Séminaire gravitation – 12/2023

L. Schiesko

La gravitation en quelques chiffres

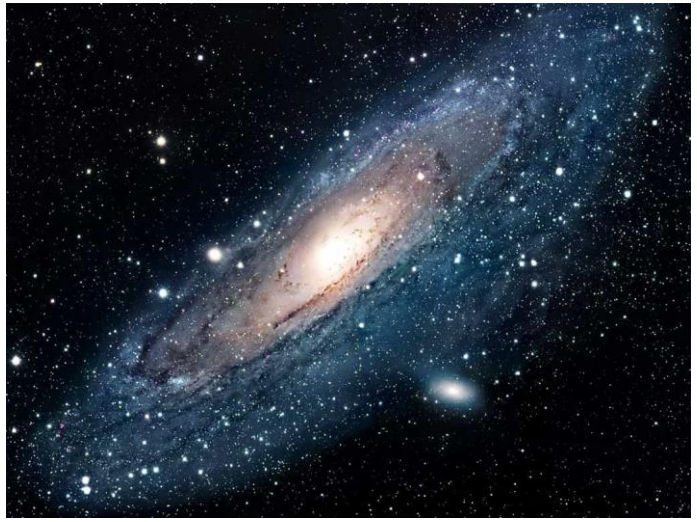
- 4 interactions fondamentales

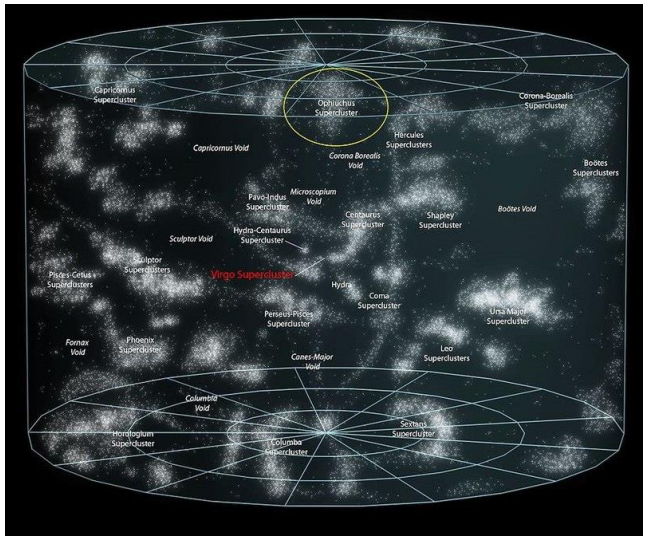
Intensité relative

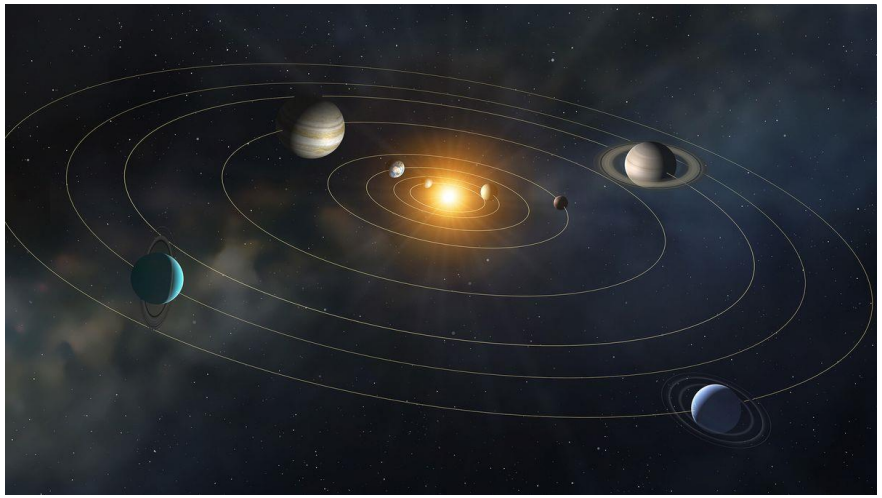
10^{-38}	10^{-13}-10^{-6}	10^{-2}	1
Gravitation	Interaction faible	Electromagnétique	Interaction forte

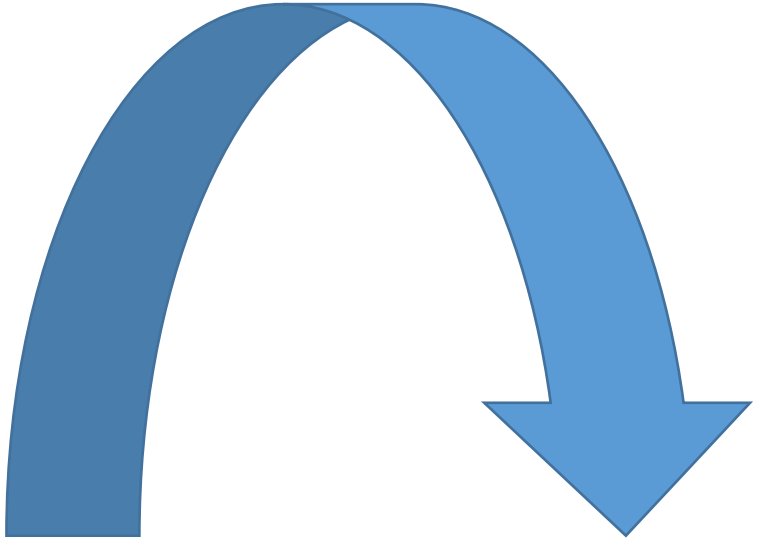
- La plus faible
- Portée infinie
- Vitesse d'interaction finie, prob. c
- Distribution de la matière
- Grandes structures

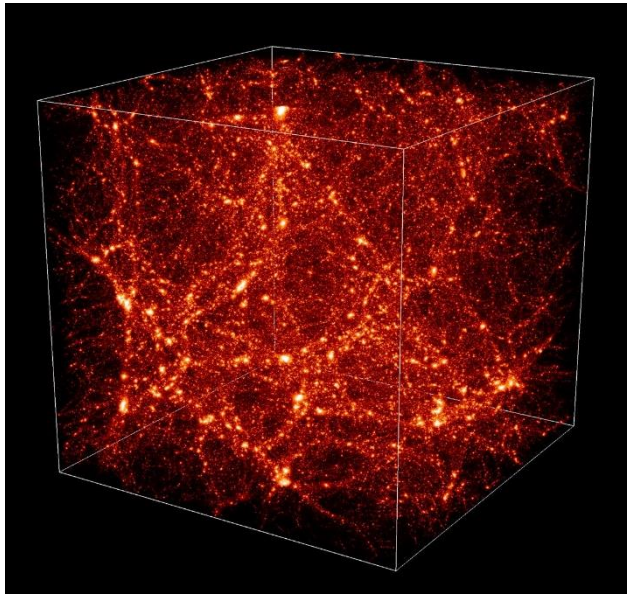
Facteur d'échelle de la distribution de matière dans l'univers











Echelle de temps et de distance

- « Age de l'univers »: 13,8 MA
- Fixe la distance comobile (univers fixe sans expansion)
- Distance des objets les plus lointains: 46,5 MA > 13,8 MA

Echelle de temps et de distance

- « Age de l'univers »: 13,8 MA
- Fixe la distance comobile (univers fixe sans expansion)
- Distance des objets les plus lointains: 46,5 MA > 13,8 MA
- Dépend du:
  - modèle d'univers (modèle standard)
  - topologie
  - expansion

Echelle de temps et de distance

- « Age de l'univers »: 13,8 MA
- Fixe la distance comobile (univers fixe sans expansion)
- Distance des objets les plus lointains: 46,5 MA > 13,8 MA
- Dépend du:
  - modèle d'univers (modèle standard)
  - topologie
  - expansion

Modèle de gravitation → « Naissance et destin », voyages !

I. Newton

II. Relativité générale (RG)

a. Victoires de la RG
b. Anomalies observationnelles

III. Au-delà de la relativité générale

a. MOND
b. Gravité entropique
c. Gravité quantique à boucles
d. Univers jumeaux

IV. De l’importance d’une théorie gravitationnelle fiable

I. Newton

II. Relativité générale (RG)

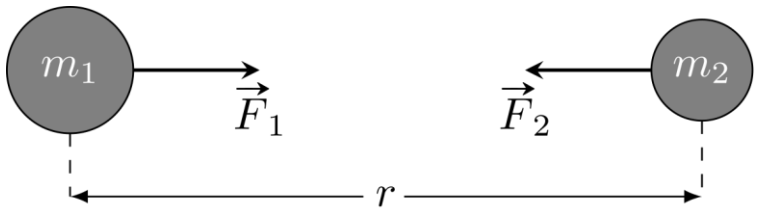
a. Victoires de la RG
b. Anomalies observationnelles

III. Au-delà de la relativité générale

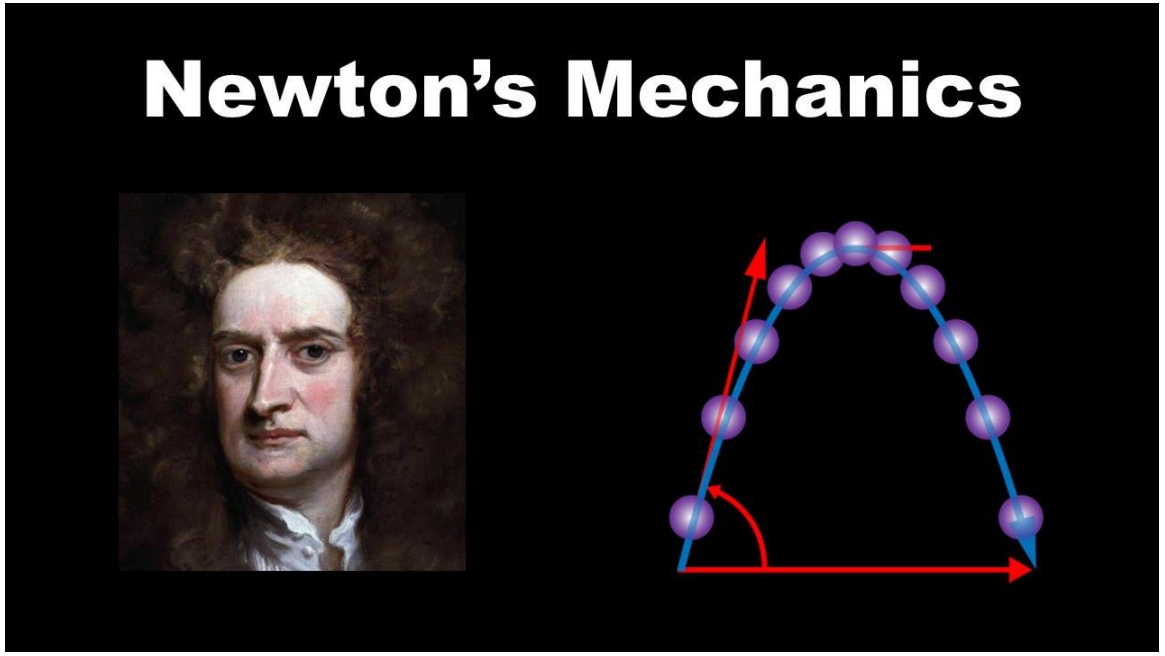
a. MOND
b. Gravité entropique
c. Gravité quantique à boucles
d. Univers jumeaux

