

Une histoire de la gravitation. De l'antiquité à la matière et l'énergie noires

Olivier Collet

Université de Lorraine.

18 mars 2022



1 Astronomie antique

2 De l'astronomie à la loi de la gravitation.

- Modèles astronomiques.

3 Précurseurs.

4 La Révolution newtonienne

- Formulation de la loi de la gravitation.
- Détermination de la masse de la Terre et du Soleil.

5 Les épreuves

6 Cartographie système solaire.

- Découverte d'Uranus et premier cas de "matière noire".
- Mercure et la relativité générale".

7 Les mesures et la structure

8 Cartographie de l'Univers.

- Mesure de distance inter-stellaire ou inter-galactique.
- Les théories et observations.
- Structure de l'Univers.

9 Energie noire

10 Evolution de l'Univers.

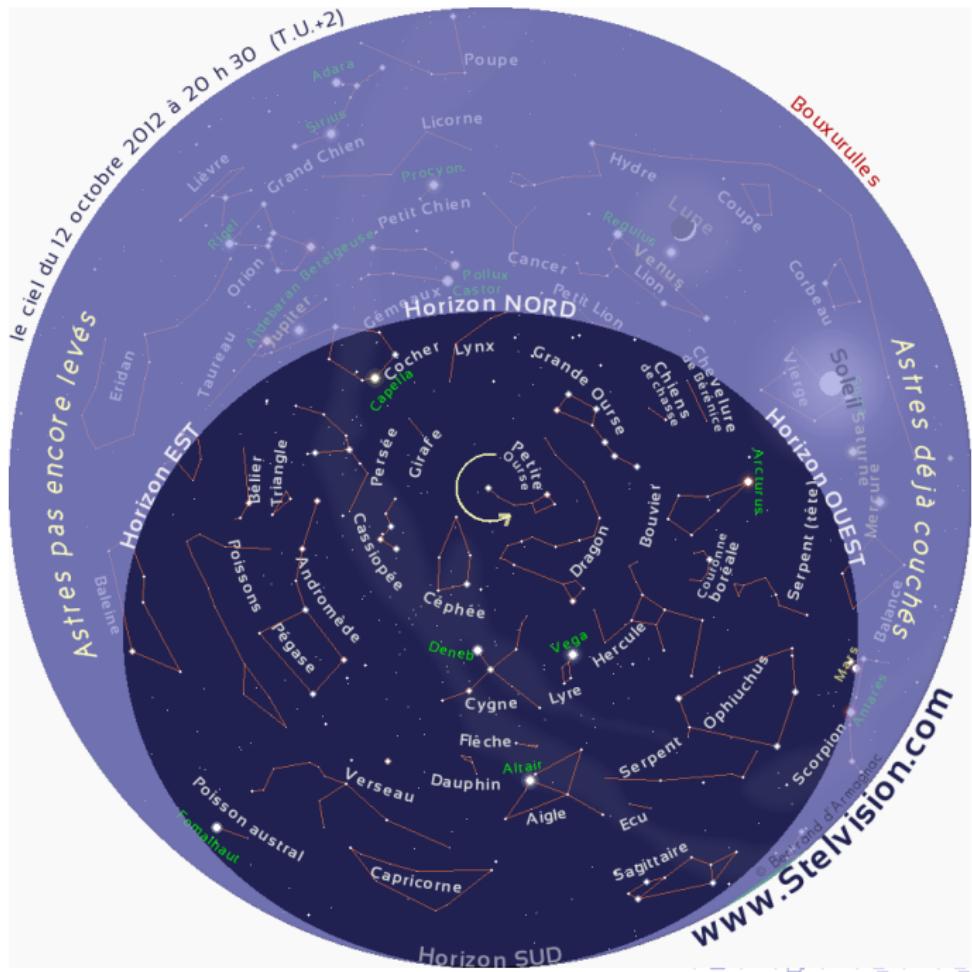
- D'où venons nous et où allons nous.

11 Matière noire.

- Mesure de vitesse des galaxies.
- Anomalies dans les trajectoires des galaxies.
- Les hypothèses.
- Le test.

Conclusion







MARS

Eloignement au Soleil : 206.6 à 249.0 millions de km

Période orbitale : 686.7 jours

Trajectoire de Mars vue de la Terre (relevé sur un an)



Plan

1 Astronomie antique

2 De l'astronomie à la loi de la gravitation.

- Modèles astronomiques.

3 Précurseurs.

4 La Révolution newtonienne

- Formulation de la loi de la gravitation.
- Détermination de la masse de la Terre et du Soleil.

5 Les épreuves

6 Cartographie système solaire.

- Découverte d'Uranus et premier cas de "matière noire".
- Mercure et la relativité générale".

7 Les mesures et la structure

8 Cartographie de l'Univers.

- Mesure de distance inter-stellaire ou inter-galactique.
- Les théories et observations.
- Structure de l'Univers.

9 Energie noire

10 Evolution de l'Univers.

- D'où venons nous et où allons nous.

11 Matière noire.

- Mesure de vitesse des galaxies.
- Anomalies dans les trajectoires des galaxies.



Plan

1 Astronomie antique

2 De l'astronomie à la loi de la gravitation.

- Modèles astronomiques.

3 Précurseurs.

4 La Révolution newtonienne

- Formulation de la loi de la gravitation.
- Détermination de la masse de la Terre et du Soleil.

5 Les épreuves

6 Cartographie système solaire.

- Découverte d'Uranus et premier cas de "matière noire".
- Mercure et la relativité générale".

7 Les mesures et la structure

8 Cartographie de l'Univers.

- Mesure de distance inter-stellaire ou inter-galactique.
- Les théories et observations.
- Structure de l'Univers.

9 Energie noire

10 Evolution de l'Univers.

- D'où venons nous et où allons nous.

11 Matière noire.

- Mesure de vitesse des galaxies.
- Anomalies dans les trajectoires des galaxies.



Astronomie dans la grèce antique.

① En grec *grave* signifie *lourd*.

② **Anaximandre, Thalès** $-VII$

La Terre est plate. Etoiles fixées sur sphères.

③ **Pythagore** $-580, -495$

Dix sphères avec des intervalles musicaux

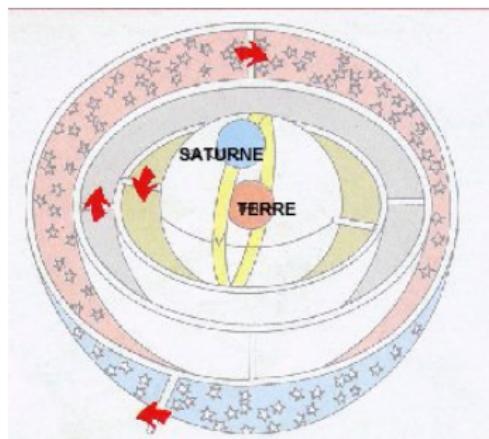
④ **Eudoxe** $-395, -342$

27 sphères (Lune (3), Soleil (3), Planètes (4))



Astronomie dans la grèce antique.

- ① En grec *grave* signifie *lourd*.
- ② **Anaximandre, Thalès** ^{-VI}
La Terre est plate. Etoiles fixées sur sphères.
- ③ **Pythagore** ^{-580, -495}
Dix sphères avec des intervalles musicaux
- ④ **Eudoxe** ^{-395, -342}
27 sphères (Lune (3), Soleil (3), Planètes (4))



Astronomie dans la grèce antique.

Aristote –382, –322

- ❶ La Lune tourne autour de la Terre.
 - ❷ Une pierre tombe au pied d'un mat.
⇒ la Terre est immobile... au centre du monde.
 - ❸ Ombre de la Terre sur la Lune arrondie
⇒ la Terre sphérique.
-
- ❶ Mondes sublunaire et supralunaire.
Gravité : loi gouvernant le monde sublunaire.
Gravité : aucune conséquence sur le monde supralunaire.
 - ❷ Cause du mouvement : essence des objets.
Le mouvement est un changement d'état des objets.
Les objets lourds tombent parce que c'est dans leur "nature".
Un objet tombe pour rejoindre son état propre (au centre de la Terre).



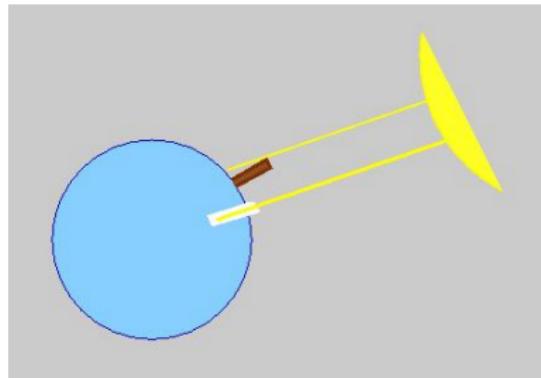
Astronomie dans la grèce antique.

Erasthotène −276, −194

Mesure de la circonference.

A midi, au solstice d'été :

- ⌚ Puits Assouan : pas d'ombre
- ⌚ Obélisque Alexandrie : ombre à 7.2°
- ⌚ $360 / 7.2 = 50$ segments couvrent le disque
- ⌚ Distance Assouan - Alexandrie
- ⇒ $C_{\text{Terre}} = 50 \times d = 39375 \text{ km} !$



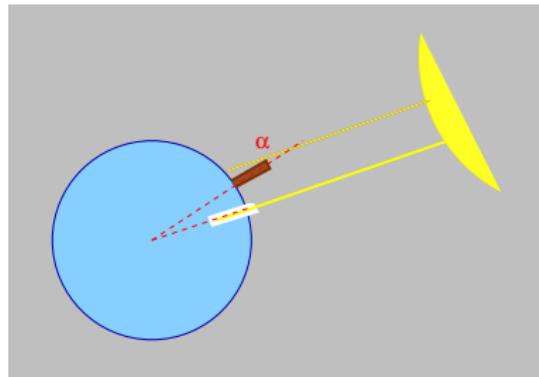
Astronomie dans la grèce antique.

Erasthotène -276, -194

Mesure de la circonference.

A midi, au solstice d'été :

- ⌚ Puits Assouan : pas d'ombre
 - ⌚ Obélisque Alexandrie : ombre à 7.2°
 - ⌚ $360 / 7.2 = 50$ segments couvrent le disque
 - ⌚ Distance Assouan - Alexandrie
- $\Rightarrow C_{\text{Terre}} = 50 \times d = 39375 \text{ km} !$



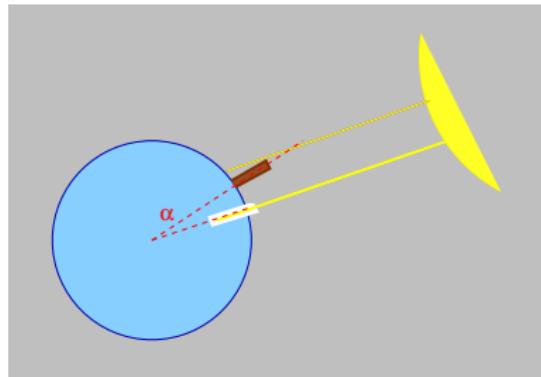
Astronomie dans la grèce antique.

Erasthotène −276, −194

Mesure de la circonference.

A midi, au solstice d'été :

- i Puits Assouan : pas d'ombre
 - ii Obélisque Alexandrie : ombre à 7.2°
 - iii $360 / 7.2 = 50$ segments couvrent le disque
 - iv Distance Assouan - Alexandrie
- ⇒ $C_{\text{Terre}} = 50 \times d = 39375 \text{ km} !$



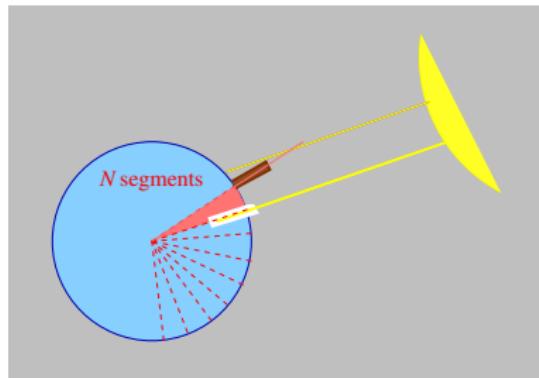
Astronomie dans la grèce antique.

Erasthotène −276, −194

Mesure de la circonference.

A midi, au solstice d'été :

- Ⓐ Puits Assouan : pas d'ombre
 - Ⓑ Obélisque Alexandrie : ombre à 7.2°
 - Ⓒ $360 / 7.2 = 50$ segments couvrent le disque
 - Ⓓ Distance Assouan - Alexandrie
- ⇒ $C_{\text{Terre}} = 50 \times d = 39375 \text{ km} !$



Astronomie dans la grèce antique.

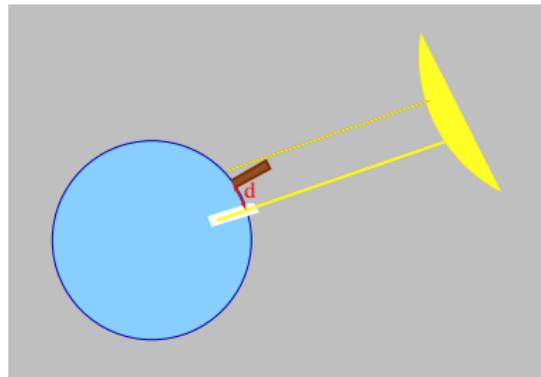
Erasthotène −276, −194

Mesure de la circonference.

A midi, au solstice d'été :

- i Puits Assouan : pas d'ombre
- ii Obélisque Alexandrie : ombre à 7.2°
- iii $360 / 7.2 = 50$ segments couvrent le disque
- iv Distance Assouan - Alexandrie

$$\Rightarrow C_{\text{Terre}} = 50 \times d = 39375 \text{ km !}$$



Astronomie dans la grèce antique.

Erasthotène −276, −194

Mesure de la circonference.

A midi, au solstice d'été :

- i Puits Assouan : pas d'ombre
 - ii Obélisque Alexandrie : ombre à 7.2°
 - iii $360 / 7.2 = 50$ segments couvrent le disque
 - iv Distance Assouan - Alexandrie
- ⇒ $C_{\text{Terre}} = 50 \times d = 39375 \text{ km} !$



Astronomie dans la grèce antique.

Aristarque de Samos^{-310, -230}

① "Intuition" héliocentrique.

- ② Diamètre (Lune) = Diamètre (Terre) / 3
(3474 km (réel) vs 3232 km (Aristarque))
- ③ Diamètre Lune apparent $\approx 0^{\circ}31'$. Distance Terre-Lune = 382 700 km !!!
(réel 384 000 km)
- ④ Durée révolution \approx 27 jours et 8 heures
Durée entre premier et dernier quartiers
 \approx 13 jours 5 heures
Distance Terre-Soleil \approx 19 x Distance Terre Lune
au lieu de 350



Astronomie dans la grèce antique.

Aristarque de Samos –310, –230

- ➊ "Intuition" héliocentrique.
- ➋ Diamètre (Lune) = Diamètre (Terre) / 3
(3474 km (réel) vs 3232 km (Aristarque))
- ➌ Diamètre Lune apparent $\approx 0^{\circ}31'$. Distance
Terre-Lune = 382 700 km !!!
(réel 384 000 km)
- ➍ Durée révolution \approx 27 jours et 8 heures
Durée entre premier et dernier quartiers
 \approx 13 jours 5 heures
Distance Terre-Soleil \approx 19 x Distance Terre Lune
au lieu de 350



Astronomie dans la grèce antique.

Aristarque de Samos –310, –230

- ➊ "Intuition" héliocentrique.
- ➋ Diamètre (Lune) = Diamètre (Terre) / 3
(3474 km (réel) vs 3232 km (Aristarque))
- ➌ Diamètre Lune apparent $\approx 0^{\circ}31'$. Distance
Terre-Lune = 382 700 km !!!
(réel 384 000 km)
- ➍ Durée révolution \approx 27 jours et 8 heures
Durée entre premier et dernier quartiers
 \approx 13 jours 5 heures
Distance Terre-Soleil \approx 19 x Distance Terre Lune
au lieu de 350



Astronomie dans la grèce antique.

Aristarque de Samos^{-310, -230}

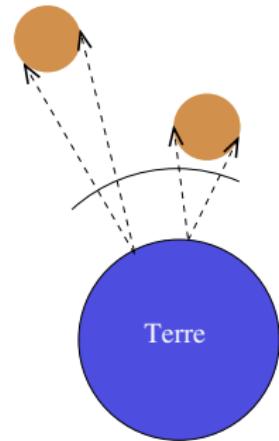
- ① "Intuition" héliocentrique.
- ② Diamètre (Lune) = Diamètre (Terre) / 3
(3474 km (réel) vs 3232 km (Aristarque))
- ③ Diamètre Lune apparent $\approx 0^{\circ}31'$. Distance Terre-Lune = 382 700 km !!!
(réel 384 000 km)
- ④ Durée révolution \approx 27 jours et 8 heures
Durée entre premier et dernier quartiers
 \approx 13 jours 5 heures
Distance Terre-Soleil \approx 19 x Distance Terre Lune
au lieu de 350



Astronomie dans la grèce antique.

