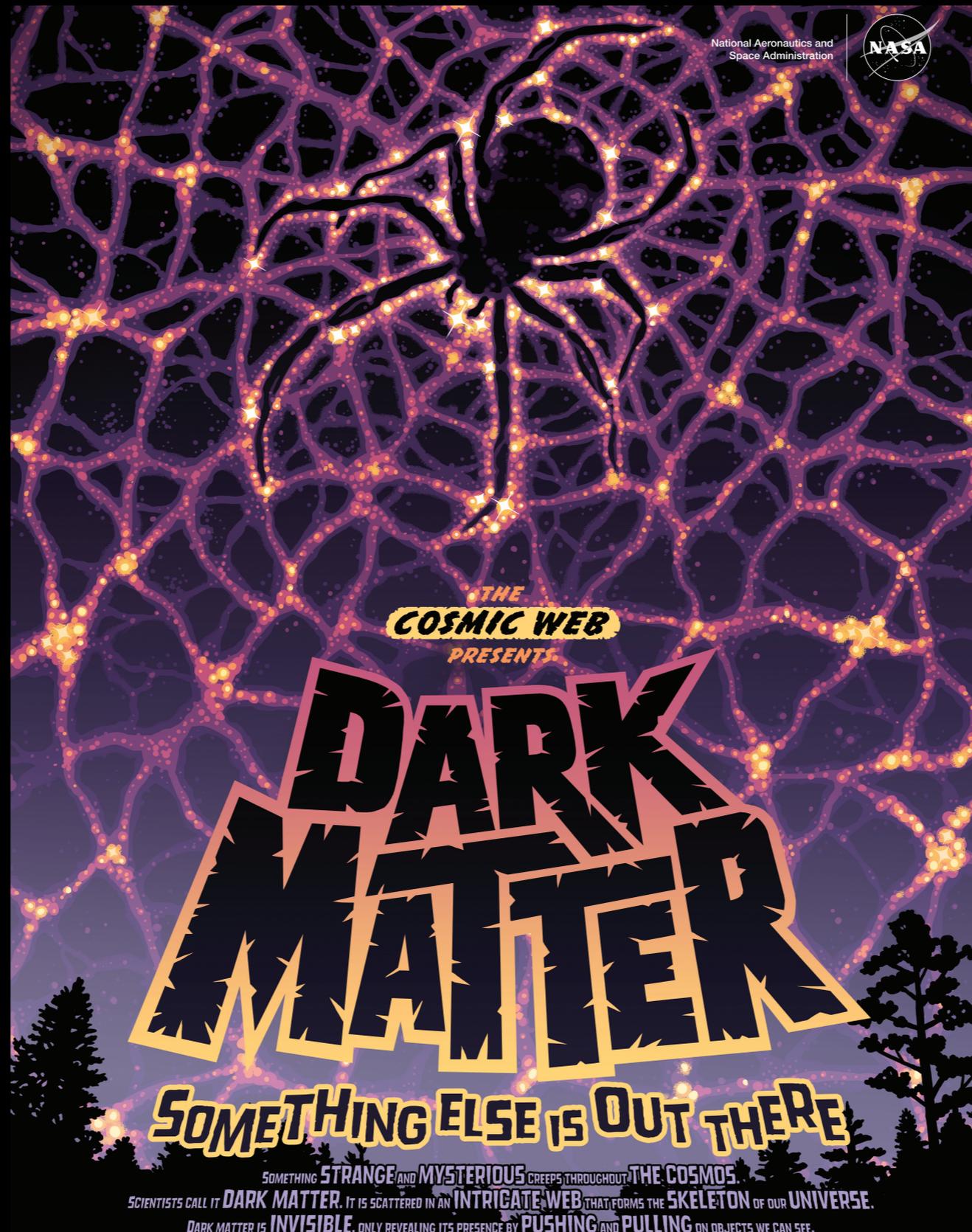


Matière noire : mirage ou réalité ?



Matière noire : mirage ou réalité ?

Cours 1 (10/01/23) : Peser l'Univers grâce à la loi de la gravitation

- Modéliser le mouvement des astres : Ptolémée, Copernic, Newton, Einstein
- Mesurer la masse de la Terre et du Soleil
- Découvrir l'invisible: Neptune, les exoplanètes, le trou noir central de notre Galaxie

Cours 2 (17/01/23) : Le problème de la masse manquante : la matière noire

- Les galaxies à différentes longueurs d'onde : le visible et l'invisible
- Les courbes de rotation des galaxies
- A la recherche de la masse manquante : gaz, trous noirs, neutrinos, etc.
- Le modèle cosmologique actuel

Cours 3 (24/01/23) : L'histoire de l'Univers avec matière noire froide

- Le Big Bang, la nucléosynthèse primordiale et le fond diffus cosmologique
- Le scénario hiérarchique de formation des galaxies
- La toile cosmique et les halos de matière noire
- La formation des étoiles et des galaxies et les phénomènes de rétroaction

Cours 4 (31/01/23) : Les défis du modèle cosmologique actuel

- La non-détection des particules de matière noire
- Les problèmes à l'échelle des galaxies
- Résoudre une partie des problèmes grâce aux phénomènes de rétroaction
- L'énergie noire et la constante de Hubble

Cours 5 (07/02/23) : Les alternatives à la matière noire froide

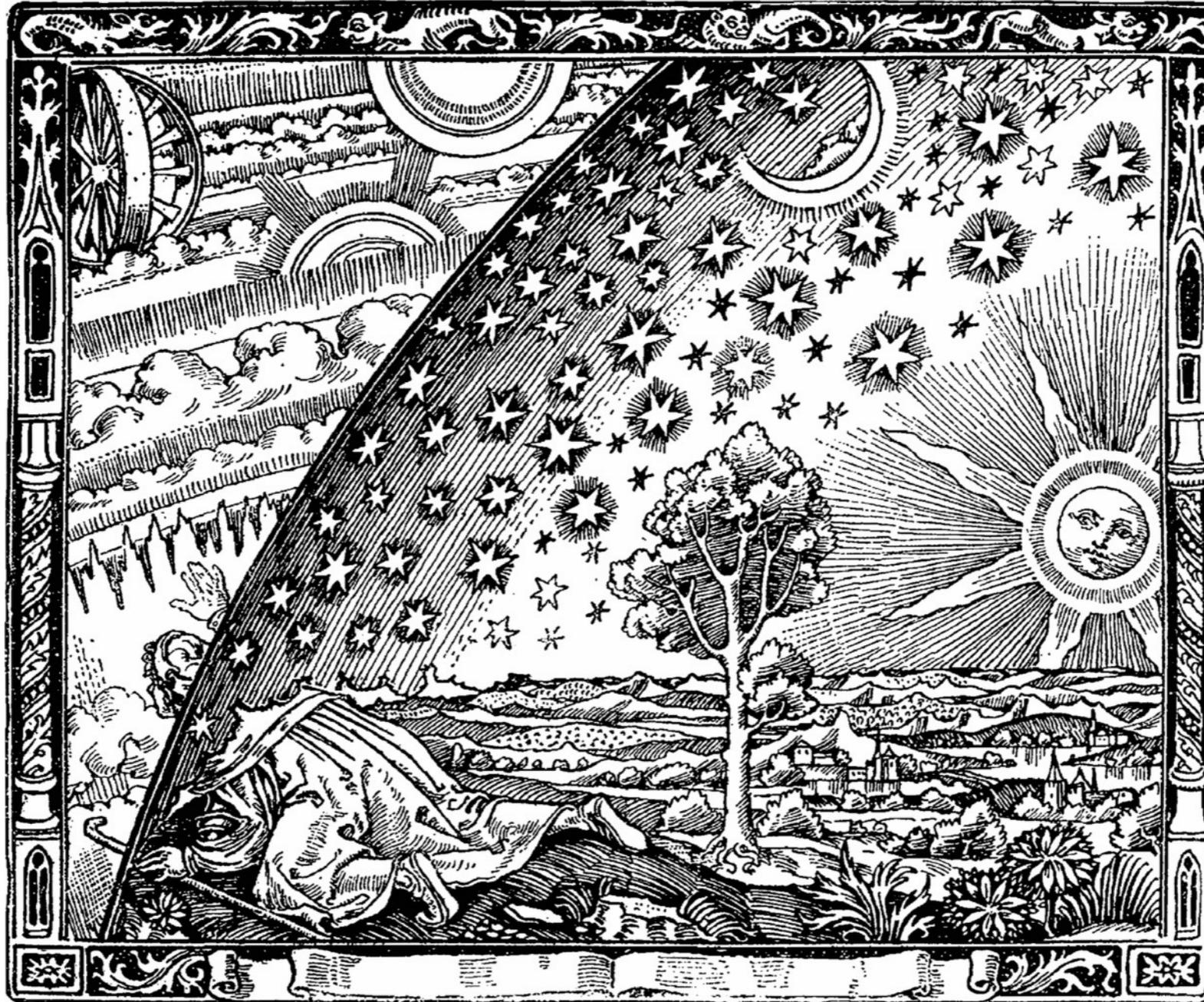
- Les autres types de matière noire : chaude, tiède, floue, interagissant avec elle-même
- La gravité modifiée

Du ciel étoilé à des modèles théoriques: spécificité de l'astronomie



Monde sublunaire et cosmos chez Aristote (384-322 av. J.C.)

- Monde sublunaire : le physicien cherche à percer la nature des choses
- Cosmos : l'astronome mathématicien rend compte des phénomènes (sauve les apparences)

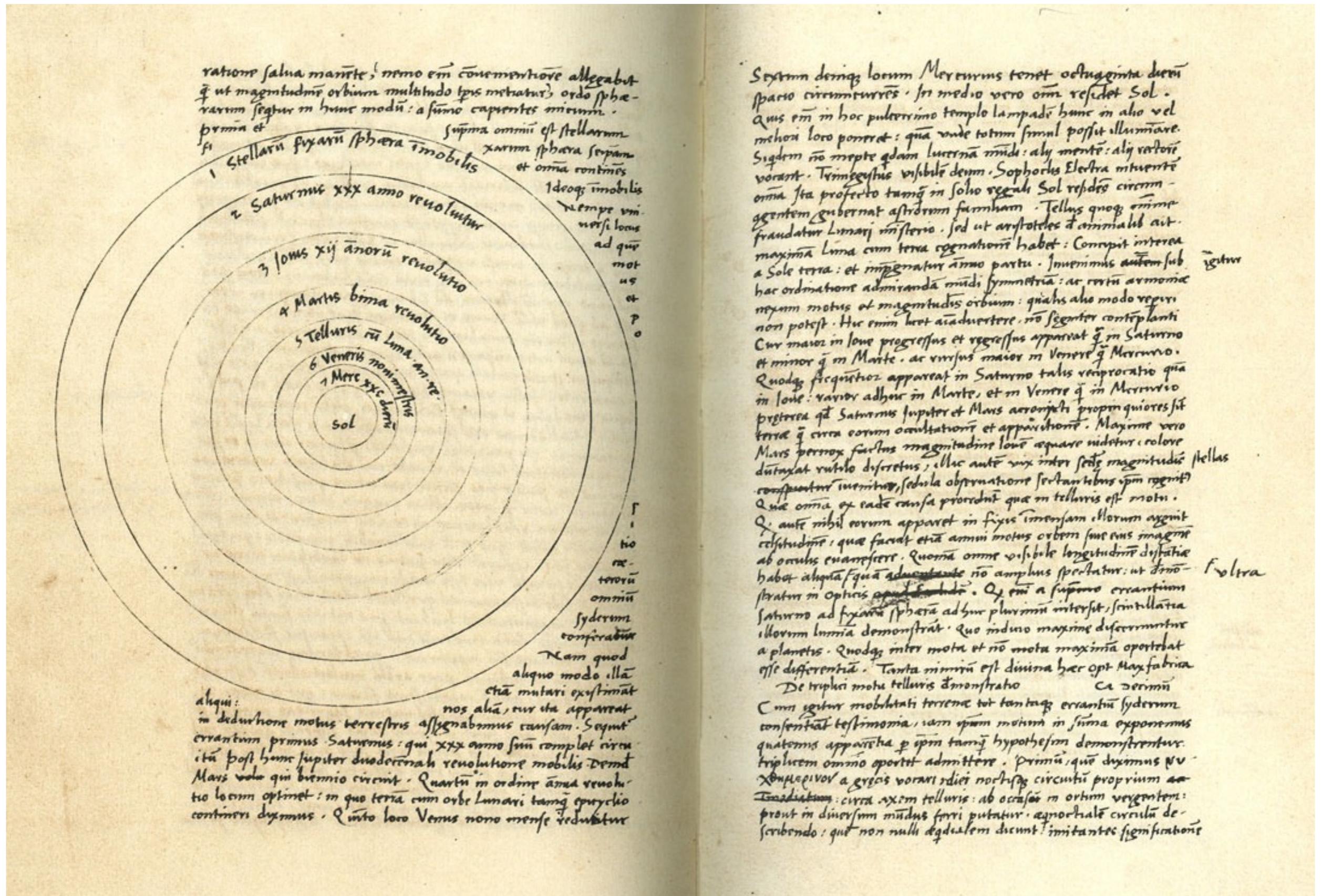


Camille Flammarion, *L'atmosphère : météorologie populaire* (1888)