IV. De l’importance d’une théorie gravitationnelle fiable

Mécanique Newtonienne



$$\left\|\vec{F}_1\right\| = \left\|\vec{F}_2\right\| = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$



- **Attraction universelle**
- **Explique les mouvements d'objets sur Terre**
- **Mécanique céleste**
- **Solution simples, bonne approximation de la relativité générale pour les faibles vitesses**
- **Ne peut expliquer, par ex.: précession du périhélie, ondes gravitationnelles**

Relativité générale

I. Newton

II. Relativité générale (RG)

a. Victoires de la RG
b. Anomalies observationnelles

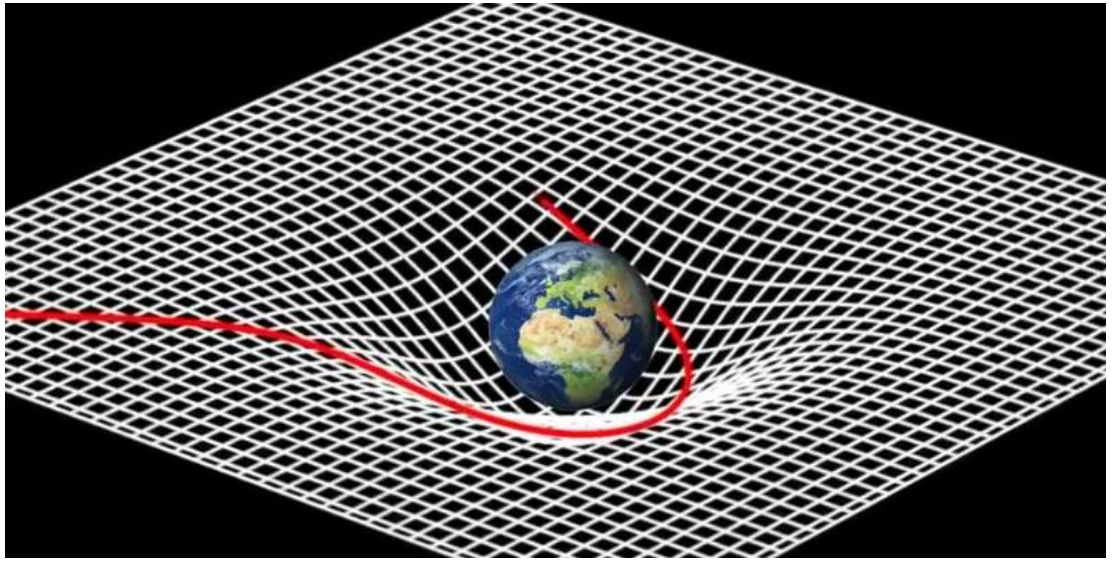
III. Au-delà de la relativité générale

a. MOND
b. Gravité entropique
c. Gravité quantique à boucles
d. Univers jumeaux

IV. De l’importance d’une théorie gravitationnelle fiable

Relativité générale

- Théorie géométrique de l'espace-temps
- L'énergie courbe l'espace
- Toute énergie y est soumise (même les photons de masse nulle!)
- Calculs relativement complexes
- Permet de rendre compte de l'ensemble des phénomènes orbitaux à courte distance
- Jamais mise en défaut