Aristarque de Samos^{-310, -230}

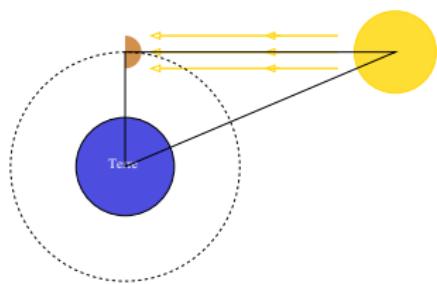
- ① "Intuition" héliocentrique.
- ② Diamètre (Lune) = Diamètre (Terre) / 3
(3474 km (réel) vs 3232 km (Aristarque))
- ③ Diamètre Lune apparent $\approx 0^{\circ}31'$. Distance Terre-Lune = 382 700 km!!!
(réel 384 000 km)
- ④ Durée révolution ≈ 27 jours et 8 heures
Durée entre premier et dernier quartiers
 ≈ 13 jours 5 heures
Distance Terre-Soleil $\approx 19 \times$ Distance Terre Lune
au lieu de 350



Astronomie dans la grèce antique.

Aristarque de Samos^{-310, -230}

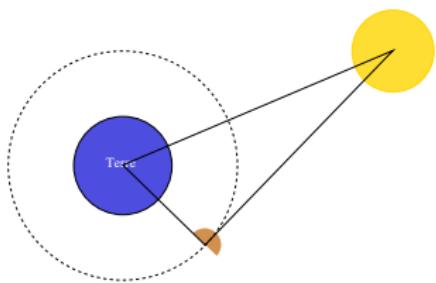
- ① "Intuition" héliocentrique.
- ② Diamètre (Lune) = Diamètre (Terre) / 3
(3474 km (réel) vs 3232 km (Aristarque))
- ③ Diamètre Lune apparent $\approx 0^{\circ}31'$. Distance Terre-Lune = 382 700 km !!!
(réel 384 000 km)
- ④ Durée révolution ≈ 27 jours et 8 heures
Durée entre premier et dernier quartiers
 ≈ 13 jours 5 heures
Distance Terre-Soleil $\approx 19 \times$ Distance Terre Lune
au lieu de 350



Astronomie dans la grèce antique.

Aristarque de Samos^{-310, -230}

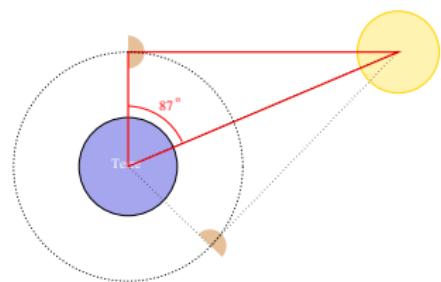
- ① "Intuition" héliocentrique.
- ② Diamètre (Lune) = Diamètre (Terre) / 3
(3474 km (réel) vs 3232 km (Aristarque))
- ③ Diamètre Lune apparent $\approx 0^{\circ}31'$. Distance Terre-Lune = 382 700 km !!!
(réel 384 000 km)
- ④ Durée révolution \approx 27 jours et 8 heures
Durée entre premier et dernier quartiers
 \approx 13 jours 5 heures
Distance Terre-Soleil \approx 19 x Distance Terre Lune
au lieu de 350



Astronomie dans la grèce antique.

Aristarque de Samos^{-310, -230}

- ① "Intuition" héliocentrique.
- ② Diamètre (Lune) = Diamètre (Terre) / 3
(3474 km (réel) vs 3232 km (Aristarque))
- ③ Diamètre Lune apparent $\approx 0^{\circ}31'$. Distance Terre-Lune = 382 700 km !!!
(réel 384 000 km)
- ④ Durée révolution ≈ 27 jours et 8 heures
Durée entre premier et dernier quartiers
 ≈ 13 jours 5 heures
Distance Terre-Soleil $\approx 19 \times$ Distance Terre Lune
au lieu de 350



Astronomie dans la grèce antique.

Aristarque de Samos^{-310, -230}

- ① "Intuition" héliocentrique.
- ② Diamètre (Lune) = Diamètre (Terre) / 3
(3474 km (réel) vs 3232 km (Aristarque))
- ③ Diamètre Lune apparent $\approx 0^{\circ}31'$. Distance Terre-Lune = 382 700 km !!!
(réel 384 000 km)
- ④ Durée révolution \approx 27 jours et 8 heures
Durée entre premier et dernier quartiers
 \approx 13 jours 5 heures
Distance Terre-Soleil \approx 19 x Distance Terre Lune
au lieu de 350



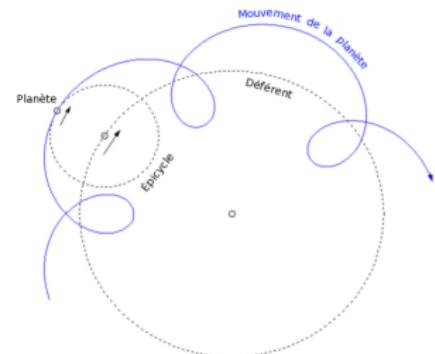
Astronomie dans la grèce antique.

Hipparche^{-190, -120}

Précession : 26 000 ans

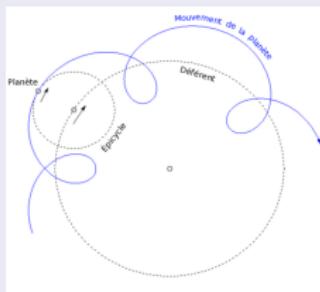
Rétrogradation des planètes : épicycles

Vitesse du Soleil variable : décentrement



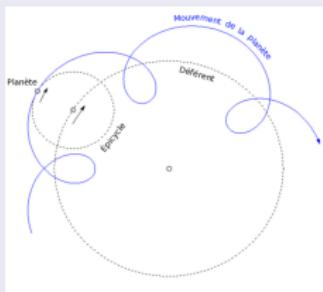
Révolution "Ptolémée".

Claude Ptolémée (90-168)

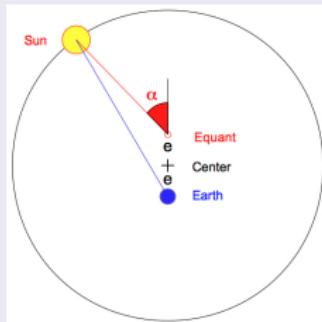


Révolution "Ptolémée".

Claude Ptolémée (90-168)



Ajout de l'équant

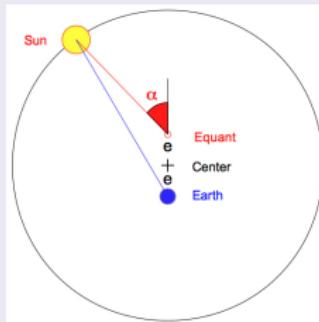


Révolution "Ptolémée".

Claude Ptolémée (90-168)



Ajout de l'équant



Reproduit les rétrogradations des planètes supérieures.

Les planètes internes sont "proches" du Soleil.
Ne donne pas des valeurs correctes des vitesses.

Plan

1 Astronomie antique

2 De l'astronomie à la loi de la gravitation.

- Modèles astronomiques.

3 Précurseurs.

4 La Révolution newtonienne

- Formulation de la loi de la gravitation.
- Détermination de la masse de la Terre et du Soleil.

5 Les épreuves

6 Cartographie système solaire.

- Découverte d'Uranus et premier cas de "matière noire".
- Mercure et la relativité générale".

7 Les mesures et la structure

8 Cartographie de l'Univers.

- Mesure de distance inter-stellaire ou inter-galactique.
- Les théories et observations.
- Structure de l'Univers.

9 Energie noire

10 Evolution de l'Univers.

- D'où venons nous et où allons nous.

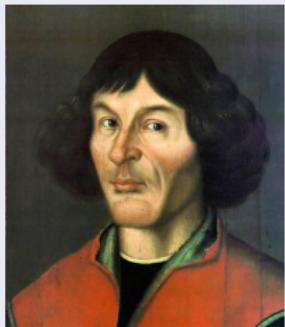
11 Matière noire.

- Mesure de vitesse des galaxies.
- Anomalies dans les trajectoires des galaxies.



Révolution copernicienne.

Nicolas Copernic (Torun ; 1473 - Frombork ; 1543)



- ➊ 1497 : Occultation d'Aldébaran par la Lune.
- ➋ 1500 : Eclipse partielle de Lune
- ➌ 1510-1520 : Observations d'étoiles (tour de la cathédrale de Frombork)
- ➍ 1512-1517 : Réforme du calendrier (Latran)

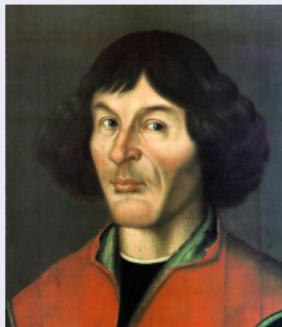
Critique du géocentrisme.

- Multiplicité
- Pb prédition
- Manque d'ordre et d'harmonie (équant).
⇒ L'héliocentrisme.

- ➊ La Terre a deux mouvements
- ➋ Mouvement rétrograde des planètes expliqué
- ➌ Distance aux étoiles considérable (pas de parallaxe)
- ➍ Planètes internes toujours "proche du Soleil" (jamais en opposition)
- ➎ Vitesses des planètes différentes (fonction de leur distance au Soleil)

Révolution copernicienne.

Nicolas Copernic (Torun ; 1473 - Frombork ; 1543)



- ➊ 1497 : Occultation d'Aldébaran par la Lune.
- ➋ 1500 : Eclipse partielle de Lune
- ➌ 1510-1520 : Observations d'étoiles (tour de la cathédrale de Frombork)
- ➍ 1512-1517 : Réforme du calendrier (Latran)

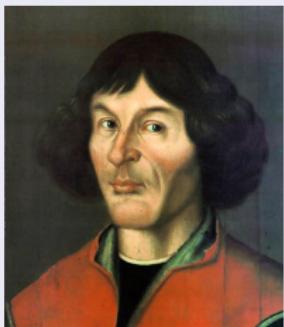
Critique du géocentrisme.

- Multiplicité
- Pb prédition
- Manque d'ordre et d'harmonie (équant).
⇒ **L'héliocentrisme.**

- ➊ La Terre a deux mouvements
- ➋ Mouvement rétrograde des planètes expliqué
- ➌ Distance aux étoiles considérable (pas de parallaxe)
- ➍ Planètes internes toujours "proche du Soleil" (jamais en opposition)
- ➎ Vitesses des planètes différentes (fonction de leur distance au Soleil)

Révolution copernicienne.

Nicolas Copernic (Torun ; 1473 - Frombork ; 1543)



- ➊ 1497 : Occultation d'Aldébaran par la Lune.
- ➋ 1500 : Eclipse partielle de Lune
- ➌ 1510-1520 : Observations d'étoiles (tour de la cathédrale de Frombork)
- ➍ 1512-1517 : Réforme du calendrier (Latran)

Critique du géocentrisme.

- Multiplicité
- Pb prédition
- Manque d'ordre et d'harmonie (équant).
⇒ **L'héliocentrisme.**

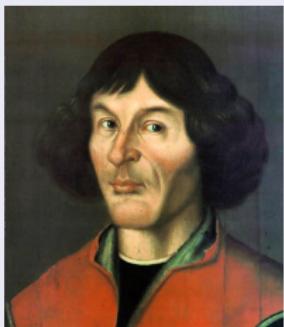
*De Revolutionibus*¹⁵⁴³



- ➊ La Terre a deux mouvements
- ➋ Mouvement rétrograde des planètes expliqué
- ➌ Distance aux étoiles considérable (pas de parallaxe)
- ➍ Planètes internes toujours "proche du Soleil" (jamais en opposition)
- ➎ Vitesses des planètes différentes (fonction de leur distance au Soleil)

Révolution copernicienne.

Nicolas Copernic (Torun ; 1473 - Frombork ; 1543)



- ① 1497 : Occultation d'Aldébaran par la Lune.
- ② 1500 : Eclipse partielle de Lune
- ③ 1510-1520 : Observations d'étoiles (tour de la cathédrale de Frombork)
- ④ 1512-1517 : Réforme du calendrier (Latran)

Critique du géocentrisme.

- Multiplicité
- Pb prédition
- Manque d'ordre et d'harmonie (équant).
⇒ **L'héliocentrisme.**

*De Revolutionibus*¹⁵⁴³



- ① La Terre a deux mouvements
- ② Mouvement rétrograde des planètes expliqué
- ③ Distance aux étoiles considérable (pas de parallaxe)
- ④ Planètes internes toujours "proche du Soleil" (jamais en opposition)
- ⑤ Vitesses des planètes différentes (fonction de leur distance au Soleil)

Giordano Bruno (1548-1600)



*Le banquet des cendres*¹⁵⁸⁴ :

" Toutes choses qui se trouvent sur la Terre se meuvent avec la Terre. La pierre jetée du haut du mât reviendra en bas, de quelque façon que le navire se meuve."

Bruno : Impossibilité de déceler le mouvement d'un système à bord de ce système.

*L'infini, l'univers et les mondes*¹⁵⁸⁴ :

Il existe une infinité de terres, une infinité de soleils et un éther infini



Observations astronomiques.

Tycho Brahe (1546 - 1601)



- ➊ 1561 : Observations étoiles avec ficelles.
- ➋ 1563 : Rapprochement Jupiter-Saturne avec compas
- ➌ 1565 : Oncle meurt noyé
- ➍ 1566 : Eclipse de Lune → mort de Soliman
- ➎ 1570 : Construction d'outils
- ➏ 1572 : *Nova Stella* dans monde supra-lunaire
- ➐ 1574 : Don de l'île de Ven - Uraniborg
- ➑ 1577 : Observation de la grande comète
- ➒ 1588 : Perte mécénat
- ➓ 1597 : Fuite et mort à Prague

Observations astronomiques.

Tycho Brahe (1546 - 1601)



- ➊ 1561 : Observations étoiles avec ficelles.
- ➋ 1563 : Rapprochement Jupiter-Saturne avec compas
- ➌ 1565 : Oncle meurt noyé
- ➍ 1566 : Eclipse de Lune → mort de Soliman
- ➎ 1570 : Construction d'outils
- ➏ 1572 : *Nova Stella* dans monde supra-lunaire
- ➐ 1574 : Don de l'île de Ven - Uraniborg
- ➑ 1577 : Observation de la grande comète
- ➒ 1588 : Perte mécénat
- ➓ 1597 : Fuite et mort à Prague

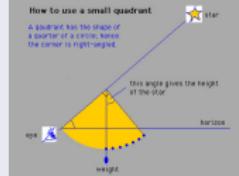
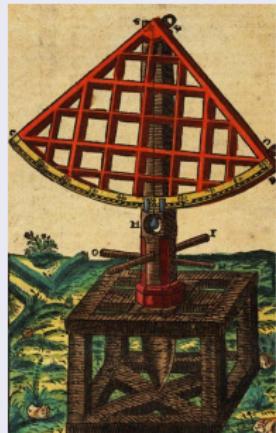


Observations astronomiques.

Tycho Brahe (1546 - 1601)



- ➊ 1561 : Observations étoiles avec ficelles.
- ➋ 1563 : Rapprochement Jupiter-Saturne avec compas
- ➌ 1565 : Oncle meurt noyé
- ➍ 1566 : Eclipse de Lune → mort de Soliman
- ➎ 1570 : Construction d'outils
- ➏ 1572 : *Nova Stella* dans monde supra-lunaire
- ➐ 1574 : Don de l'île de Ven - Uraniborg
- ➑ 1577 : Observation de la grande comète
- ➒ 1588 : Perte mécénat
- ➓ 1597 : Fuite et mort à Prague

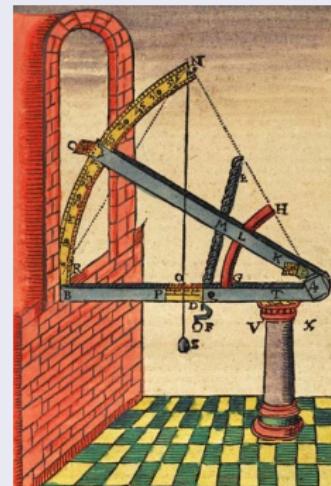


Observations astronomiques.

Tycho Brahe (1546 - 1601)



- ➊ 1561 : Observations étoiles avec ficelles.
- ➋ 1563 : Rapprochement Jupiter-Saturne avec compas
- ➌ 1565 : Oncle meurt noyé
- ➍ 1566 : Eclipse de Lune → mort de Soliman
- ➎ 1570 : Construction d'outils
- ➏ 1572 : *Nova Stella* dans monde supra-lunaire
- ➐ 1574 : Don de l'île de Ven - Uraniborg
- ➑ 1577 : Observation de la grande comète
- ➒ 1588 : Perte mécénat
- ➓ 1597 : Fuite et mort à Prague



Observations astronomiques.