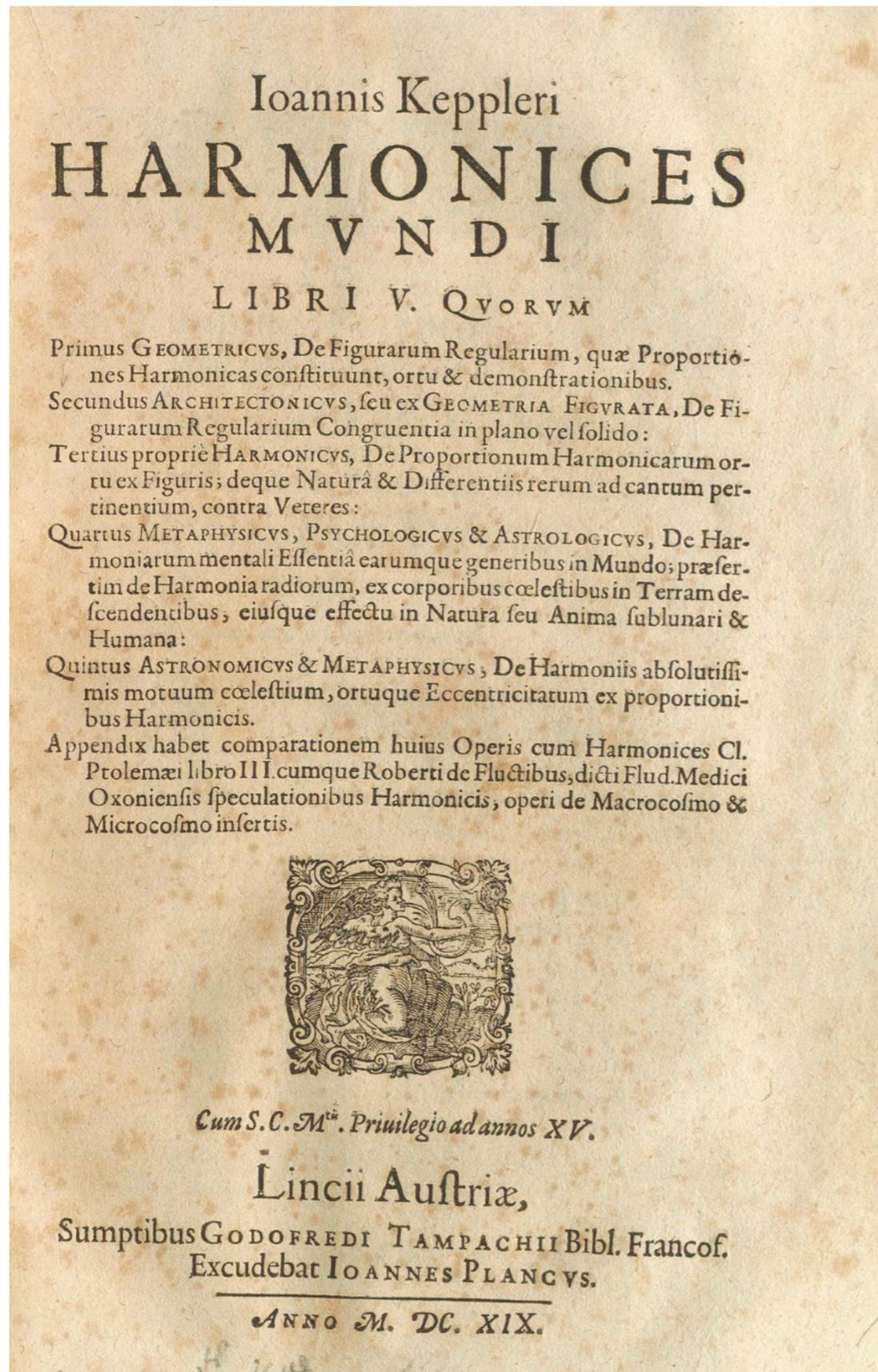
Sénèque : Questions naturelles, VII, II-III, 1 :

« Il est bon, pour avancer dans cette recherche, de nous demander si les comètes sont de même nature que les astres. Elles ont des points de ressemblance avec eux, elles se lèvent, elles se couchent ; sauf la diffusion et la longueur, **elles en ont l'aspect, le feu, la splendeur.** Si donc tous les astres sont des corps terrestres, les comètes auront aussi la même nature. Si les comètes ne sont qu'une flamme pure, qui subsiste six mois de suite, et que la rapide conversion du monde ne dissipe point, les astres aussi peuvent être formés d'une matière déliée, et qui n'ait rien à craindre de la révolution perpétuelle du ciel. **À ces questions se rattache celle de savoir si la Terre reste immobile, le monde circulant autour d'elle, ou si elle tourne dans le monde immobile ; car il est des philosophes qui ont affirmé que la nature nous emporte à notre insu, que ce n'est pas le ciel qui se lève et qui se couche, mais nous qui nous couchons et nous levons relativement à lui.** Un problème digne de nos méditations, c'est de savoir quelle situation est la nôtre : si notre demeure est stationnaire ou douée du plus rapide mouvement ; si Dieu fait rouler l'univers autour de nous, ou nous autour de l'univers. Il faudrait de plus avoir le tableau de toutes les comètes qui sont apparues anciennement, car leur rareté empêche de saisir la loi de leur course, et de dire avec certitude s'il y a périodicité et régularité dans leurs révolutions. Or, l'observation de ces corps célestes est de date récente, et ne s'est introduite que depuis peu dans la Grèce. »

Le modèle héliocentrique de Copernic (1473-1543)



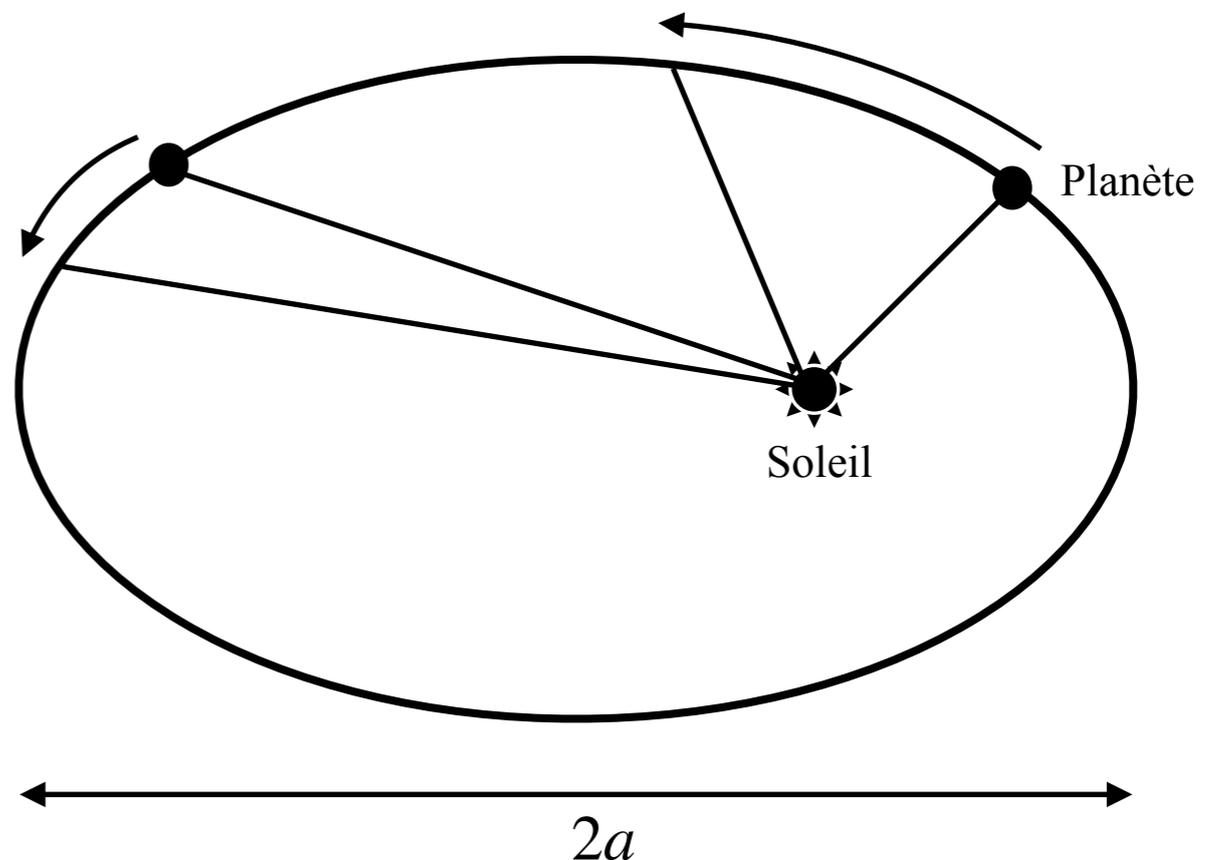
Les lois de Kepler (1571-1630)



Harmonices Mundi, 1619

- ◆ Première loi (loi des orbites) : les planètes du système solaire décrivent des trajectoires elliptiques, dont le Soleil occupe l'un des foyers.
- ◆ Deuxième loi (loi des aires) : des aires égales sont balayées dans des temps égaux.
- ◆ Troisième loi (loi des périodes) : le carré de la période T d'une planète est proportionnel au cube du demi-grand axe a de l'ellipse

$$\frac{a^3}{T^2} = \text{constante}$$



La loi universelle de la gravitation de Newton (1642-1727)

PRINCIPES MATHÉMATIQUES

DE LA

PHILOSOPHIE NATURELLE,

Par feu Madame la Marquise DU CHASTELET.

TOME PREMIER.



A PARIS,

Chez DESAINT & SAILLANT, rue S. Jean de Beauvais,
LAMBERT, Imprimeur - Libraire, rue & à côté
de la Comédie Française, au Parnasse.

M. D. C. C. L. I. X.

AVEC APPROBATION ET PRIVILÈGE DU ROI.

DE LA PHILOSOPHIE NATURELLE. 17

A X I O M E S, O U L O I X D U M O U V E M E N T.

P R E M I E R E L O I.

Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, & ne le contraigne à changer d'état.

Les projectiles par eux-mêmes persévèrent dans leurs mouvemens, mais la résistance de l'air les retarde, & la force de la gravité les porte vers la terre. Une toupie, dont les parties se détournent continuellement les unes les autres de la ligne droite par leur cohérence réciproque, ne cesse de tourner, que parce que la résistance de l'air la retarde peu à peu. Les planètes & les comètes qui sont de plus grandes masses, & qui se meuvent dans des espaces moins résistans, conservent plus long-temps leurs mouvemens progressifs & circulaires.

I I. L O I.

Les changemens qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice, & se font dans la ligne droite dans laquelle cette force a été imprimée.

Si une force produit un mouvement quelconque, une force double de cette première produira un mouvement double, & une force triple un mouvement triple, soit qu'elle ait été imprimée en un seul coup, soit qu'elle l'ait été peu à peu & successivement, & ce mouvement, étant toujours déterminé du même côté que la force génératrice, sera ajouté au mouvement que le corps est

18 PRINCIPES MATHÉMATIQUES

supposé avoir déjà, s'il conspire avec lui; ou en sera retranché, s'il lui est contraire, ou bien sera retranché ou ajouté en partie, s'il lui est oblique; & de ces deux mouvemens il s'en formera un seul, dont la détermination sera composée des deux premières.

I I I. L O I.

L'action est toujours égale & opposée à la réaction; c'est-à-dire, que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales, & dans des directions contraires.

Tout corps qui presse ou tire un autre corps est en même-temps tiré ou pressé lui-même par cet autre corps. Si on presse une pierre avec le doigt, le doigt est pressé en même-temps par la pierre. Si un cheval tire une pierre par le moyen d'une corde, il est également tiré par la pierre: car la corde qui les joint & qui est tendue des deux côtés, fait un effort égal pour tirer la pierre vers le cheval, & le cheval vers la pierre; & cet effort s'oppose autant au mouvement de l'un, qu'il excite le mouvement de l'autre.

Si un corps en frappe un autre, & qu'il change son mouvement, de quelque façon que ce soit, le mouvement du corps choquant sera aussi changé de la même quantité & dans une direction contraire par la force du corps choqué, à cause de l'égalité de leur pression mutuelle.

Par ces actions mutuelles, il se fait des changemens égaux, non pas de vitesse, mais de mouvement, pourvu qu'il ne s'y mêle aucune cause étrangère; car les changemens de vitesse qui se font de la même manière dans des directions contraires doivent être réciproquement proportionnels aux masses, à cause que les changemens de mouvement sont égaux. Cette loi a lieu aussi dans les attractions, comme je le prouverai dans le scholie suivant.

Traduction française par la marquise du Châtelet, 1759



Gotlib, Rubrique-à-brac, 2017

Lois de Newton

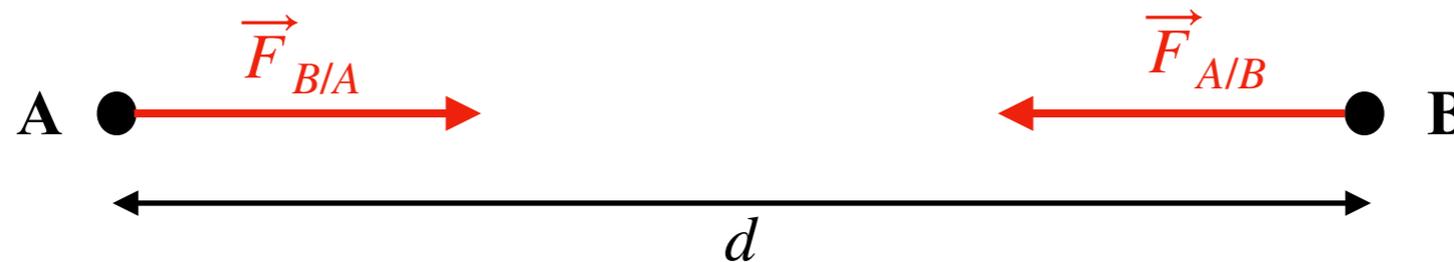
◆ Première loi de Newton (principe d'inertie) : Il existe une famille de référentiels, appelés galiléens ou inertiels, dans lesquels tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme, à moins que quelque force n'agisse sur lui.