I. Newton

II. Relativité générale (RG)

a. Victoires de la RG
b. Anomalies observationnelles

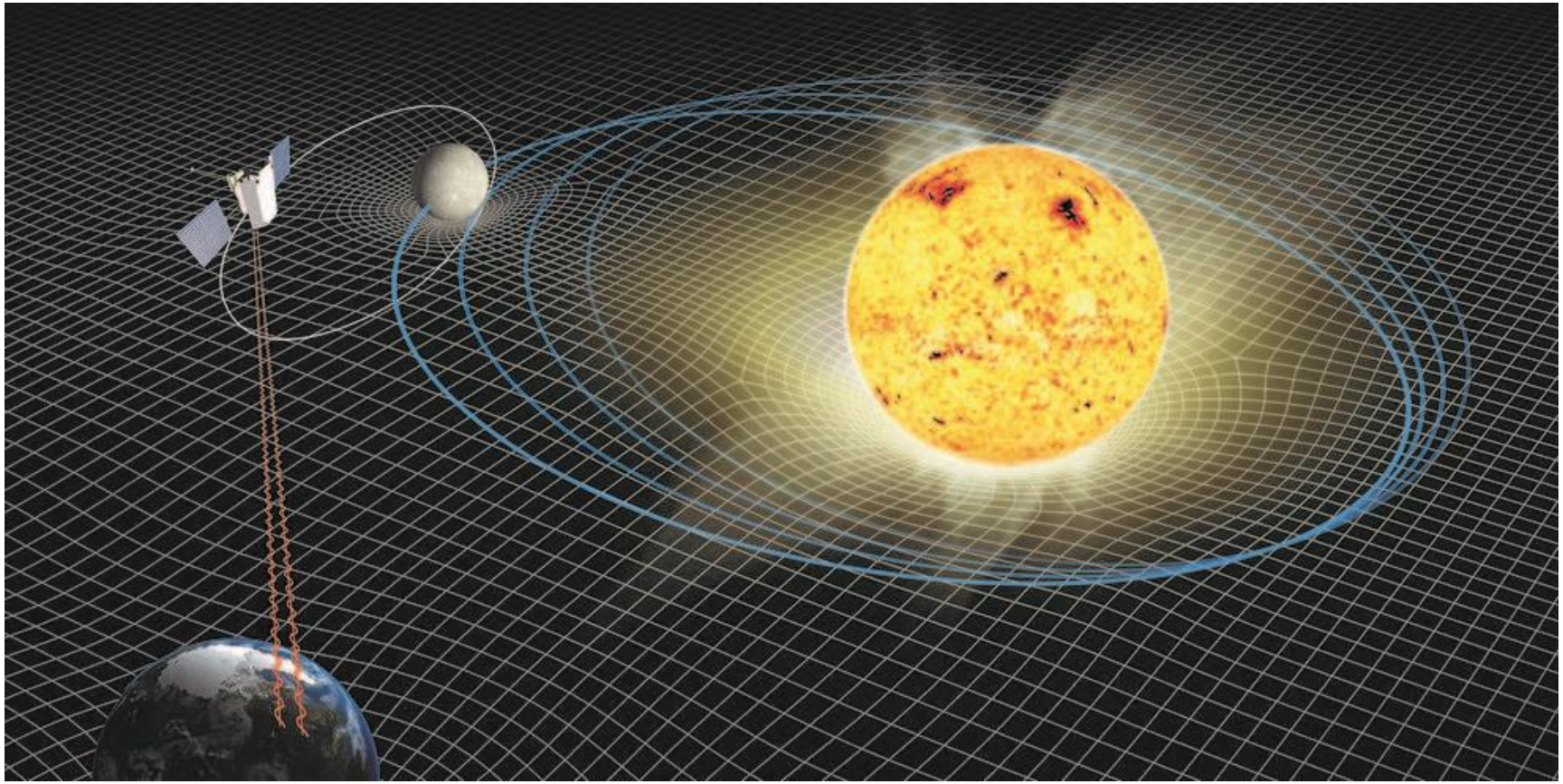
III. Au-delà de la relativité générale

a. MOND
b. Gravité entropique
c. Gravité quantique à boucles
d. Univers jumeaux

IV. De l’importance d’une théorie gravitationnelle fiable

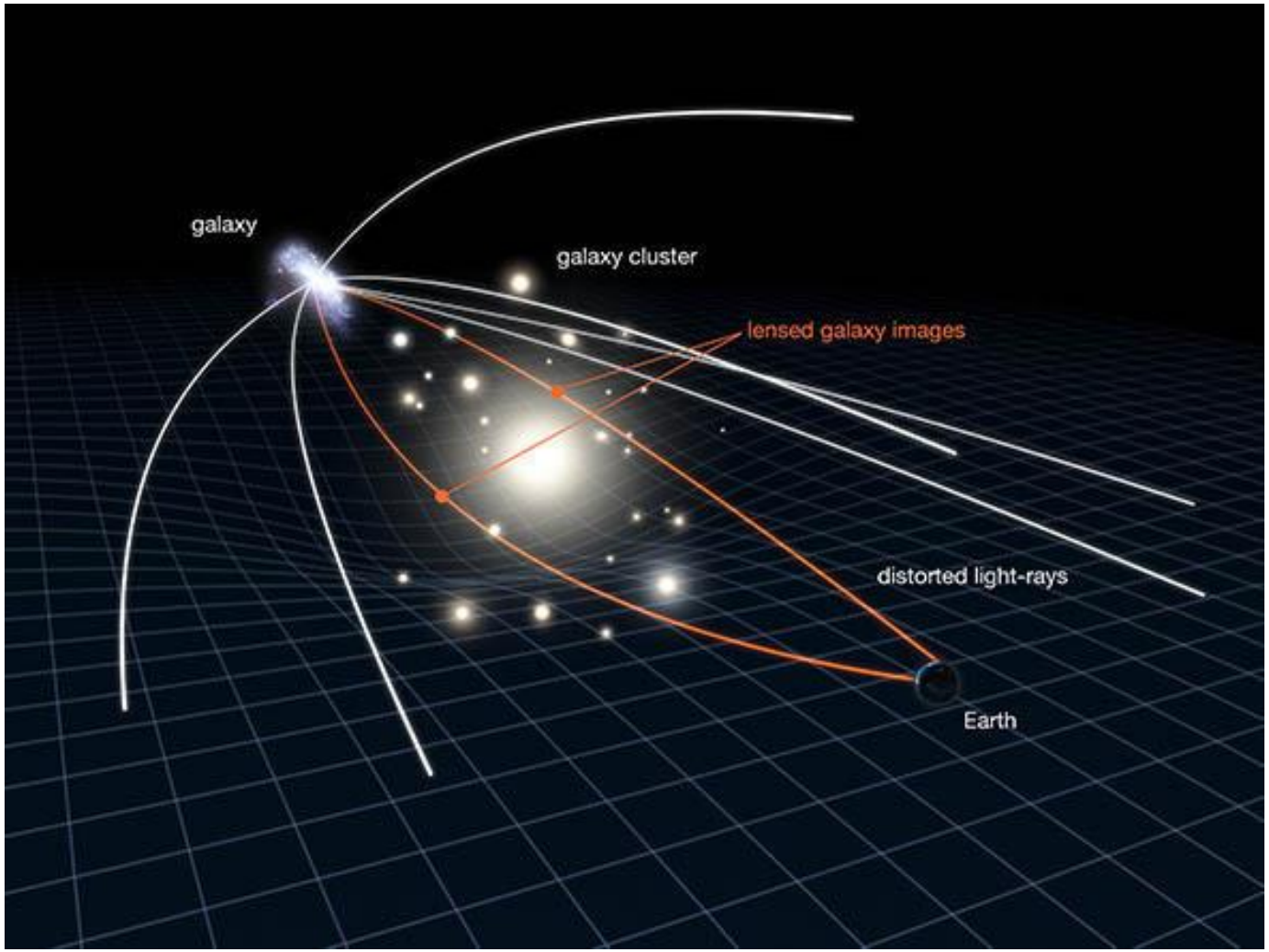
Précession du périhélie de Mercure

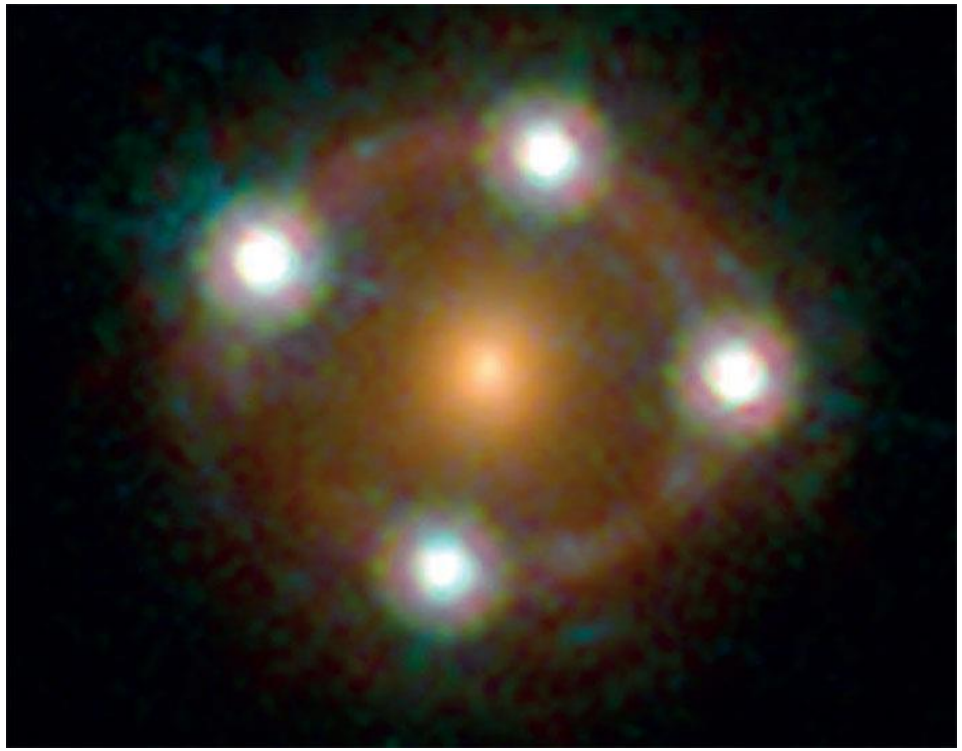
1ere validation de la RG



- Compréhensible uniquement avec la RG
- Influence des autres planètes pour Mercure

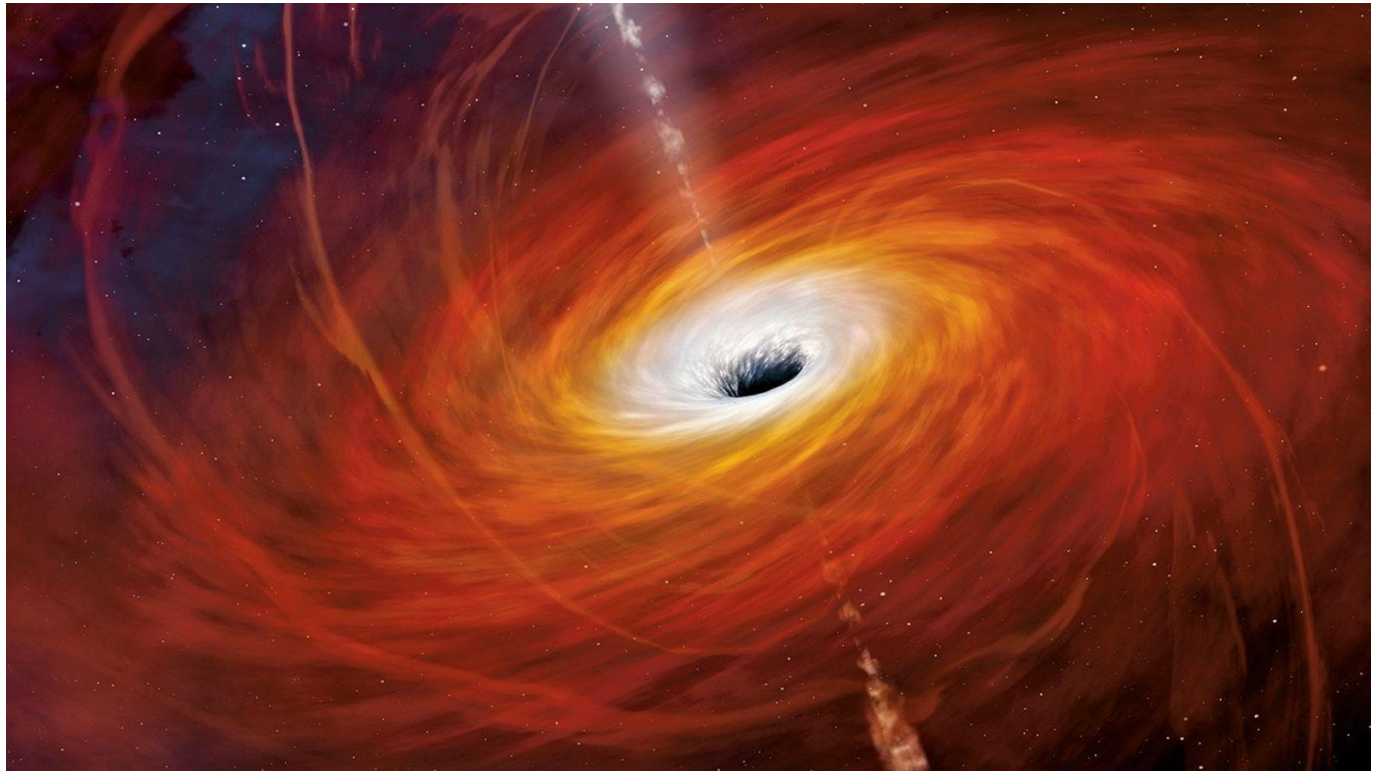
Lentilles gravitationnelles



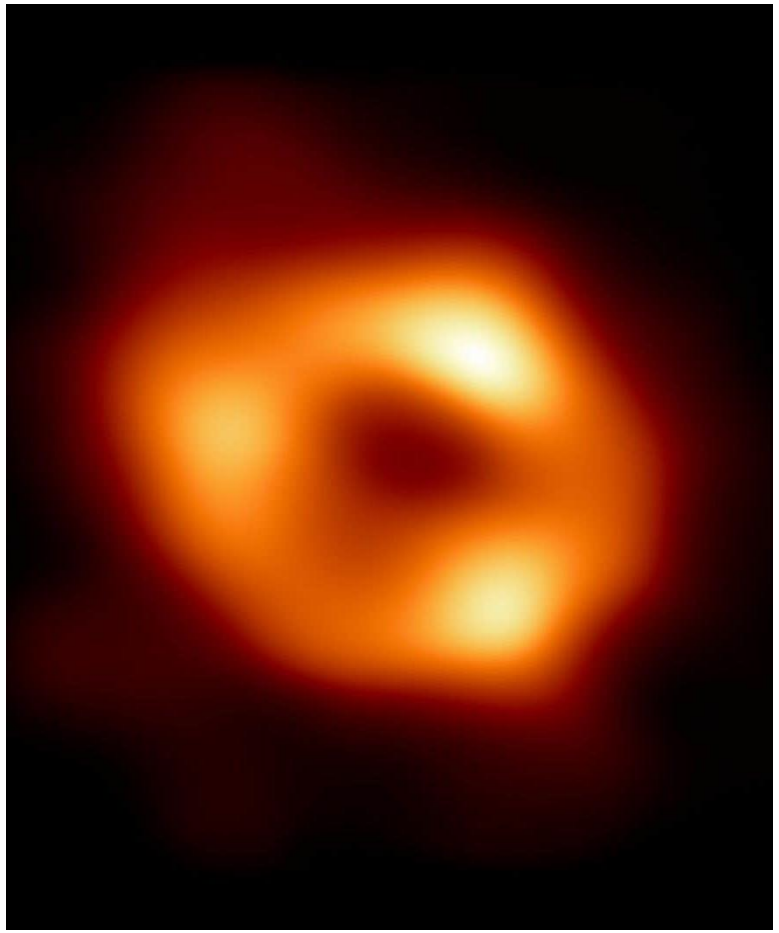


- Un amas de matière agit comme une loupe
- Permet de calculer la densité de matière !