Tycho Brahe (1546 - 1601)



- ① 1561 : Observations étoiles avec ficelles.
- ② 1563 : Rapprochement Jupiter-Saturne avec compas
- ③ 1565 : Oncle meurt noyé
- ④ 1566 : Eclipse de Lune → mort de Soliman
- ⑤ 1570 : Construction d'outils
- ⑥ 1572 : *Nova Stella* dans monde supra-lunaire
- ⑦ 1574 : Don de l'île de Ven - Uraniborg
- ⑧ 1577 : Observation de la grande comète
- ⑨ 1588 : Perte mécénat
- ⑩ 1597 : Fuite et mort à Prague

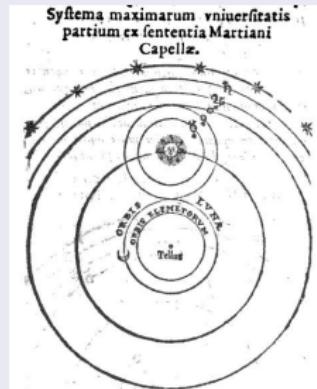
Observations astronomiques.

Tycho Brahe (1546 - 1601)



- ➊ 1561 : Observations étoiles avec ficelles.
- ➋ 1563 : Rapprochement Jupiter-Saturne avec compas
- ➌ 1565 : Oncle meurt noyé
- ➍ 1566 : Eclipse de Lune → mort de Soliman
- ➎ 1570 : Construction d'outils
- ➏ 1572 : *Nova Stella* dans monde supra-lunaire
- ➐ 1574 : Don de l'île de Ven - Uraniborg
- ➑ 1577 : Observation de la grande comète
- ➒ 1588 : Perte mécénat
- ➓ 1597 : Fuite et mort à Prague

Modèle mixte d'Héraclite du Pont



Observations astronomiques.

Tycho Brahe (1546 - 1601)



- ➊ 1561 : Observations étoiles avec ficelles.
- ➋ 1563 : Rapprochement Jupiter-Saturne avec compas
- ➌ 1565 : Oncle meurt noyé
- ➍ 1566 : Eclipse de Lune → mort de Soliman
- ➎ 1570 : Construction d'outils
- ➏ 1572 : *Nova Stella* dans monde supra-lunaire
- ➐ 1574 : Don de l'île de Ven - Uraniborg
- ➑ 1577 : Observation de la grande comète
- ➒ 1588 : Perte mécénat
- ➓ 1597 : Fuite et mort à Prague

Modèle mixte de Tycho Brahe

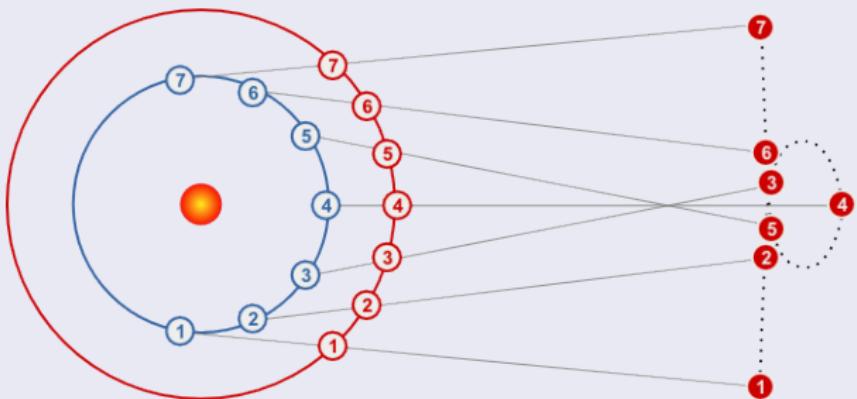


Observations astronomiques.

Johannes Kepler (Weil der Stadt ; 1571 - Ratisbonne ; 1630)



- Observations de Tycho Brahe
- Etude théorique de la trajectoire de Mars par Kepler



Observations astronomiques.

Johannes Kepler (Weil der Stadt ; 1571 - Ratisbonne ; 1630)



- Trajectoire elliptique (et non circulaire) des planètes.

Loi des orbites (Soleil est un foyer)

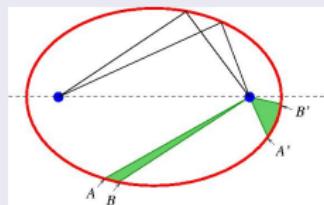
⇒ force centripète

Loi des aires (Egales aires balayées pdt la même durée)

⇒ force dirigée vers Soleil

Loi des périodes (Période² ∝ demi-grand axe³)

⇒ $\frac{\text{Force}}{\text{Masse}} = \text{constante}$, \forall planète.



Observations astronomiques.

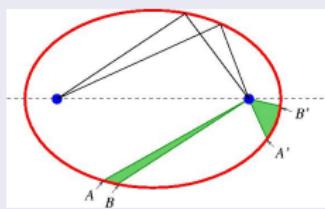
Johannes Kepler (Weil der Stadt ; 1571 - Ratisbonne ; 1630)



Loi des périodes (Période² \propto demi-grand axe³)

Planète	Période (jours)	demi-grand axe (km)	P^2 / D^3 (jours ² / km ³)
Mercure	87,96	57,9 M	$29,755\ 153 \times 10^{-20}$
Vénus	224,7	108,2 M	$29,754\ 454 \times 10^{-20}$
Terre	365,25	149,6 M	$29,744\ 939 \times 10^{-20}$
Mars	686,9	227,9 M	$29,756\ 485 \times 10^{-20}$
Jupiter	4335,4	778,4 M	$29,749\ 335 \times 10^{-20}$
Saturne	10 757,7	1 421,2 M	$30,095\ 440 \times 10^{-20}$

$$\text{Période} \times \text{Période} = \text{cste} \times \text{Rayon} \times \text{Rayon} \times \text{Rayon}$$



Le mouvement

Galileo Galilei (Pise ; 1564 - Florence ; 1642)



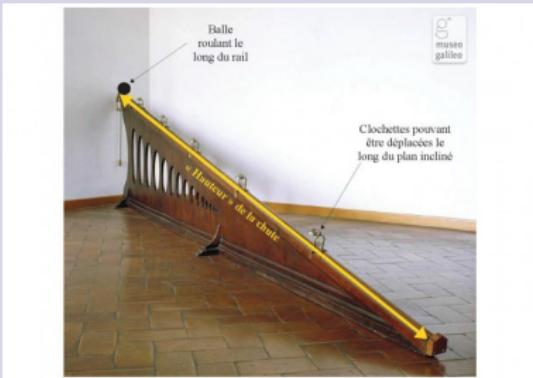
Portrait de Galilée peint par Justus Sustermans en 1636.

Relativité galiléenne

- Vitesse constante
- ⇒ accélération nulle
- ⇒ pas de force
- ⇒ pas d'expérience !!

Rampe de Galilée

- Hypothèse : force gravitation constante
- Avant : chute libre : à *vitesse* (!) constante.



- Après : chute libre : à *accélération* (!) constante.
- L'accélération est proportionnelle à la force

Le mouvement

Galileo Galilei (Pise ; 1564 - Florence ; 1642)



Portrait de Galilée peint par Justus Sustermans en 1636.

Relativité galiléenne

Vitesse constante

⇒ accélération nulle

⇒ pas de force

⇒ pas d'expérience !!

Rampe de Galilée

- Hypothèse : force gravitation constante
- Avant : chute libre : à *vitesse* (!) constante.



- Après : chute libre : à *accélération* (!) constante.

• L'accélération est proportionnelle à la force

La Terre peut bouger

Découverte des lunes de Jupiter

- Premier argument d'Aristote :
Si la Terre était en mouvement,
la Lune ne pourrait pas la suivre.
- Jupiter est en mouvement et "entraîne"
ces satellites.

Relativité galiléenne

- Deuxième argument d'Aristote :
Si la Terre était en mouvement,
une pierre ne tomberait pas au pied
d'une falaise.
- Pas d'expérience dans une cabine d'un
bateau pour détecter si celui-ci est
 - au repos
 - un mouvement uniforme (ni donner sa
vitesse).

Chute libre

- Poids différents lachés du haut de la
tour de Pise arrivent en même temps au
sol.
- La vitesse de chute ne dépend pas de
la masse.



Découverte des lunes de Jupiter

- Premier argument d'Aristote :
Si la Terre était en mouvement,
la Lune ne pourrait pas la suivre.
- Jupiter est en mouvement et "entraîne"
ces satellites.

Relativité galiléenne

- Deuxième argument d'Aristote :
Si la Terre était en mouvement,
une pierre ne tomberait pas au pied
d'une falaise.
- Pas d'expérience dans une cabine d'un
bateau pour détecter si celui-ci est
 - au repos
 - un mouvement uniforme (ni donner sa
vitesse).

Chute libre

- Poids différents lachés du haut de la
tour de Pise arrivent en même temps au
sol.
- La vitesse de chute ne dépend pas de
la masse.



La Terre peut bouger

Découverte des lunes de Jupiter

- Premier argument d'Aristote :
Si la Terre était en mouvement,
la Lune ne pourrait pas la suivre.
- Jupiter est en mouvement et "entraîne"
ces satellites.

Relativité galiléenne

- Deuxième argument d'Aristote :
Si la Terre était en mouvement,
une pierre ne tomberait pas au pied
d'une falaise.
- Pas d'expérience dans une cabine d'un
bateau pour détecter si celui-ci est
 - au repos
 - un mouvement uniforme (ni donner sa
vitesse).

Chute libre

- Poids différents lachés du haut de la
tour de Pise arrivent en même temps au
sol.
- **La vitesse de chute ne dépend pas de
la masse.**



Plan

1 Astronomie antique

2 De l'astronomie à la loi de la gravitation.

- Modèles astronomiques.

3 Précurseurs.

4 La Révolution newtonienne

- Formulation de la loi de la gravitation.
- Détermination de la masse de la Terre et du Soleil.

5 Les épreuves

6 Cartographie système solaire.

- Découverte d'Uranus et premier cas de "matière noire".
- Mercure et la relativité générale".

7 Les mesures et la structure

8 Cartographie de l'Univers.

- Mesure de distance inter-stellaire ou inter-galactique.
- Les théories et observations.
- Structure de l'Univers.

9 Energie noire

10 Evolution de l'Univers.

- D'où venons nous et où allons nous.

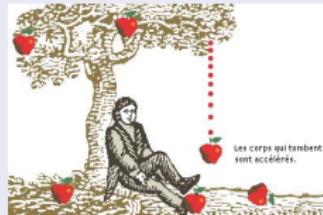
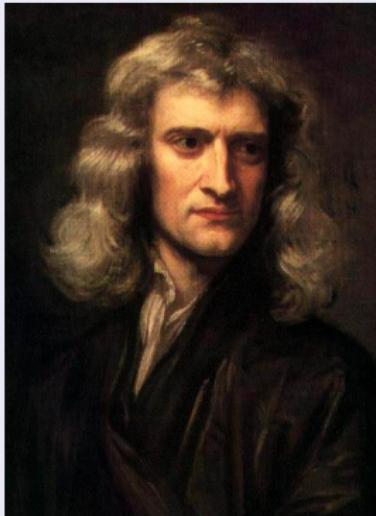
11 Matière noire.

- Mesure de vitesse des galaxies.
- Anomalies dans les trajectoires des galaxies.



La gravitation.

Isaac Newton (1642-1727)

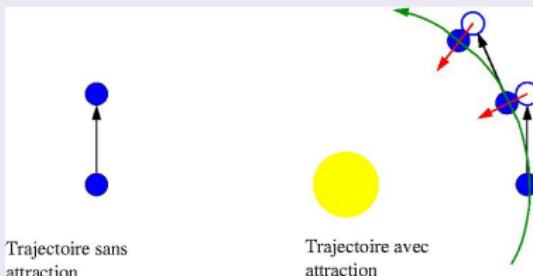
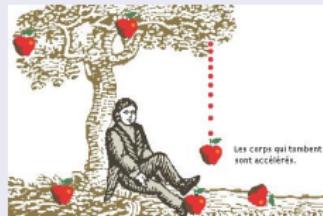
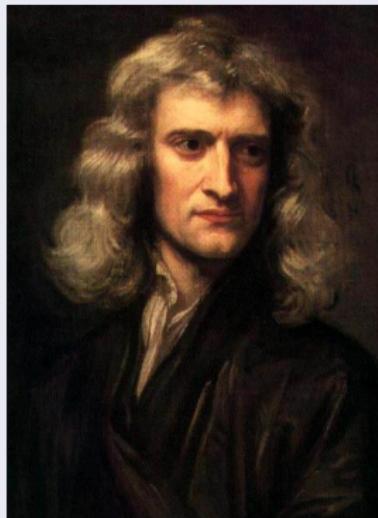


- vitesse = variation de la position en 1 seconde
- accélération = variation de la vitesse en 1 seconde

- Le Soleil exerce une force sur la Terre.
 - Cette force fait varier la vitesse (accélère) la Terre.
- La Terre exerce une force sur la pomme.
 - Cette force fait varier la vitesse (accélère) la pomme.

La gravitation.

Isaac Newton (1642-1727)

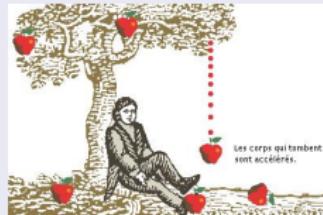
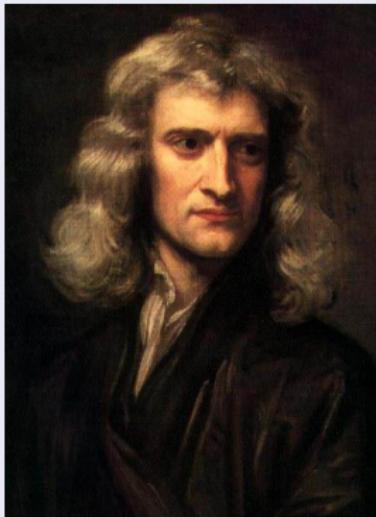


- vitesse = variation de la position en 1 seconde
- accélération = variation de la vitesse en 1 seconde

- Le Soleil exerce une force sur la Terre.
- Cette force fait varier la vitesse (accélère) la Terre.
- La Terre exerce une force sur la pomme.
- Cette force fait varier la vitesse (accélère) la pomme.

La gravitation.

Isaac Newton (1642-1727)



- vitesse = variation de la position en 1 seconde
- accélération = variation de la vitesse en 1 seconde

- Le Soleil exerce une force sur la Terre.
- Cette force fait varier la vitesse (accélère) la Terre.
- La Terre exerce une force sur la pomme.
- Cette force fait varier la vitesse (accélère) la pomme.

La gravitation.

La Force à pour origine l'attraction entre les corps

- ① La masse *grave*, m_g , détermine la quantité de matière d'un objet
- ② La force d'attraction entre deux objets est proportionnelle à la masse grave, M_g , de l'objet attirant
- ③ et aussi la masse grave, m_g , de l'objet attiré (action réciproque).
- ④ D'après les lois de Kepler, elle est proportionnelle à $1/d^2$.
- ⑤ $\vec{F}_{M_g \rightarrow m_g} = G \frac{M_g m_g}{d^2} \vec{u}$ Loi de la gravitation universelle *Principia universalis*¹⁶⁸⁷

La Force à pour conséquence d'infléchir le mouvement.

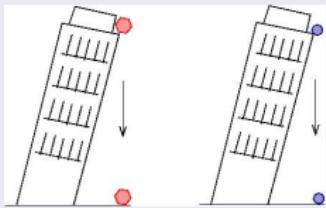
- ① La masse *inertielle*, m_i , rend difficile la mise en mouvement d'un objet.
- ② Pour fournir une accélération donnée, il faut appliquer une force proportionnelle à m_i .
- ③ $\vec{F} = m_i \vec{a}$ Principe fondamental de la dynamique.

La gravitation.

Principe d'équivalence faible

Force qui modifie la trajectoire de la masse m = Force exercée par la masse M sur m

$$m_i a = G \frac{M_g m_g}{d^2}$$



D'après Galilée,
chute indépendante de m_g !!
corps chute avec la même vitesse (et accélération).

$$\rightarrow [m_i = m_g]$$

Chute libre

$$ma = mg \quad \text{avec} \quad g = G \frac{M_T}{r_T^2} = 9.81 \text{m/s}^2$$

Mouvement circulaire.

Newton :

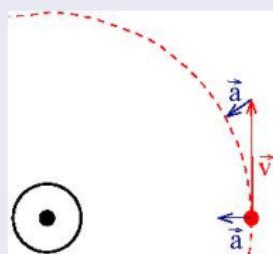
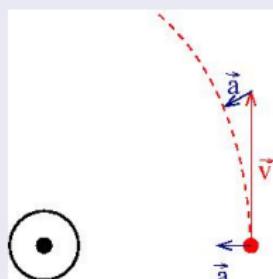
$$\vec{F}_{M \rightarrow m} = G \frac{M \ m}{r^2} \vec{u}$$

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



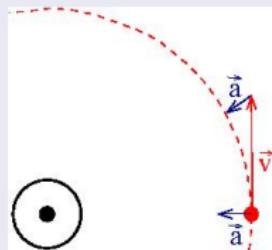
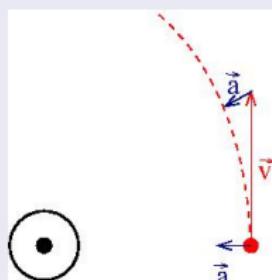
Mouvement circulaire.