◆ Deuxième loi de Newton (principe fondamental de la dynamique) : Les changements qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force.

$$m \vec{a} = \vec{F}$$

◆ Troisième loi (principe d'action-réaction) : Tout corps A exerçant une force sur un corps B subit une force d'intensité égale, de même direction mais de sens opposée, exercée par le corps B.

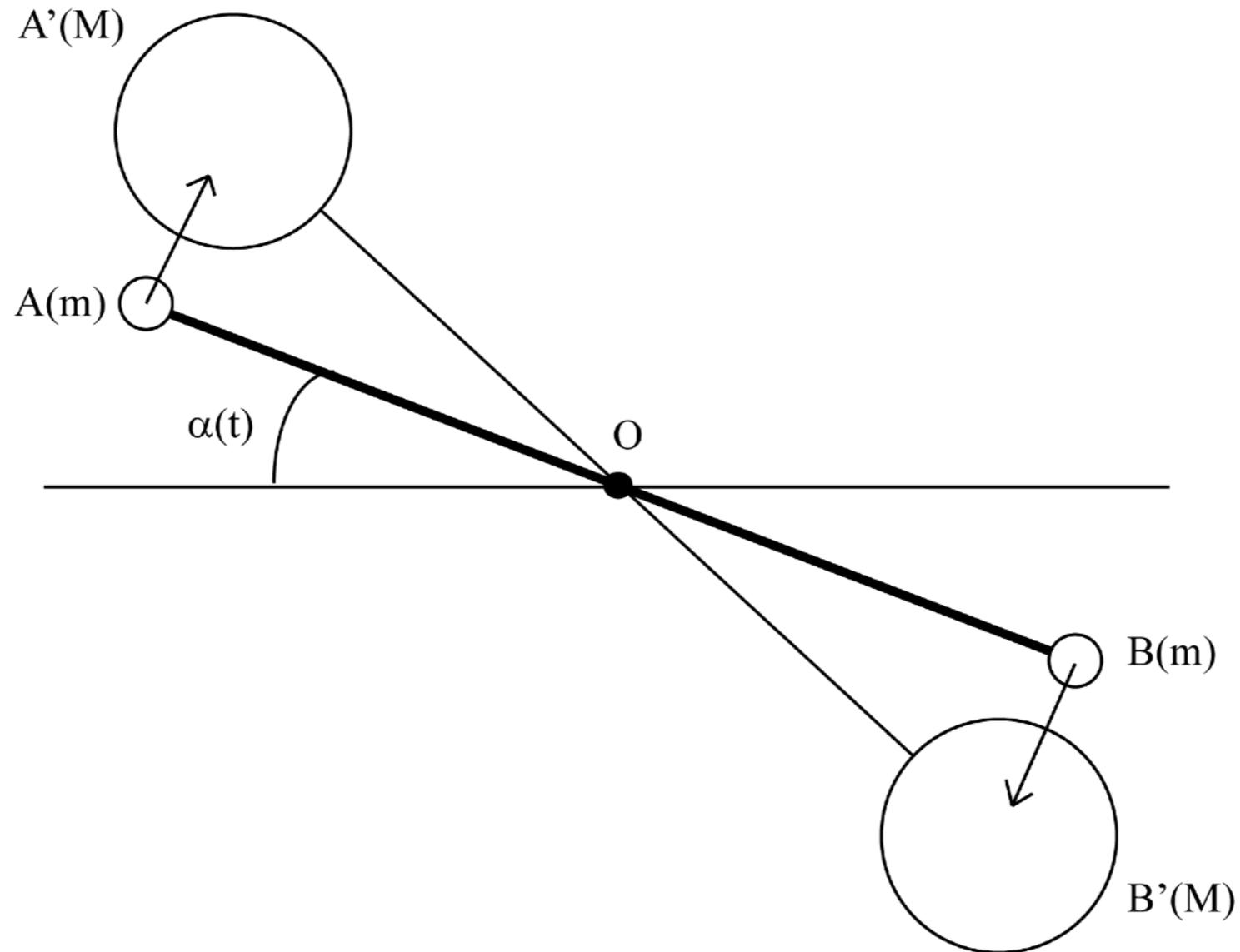
◆ La loi universelle de la gravitation :



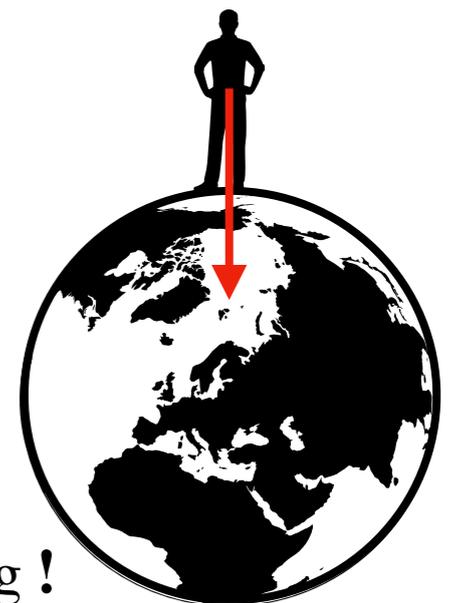
$$F_{A/B} = F_{B/A} = G \frac{M_A M_B}{d^2}$$

$G = 6.67407 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ ← c'est très petit !

Détermination de G : l'expérience de Cavendish (1798)



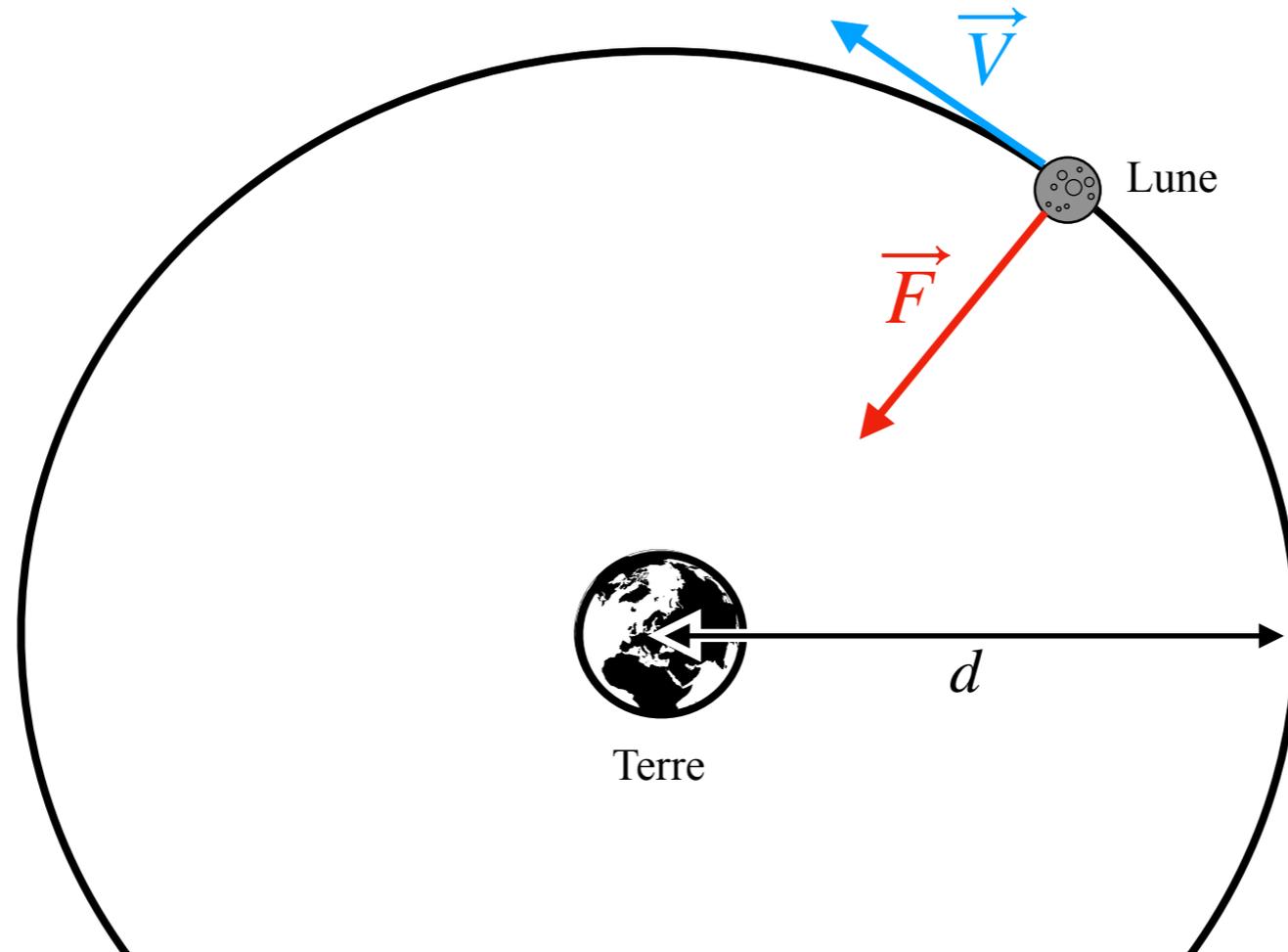
Balance de torsion



En connaissant G , on peut mesurer la masse de la Terre $M_T = 5.972 \times 10^{24}$ kg !

Cas d'une orbite circulaire uniforme

ou pourquoi la Lune ne tombe-t-elle pas sur la Terre



$$F = G \frac{M_T M_L}{d^2} = M_L a_L = M_L \frac{v^2}{d}$$

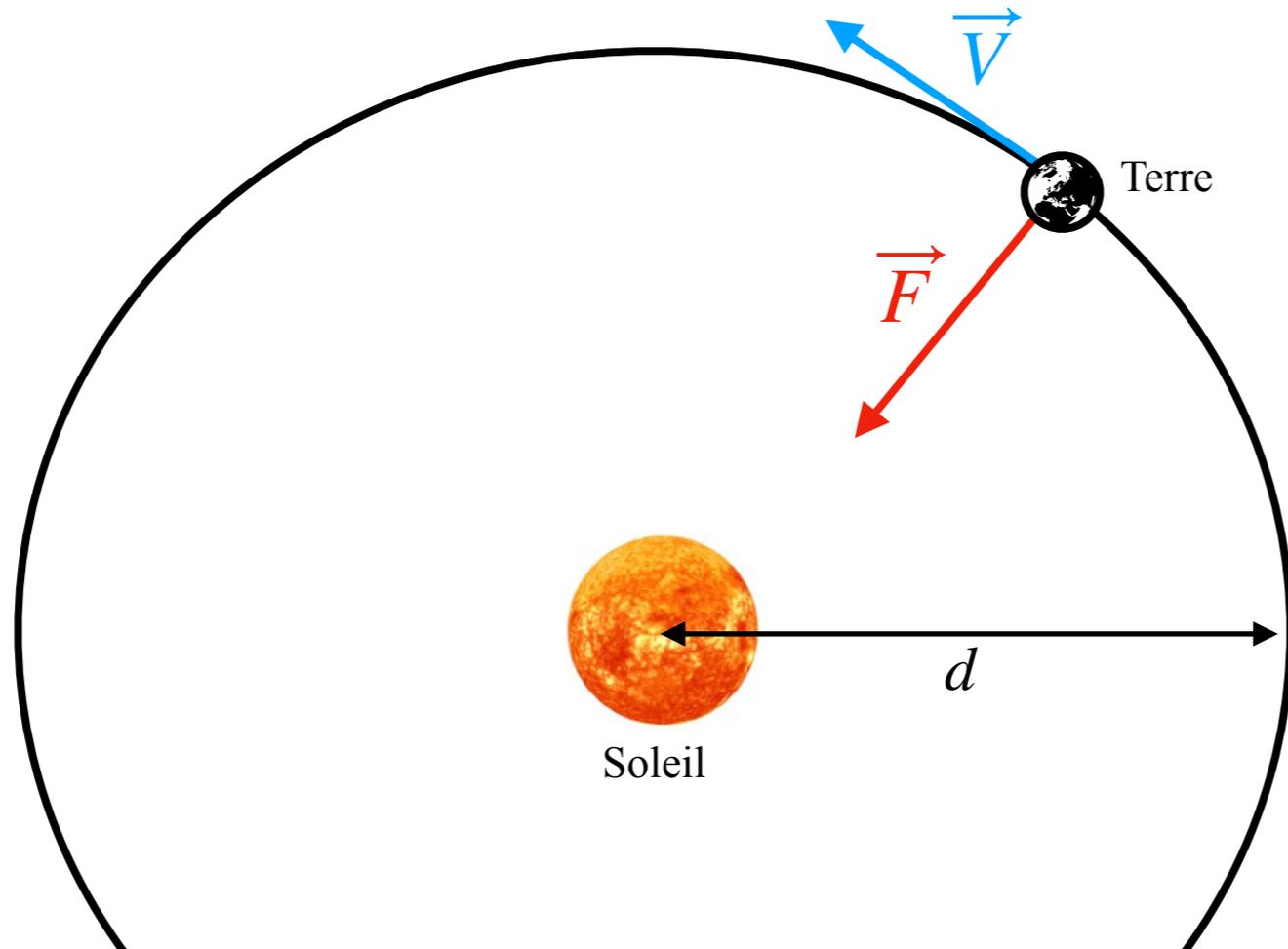
$$v^2 = \frac{GM_T}{d}$$

← la vitesse associée à cette orbite dépend directement de la masse

Ou : dans le référentiel (non galiléen) de la Lune, la force centrifuge compense exactement l'attraction gravitationnelle

Et on retrouve aussi la troisième loi de Kepler !