Trous noirs



Calculs

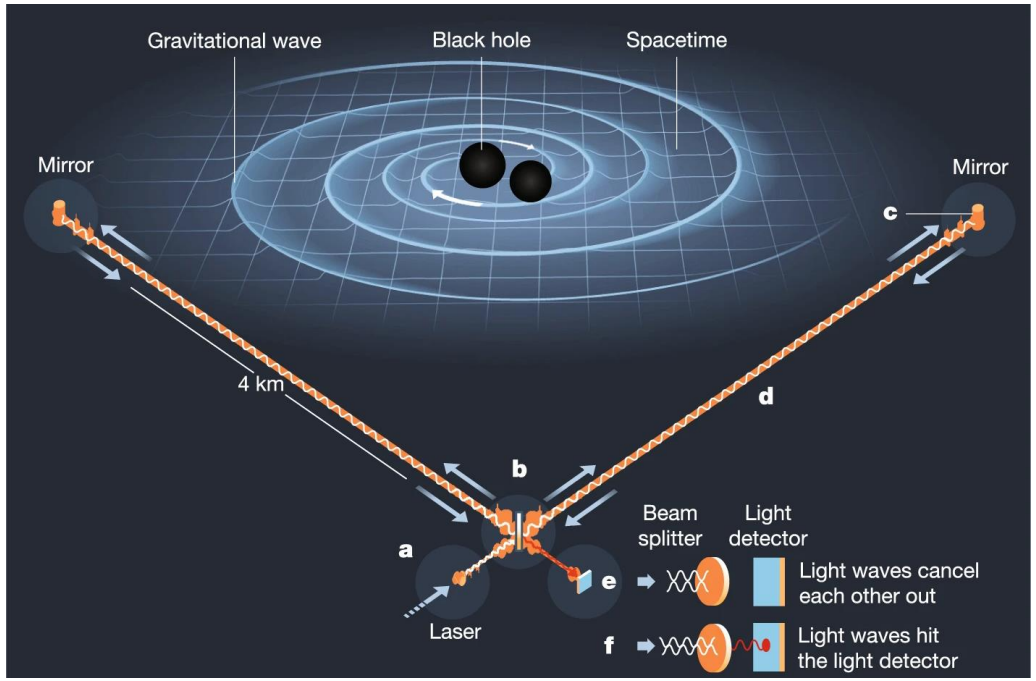


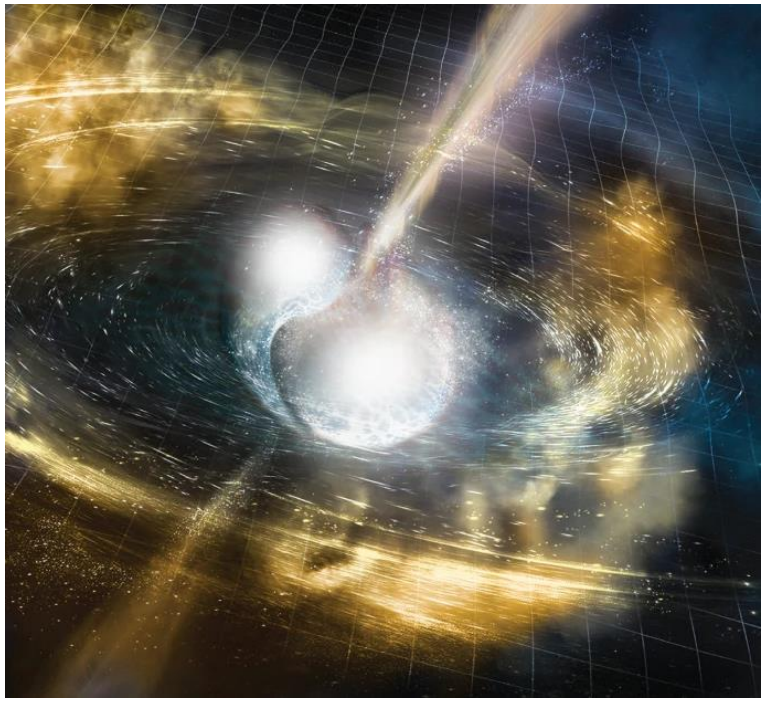
Sgt A, ESA, 11 radiotélescopes

- Au-delà d'une masse critique, la vitesse de libération est supérieure à celle de la lumière
- Restes d'étoiles massives, quasars et centres de galaxies
- Rien ne sort (enfin presque)

Ondes gravitationnelles

- Prédites par la RG
- Nouvelle méthode de mesure, très délicate
- Permet de déterminer les masses d'objets en rotation proche
- Ouvre un champ de recherche: la spectro gravitationnelle !!
- Sonder l'intérieur des objets massifs





Bilan sur la Relativité Générale

- Newton: approximation à faible vitesse de la RG

- RG: Théorie géométrique

- Explique naturellement de nombreux phénomènes physiques

  - Trou noirs
  - Lentilles gravitationnelles
  - Précessions
  - Prédit les ondes gravitationnelles…

- Jamais mise en défaut

- Mais…

I. Newton

II. Relativité générale (RG)

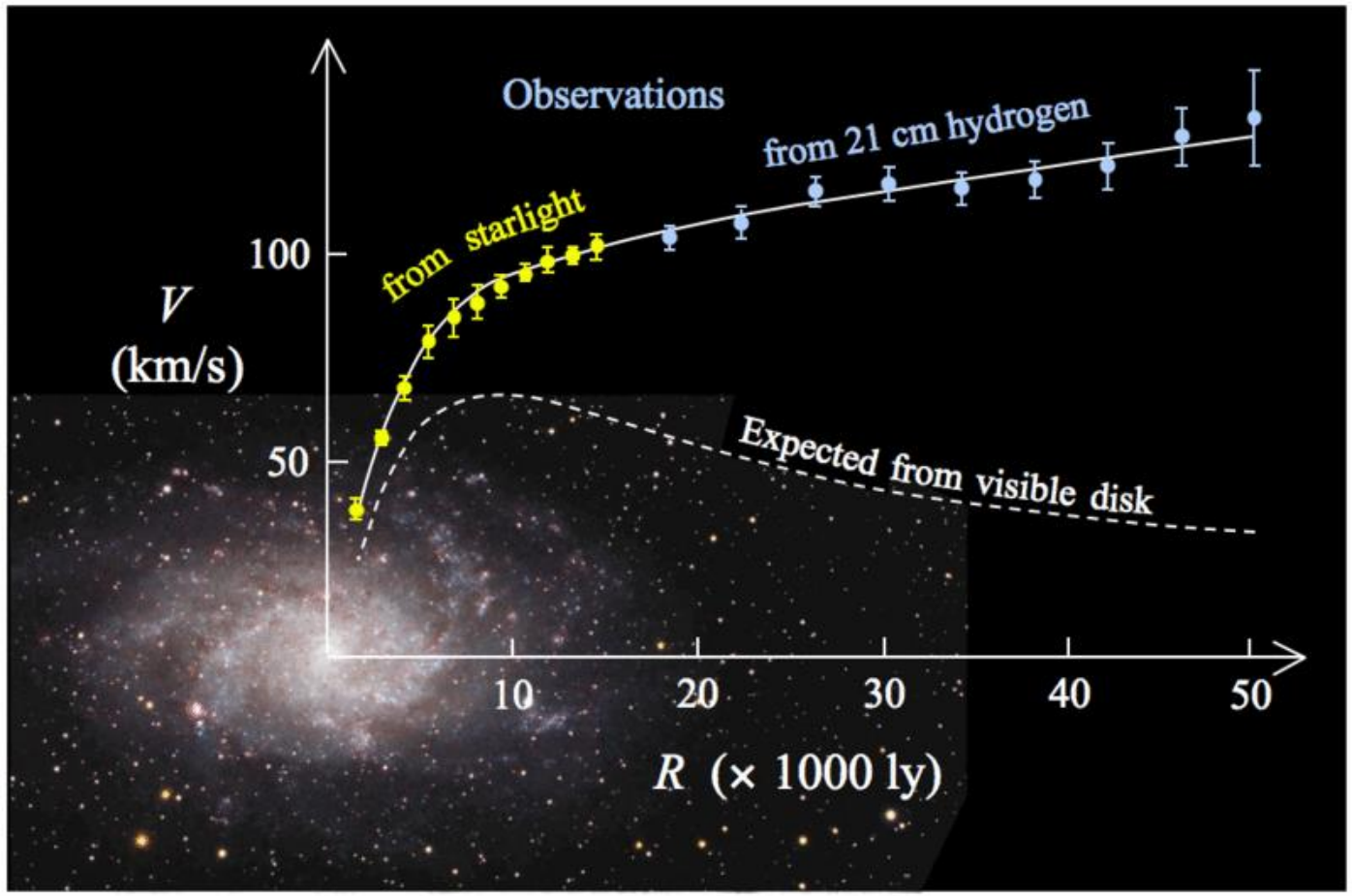
a. Victoires de la RG
b. Anomalies observationnelles