Mouvement circulaire



Mouvement circulaire.

Mouvement circulaire



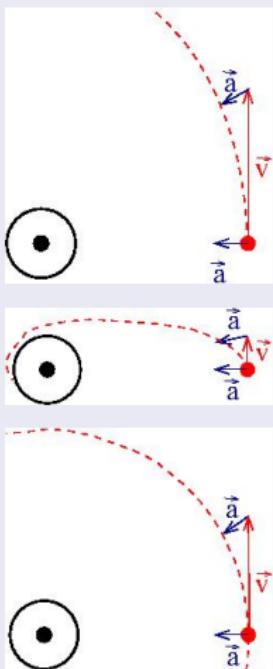
Relation v et r

Pour une distance Soleil-planète donnée (r_p)
Mouvement circulaire $\Rightarrow a = v^2/r$



Mouvement circulaire.

Mouvement circulaire



Relation v et r

$$a = v^2/r \quad \text{et} \quad ma = G \frac{M_{\odot} m}{r^2}$$

$$v^2 = \frac{GM_{\odot}}{r}$$

comme $T = 2\pi r/v$ alors

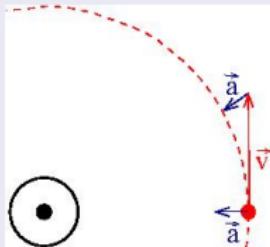
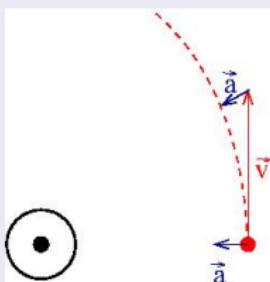
$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM_{\odot}} r^3$$

avec

$$\frac{4\pi^2}{GM_{\odot}} = 29,744305 \times 10^{-20} \text{ MKSA}$$

Mouvement circulaire.

Mouvement circulaire



Relation v et r

$$a = v^2/r \quad \text{et} \quad ma = G \frac{M_{\odot} m}{r^2}$$

$$v^2 = \frac{GM_{\odot}}{r}$$

comme $T = 2\pi r/v$ alors

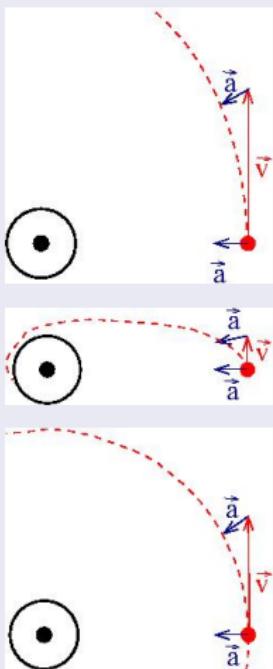
$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM_{\odot}} r^3$$

avec

$$\frac{4\pi^2}{GM_{\odot}} = 29,744305 \times 10^{-20} \text{ MKSA}$$

Mouvement circulaire.

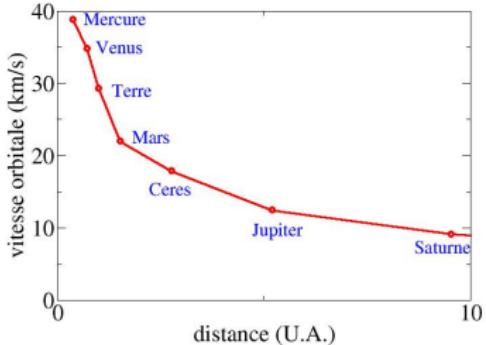
Mouvement circulaire



Relation v et r

$$a = v^2/r \quad \text{et} \quad ma = G \frac{M_{\odot} m}{r^2}$$

$$v^2 = \frac{GM_{\odot}}{r}$$



comme $T = 2\pi r/v$ alors

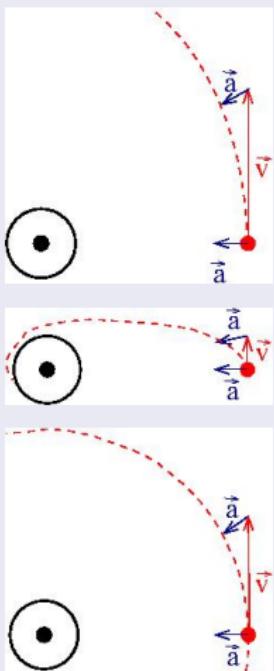
$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM_{\odot}} r^3$$

avec

$$\frac{4\pi^2}{GM_{\odot}} = 29,744305 \times 10^{-20} \text{ MKSA}$$

Mouvement circulaire.

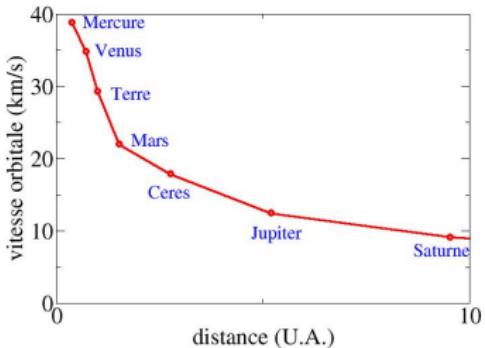
Mouvement circulaire



Relation v et r

$$a = v^2/r \quad \text{et} \quad ma = G \frac{M_{\odot} m}{r^2}$$

$$v^2 = \frac{GM_{\odot}}{r}$$



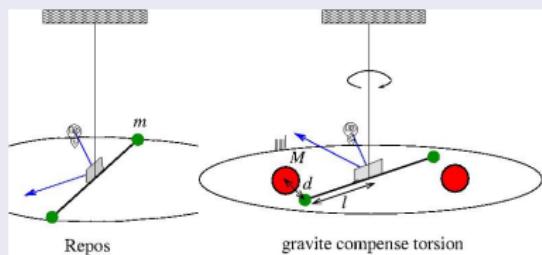
comme $T = 2\pi r/v$ alors

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM_{\odot}} r^3$$

avec

$$\frac{4\pi^2}{GM_{\odot}} = 29,744305 \times 10^{-20} \text{ MKSA}$$

Henri Cavendish (1731-1810)



Manipulation

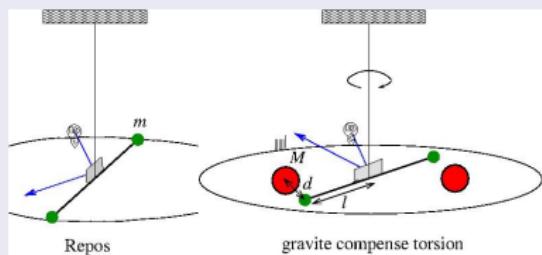
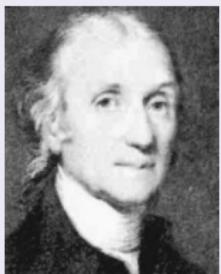
- ➊ Equilibre, $\Rightarrow \alpha_i$, quand fil pas tordu.
- ➋ Approche deux autres grosses masses.
- ➌ Petites masses attirées.
- ➍ Torsion du fil.
- ➎ Nouvelle position équilibre, α_f

Observation Torsion du fil \equiv Attraction entre masses.... $C(\alpha_f - \alpha_i) = 2F_{M \rightarrow m}d$

Résultats

- ➏ $G = 6.74 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$ (vs 6.67428×10^{-11})
- ➐ $M_T = 5.980 \times 10^{24} \text{ kg}$ (vs 5.974×10^{24})
- ➑ $M_\odot = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$

Henri Cavendish (1731-1810)



① Manipulation

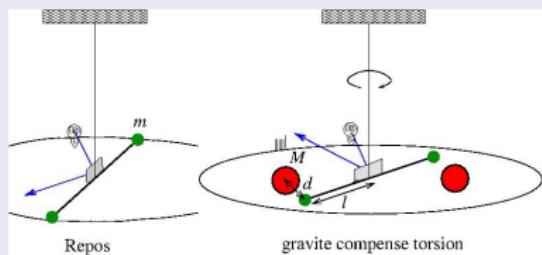
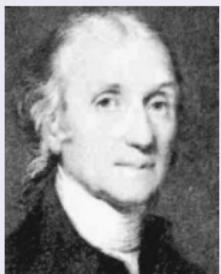
- ➊ Equilibre, $\Rightarrow \alpha_i$, quand fil pas tordu.
- ➋ Approche deux autres grosses masses.
- ➌ Petites masses attirées.
- ➍ Torsion du fil.
- ➎ Nouvelle position équilibre, α_f

② Observation Torsion du fil \equiv Attraction entre masses.... $C(\alpha_f - \alpha_i) = 2F_{M \rightarrow m}d$

③ Résultats

- ➊ $G = 6.74 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$ (vs 6.67428×10^{-11})
- ➋ $M_T = 5.980 \times 10^{24} \text{ kg}$ (vs 5.974×10^{24})
- ➌ $M_\odot = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$

Henri Cavendish (1731-1810)



① Manipulation

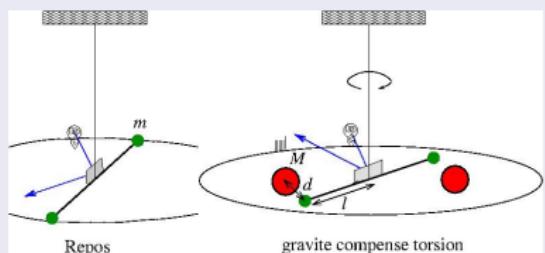
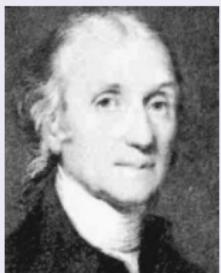
- ④ Equilibre, $\Rightarrow \alpha_i$, quand fil pas tordu.
- ⑤ Approche deux autres grosses masses.
- ⑥ Petites masses attirées.
- ⑦ Torsion du fil.
- ⑧ Nouvelle position équilibre, α_f

② Observation Torsion du fil \equiv Attraction entre masses.... $C(\alpha_f - \alpha_i) = 2F_{M \rightarrow m}d$

③ Résultats

- ⑨ $G = 6.74 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$ (vs 6.67428×10^{-11})
- ⑩ $M_T = 5.980 \times 10^{24} \text{ kg}$ (vs 5.974×10^{24})
- ⑪ $M_\odot = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$

Henri Cavendish (1731-1810)



① Manipulation

- ① Equilibre, $\Rightarrow \alpha_i$, quand fil pas tordu.
- ② Approche deux autres grosses masses.
- ③ Petites masses attirées.
- ④ Torsion du fil.
- ⑤ Nouvelle position équilibre, α_f

② Observation Torsion du fil \equiv Attraction entre masses.... $C(\alpha_f - \alpha_i) = 2F_{M \rightarrow m}d$

③ Résultats

- ① $G = 6.74 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$ (vs 6.67428×10^{-11})
- ② $M_T = 5.980 \times 10^{24} \text{ kg}$ (vs 5.974×10^{24})
- ③ $M_\odot = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$

La gravitation.

A la fin du XVIII siècle....

- ① La constante de gravitation universelle est déterminée.
- ② La masse du Soleil et des planètes connues sont déterminées.



Plan

1 Astronomie antique

2 De l'astronomie à la loi de la gravitation.

- Modèles astronomiques.

3 Précurseurs.

4 La Révolution newtonienne

- Formulation de la loi de la gravitation.
- Détermination de la masse de la Terre et du Soleil.

5 Les épreuves

6 Cartographie système solaire.

- Découverte d'Uranus et premier cas de "matière noire".
- Mercure et la relativité générale".

7 Les mesures et la structure

8 Cartographie de l'Univers.

- Mesure de distance inter-stellaire ou inter-galactique.
- Les théories et observations.
- Structure de l'Univers.

9 Energie noire

10 Evolution de l'Univers.

- D'où venons nous et où allons nous.

11 Matière noire.

- Mesure de vitesse des galaxies.
- Anomalies dans les trajectoires des galaxies.



Plan

1 Astronomie antique

2 De l'astronomie à la loi de la gravitation.

- Modèles astronomiques.

3 Précurseurs.

4 La Révolution newtonienne

- Formulation de la loi de la gravitation.
- Détermination de la masse de la Terre et du Soleil.

5 Les épreuves

6 Cartographie système solaire.

- Découverte d'Uranus et premier cas de "matière noire".
- Mercure et la relativité générale".

7 Les mesures et la structure

8 Cartographie de l'Univers.

- Mesure de distance inter-stellaire ou inter-galactique.
- Les théories et observations.
- Structure de l'Univers.

9 Energie noire

10 Evolution de l'Univers.

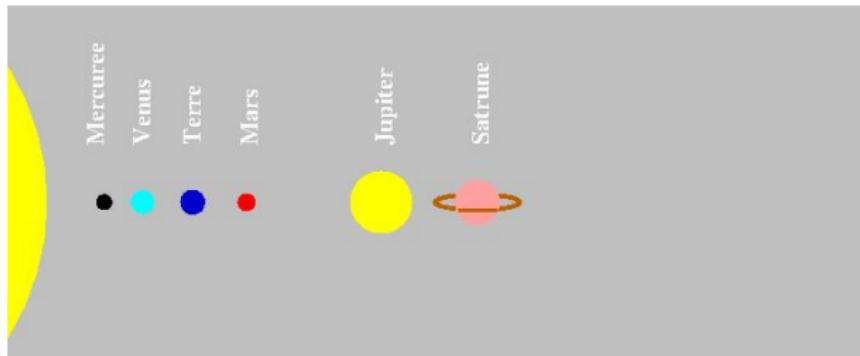
- D'où venons nous et où allons nous.

11 Matière noire.

- Mesure de vitesse des galaxies.
- Anomalies dans les trajectoires des galaxies.



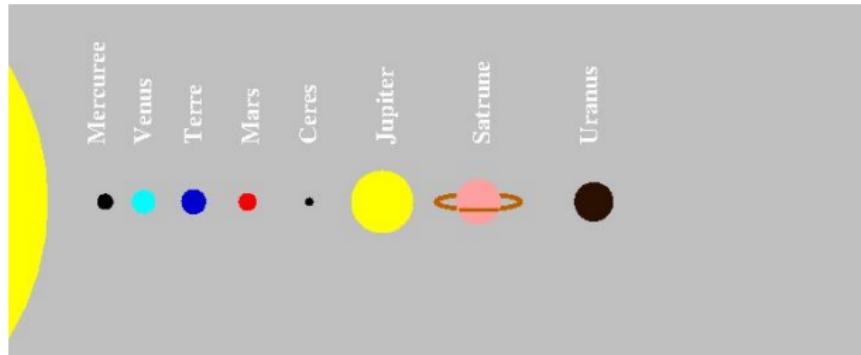
Le système solaire.



Uranus.



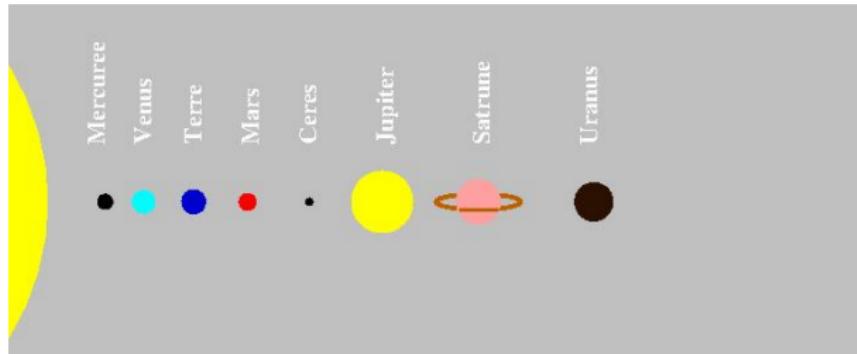
Uranus.



Découverte par
Herschel en 1781

- 1783 : expression mathématique de paramètres orbitaux (Laplace).
- 1821 : calculs de tables pour Jupiter, Saturne et Uranus (Alexis Bouvard)

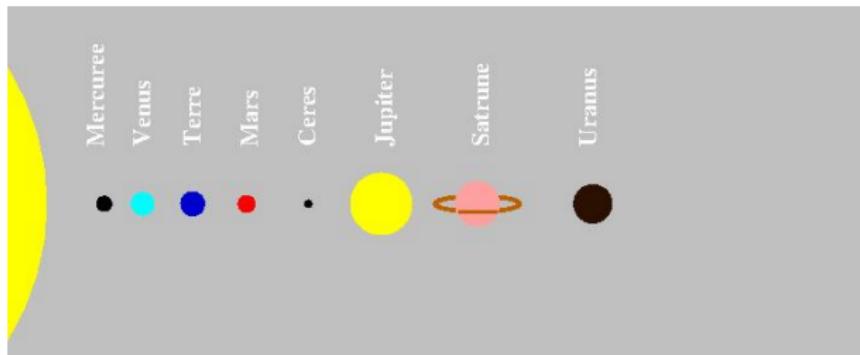
Uranus.