Détermination de la masse du Soleil



Si on connaît la distance Terre-Soleil d et la vitesse de rotation V de la Terre :

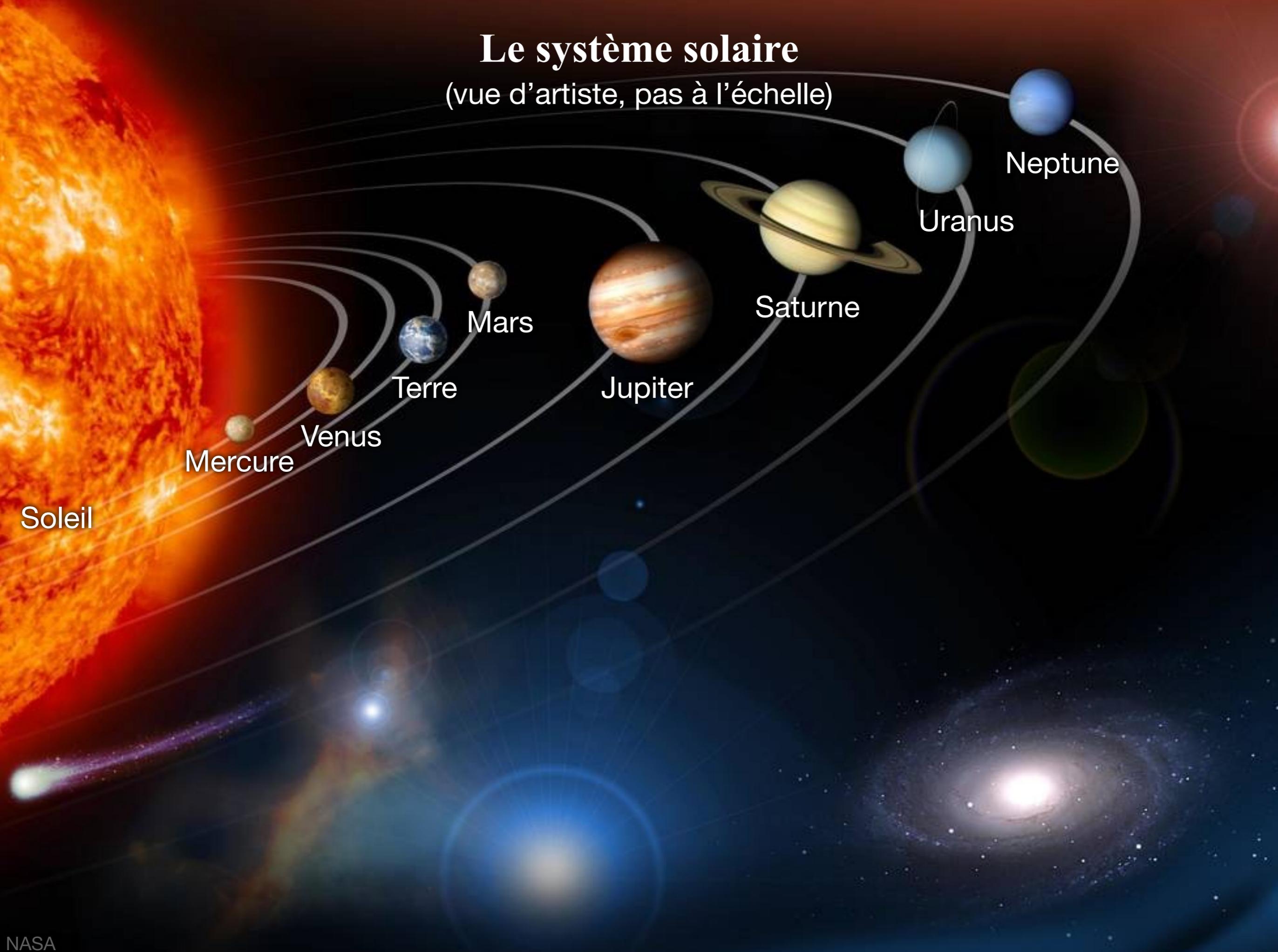
- $d = 149\,600\,000$ km (une unité astronomique)

- $V = \frac{2\pi d}{T} = 2\,575\,000$ km/jour = 107 000 km/h = 30 km/s avec T égal à 365 jours

$$V^2 = \frac{GM_S}{d} \quad \text{donne} \quad M_S = \frac{d}{G} V^2 \quad \text{et on trouve} \quad M_S = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg} \quad (= 1 M_\odot)$$

Le système solaire

(vue d'artiste, pas à l'échelle)



Soleil

Mercure

Venus

Terre

Mars

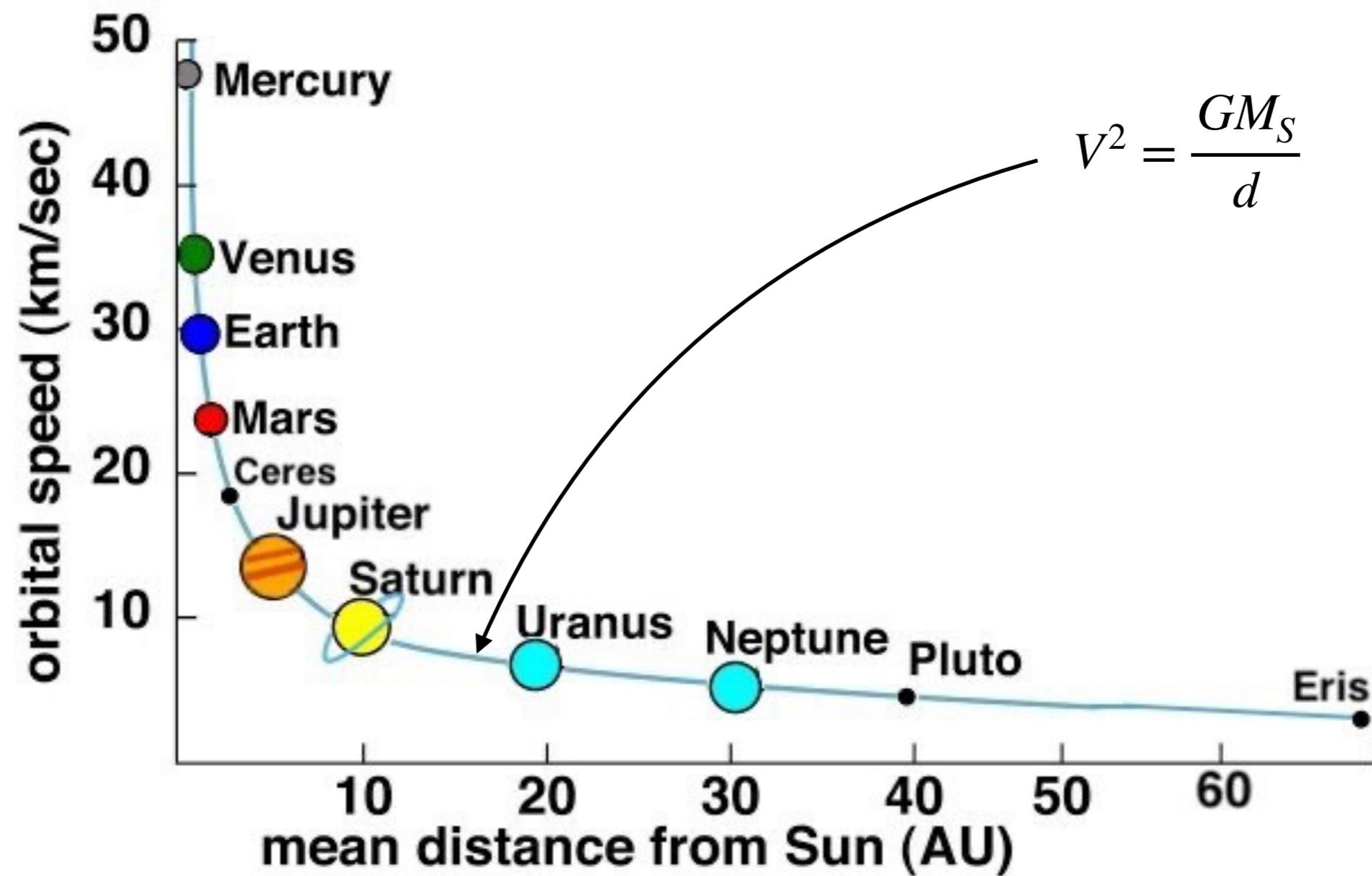
Jupiter

Saturne

Uranus

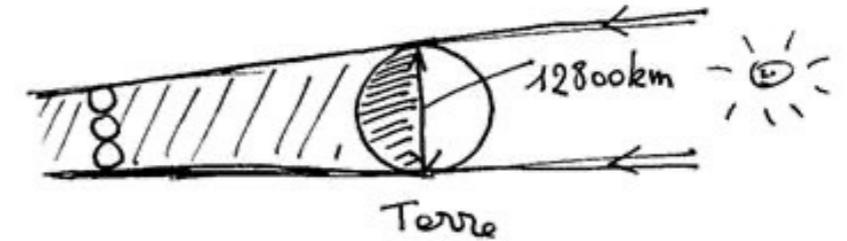
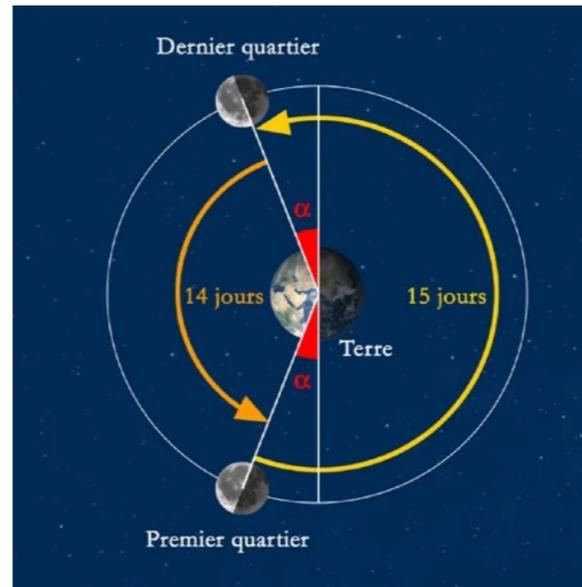
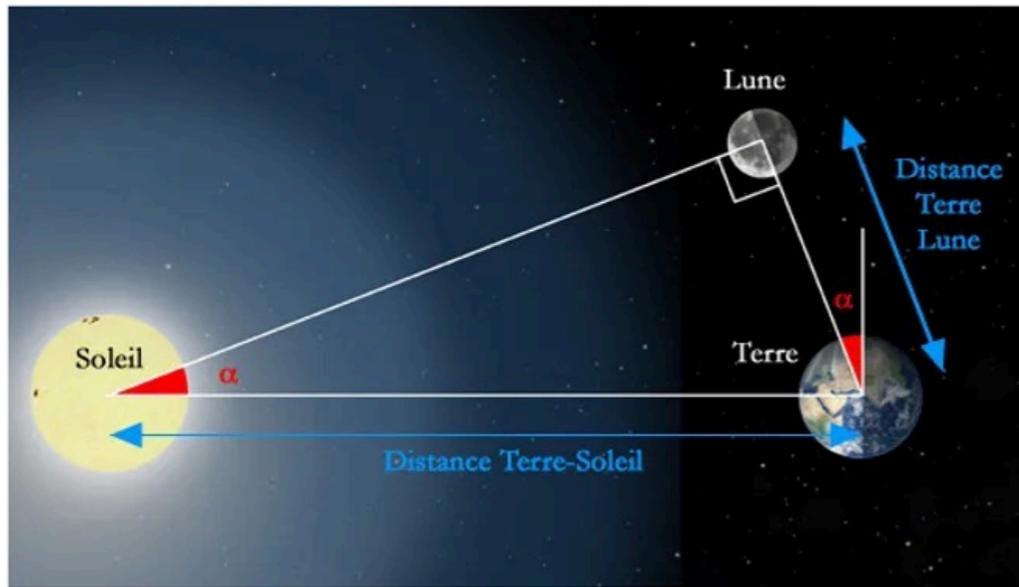
Neptune