III. Au-delà de la relativité générale

a. MOND
b. Gravité entropique
c. Gravité quantique à boucles
d. Univers jumeaux

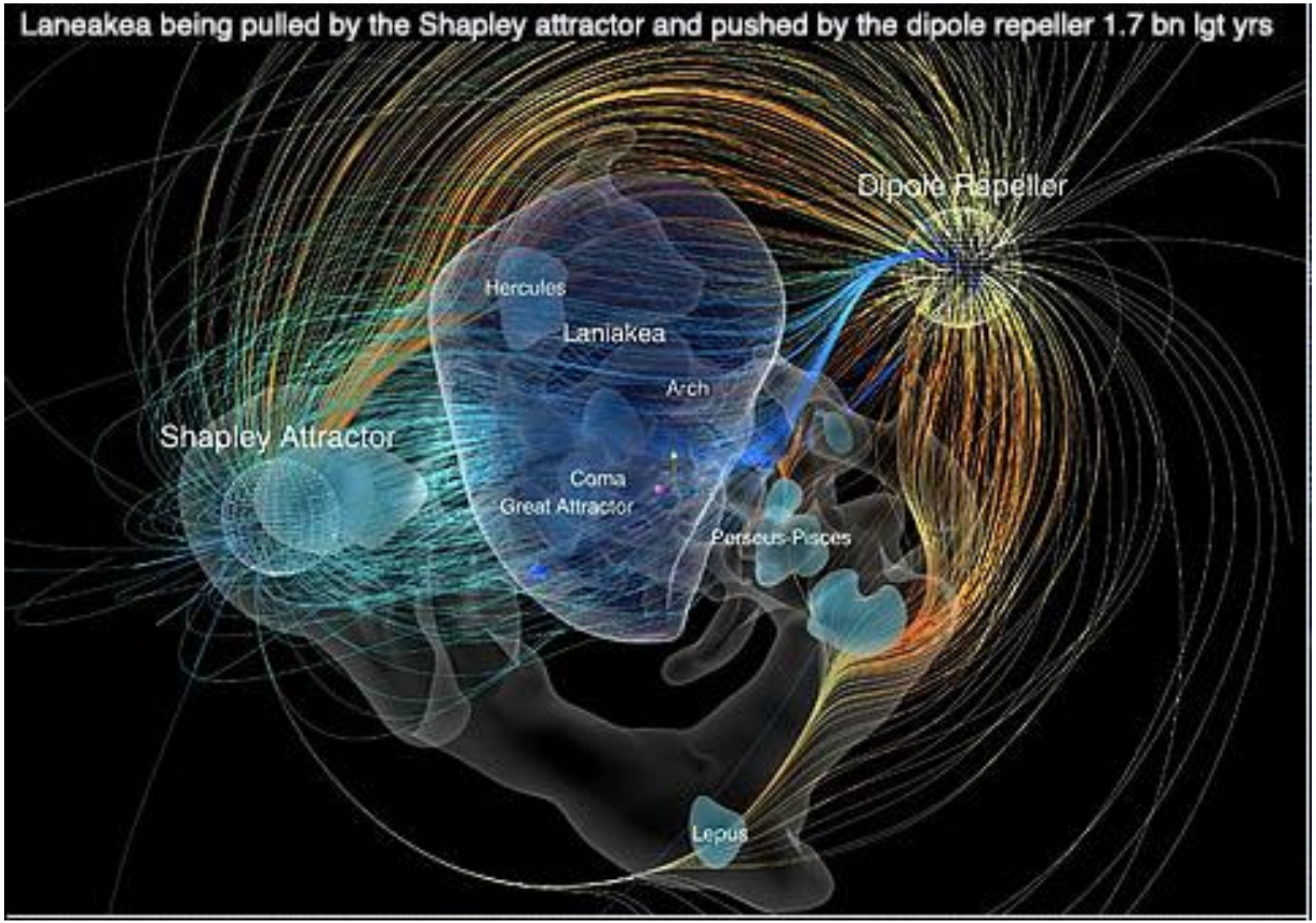
IV. De l’importance d’une théorie gravitationnelle fiable

Anomalies: courbes de rotation des galaxies



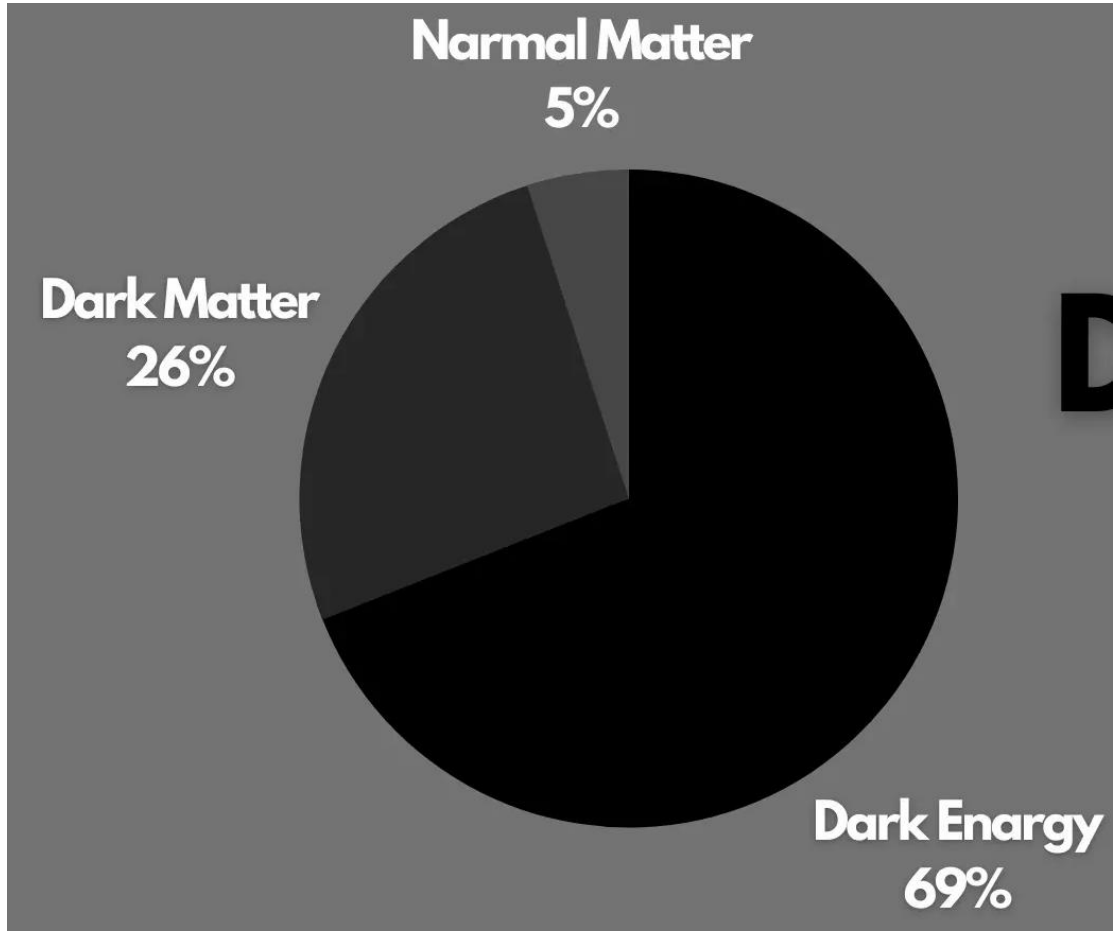
- Déduites de la distribution de matière lumineuse
- Décroissance attendue mais non observée
- Galaxies lointaines (jeunes): courbe de rotation attendue
- Hypothèse: présence de matière noire, masse manquante

Anomalies: zones de vide et de fortes densités de matière



Distance Voie Lactée – DR: 220 Mpc = 7,15.10^8 a. l.

Anomalies: energie noire et constante cosmologique



- Constante cosmologique: terme ajouté dans la RG de manière ad-hoc
- Expansion de l'univers: énergie noire, domine la dynmique de l'univers !

$$H_0 = 73.24 \pm 1.74 \text{ (km/s)/Mpc}$$

1 Mpc = $3{,}086.10^{19}$ km = $3{,}262.10^{6}$ a. l.

Bilan sur les anomalies en gravitations

- Vitesses ne correspondent pas aux attentes: masse manquante
  - Matière noire baryonique: gaz, naines, objets peu lumineux en grand nombre
  - Matière noire exotique: bestiaire de la physique des particules
- Aujourd'hui: aucune idée sur la composition de la masse manquante
- Energie noire:
  - Domine la dynamique à l'échelle de l'univers observable
  - Energie du « point zéro »
  - Constante cosmologique
  - Physique des champs scalaires
- Aujourd'hui: aucune idée précise sur son identité

I. Newton

II. Relativité générale (RG)

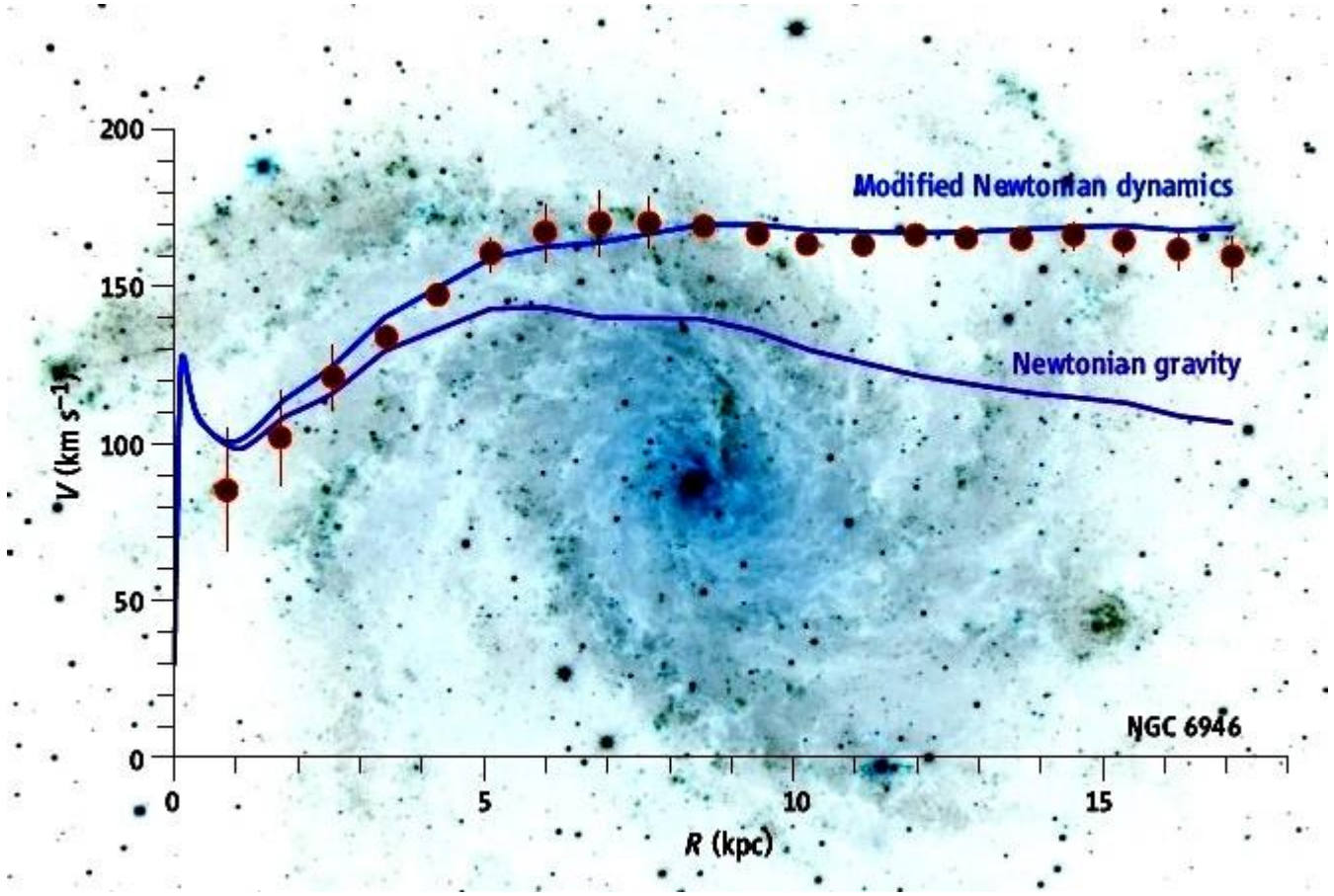
a. Victoires de la RG
b. Anomalies observationnelles