Découverte par
Herschel en 1781

- 1783 : expression mathématique de paramètres orbitaux (Laplace).
- 1821 : calculs de tables pour Jupiter, Saturne et Uranus (Alexis Bouvard)

Uranus.



Découverte par
Herschel en 1781

- 1783 : expression mathématique de paramètres orbitaux (Laplace).
- 1821 : calculs de tables pour Jupiter, Saturne et Uranus (Alexis Bouvard)

Anomalie dans la trajectoire d'Uranus !!



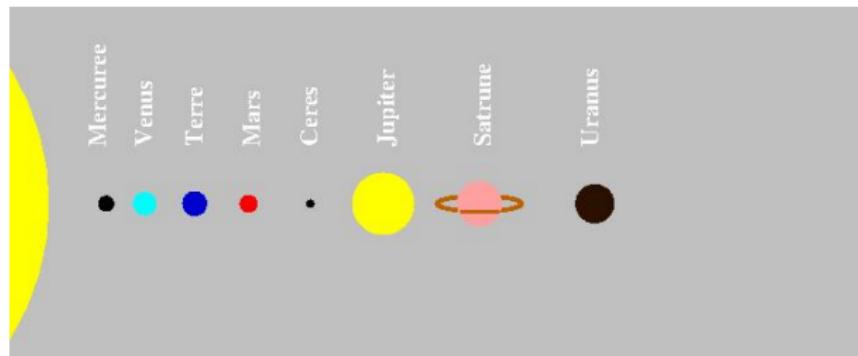
Neptune.

Anomalies pouvant résulter de la présence d'une autre planète.

- 1845 : Arago demande à le Verrier d'élucider le problème.

Exclu

- la présence d'une comète
- de modifier la théorie



En 1845, Le Verrier calcul la trajectoire d'une autre planète qui compenserait l'anomalie.

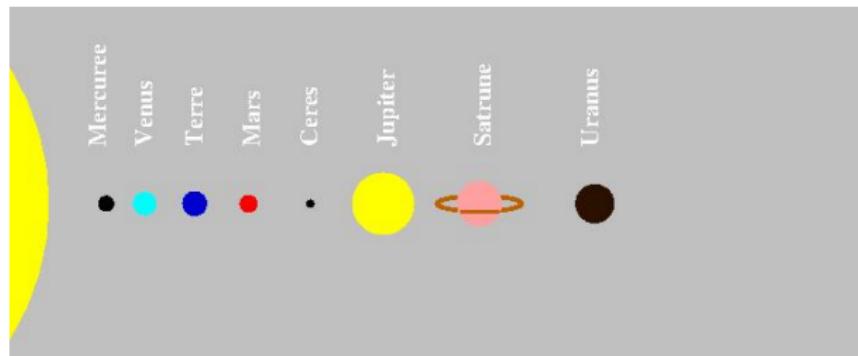
Neptune.

Anomalies pouvant résulter de la présence d'une autre planète.

- 1845 : Arago demande à le Verrier d'élucider le problème.

Exclu

- la présence d'une comète
- de modifier la théorie



En 1845, Le Verrier calcul la trajectoire d'une autre planète qui compenserait l'anomalie.

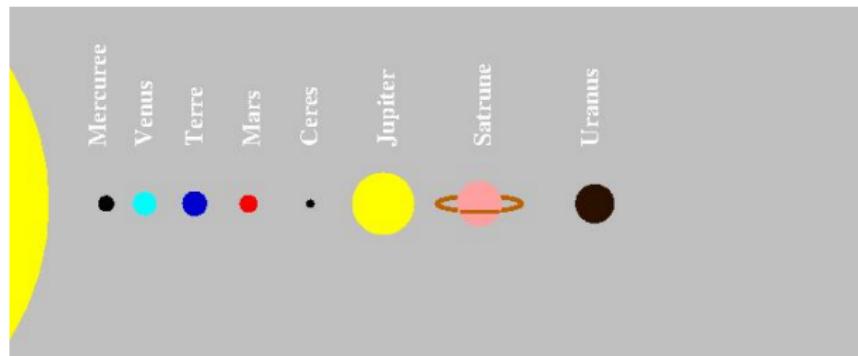
Neptune.

Anomalies pouvant résulter de la présence d'une autre planète.

- 1845 : Arago demande à le Verrier d'élucider le problème.

Exclu

- la présence d'une comète
- de modifier la théorie

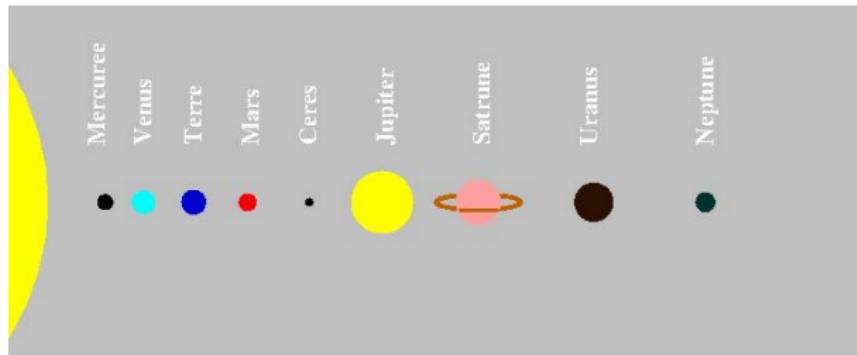


En 1845, Le Verrier calcul la trajectoire d'une autre planète qui compenserait l'anomalie.

Anomalie dans la trajectoire d'Uranus !!



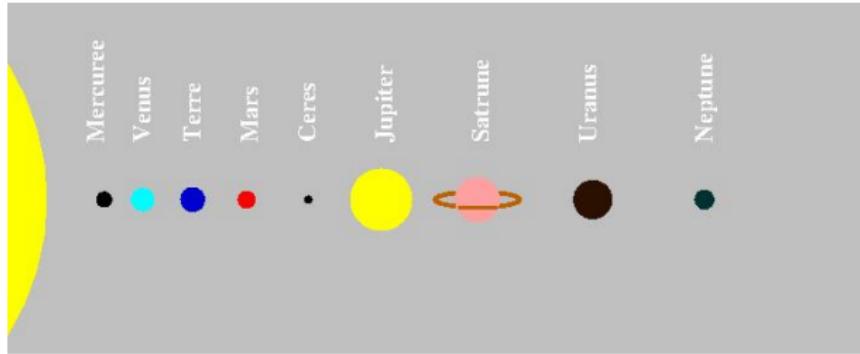
Neptune.



31 août 1846, Galle observe Neptune



Neptune.

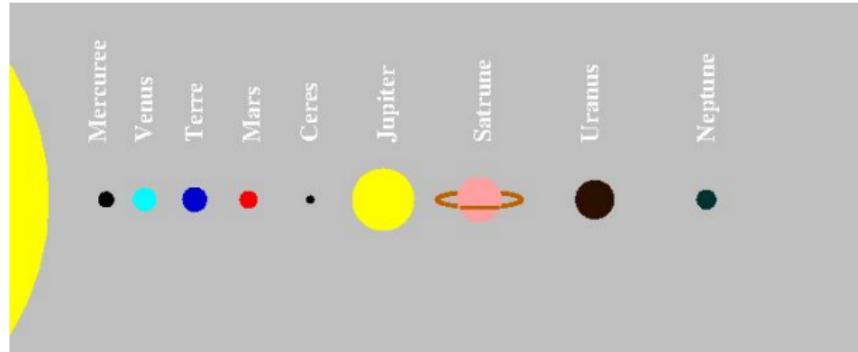


En 1846, Galle observe Neptune

- 28 déc. 1612 et 27 jan. 1613 : observations de Galilée
 - objet fixe (début du mouvement rétrograde)
 - objet très peu lumineux
 - Neptune est une étoile fixe.
- 8 et 10 mai 1795 : observations "approximatives" de Lalande (Paris).
- 14 juillet 1830 : observation "par hasard" de John Herschel.
- 1846 : Controverse Adams/Airy – Le Verrier



Neptune.

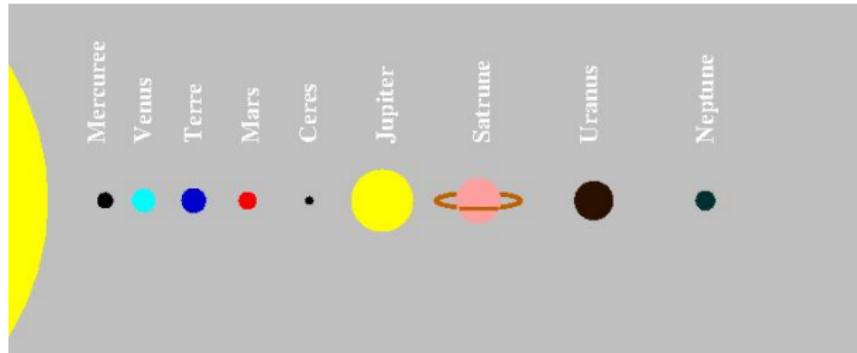


En 1846, Galle observe Neptune

- 28 déc. 1612 et 27 jan. 1613 : observations de Galilée
 - objet fixe (début du mouvement rétrograde)
 - objet très peu lumineux
 - Neptune est une étoile fixe.
- 8 et 10 mai 1795 : observations "approximatives" de Lalande (Paris).
- 14 juillet 1830 : observation "par hasard" de John Herschel.
- 1846 : Controverse Adams/Airy – Le Verrier



Neptune.

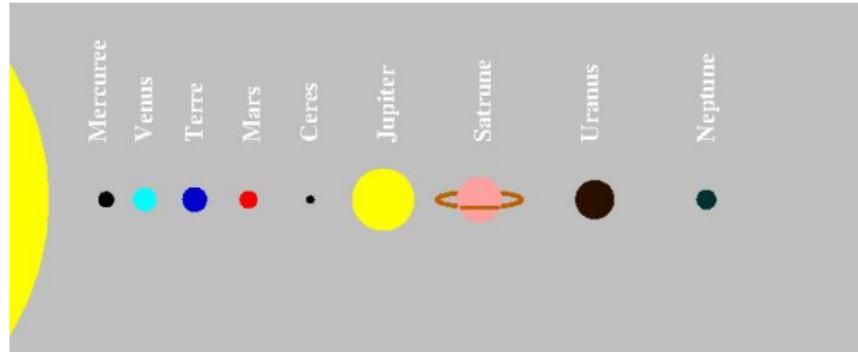


En 1846, Galle observe Neptune

- 28 déc. 1612 et 27 jan. 1613 : observations de Galilée
 - objet fixe (début du mouvement rétrograde)
 - objet très peu lumineux
 - Neptune est une étoile fixe.
- 8 et 10 mai 1795 : observations "approximatives" de Lalande (Paris).
- 14 juillet 1830 : observation "par hasard" de John Herschel.
- 1846 : Controverse Adams/Airy – Le Verrier



Neptune.

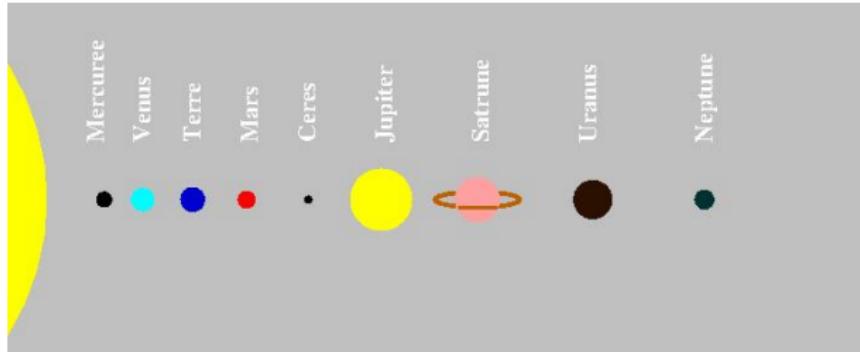


En 1846, Galle observe Neptune

- 28 déc. 1612 et 27 jan. 1613 : observations de Galilée
 - objet fixe (début du mouvement rétrograde)
 - objet très peu lumineux
 - Neptune est une étoile fixe.
- 8 et 10 mai 1795 : observations "approximatives" de Lalande (Paris).
- 14 juillet 1830 : observation "par hasard" de John Herschel.
- 1846 : Controverse Adams/Airy – Le Verrier



Neptune.



En 1846, Galle observe Neptune

- 28 déc. 1612 et 27 jan. 1613 : observations de Galilée
 - objet fixe (début du mouvement rétrograde)
 - objet très peu lumineux
 - Neptune est une étoile fixe.
- 8 et 10 mai 1795 : observations "approximatives" de Lalande (Paris).
- 14 juillet 1830 : observation "par hasard" de John Herschel.
- 1846 : Controverse Adams/Airy – Le Verrier



Anomalie dans la trajectoire de Mercure !!

Une autre anomalie (observée par Le Verrier en 1855) résistait dans le système solaire.

- D'après Newton, s'il n'y avait que le Soleil et Mercure, Mercure décrirait toujours la même orbite.
- En réalité les autres planètes induisent une "rotation" du grand axe de l'ellipse.



Anomalie dans la trajectoire de Mercure !!

Une autre anomalie (observée par Le Verrier en 1855) résistait dans le système solaire.

- D'après Newton, s'il n'y avait que le Soleil et Mercure, Mercure décrirait toujours la même orbite.
- En réalité les autres planètes induisent une "rotation" du grand axe de l'ellipse.



Anomalie dans la trajectoire de Mercure !!

Une autre anomalie (observée par Le Verrier en 1855) résistait dans le système solaire.

- D'après Newton, s'il n'y avait que le Soleil et Mercure, Mercure décrirait toujours la même orbite.
- En réalité les autres planètes induisent une "rotation" du grand axe de l'ellipse.



Anomalie dans la trajectoire de Mercure !!

Avance du périhélie.

Le grand axe est
"en avance"

de 43 secondes
d'arc/siècle !!



Anomalie dans la trajectoire de Mercure !!

Le Verrier propose
l'existence de
Vulcain.



Anomalie dans la trajectoire de Mercure !!

28 mars 1859 : Lescarbault observe une tache noire passant devant le Soleil.

Le Verrier calcul les paramètres de Vulcain :

- période annuelle : 19 jours et 7 heures.
- distance au Soleil : 0.14 u.a.
- diamètre : 2 000 km.
- masse : $1/17^{\text{e}}$ de la masse de Mercure.

1860 : Eclipse de Soleil mais... pas d'observations.

1877 : Mort de Le Verrier.... sans découverte de Vulcain

Fin des recherches de Vulcain....

La solution viendra en 1915....



Anomalie dans la trajectoire de Mercure !!

28 mars 1859 : Lescarbault observe une tache noire passant devant le Soleil.

Le Verrier calcul les paramètres de Vulcain :

- période annuelle : 19 jours et 7 heures.
- distance au Soleil : 0.14 u.a.
- diamètre : 2 000 km.
- masse : $1/17^{\text{e}}$ de la masse de Mercure.

1860 : Eclipse de Soleil mais... pas d'observations.

1877 : Mort de Le Verrier.... sans découverte de Vulcain

Fin des recherches de Vulcain....

La solution viendra en 1915....



Anomalie dans la trajectoire de Mercure !!

28 mars 1859 : Lescarbault observe une tache noire passant devant le Soleil.

Le Verrier calcul les paramètres de Vulcain :

- période annuelle : 19 jours et 7 heures.
- distance au Soleil : 0.14 u.a.
- diamètre : 2 000 km.
- masse : $1/17^{\text{e}}$ de la masse de Mercure.

1860 : Eclipse de Soleil mais... pas d'observations.

1877 : Mort de Le Verrier.... sans découverte de Vulcain

Fin des recherches de Vulcain....

La solution viendra en 1915....



Anomalie dans la trajectoire de Mercure !!

28 mars 1859 : Lescarbault observe une tache noire passant devant le Soleil.

Le Verrier calcul les paramètres de Vulcain :

- période annuelle : 19 jours et 7 heures.
- distance au Soleil : 0.14 u.a.
- diamètre : 2 000 km.
- masse : $1/17^{\text{e}}$ de la masse de Mercure.

1860 : Eclipse de Soleil mais... pas d'observations.

1877 : Mort de Le Verrier.... sans découverte de Vulcain

Fin des recherches de Vulcain....

La solution viendra en 1915....



Anomalie dans la trajectoire de Mercure !!

28 mars 1859 : Lescarbault observe une tache noire passant devant le Soleil.

Le Verrier calcul les paramètres de Vulcain :

- période annuelle : 19 jours et 7 heures.
- distance au Soleil : 0.14 u.a.
- diamètre : 2 000 km.
- masse : $1/17^{\text{e}}$ de la masse de Mercure.

1860 : Eclipse de Soleil mais... pas d'observations.

1877 : Mort de Le Verrier.... sans découverte de Vulcain

Fin des recherches de Vulcain....

La solution viendra en 1915....



Anomalie dans la trajectoire de Mercure !!

28 mars 1859 : Lescarbault observe une tache noire passant devant le Soleil.