Vitesse orbitale des planètes du Système Solaire

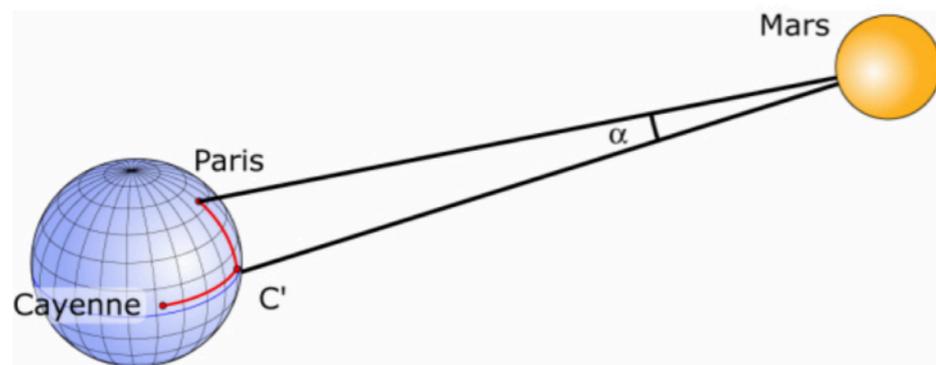


Détermination de la distance Terre-Soleil

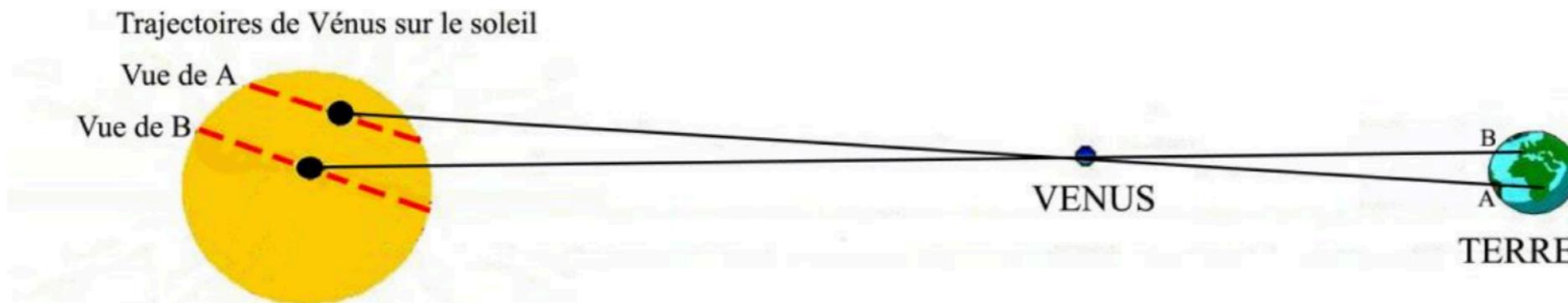
1/ Aristarque de Samos (310-230 av. J.C.) : quartiers de la Lune



2/ Cassini, Picard & Richer (1672) : en mesurant la distance Terre-Mars



2/ Lalande et al. (1771) : grâce aux transits de Vénus de 1761 et 1769

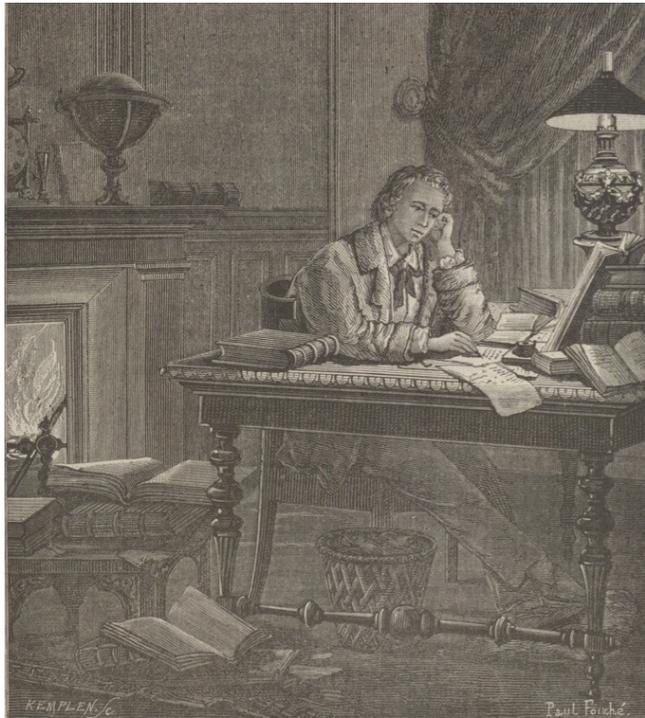


(pour un récit des expéditions de 1761 et 1769, cf. Jean-Pierre Luminet, Le rendez-vous de Vénus)

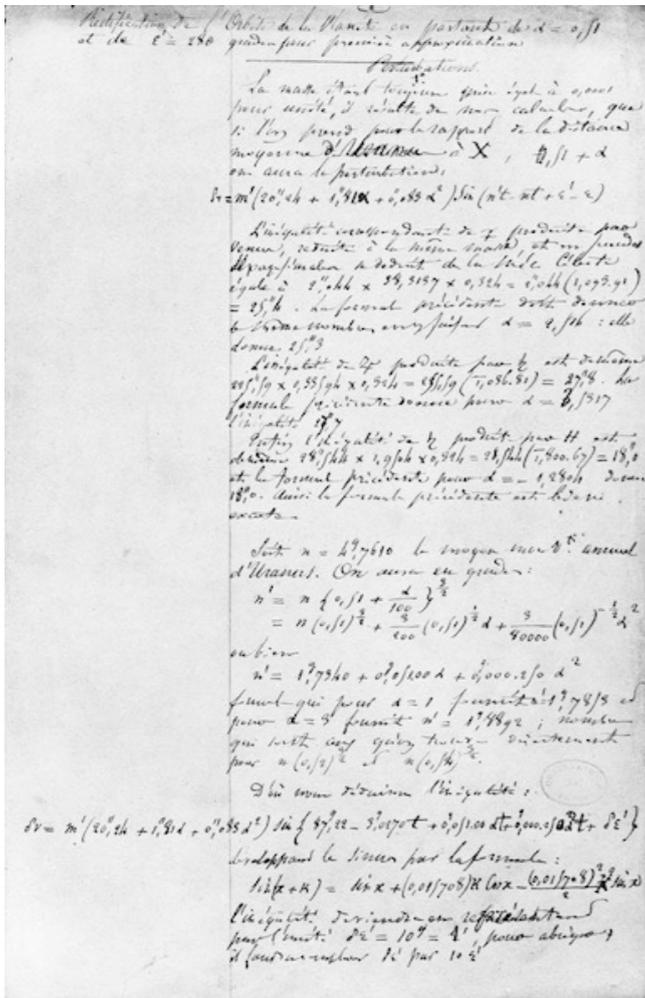


Plafond de la salle du conseil de l'Observatoire de Paris

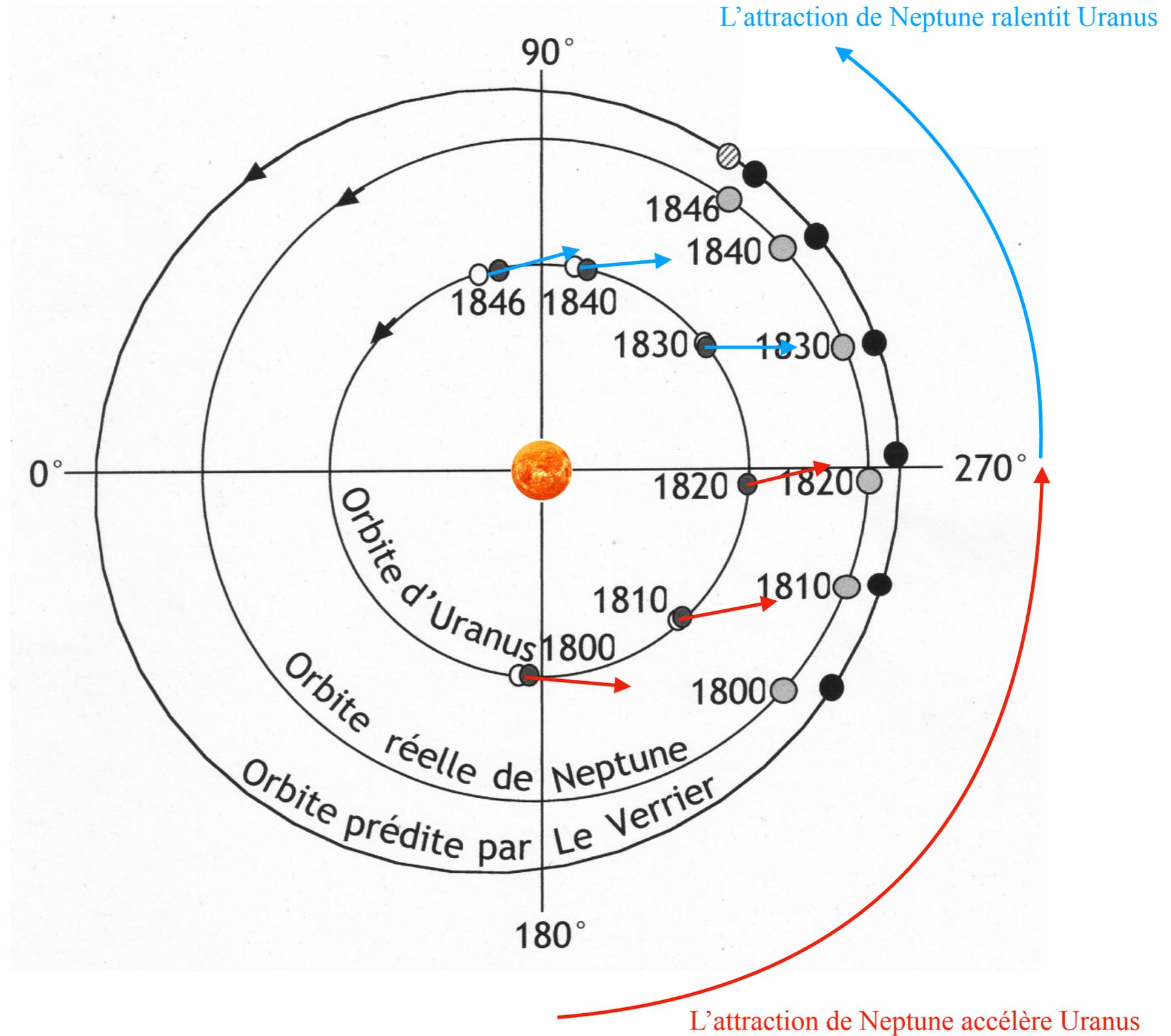
La découverte de Neptune (Urbain le Verrier, 1846)



Le Verrier découvrant la planète Neptune (C. Flammarion, Astronomie Populaire, 1884)

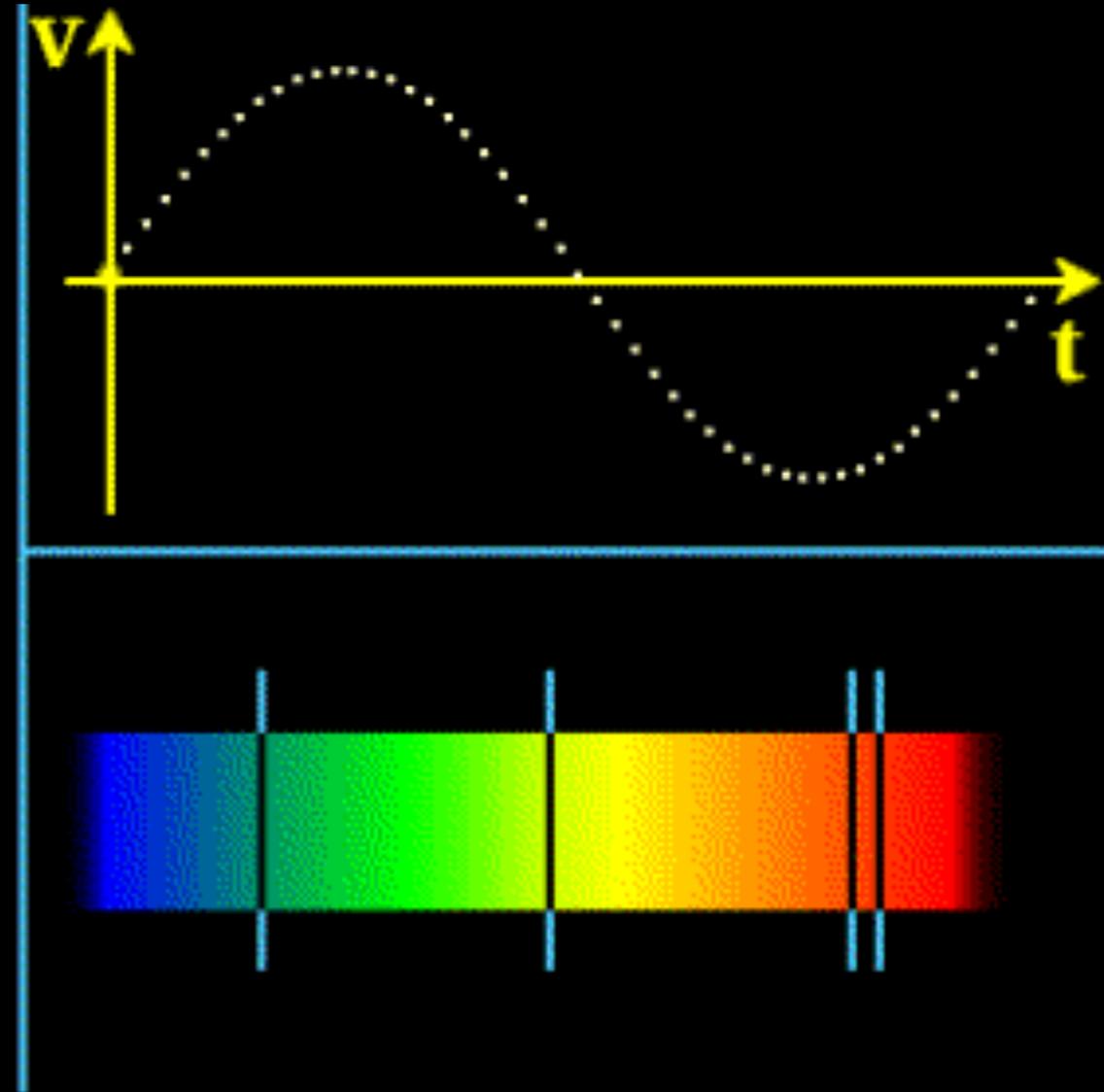


Page de calculs de Le Verrier (1846)