III. Au-delà de la relativité générale

a. MOND
b. Gravité entropique
c. Gravité quantique à boucles
d. Univers jumeaux

IV. De l’importance d’une théorie gravitationnelle fiable

MOND (Modified Newtonian dynamics)



- Ajout empirique d'une constante à la théorie de Newton, « variable d'ajustement »
- But: rendre compte des courbes de rotation des galaxies ✓
- Formation des galaxies au début de l'univers (James Webb Télescope, 2023) ✓
- Pas de sens physique, limitée à certains types d'observations

I. Newton

II. Relativité générale (RG)

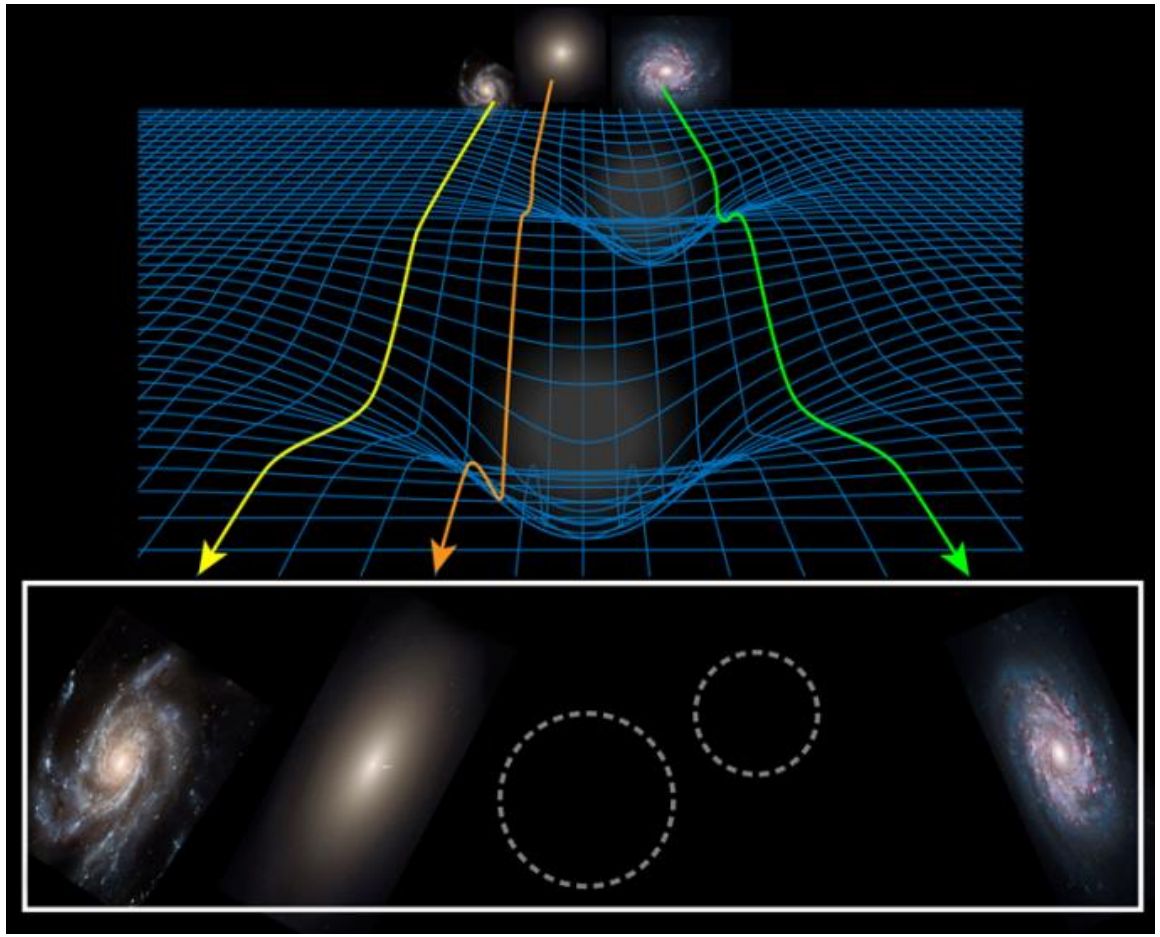
a. Victoires de la RG
b. Anomalies observationnelles

III. Au-delà de la relativité générale

a. MOND
b. Gravité entropique
c. Gravité quantique à boucles
d. Univers jumeaux

IV. De l’importance d’une théorie gravitationnelle fiable

Gravité entropique



- Newton à partir de considérations thermod.: force entropique ≠ force fondamentale
- Force entropique: effets collectifs et statistiques qui augmentent l'entropie (désordre)
- Formalisme pouvant expliquer MOND, effets quantiques
- Premiers tests satisfaisants ✓ mais on doit retrouver la RG à un moment

I. Newton

II. Relativité générale (RG)

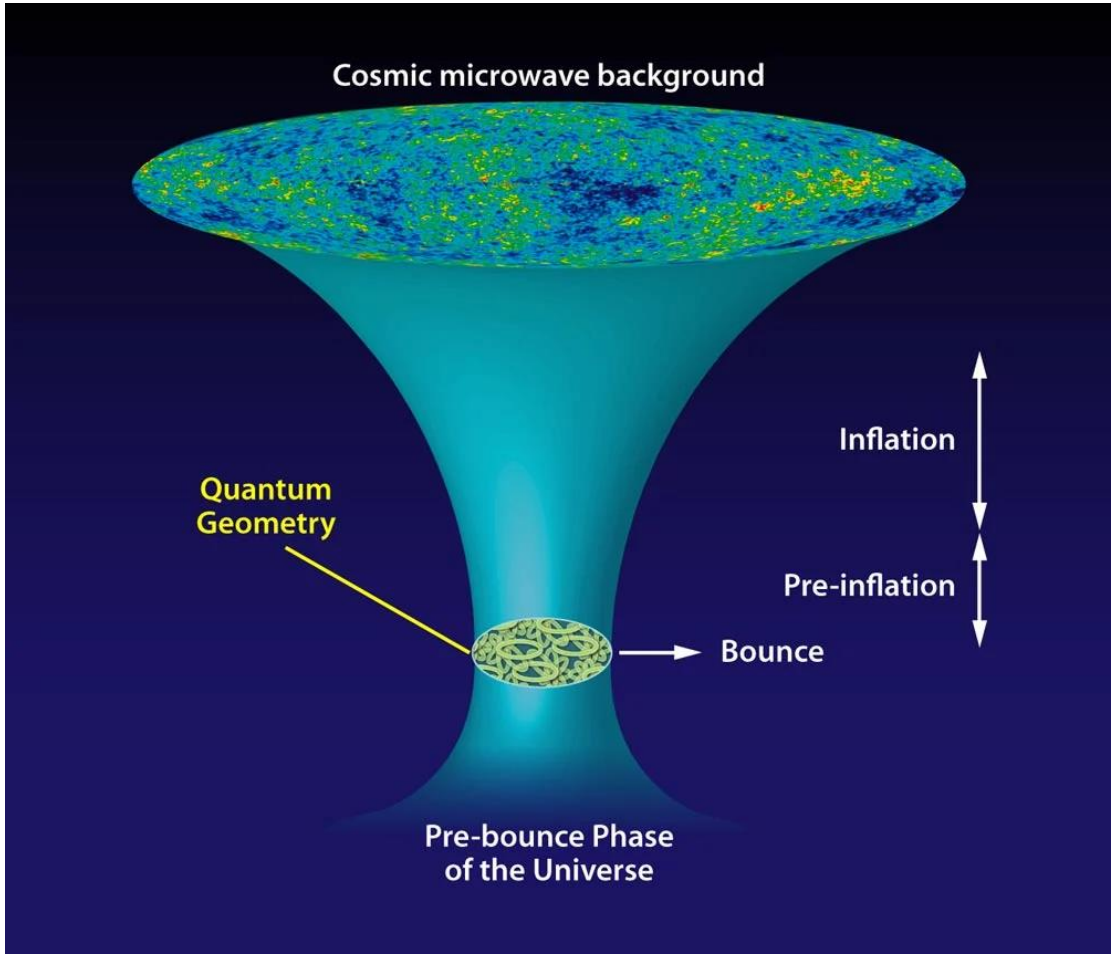
a. Victoires de la RG
b. Anomalies observationnelles

III. Au-delà de la relativité générale

a. MOND
b. Gravité entropique
c. Gravité quantique à boucles
d. Univers jumeaux

IV. De l’importance d’une théorie gravitationnelle fiable

Gravité quantique à boucles



- Géométrie « discrète », quantification naturelle ✓
- Prédit la forme de l'entropie des trous noirs comme la Hawking ✓
- Prédit un univers oscillant, rebond par effets quantiques

I. Newton

II. Relativité générale (RG)

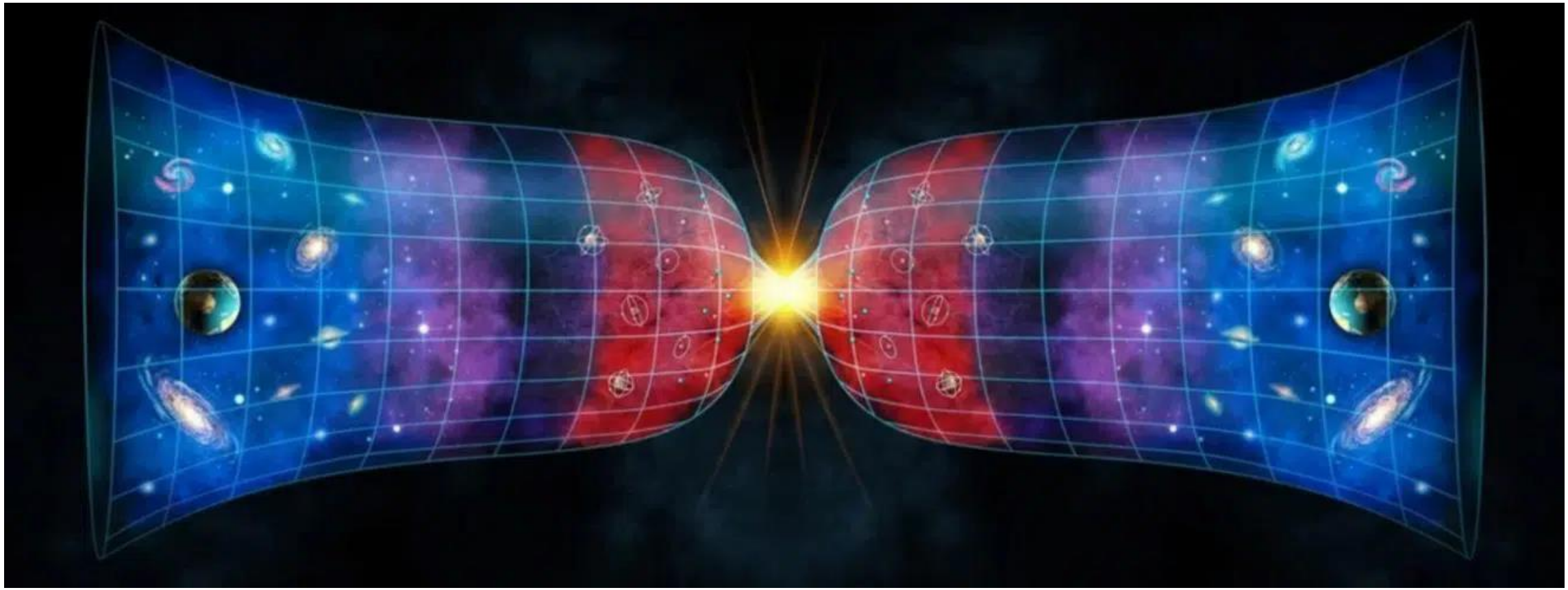
a. Victoires de la RG
b. Anomalies observationnelles