Le Verrier calcul les paramètres de Vulcain :

- période annuelle : 19 jours et 7 heures.
- distance au Soleil : 0.14 u.a.
- diamètre : 2 000 km.
- masse : $1/17^{\text{e}}$ de la masse de Mercure.

1860 : Eclipse de Soleil mais... pas d'observations.

1877 : Mort de Le Verrier.... sans découverte de Vulcain

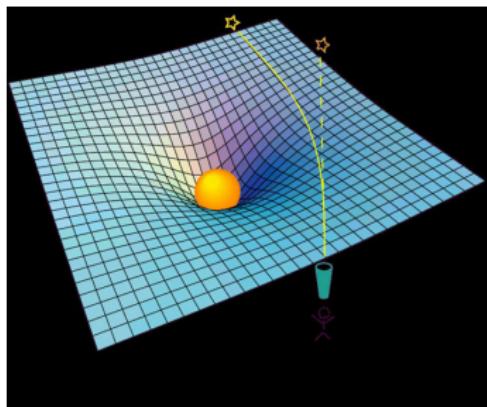
Fin des recherches de Vulcain....

La solution viendra en 1915.....



Relativité générale.

1915 : La Gravitation newtonienne est une approximation de la relativité générale.



1915 : La métrique est donnée par les masses.

- (courbure moyenne de l'espace-temps) = (mesure densité d'énergie)
- $R_{ij} - \frac{1}{2}g_{ij}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{ij}$

18 nov. 1915 : la relativité générale explique l'avance du périhélie de Mercure.



Anomalies dans les trajectoires.

La dynamique des planètes est bien comprise.

Les deux "anomalies" observées sont comprises.

Uranus

Loi de la gravitation de Newton
est correcte.

Autre masse exerçant de
la gravitation non observée.

- Matière noire (observée)



La dynamique des planètes est bien comprise.

Les deux "anomalies" observées sont comprises.

Mercure

Toutes les masses exerçant de la gravitation sont observées.

Loi de la gravitation de Newton pas valable "en champ fort".

- Relativité générale.



Anomalies dans les trajectoires.

La dynamique des planètes est bien comprise.

Les deux "anomalies" observées sont comprises.

Uranus

Loi de la gravitation de Newton
est correcte.

Autre masse exerçant de
la gravitation non observée.

- Matière noire (observée)

Mercure

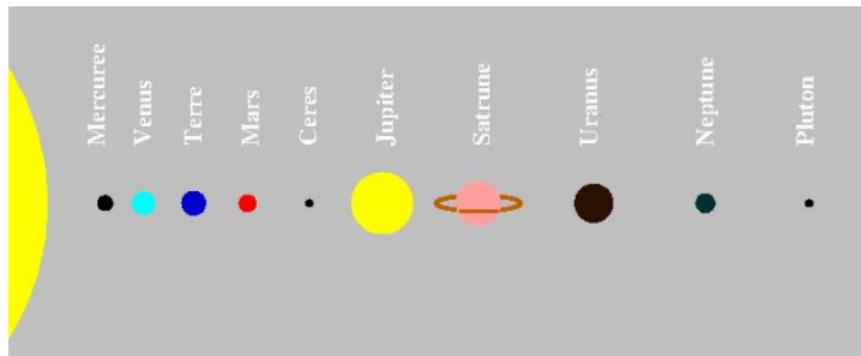
Toutes les masses exerçant de
la gravitation sont observées.

Loi de la gravitation de Newton
pas valable "en champ fort".

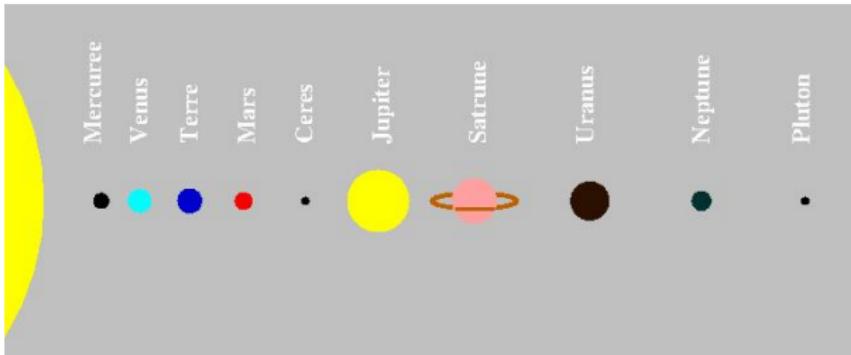
- Relativité générale.



Neptune.



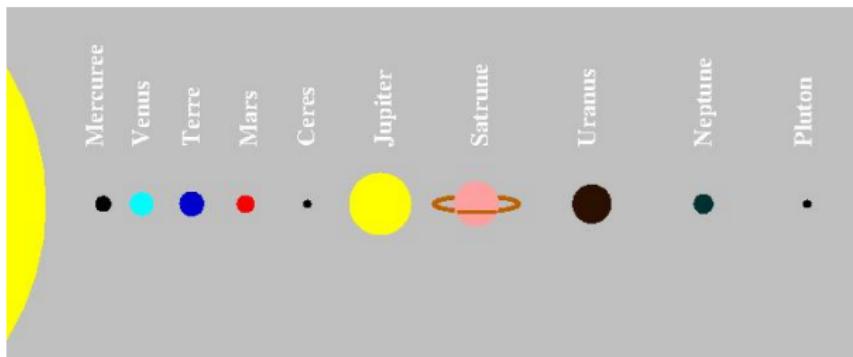
Pluton.



- 1992 : Découverte de 1992 QB₁ ($\varnothing = 120$ km) - Ceinture de Kuiper
- 2001 : Découverte de Varuna et d'Ixion (plutino)
- 2002 : Découverte de Quaoar
- 2003 : Découverte d'Eris ($\varnothing = 2\,326$ km)
- 2004 : Découverte de Haumea
- 2005 : Découverte de Makemake
- 24 août 2006 : Pluton¹⁹³⁰ ($\varnothing = 2\,306$ km) n'est plus une planète



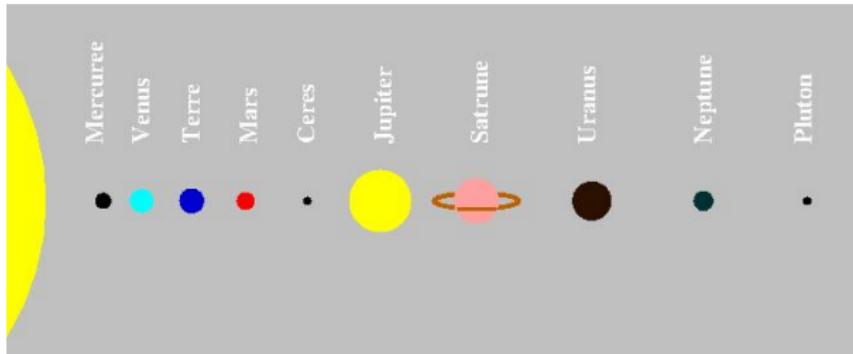
Pluton.



- 1992 : Découverte de 1992 QB₁ ($\varnothing = 120$ km) - Ceinture de Kuiper
- 2001 : Découverte de Varuna et d'Ixion (plutino)
- 2002 : Découverte de Quaoar
- 2003 : Découverte d'Eris ($\varnothing = 2\,326$ km)
- 2004 : Découverte de Haumea
- 2005 : Découverte de Makemake
- 24 août 2006 : Pluton¹⁹³⁰ ($\varnothing = 2\,306$ km) n'est plus une planète



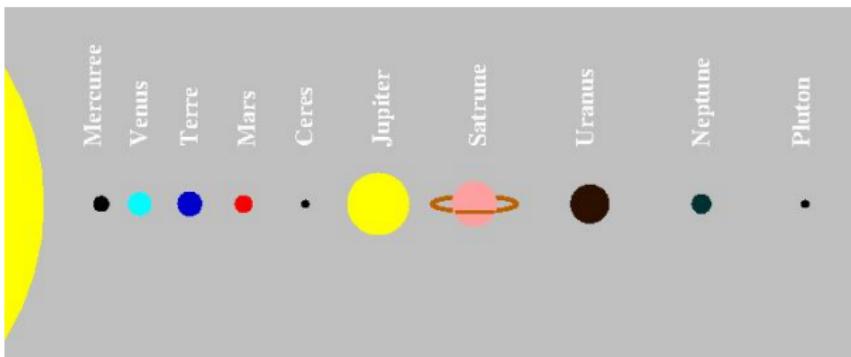
Pluton.



- 1992 : Découverte de 1992 QB₁ ($\varnothing = 120$ km) - Ceinture de Kuiper
- 2001 : Découverte de Varuna et d'Ixion (plutino)
- 2002 : Découverte de Quaoar
- 2003 : Découverte d'Eris ($\varnothing = 2\,326$ km)
- 2004 : Découverte de Haumea
- 2005 : Découverte de Makemake
- 24 août 2006 : Pluton¹⁹³⁰ ($\varnothing = 2\,306$ km) n'est plus une planète



Pluton.



- 1992 : Découverte de 1992 QB₁ ($\varnothing = 120$ km) - Ceinture de Kuiper
- 2001 : Découverte de Varuna et d'Ixion (plutino)
- 2002 : Découverte de Quaoar
- 2003 : Découverte d'Eris ($\varnothing = 2\,326$ km)
- 2004 : Découverte de Haumea
- 2005 : Découverte de Makemake
- 24 août 2006 : Pluton¹⁹³⁰ ($\varnothing = 2\,306$ km) n'est plus une planète



Le Soleil dans la voie lactée.

Au début du XX siècle....

- ① Le système solaire est bien décrit.
- ② La place du Soleil dans la voie lactée reste à préciser.
L'idée de Thomas Wright¹⁷⁵⁰, G.E Kant¹⁷⁵⁵ W. Herschel^{≈1780} :
"le soleil est au centre d'une galaxie aplatie" persiste.
- ③ La Voie Lactée est-elle l'Univers ?
- ④ Quelle dynamique pour ces systèmes ?



Plan

1 Astronomie antique

2 De l'astronomie à la loi de la gravitation.

- Modèles astronomiques.

3 Précurseurs.

4 La Révolution newtonienne

- Formulation de la loi de la gravitation.
- Détermination de la masse de la Terre et du Soleil.

5 Les épreuves

6 Cartographie système solaire.

- Découverte d'Uranus et premier cas de "matière noire".
- Mercure et la relativité générale".

7 Les mesures et la structure

8 Cartographie de l'Univers.

- Mesure de distance inter-stellaire ou inter-galactique.
- Les théories et observations.
- Structure de l'Univers.

9 Energie noire

10 Evolution de l'Univers.

- D'où venons nous et où allons nous.

11 Matière noire.

- Mesure de vitesse des galaxies.
- Anomalies dans les trajectoires des galaxies.



Plan

1 Astronomie antique

2 De l'astronomie à la loi de la gravitation.

- Modèles astronomiques.

3 Précurseurs.

4 La Révolution newtonienne

- Formulation de la loi de la gravitation.
- Détermination de la masse de la Terre et du Soleil.

5 Les épreuves

6 Cartographie système solaire.

- Découverte d'Uranus et premier cas de "matière noire".
- Mercure et la relativité générale".

7 Les mesures et la structure

8 Cartographie de l'Univers.

- Mesure de distance inter-stellaire ou inter-galactique.
- Les théories et observations.
- Structure de l'Univers.

9 Energie noire

10 Evolution de l'Univers.

- D'où venons nous et où allons nous.

11 Matière noire.

- Mesure de vitesse des galaxies.
- Anomalies dans les trajectoires des galaxies.



Chronologie des mesures et méthodes

Mesure du rayon de la Terre (Eratosthène)

Mesure de distances Terre-Lune-Soleil (Aristarque)

Mesure des distances des étoiles (Bessel)

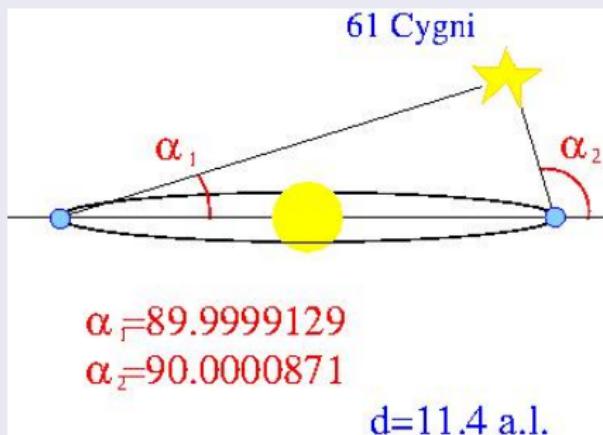
Mesure des distances par céphéides (Leavitt)

Mesure des distances par Supernovae.



Parallaxe

Parallaxe (< 100 a.l.) - Bessel¹⁸³⁸



F.W. Bessel : position apparente de 62500 étoiles !

Limite de la Parallaxe

La parallaxe ne peut pas être utilisée au delà de 100 a.l. !!



Parallaxe

Parallaxe (< 100 a.l.) - Bessel¹⁸³⁸



F.W. Bessel : position apparente de 62500 étoiles !

Limite de la Parallaxe

La parallaxe ne peut pas être utilisée au delà de 100 a.l. !!

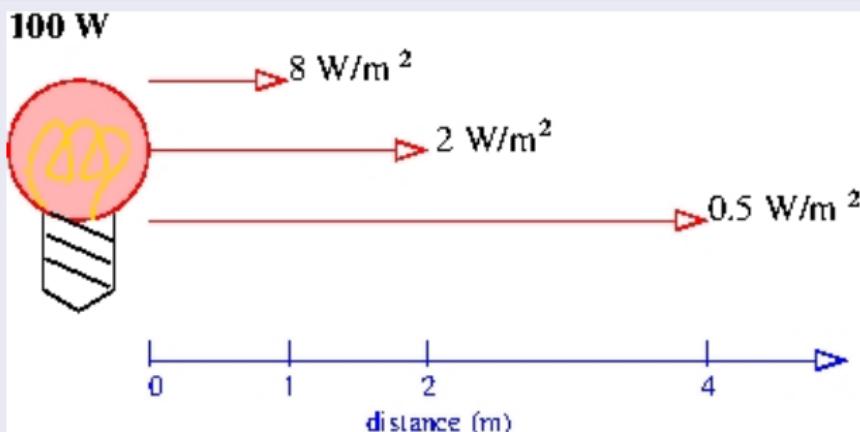


Limite de la Parallaxe

Il faut trouver une autre méthode.

Début du XXeme siècle : **chandelles standards** (céphéides).

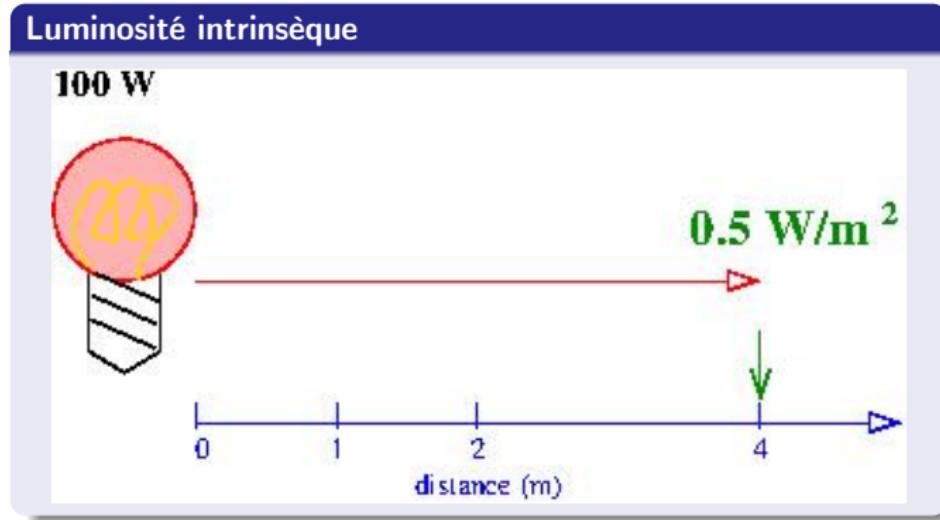
Luminosité intrinsèque



Mesures de distances.

La parallaxe est limitée. Il faut trouver une autre méthode.

Début du XXeme siècle : chandelles standards (céphéides).



Luminosité intrinsèque

???



distance ???

0.5 W/m^2

- 2 m si 25 W
- 4 m si 100W
- 8 m si 400 W
- ??

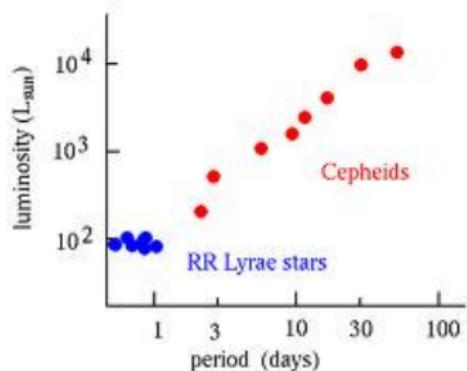
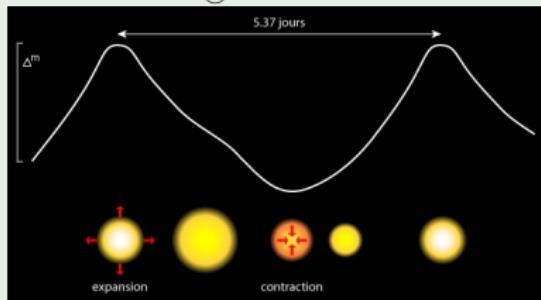


Mesures de distances.