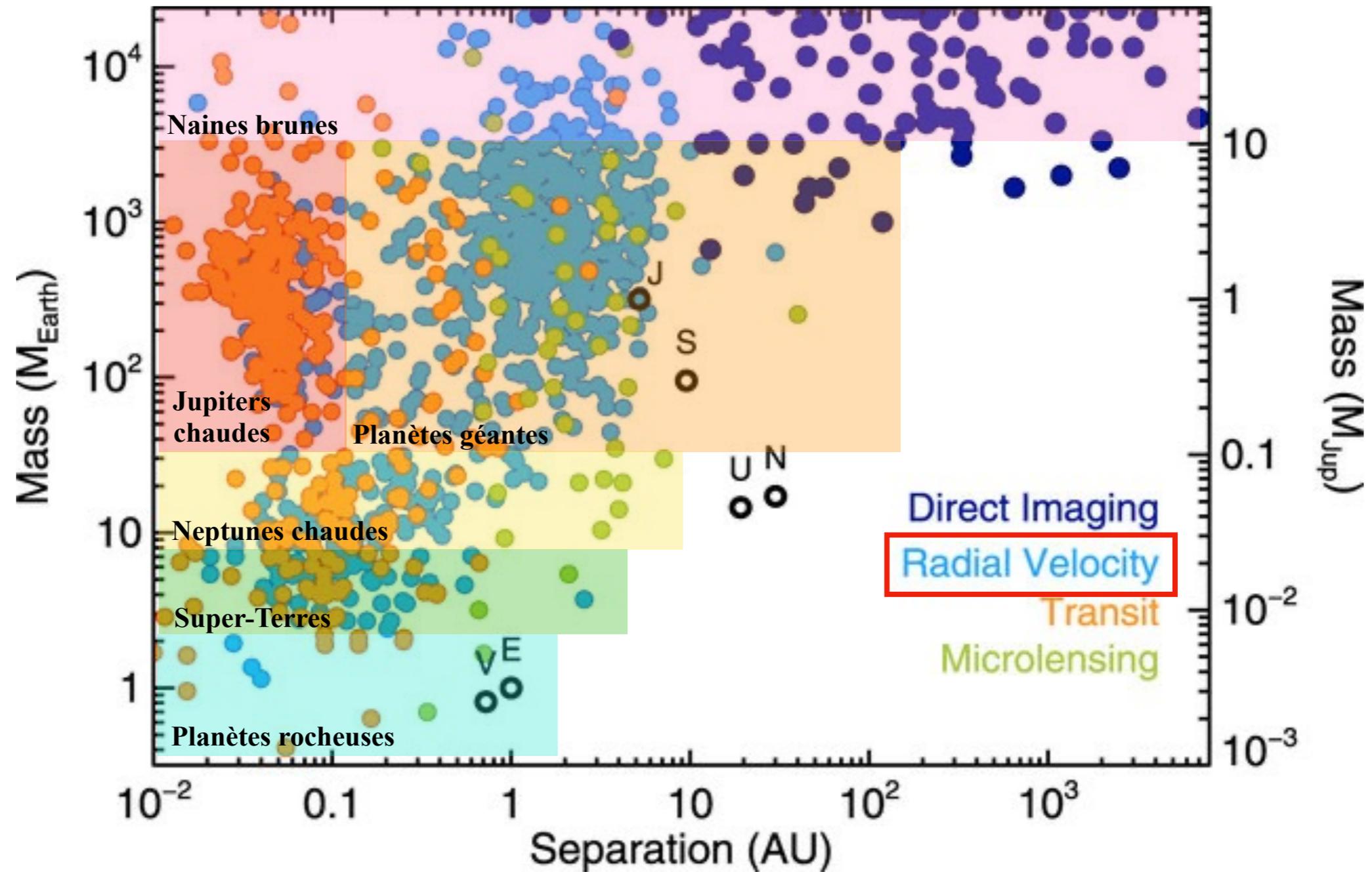


- Positions observées d'Uranus de 1800 à 1846
- Positions qu'Uranus aurait dû occuper sans Neptune

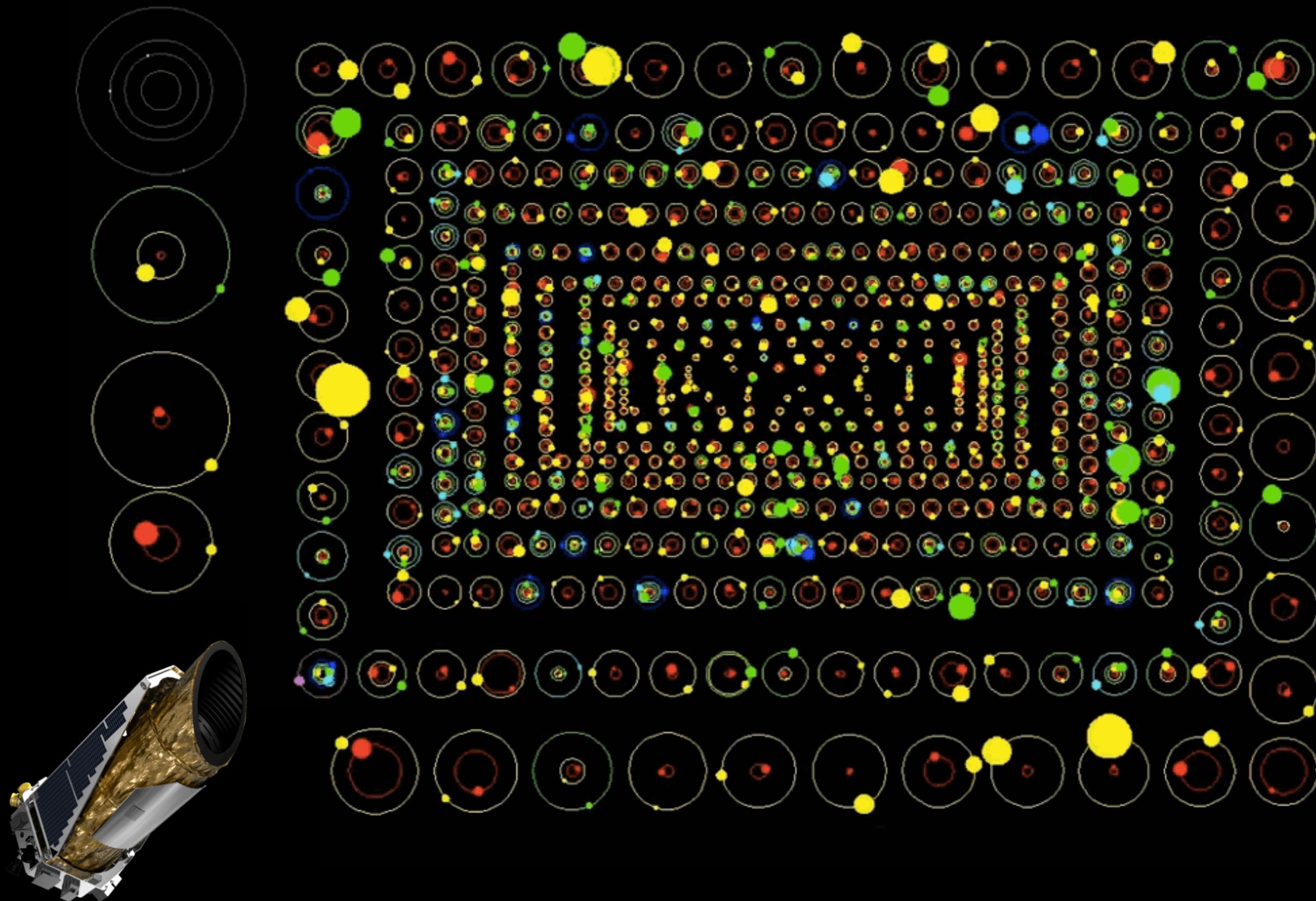
Détecter et mesurer la masse des exoplanètes avec la méthode des vitesses radiales



Détecter et mesurer la masse des exoplanètes

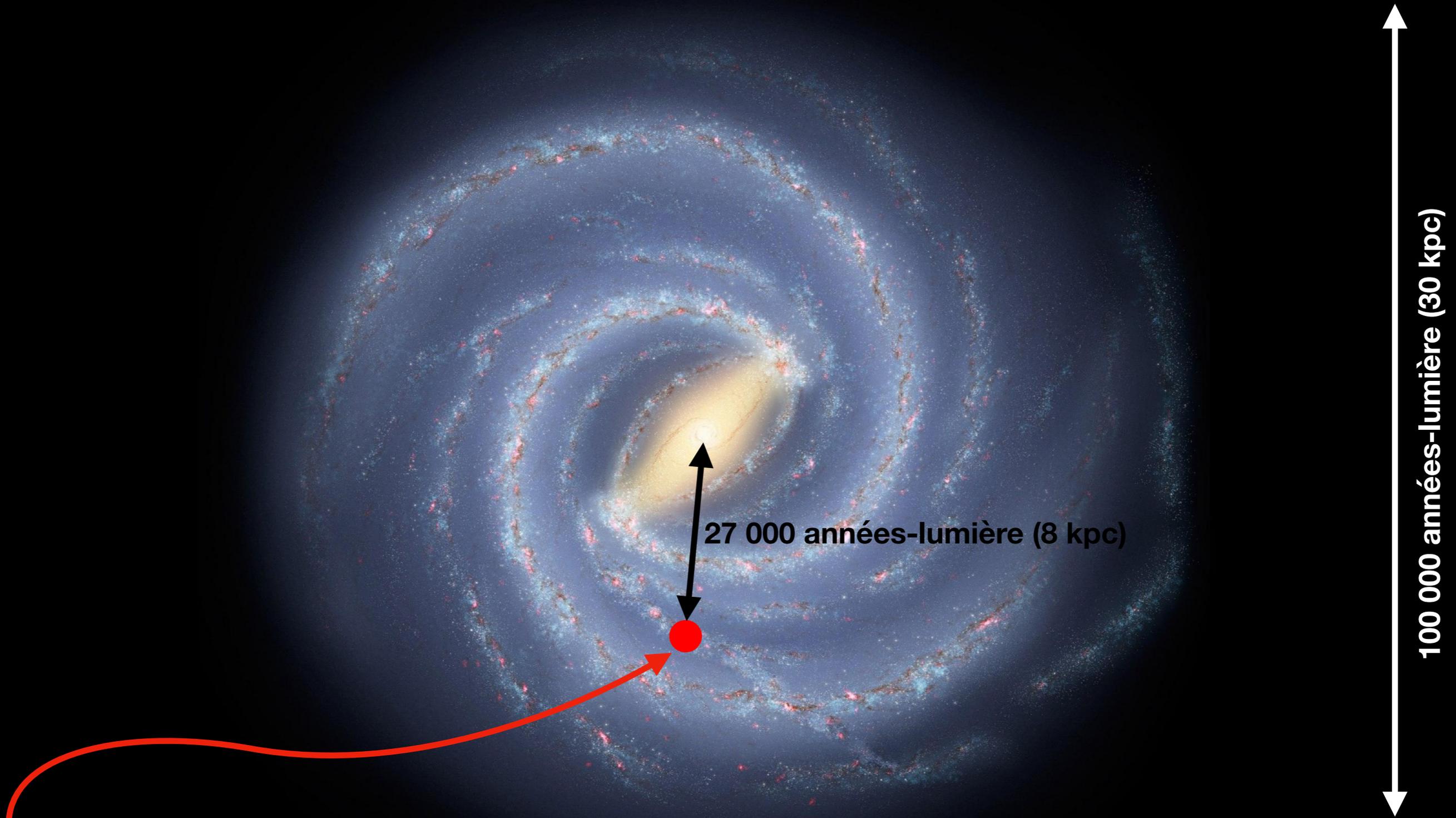


Quelques systèmes planétaires découverts par le télescope Kepler



La Voie Lactée, notre Galaxie

(vue d'artiste)



27 000 années-lumière (8 kpc)

100 000 années-lumière (30 kpc)

seule la lumière de cette petite région nous est parvenue depuis l'Antiquité (2000 années-lumière)...
l'étoile la plus proche, Proxima Centauri, est à 4.3 années-lumière

(1 kiloparsec [kpc] = $3.09 \cdot 10^{21}$ m)