III. Au-delà de la relativité générale

a. MOND
b. Gravité entropique
c. Gravité quantique à boucles
d. Univers jumeaux

IV. De l’importance d’une théorie gravitationnelle fiable

Univers jumeaux, Sakharov



- Univers jumeaux, masses positives et négatives, s'attirent si même signe, repoussent sinon
- Equations de la RG couplées
- Donne une explication à la matière noire, et à l'énergie noire ✓
- Revisite la notion de trou noir

Bilan sur les alternatives en gravitation

- MOND: rend compte des mesures mais n'explique en rien la physique sous-jacente

- Gravité entropique: lien clair entre la thermodynamique, la théorie de l'information et la gravité
  - Développement à continuer et à creuser (2009)

- Gravité quantique à boucles: espace discret, en accord avec la physique des particules et le modèle standard (longueur de Planck)
  - Permet un lien, qui doit nécessairement exister, entre le monde quantique (micro) et gravitationnel (macro)

- Univers jumeaux: masses positives et négatives, interagissant uniquement par gravitation
  - Explique la majeure partie des anomalies, à creuser

Relativité générale: théorie limite de toute nouvelle théorie

I. Newton

II. Relativité générale (RG)

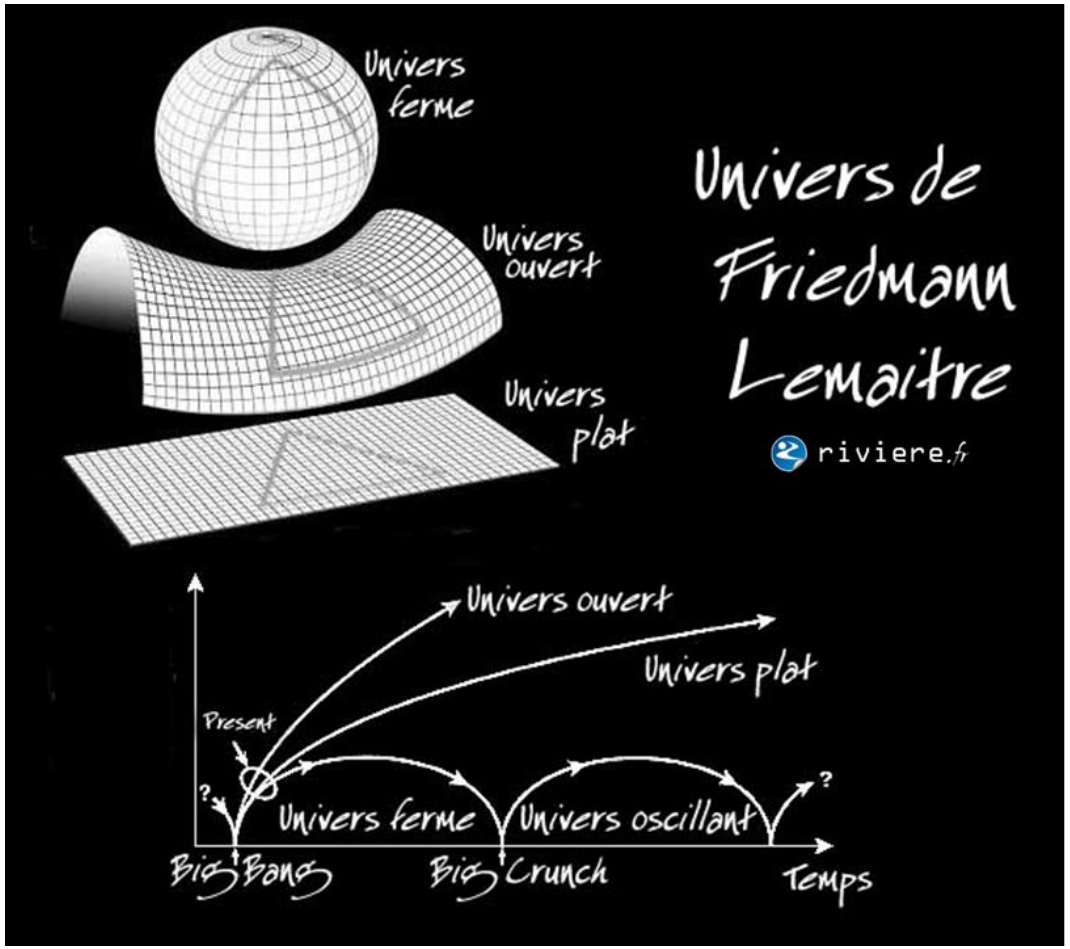
a. Victoires de la RG
b. Anomalies observationnelles

