astronomy* 4 (1) (2020) 53-57, arXiv:1909.05851 [astro-ph]. doi:10.1038/s41550-019-0931-8.  
URL <http://arxiv.org/abs/1909.05851>
- [6] A. Siraj, A. Loeb, Identifying Interstellar Objects Trapped in the Solar System through Their Orbital Parameters, *The Astrophysical Journal* 872 (2019) L10, aDS Bibcode : 2019ApJ...872L..10S.  
doi:10.3847/2041-8213/ab042a.  
URL <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ApJ...872L..10S>
- [7] F. D. Drake, The Radio Search for Intelligent Extraterrestrial Life, 1965, pages : 323-345 Titre de publication : In Current aspects of exobiology ADS Bibcode : 1965cae..book..323D.  
URL <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1965cae..book..323D>
- [8] T. Westby, C. J. Conselice, The Astrobiological Copernican Weak and Strong Limits for Intelligent Life, *The Astrophysical Journal* 896 (1) (2020) 58, éditeur : American Astronomical Society.  
doi:10.3847/1538-4357/ab8225.  
URL <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab8225>
- [9] J. Binney, S. Tremaine, Disk Dynamics and Spiral Structure, in : Galactic Dynamics, 2008, pp. 456-553.  
URL <https://press.princeton.edu/books/paperback/9780691130279/galactique-dynamique>
- [10] K. Vieira, G. Carraro, V. Korchagin, A. Lutsenko, T. M. Girard, W. van Altena, Milky Way thin and thick disk kinematics with GAIA EDR3 and



- RAVE DR5, *The Astrophysical Journal* 932 (1) (2022) 28,  
arXiv:2205.00590 [astro-ph]. doi:10.3847/1538-4357/ac6b9b.  
URL <http://arxiv.org/abs/2205.00590>
- [11] M. Lingam, A. Loeb, *Life in the Cosmos : From Biosignatures to Technosignatures*, Harvard University Press, 2021.
- [12] E. Böhm-Vitense, *Introduction to Stellar Astrophysics*, Vol. 3, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.  
doi:10.1017/CBO9780511623028.  
URL <https://www.cambridge.org/core/books/introduction-to-stellar-astrophysics/COB359B1AAE3C6EDEAA31530E2AA6D5C>
- [13] L. Zeng, D. D. Sasselov, S. B. Jacobsen, Mass-Radius Relation for Rocky Planets Based on PREM, *The Astrophysical Journal* 819 (2) (2016) 127, éditeur : American Astronomical Society.  
doi:10.3847/0004-637X/819/2/127.  
URL <https://doi.org/10.3847/0004-637x/819/2/127>
- [14] M. Bennett, J. Bovy, Vertical waves in the solar neighbourhood in Gaia DR2, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 482 (1) (2019) 1417-1425. doi:10.1093/mnras/sty2813.  
URL <https://doi.org/10.1093/mnras/sty2813>
- [15] J. Holmberg, C. Flynn, The local density of matter mapped by Hipparcos, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 313 (2) (2000) 209-216, arXiv:astro-ph/9812404.  
doi:10.1046/j.1365-8711.2000.02905.x.  
URL <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9812404>
- [16] A. Do, M. A. Tucker, J. Tonry, Interstellar Interlopers : Number Density and Origin of 'Oumuamua-like Objects, *The Astrophysical Journal*. 855 (1) (2018) L10, éditeur : American Astronomical Society.  
doi:10.3847/2041-8213/aaae67.  
URL <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaae67>
- [17] A. Siraj, A. Loeb, The Mass Budget Necessary to Explain 'Oumuamua as a Nitrogen Iceberg, *New Astronomy* 92 (2022) 101730, arXiv:2103.14032 [astro-ph]. doi:10.1016/j.newast.2021.101730.  
URL <http://arxiv.org/abs/2103.14032>
- [18] D. Jewitt, D. Z. Seligman, The Interstellar Interlopers, arXiv:2209.08182 [astro-ph] (sept. 2022).  
URL <http://arxiv.org/abs/2209.08182>
- [19] S. J. Desch, A. P. Jackson, 1I/'Oumuamua as an N<sub>2</sub> Ice Fragment of an Exo-Pluto Surface II : Generation of N<sub>2</sub> Ice Fragments and the Origin of 'Oumuamua, *Journal of Geophysical Research : Planets* 126 (5) (2021) e2020JE006807, eprint :

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2020JE006807>.  
doi:10.1029/2020JE006807.

URL

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020JE006807>

- [20] D. J. Hoover, D. Z. Seligman, M. J. Payne, The Population of Interstellar Objects Detectable with the LSST and Accessible for In Situ Rendezvous with Various Mission Designs, *The Planetary Science Journal* 3 (3) (2022) 71, éditeur : IOP Publishing. doi:10.3847/PSJ/ac58fe.  
URL  
<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/PSJ/ac58fe/meta>
- [21] A. Loeb, Overview of the Galileo Project, arXiv:2209.02479 [astro-ph, physics:physics] (août 2022).  
URL <http://arxiv.org/abs/2209.02479>
- [22] A. Siraj, A. Loeb, Preliminary Evidence That Protoplanetary Disks Eject More Mass Than They Retain, arXiv:2108.13429 [astro-ph] (août 2021).  
URL <http://arxiv.org/abs/2108.13429>
- [23] A. Siraj, A. Loeb, The New Astronomical Frontier of Interstellar Objects, arXiv:2111.05516 [astro-ph] (Nov. 2021).  
URL <http://arxiv.org/abs/2111.05516>
- [24] A. Siraj, A. Loeb, T. Gallaudet, An Ocean Expedition by the Galileo Project to Retrieve Fragments of the First Large Interstellar Meteor CNEOS 2014-01-08, arXiv:2208.00092 [astro-ph] (août 2022).  
URL <http://arxiv.org/abs/2208.00092>