J. Goodricke découvre la variabilité de luminosité de δ -Céphéï en 1784.

Henrietta Leavitt et les Céphéïdes.

$4 \text{ à } 15 M_{\odot}$
 $100 \text{ à } 30\,000 L_{\odot}$



Contraction : gravité.

Expansion : pression du gaz.

Variation de température et
Variation de luminosité.

Distance : 80 M d'a.l.

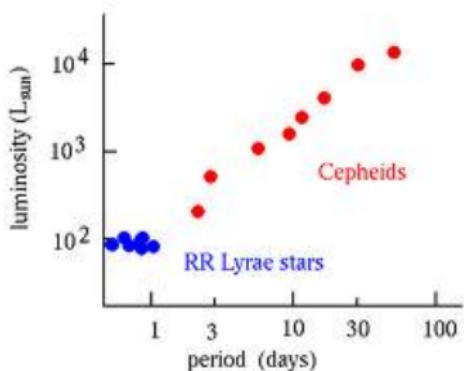
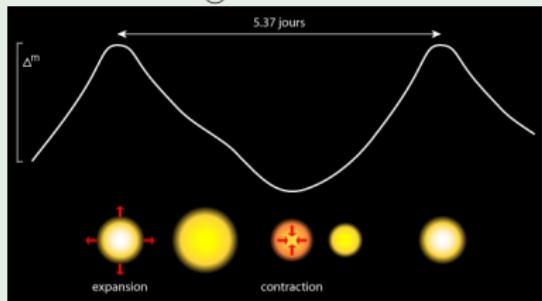


Mesures de distances.

J. Goodricke découvre la variabilité de luminosité de δ -Céphéï en 1784.

Henrietta Leavitt et les Céphéïdes.

$4 \text{ à } 15 M_{\odot}$
 $100 \text{ à } 30\,000 L_{\odot}$



Contraction : gravité.

Expansion : pression du gaz.

Variation de température et
Variation de luminosité.

Distance : 80 M d'a.l.

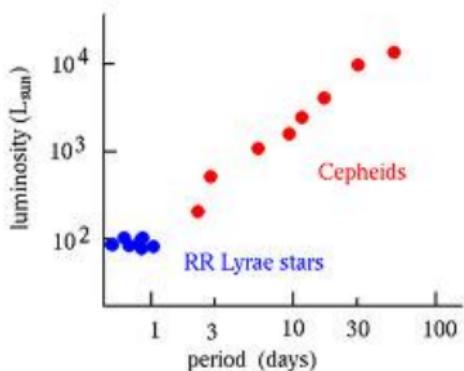
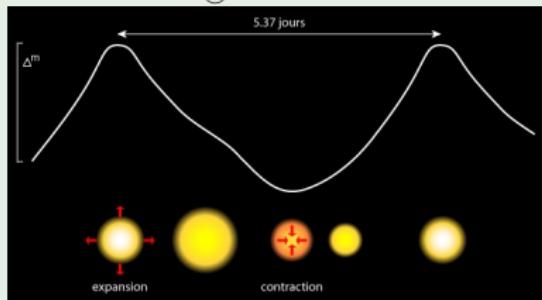


Mesures de distances.

J. Goodricke découvre la variabilité de luminosité de δ -Céphéï en 1784.

Henrietta Leavitt et les Céphéïdes.

$4 \text{ à } 15 M_{\odot}$
 $100 \text{ à } 30\,000 L_{\odot}$



Contraction : gravité.

Expansion : pression du gaz.

Variation de température et
Variation de luminosité.

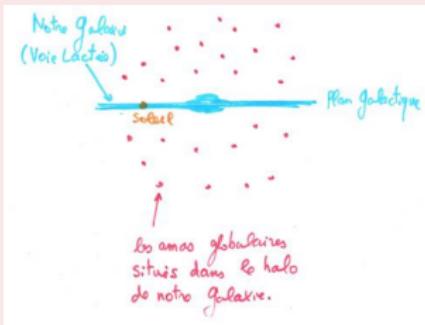
Distance : 80 M d'a.l.



Mesures de distances.

Harlow Shapley

- 1918 : Pb répartition de 69 amas globulaires : Le soleil n'est pas au centre de la galaxie. Concentration à symétrie sphérique de 1000 à 1 M étoiles réparties autour du centre de la galaxie.

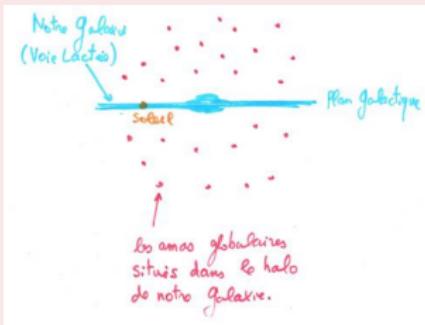


- 1920 : quarante modèles pour la Voie Lactée.
- 26 avril 1920 : le Grand Débat (nature des nébuleuses) entre
 - Shapley détecte des mouvements dans Andromède (donc objet "modeste") (univers = Voie Lactée)
 - Curtis (Vesto Slipher mesure l'effet Doppler d'objets "lointains".) (Andromède \neq Voie Lactée).

Mesures de distances.

Harlow Shapley

- 1918 : Pb répartition de 69 amas globulaires : Le soleil n'est pas au centre de la galaxie. Concentration à symétrie sphérique de 1000 à 1 M étoiles réparties autour du centre de la galaxie.

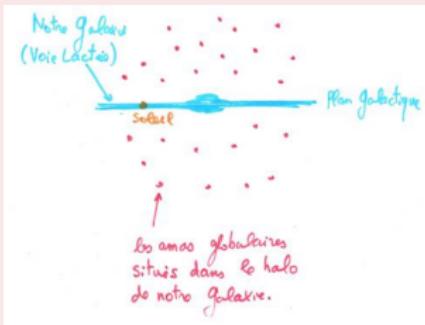


- 1920 : quarante modèles pour la Voie Lactée.
- 26 avril 1920 : le Grand Débat (nature des nébuleuses) entre
 - Shapley détecte des mouvements dans Andromède (donc objet "modeste") (univers = Voie Lactée)
 - Curtis (Vesto Slipher mesure l'effet Doppler d'objets "lointains".) (Andromède \neq Voie Lactée).

Mesures de distances.

Harlow Shapley

- 1918 : Pb répartition de 69 amas globulaires : Le soleil n'est pas au centre de la galaxie. Concentration à symétrie sphérique de 1000 à 1 M étoiles réparties autour du centre de la galaxie.



- 1920 : quarante modèles pour la Voie Lactée.
- 26 avril 1920 : le Grand Débat (nature des nébuleuses) entre
 - Shapley détecte des mouvements dans Andromède (donc objet "modeste") (univers = Voie Lactée)
 - Curtis (Vesto Slipher mesure l'effet Doppler d'objets "lointains".) (Andromède \neq Voie Lactée).

L'Univers au début du XX^{eme} siècle.

En 1920 :

- Etoile la plus lointaine dans la Voie Lactée : 70 000 a.l.
- Univers a une taille de 300 000 a.l.

Hubble observe des Céphéides dans des nébuleuses.

1925 : NGC 6832 est une galaxie ($> 700\,000$ a.l. !!! (1.63 \overline{M} a.l.))

1926 : M33 devient la galaxie du Triangle (2.8 \overline{M} a.l. (?))

1929 : M31 devient la galaxie d'Andromède



L'Univers au début du XX^{eme} siècle.

En 1920 :

- Etoile la plus lointaine dans la Voie Lactée : 70 000 a.l.
- Univers a une taille de 300 000 a.l.

Hubble observe des Céphéides dans des nébuleuses.

1925 : NGC 6832 est une galaxie ($> 700\,000$ a.l. !!! (1.63 \overline{M} a.l.))

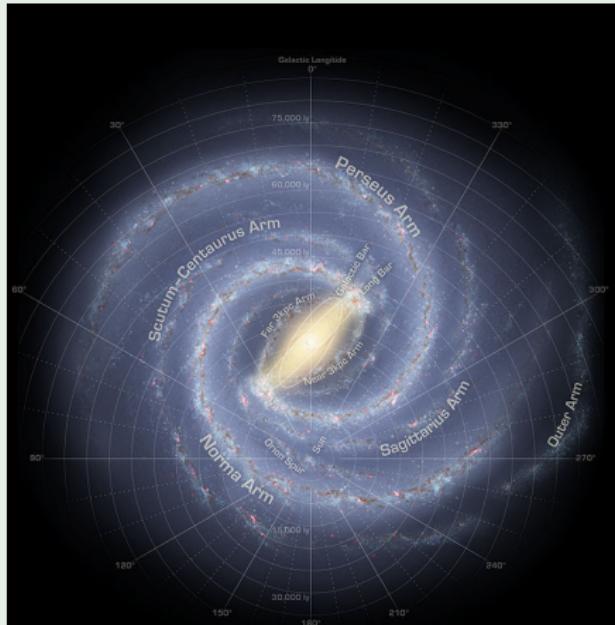
1926 : M33 devient la galaxie du Triangle (2.8 \overline{M} a.l. (?))

1929 : M31 devient la galaxie d'Andromède



Le Soleil dans la voie lactée.

Voie lactée



Annotated Roadmap to the Milky Way

(artist's concept)

NASA / JPL-Caltech / R. Hurt (SSC-Caltech)

ssc2008-10b

Soleil

Période : 226 M d'années

Vitesse : 250 km/s

Voie lactée

Diamètre = 70 000 a.l.

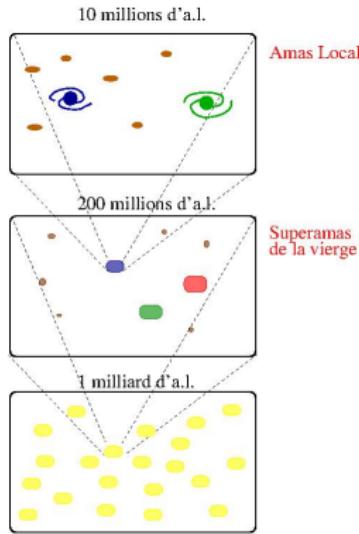
200 à 400 milliards d'étoiles

Centre : Sagittarius A*.

Andromède - M31 - NGC224



Cartographie cosmique.



Composition supposée de l'Univers.

10^7 superamas

25×10^9 amas de galaxies

350×10^9 galaxies

$30\ 000 \times 10^{18}$ étoiles

Echelles.

	taille	1 ^{er} voisin	distance	bille de 1 cm
Terre	12 000 km	Mars	40 M	300 m
Syst Sol.	$8 \frac{M}{\text{km}}$	Proxima Centaure	4.22 a.l.	200 m
Voie Lactée	80 000 a.l.	Andromède	2.55 M a.l.	30 m
Amas Local	10 M a.l.	Amas de la Vierge	60 M a.l.	6 cm
SA de la Vierge	200 M a.l.			

- Structure locale très hétérogène.
- Structure globale très homogène.
- Structure globale très isotrope.
- Pas de lieu particulier dans l'Univers !!!

Assez bonne idée de la photo....
... mais qu'en est-il du film ?



Plan

1 Astronomie antique

2 De l'astronomie à la loi de la gravitation.

- Modèles astronomiques.

3 Précurseurs.

4 La Révolution newtonienne

- Formulation de la loi de la gravitation.
- Détermination de la masse de la Terre et du Soleil.

5 Les épreuves

6 Cartographie système solaire.

- Découverte d'Uranus et premier cas de "matière noire".
- Mercure et la relativité générale".

7 Les mesures et la structure

8 Cartographie de l'Univers.

- Mesure de distance inter-stellaire ou inter-galactique.
- Les théories et observations.
- Structure de l'Univers.

9 Energie noire

10 Evolution de l'Univers.

- D'où venons nous et où allons nous.

11 Matière noire.

- Mesure de vitesse des galaxies.
- Anomalies dans les trajectoires des galaxies.



Plan

1 Astronomie antique

2 De l'astronomie à la loi de la gravitation.

- Modèles astronomiques.

3 Précurseurs.

4 La Révolution newtonienne

- Formulation de la loi de la gravitation.
- Détermination de la masse de la Terre et du Soleil.

5 Les épreuves

6 Cartographie système solaire.

- Découverte d'Uranus et premier cas de "matière noire".
- Mercure et la relativité générale".

7 Les mesures et la structure

8 Cartographie de l'Univers.

- Mesure de distance inter-stellaire ou inter-galactique.
- Les théories et observations.
- Structure de l'Univers.

9 Energie noire

10 Evolution de l'Univers.

- D'où venons nous et où allons nous.

11 Matière noire.

- Mesure de vitesse des galaxies.
- Anomalies dans les trajectoires des galaxies.



L'Univers et la relativité générale.

➊ 1915 : Relativité générale

- (courbure moyenne de l'espace-temps) = (mesure densité d'énergie)
- $R_{ij} - \frac{1}{2}g_{ij}R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ij}$

➋ 1917 : Introduction de la constante cosmologique.

$$• R_{ij} - \frac{1}{2}g_{ij}R - g_{ij}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ij}$$

➌ 1922 : Friedmann

- temps, espace et gravitation → théorie de l'Univers
- introduit l'idée d'un Univers en expansion (cosmologie non-statique)
- singularité à l'origine (controverse avec Einstein)

➍ 1927 : Lemaître

- *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant.*
- *Rapport constant de v/d....(= H)!!!!*
- *Papier traduit en anglais en 1931.... sans la partie v/d =constante.*
- *Théorie de l'atome primitif et du rayonnement cosmique en 1949.*



L'Univers et la relativité générale.

① 1915 : Relativité générale

- (courbure moyenne de l'espace-temps) = (mesure densité d'énergie)
- $R_{ij} - \frac{1}{2}g_{ij}R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ij}$

② 1917 : Introduction de la constante cosmologique.

- $R_{ij} - \frac{1}{2}g_{ij}R - g_{ij}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ij}$

③ 1922 : Friedmann

- temps, espace et gravitation → théorie de l'Univers
- introduit l'idée d'un Univers en expansion (cosmologie non-statique)
- singularité à l'origine (controverse avec Einstein)

④ 1927 : Lemaître

- *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant.*
- *Rapport constant de v/d....(= H)!!!!*
- *Papier traduit en anglais en 1931.... sans la partie v/d =constante.*
- *Théorie de l'atome primitif et du rayonnement cosmique en 1949.*



L'Univers et la relativité générale.

① 1915 : Relativité générale

- (courbure moyenne de l'espace-temps) = (mesure densité d'énergie)
- $R_{ij} - \frac{1}{2}g_{ij}R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ij}$

② 1917 : Introduction de la constante cosmologique.

- $R_{ij} - \frac{1}{2}g_{ij}R - g_{ij}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ij}$

③ 1922 : Friedmann

- temps, espace et gravitation → théorie de l'Univers
- introduit l'idée d'un Univers en expansion (cosmologie non-statique)
- singularité à l'origine (controverse avec Einstein)

④ 1927 : Lemaître

- *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant.*
- *Rapport constant de v/d....(= H)!!!!*
- *Papier traduit en anglais en 1931.... sans la partie v/d =constante.*
- *Théorie de l'atome primitif et du rayonnement cosmique en 1949.*



Univers en expansion

L'Univers et la relativité générale.

① 1915 : Relativité générale

- (courbure moyenne de l'espace-temps) = (mesure densité d'énergie)
- $R_{ij} - \frac{1}{2}g_{ij}R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ij}$

② 1917 : Introduction de la constante cosmologique.

$$R_{ij} - \frac{1}{2}g_{ij}R - g_{ij}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ij}$$

③ 1922 : Friedmann

- temps, espace et gravitation → théorie de l'Univers
- introduit l'idée d'un Univers en expansion (cosmologie non-statique)
- singularité à l'origine (controverse avec Einstein)

④ 1927 : Lemaître

- *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant.*
- *Rapport constant de v/d....(= H)!!!!*
- *Papier traduit en anglais en 1931.... sans la partie v/d =constante.*
- *Théorie de l'atome primitif et du rayonnement cosmique en 1949.*



Univers en expansion

L'Univers et la relativité générale.