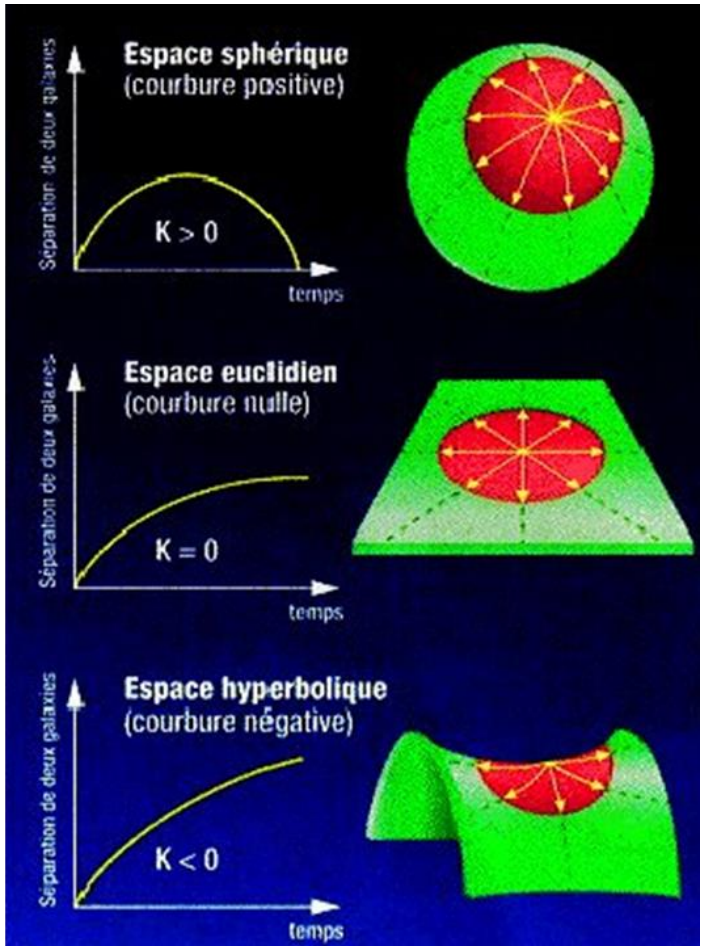
III. Au-delà de la relativité générale

a. MOND
b. Gravité entropique
c. Gravité quantique à boucles
d. Univers jumeaux

IV. De l’importance d’une théorie gravitationnelle fiable

De l'importance de la métrique

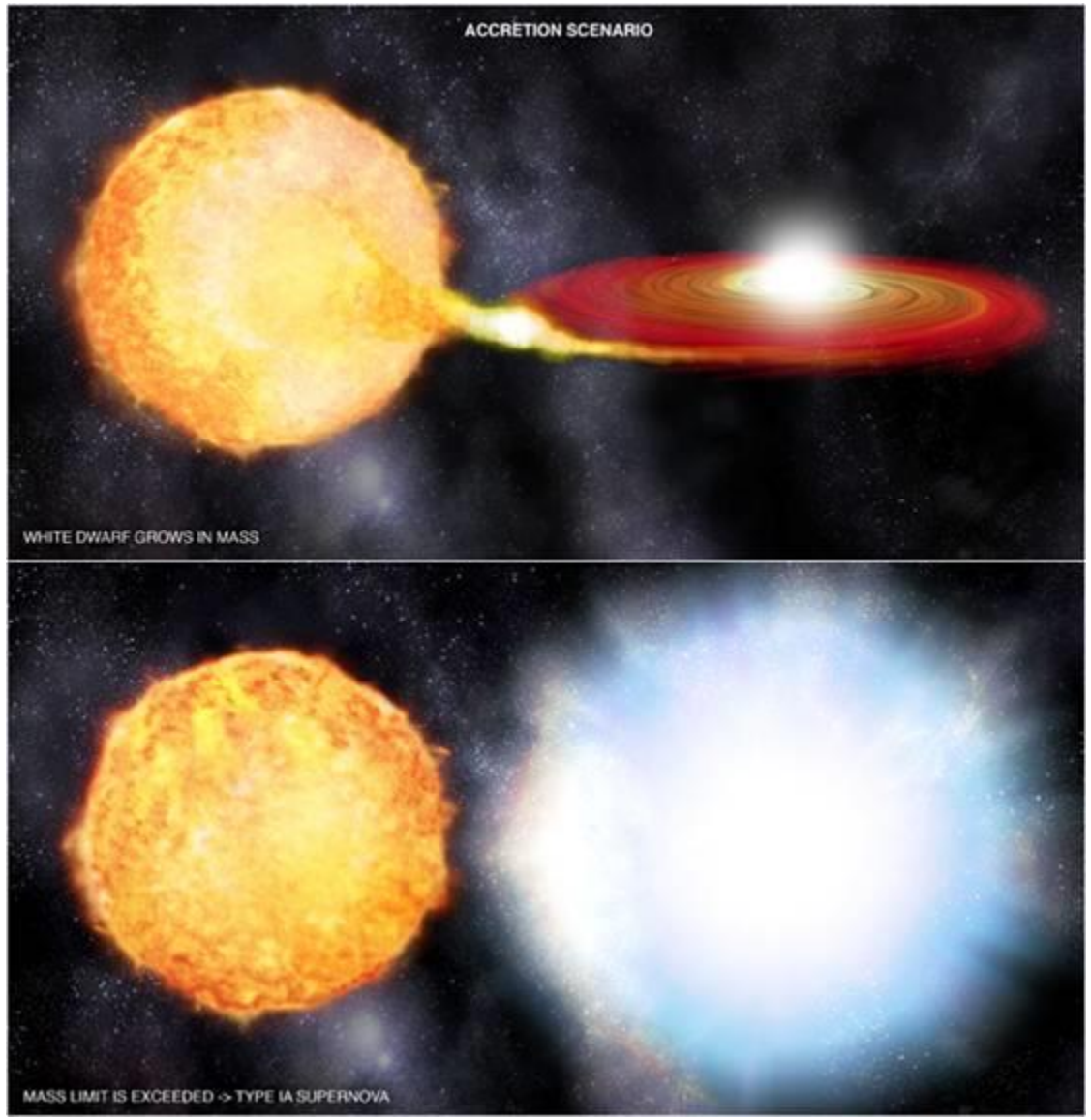




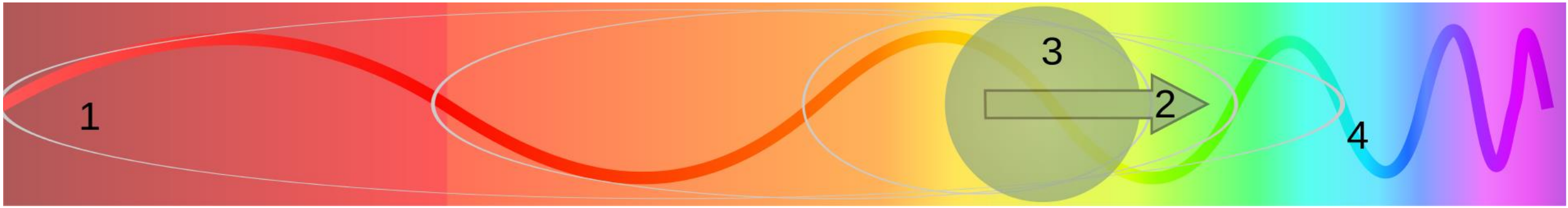
- Permet de mesurer les distances
- Elle dépend de la densité d'énergie totale, incluant la constante cosmologique, et détermine le destin de l'univers
- Mesures actuelles: univers plat (infini)

Mesures de distances ‘faibles’: chandelles standard

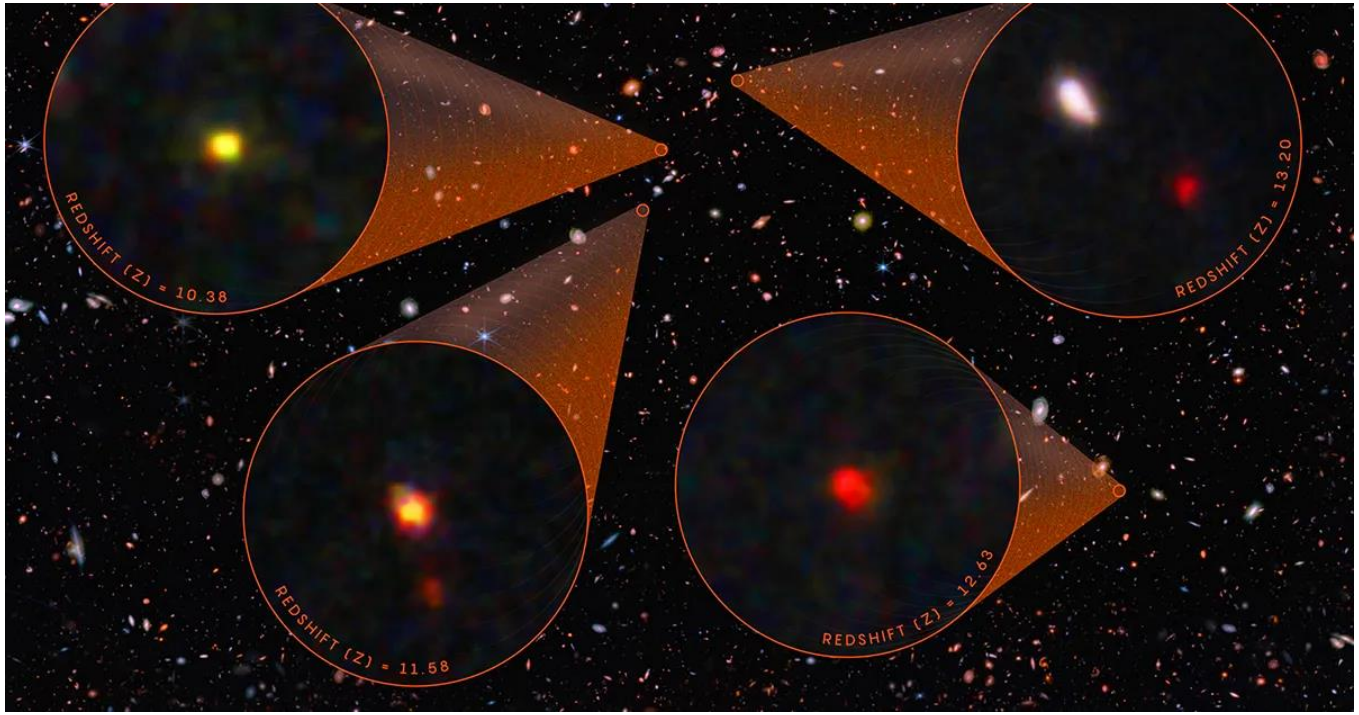
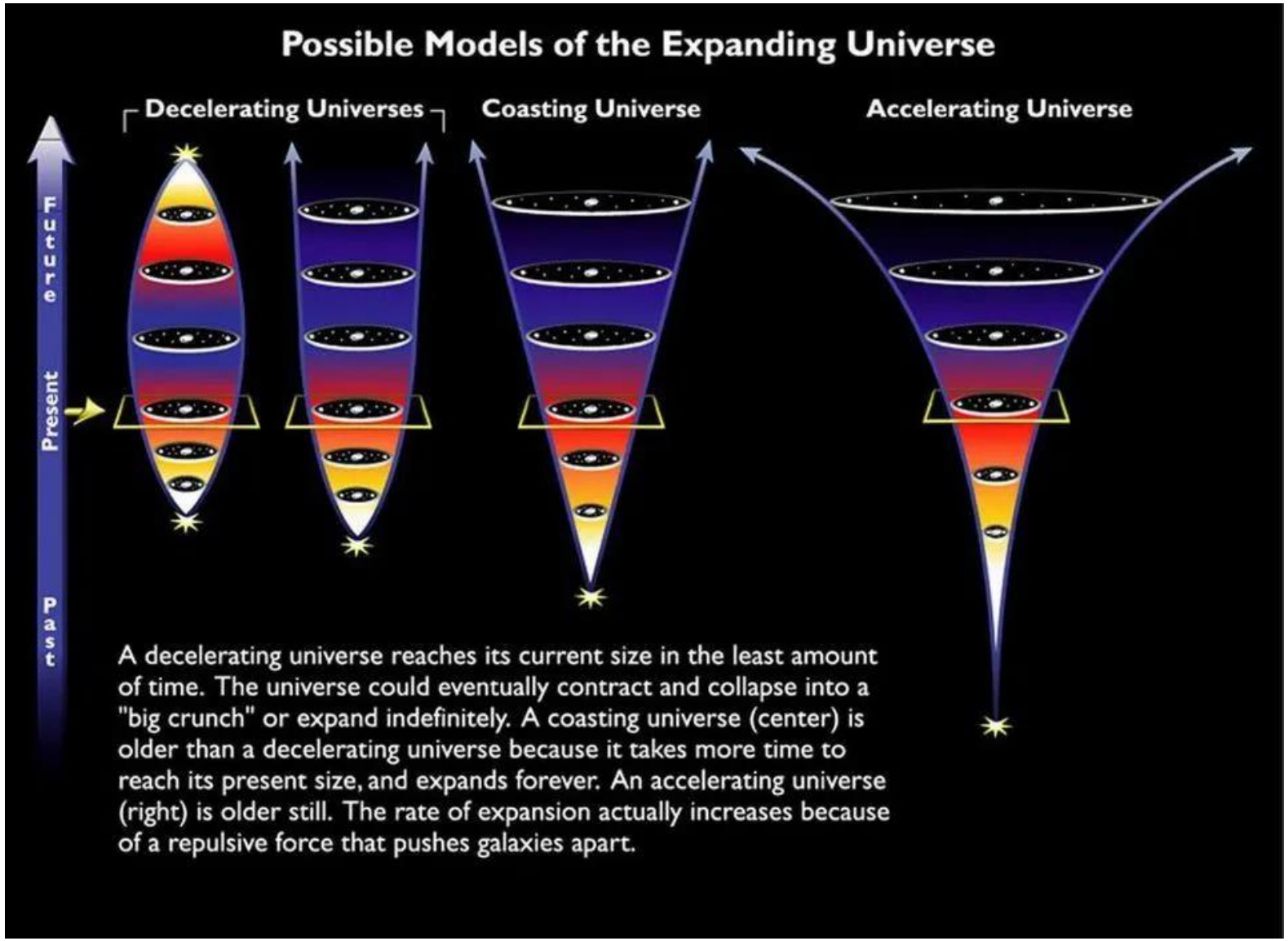
- Etoiles dont la luminosité est connue
- Céphéides
- Supernovas de type Ia (accrétion)
- Comparaison entre la luminosité connue et la luminosité observé
- Permet de connaitre la distance de l’objet… si on connait la métrique !!



Mesures de ‘grandes’ distances: redshift



- Identique à l’effet doppler
- Supernovas de type Ia (accrétion)
- Galaxies, statistique
- Métrique !!



Différents destins de l'univers