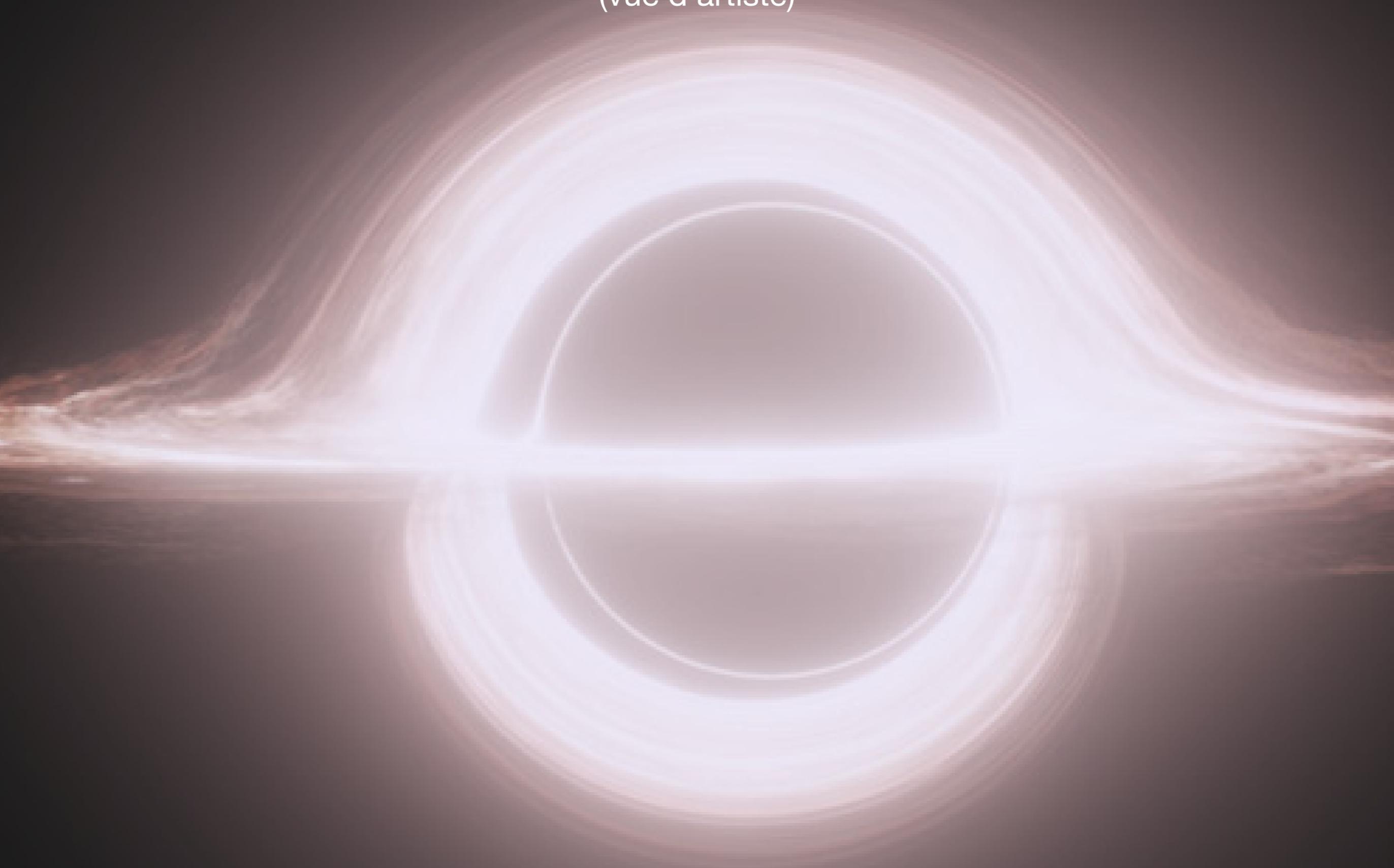
La Voie Lactée, notre Galaxie



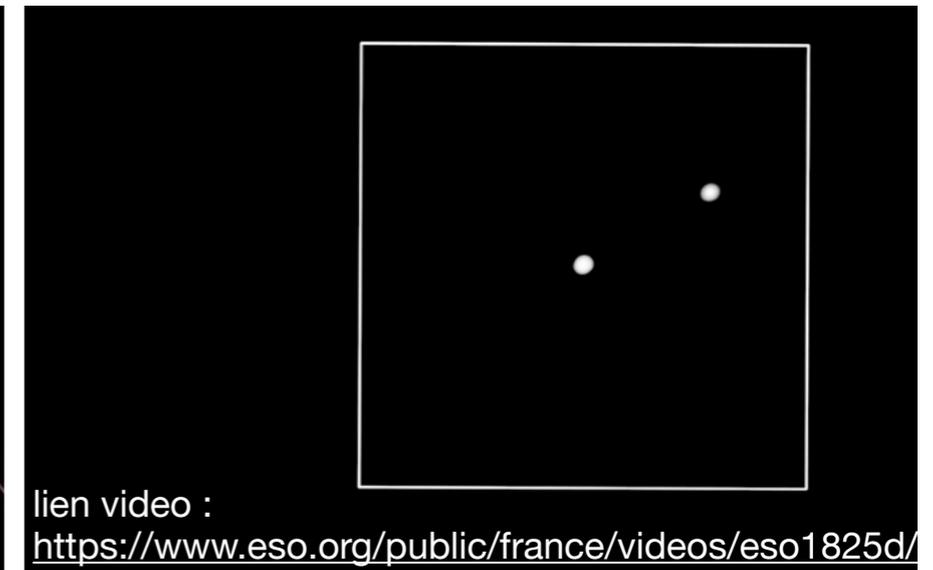
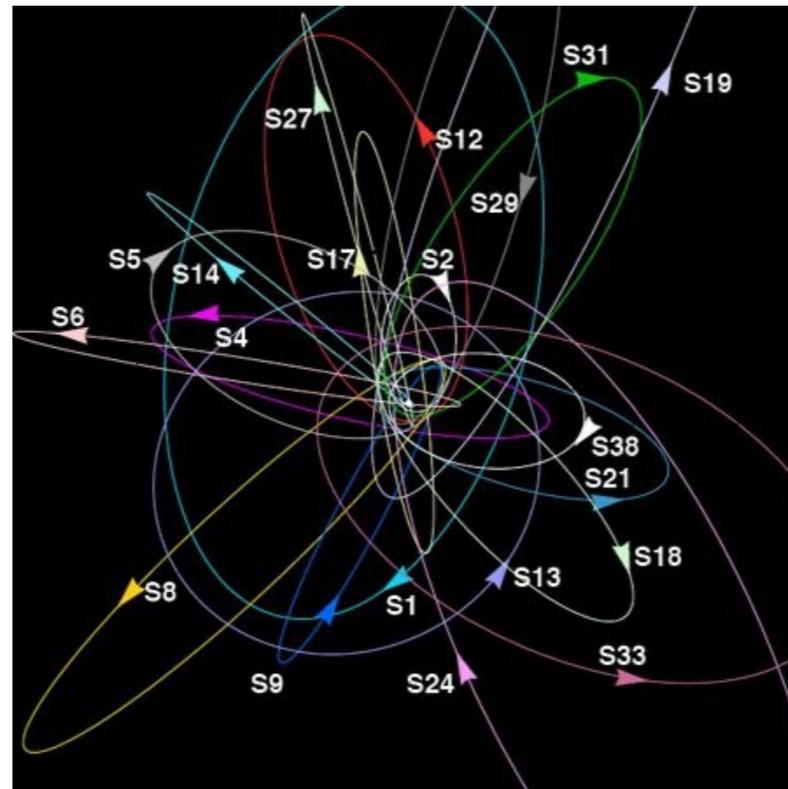
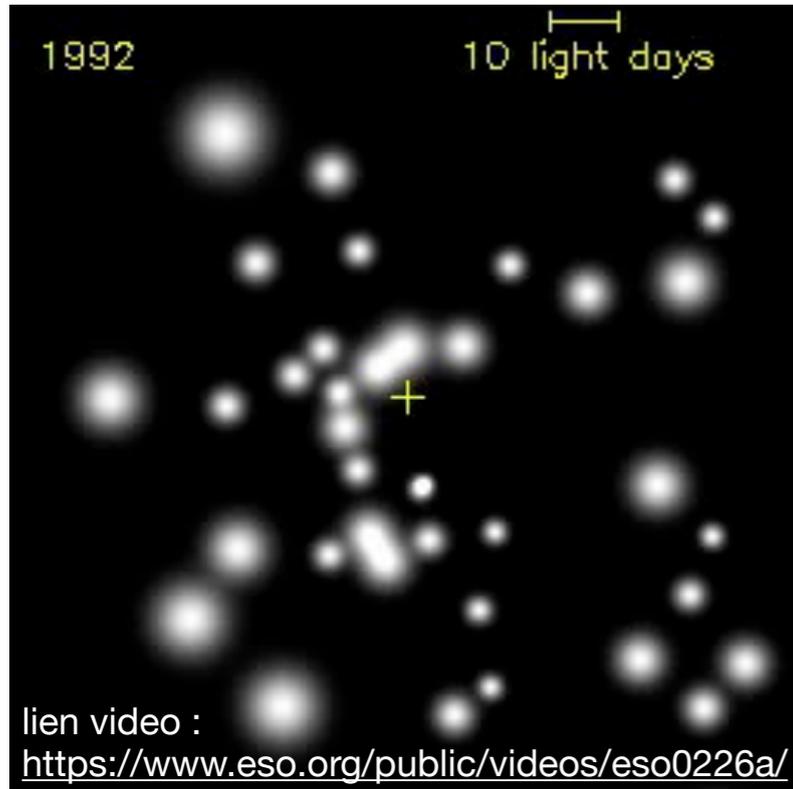
le centre de notre Galaxie

Un trou noir supermassif au centre de notre Galaxie ?

(vue d'artiste)

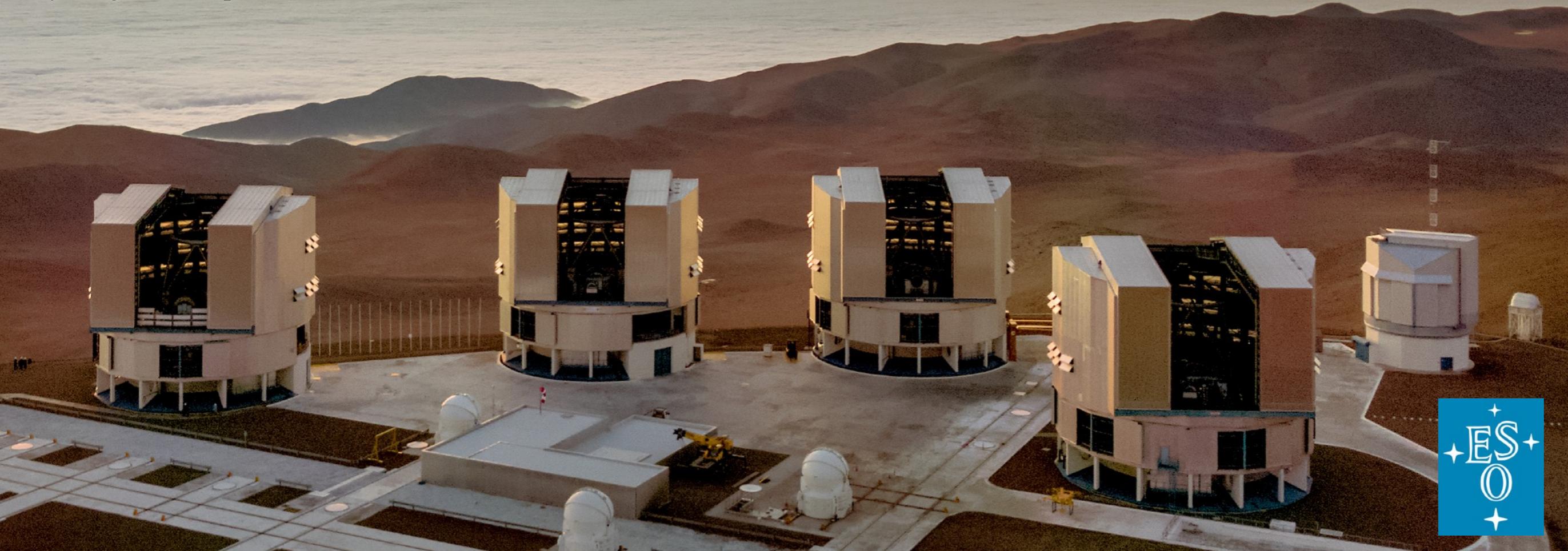


Mesurer la masse du trou noir central de notre Galaxie



Son nom : Sagittarius A*
Sa masse : $M_{\bullet} = 4.152 \times 10^6 M_{\odot}$
(8.25×10^{36} kg !)

Very Large Telescope



Sagittarius A*



La relativité générale d'Einstein (1915)

51). B. das Form also auch seine Gesamtenergie und Gravitationsenergie wird sich durch ausdrückliche Ausstelle der Summen $t_{\mu}^{\alpha} + T_{\mu}^{\alpha}$ der Energiekomponenten von Materie und Gravitationsfeld einführt. Man erhält so statt (51) die Tensorgleichung

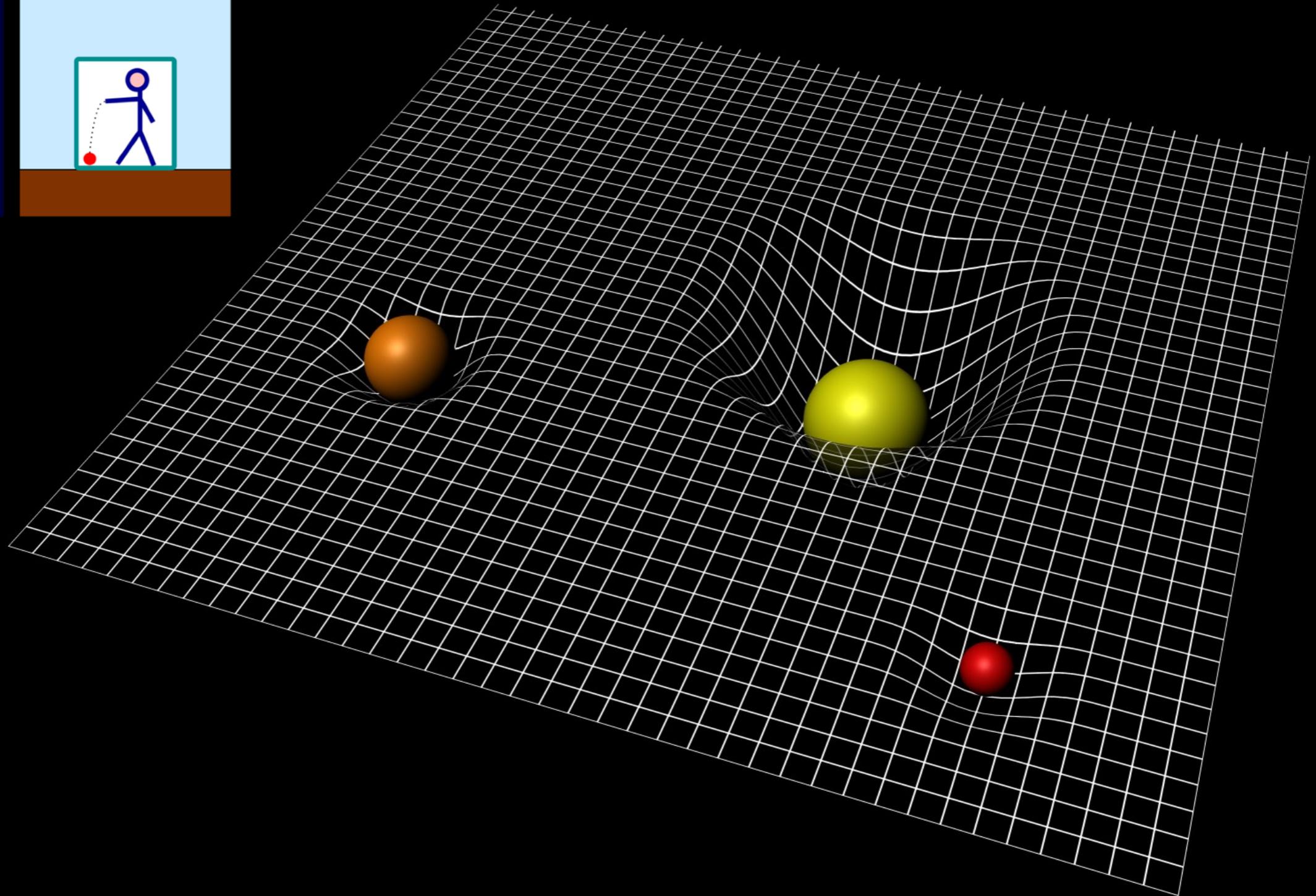
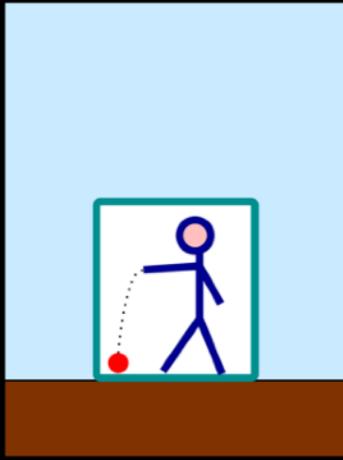
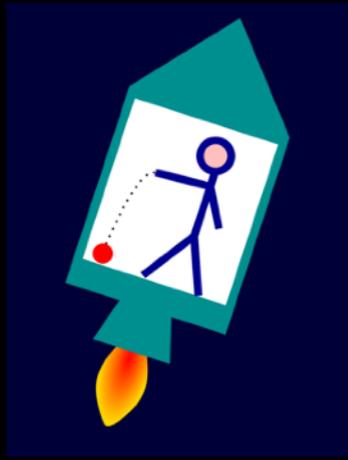
$$\frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} (g^{\beta\gamma} T_{\mu\beta}^{\alpha}) = -K \left[(t_{\mu}^{\alpha} + T_{\mu}^{\alpha}) - \frac{1}{2} S_{\mu}^{\alpha} (t + T) \right] \quad (52)$$

wobei $T = T_{\mu}^{\mu}$ gesetzt ist (Lange'scher Skalar). Anstatt dies und die gesuchten allgemeinen Feldgleichungen der Gravitation in geschlossener Form. Anstelle von (42) ergibt sich daraus anknüpfend das System

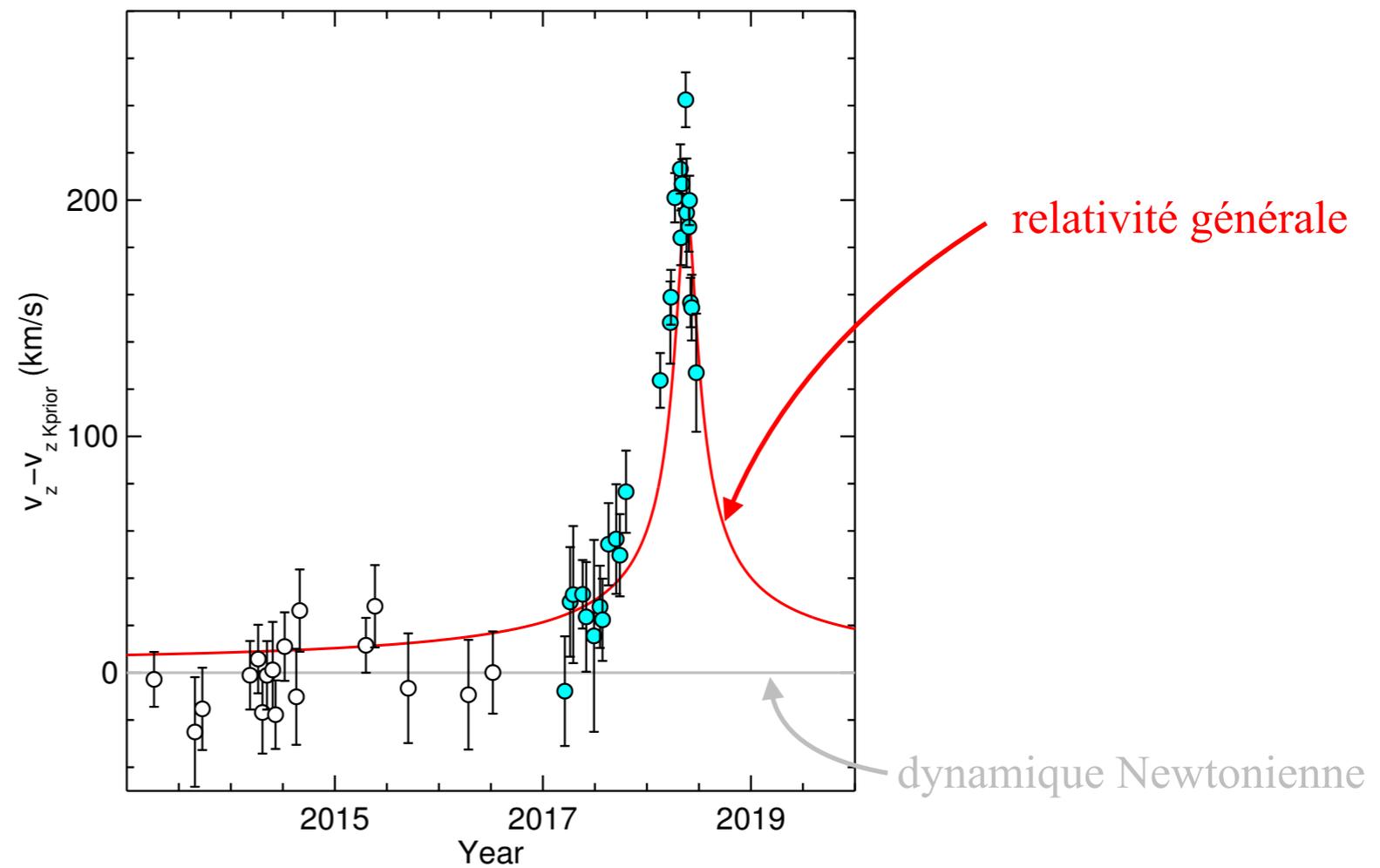
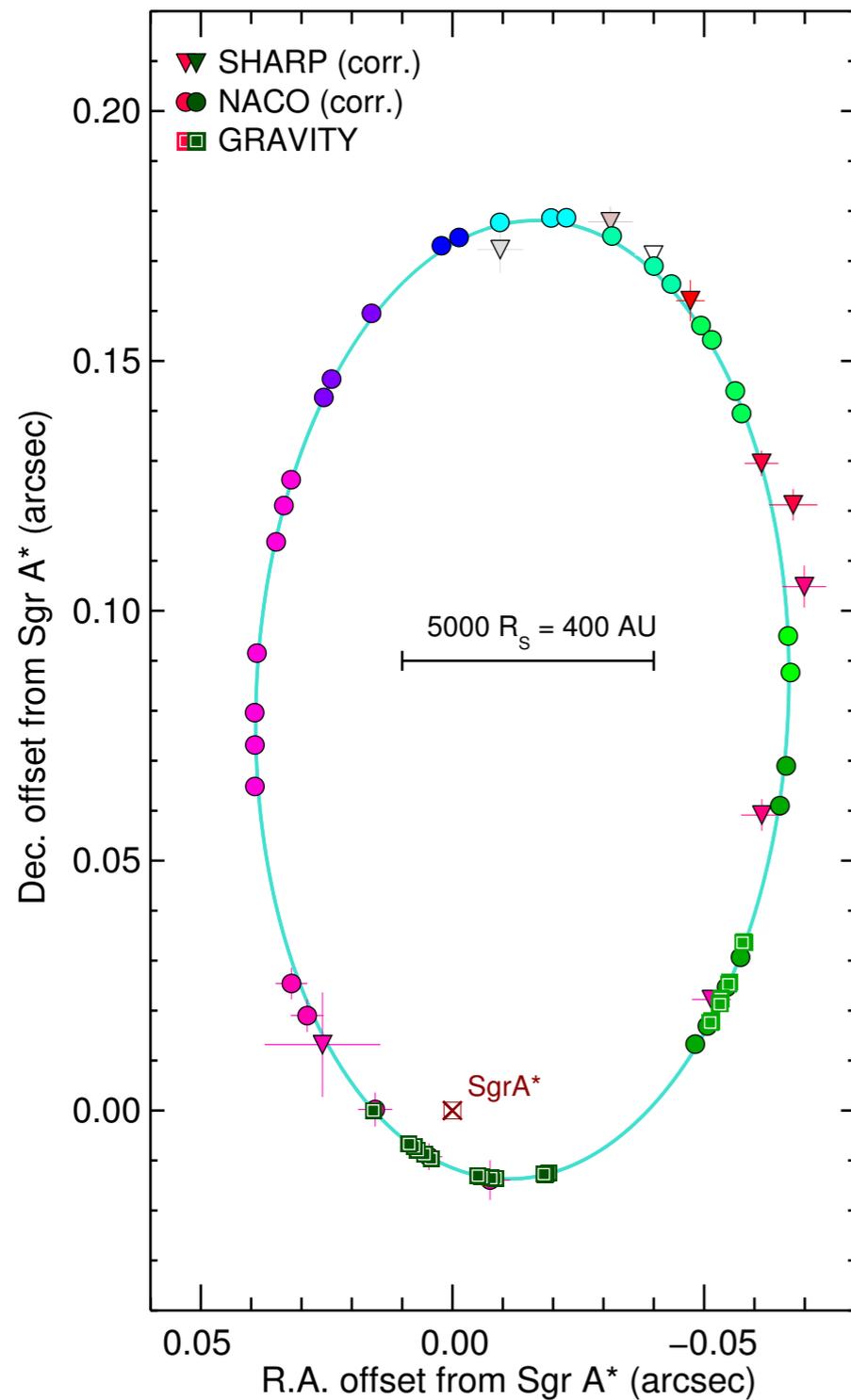
$$\frac{\partial T_{\mu\nu}^{\alpha}}{\partial x_{\alpha}} + T_{\mu\beta}^{\alpha} \frac{\partial T^{\beta}}{\partial x_{\alpha}} = -K (T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T) \quad (53)$$

Es muss zugegeben werden, dass diese Einführung des Energietensors der Materie durch das Relativitätspostulat allein nicht gerechtfertigt wird. Deshalb haben wir sie im Vorigen durch die Forderung ~~abgeleitet~~ ^{abgeleitet} begründet, dass die Energie des Gravitationsfeldes in gleicher Weise gravitierend wirken soll, wie jegliche Energie anderer Art. Der stärkste Grund für die der vorstehenden Gleichungen liegt aber darin, dass sollen symmetrische Tensoren

La relativité générale d'Einstein (1915) principe d'équivalence et espace-temps courbe



Sagittarius A* : un test crucial pour la relativité générale



Au plus près de SgrA*, la vitesse de l'étoile S2 atteint $\sim 3\%$ de la vitesse la lumière
➡ effet Doppler relativiste (décalage vers le rouge)

Matière noire : mirage ou réalité ?

Cours 1 (10/01/23) : Peser l'Univers grâce à la loi de la gravitation

- Modéliser le mouvement des astres : Ptolémée, Copernic, Newton, Einstein
- Mesurer la masse de la Terre et du Soleil
- Découvrir l'invisible: Neptune, les exoplanètes, le trou noir central de notre Galaxie

Cours 2 (17/01/23) : Le problème de la masse manquante : la matière noire

- Les galaxies à différentes longueurs d'onde : le visible et l'invisible
- Les courbes de rotation des galaxies
- A la recherche de la masse manquante : gaz, trous noirs, neutrinos, etc.
- Le modèle cosmologique actuel

Cours 3 (24/01/23) : L'histoire de l'Univers avec matière noire froide

- Le Big Bang, la nucléosynthèse primordiale et le fond diffus cosmologique
- Le scénario hiérarchique de formation des galaxies
- La toile cosmique et les halos de matière noire
- La formation des étoiles et des galaxies et les phénomènes de rétroaction

Cours 4 (31/01/23) : Les défis du modèle cosmologique actuel

- La non-détection des particules de matière noire
- Les problèmes à l'échelle des galaxies
- Résoudre une partie des problèmes grâce aux phénomènes de rétroaction
- L'énergie noire et la constante de Hubble

Cours 5 (07/02/23) : Les alternatives à la matière noire froide

- Les autres types de matière noire : chaude, tiède, floue, interagissant avec elle-même
- La gravité modifiée