① 1915 : Relativité générale

- (courbure moyenne de l'espace-temps) = (mesure densité d'énergie)
- $R_{ij} - \frac{1}{2}g_{ij}R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ij}$

② 1917 : Introduction de la constante cosmologique.

$$R_{ij} - \frac{1}{2}g_{ij}R - g_{ij}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ij}$$

③ 1922 : Friedmann

- temps, espace et gravitation → théorie de l'Univers
- introduit l'idée d'un Univers en expansion (cosmologie non-statique)
- singularité à l'origine (controverse avec Einstein)

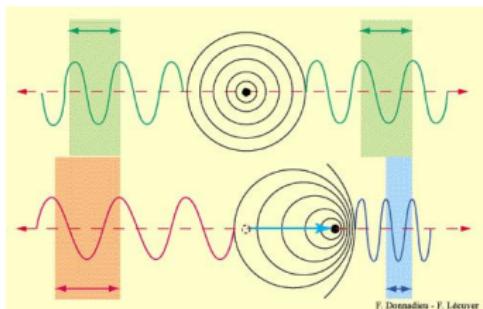
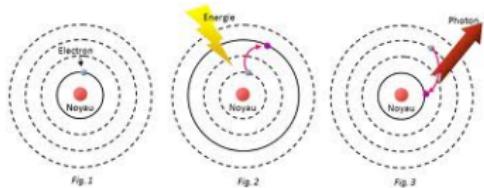
④ 1927 : Lemaître

- *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant.*
- *Rapport constant de v/d....(= H) !!!!*
- *Papier traduit en anglais en 1931.... sans la partie v/d =constante.*
- *Théorie de l'atome primitif et du rayonnement cosmique en 1949.*



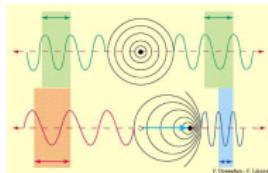
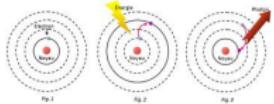
L'Univers au début du XX^{eme} siècle.

Depuis 1918 : Progrès de la spectro-astronomie (Vesto Slipher)



F. Donnadieu - F. Lévyer

L'Univers au début du XX^{eme} siècle.

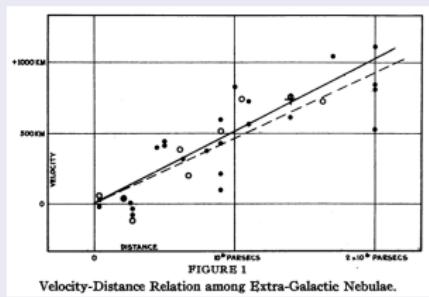


Loi de Hubble.

Slipher : vitesse de certaines galaxies.

Humason et Hubble : distance des mêmes galaxies.

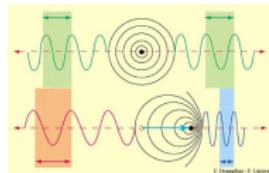
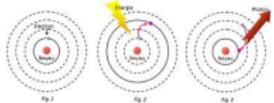
- 1929 : Hubble : Vitesse éloignement galactique proportionnelle à distance



$$v = Hd$$

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ parsec} = 3.26 \text{ a.l.} = 3.08 \cdot 10^{13} \text{ km} & \\ d \text{ (années lumière)} & v \text{ (km/s)} \\ 1 \text{ million} & 200 \text{ km/s} \\ 5 \text{ millions} & 1000 \text{ km/s} \end{array}$$

L'Univers au début du XX^{eme} siècle.

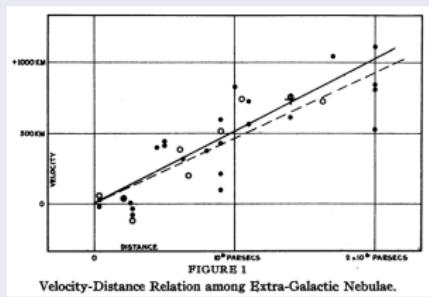


Loi de Hubble.

Slipher : vitesse de certaines galaxies.

Humason et Hubble : distance des mêmes galaxies.

- 1929 : Hubble : Vitesse éloignement galactique proportionnelle à distance

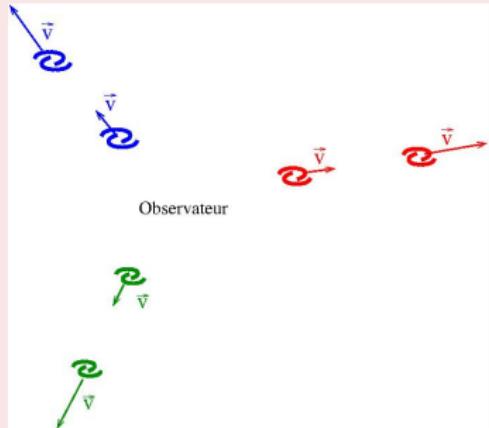


$$v = Hd$$

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ parsec} = 3.26 \text{ a.l.} = 3.08 \cdot 10^{13} \text{ km} & \\ d \text{ (années lumière)} & v \text{ (km/s)} \\ 1 \text{ million} & 200 \text{ km/s} \\ 5 \text{ millions} & 1000 \text{ km/s} \end{array}$$

Evolution de l'Univers - Hubble.

Big Bang



Observations - 1929

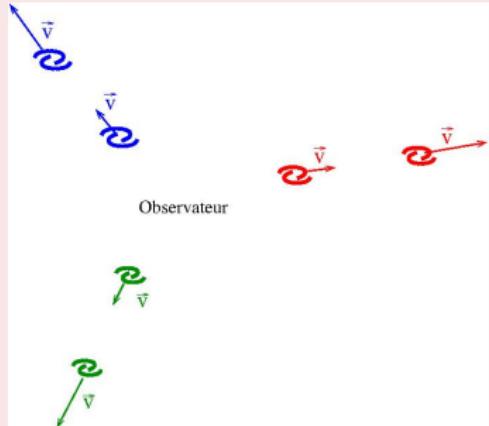
Les amas de galaxies s'éloignent tous les uns des autres.

Leur vitesse relative est proportionnelle à leur distance !



Evolution de l'Univers - Hubble.

Big Bang



Observations - 1929

Les amas de galaxies s'éloignent tous les uns des autres.

Leur vitesse relative est proportionnelle à leur distance !



Univers stationnaire

- Densité de matière constante
- Création matière perpétuelle
- Pas de naissance de l'Univers

$t_{\text{Terre}} = 4.57$ milliards d'années !!!

Univers dynamique

- Quantité de matière constante
- Densité de matière diminue
- Naissance de l'Univers

$t_{\text{Univ}} = 1.5$ milliards d'années !!!

Le modèle stationnaire est le bon modèle !!!



L'Univers avant le milieu du XX^{eme} siècle.

Abondance de l'hélium (25%)

depuis 1930 : Hydrodynamique, thermodynamique et physique nucléaire.

⇒ Calcul de la quantité des éléments chimiques

Observations spectroscopiques

⇒ Mesure de la quantité des éléments chimiques

Mesure plus précise de la récession des galaxies.

$t_{\text{Univ}} = 15$ milliards d'années dans le modèle de Big Bang

Compatible avec age de la Terre

"Explosion primordiale"

1960 : Quasars plus nombreux dans le passé (incompatible avec modèle stationnaire).

1965 : Penzias & Wilson : découverte du fond diffus cosmologique. (isotrope)

- Univers actuel (1 millards de fois) pas assez dense.
- "Echo" du Big Bang RX (3000 K) étiré en onde radio (3 K)



Un modèle dynamique est un bon modèle !!!

Evolution de l'Univers - Hubble.

Expansion de l'Univers – mouvement d'ensemble.

Univers local (< 100 M d'a.l.)

- Voie Lactée et Andromède se rapprochent
- Amas Local se rapproche de l'Amas de la Vierge
- Mouvement *dans* l'espace

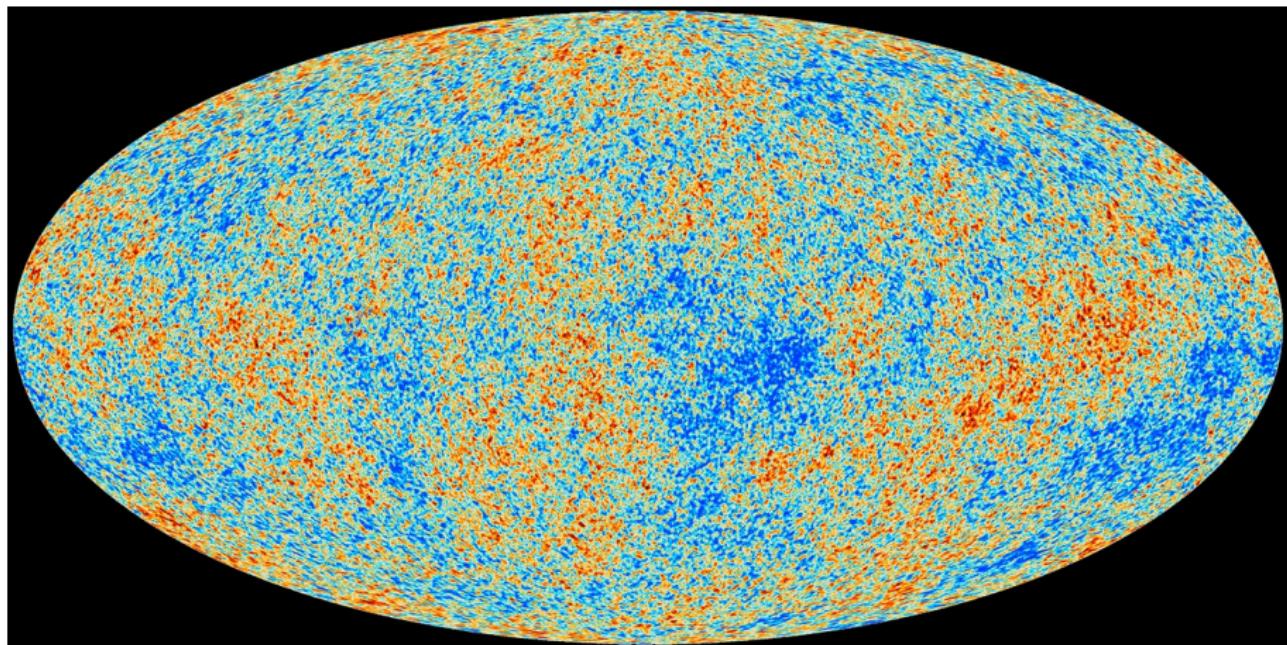
Univers "lointain"

Relativité générale : vitesse entre deux objets est un concept local.

- Expansion *de* l'espace
- ≠ Forces gravitationnelle, électromagnétique, nucléaire.
 - qui assurent la cohésion des atomes, planètes, galaxies....



Fond Diffus Cosmologique.



(Longueur d'onde) \longleftrightarrow (température d'émission : 2,726 K)



Evolution de l'Univers.

En l'absence de force....

... les vitesses sont constantes (Galilée)

Pas de place privilégiée.

...

Loi de Hubble : $v = H_0 d$

Il a un "temps" pour lequel "tout ce qui est visible était au même point" : (t_{Univ})
"distance" entre deux galaxies = "vitesse" relative $\times t_{\text{Univ}}$

âge de l'Univers $t_{\text{Univ}} = d/v = 1/H_0$

si l'expansion n'est ni freinée ni accélérée.

Mais la force de gravitation....

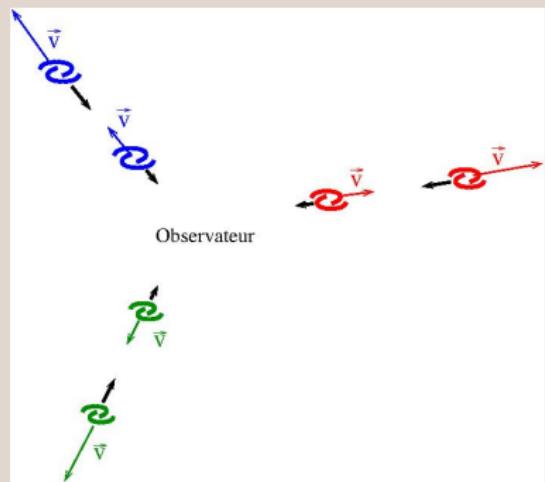
... ralenti les galaxies (Newton).



Quel passé.

Mais l'univers a évolué "entre temps"

$v = H_0 d$: très bon pour galaxies proches donc sur l'évolution récente.



Les galaxies subissent la gravitation.
Donc elles s'attirent.

Leur vitesse diminue avec le temps.

Leur vitesse diminue avec la
distance.

A un temps t passé, $v = H(t)d$ (?)
Il faut $H(t)$ pour avoir $t_{\text{Univ.}}$.

A la fin du XX siècle

- ① L'Univers est structuré en étoiles, galaxies, amas de galaxies, ...
- ② L'Univers est issu d'un système très dense et chaud
- ③ L'Univers est en expansion ralentie par la gravitation
- ④ Détermination de l'âge et de l'avenir de l'Univers



La loi de Hubble et l'âge de l'univers.

Mesure de H ... dans le passé lointain !!

Regarder des objets très loin (donc regarder loin dans le... passé)
dont on peut déterminer la vitesse (pas de pb) et la distance à la Terre (aie !)

Chandelle standard

Il faut des objets

- ① dont on connaît exactement la quantité de lumière émise.
- ② qui émettent une quantité gigantesque de lumière.

Chandelle standard

- ① En mesure l'effet Doppler, on a la vitesse v .
- ② En comparant les lumières reçue et émise, on déduit la distance d .
- ③ Connaissant la distance, on sait "quand" on regarde (t) !!
- ④ On a $d(t)$ et $v(t)$ dans le passé



Supernova.

- ① Deux géantes rouges en interaction
- ② L'une d'elle devient une naine blanche
- ③ Elle aspire l'hydrogène de sa compagne
- ④ A $1.3M_{\odot}$, explosion



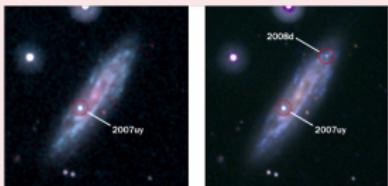
Quelques supernovae.

Supernova SN1987



Grand Nuage de Magellan (Amas Local)
(168 000 a.l.) - Le test

Supernova 2007uy et 2008D



Constellation du Lynx (88 millions d'a.l.)
source : Satellite *Swift*; NASA

Supernova SN1994D



Galaxie NGC 4526 (Amas de Virgo)
source : Sat. *Hubble*; NASA

Supernovae de Cooke

6 et 11 milliards (!!) d'a.l.
(Cooke & Sullivan - Oxford - juillet 2009)



Evolution primordiale.

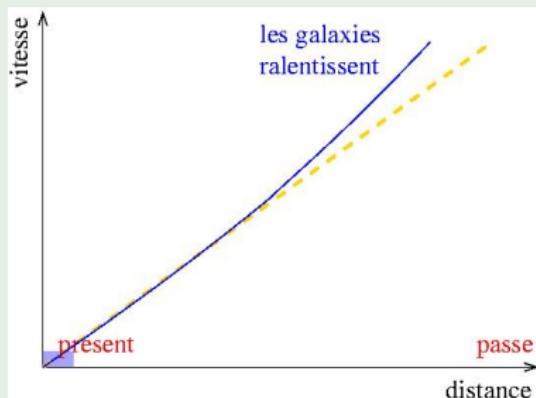
On s'attend à....

Les galaxies s'éloignent les unes des autres.

Les plus éloignées sont les plus rapides.

La force de gravitation les ralenti.

Dans le passé $H = (V/d)$ est plus grand.



Evolution primordiale.

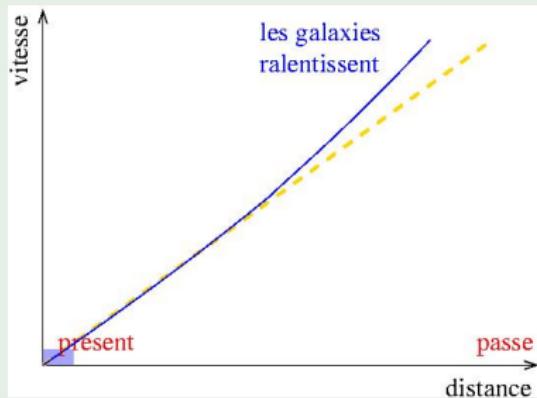
On s'attend à....

Les galaxies s'éloignent les unes des autres.

Les plus éloignées sont les plus rapides.

La force de gravitation les ralenti.

Dans le passé $H = (V/d)$ est plus grand.



Evolution primordiale.

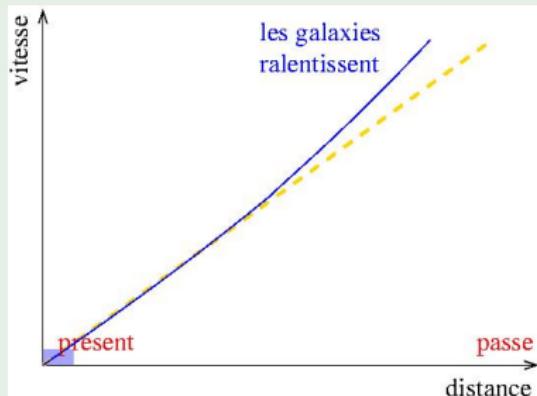
On s'attend à....

Les galaxies s'éloignent les unes des autres.

Les plus éloignées sont les plus rapides.

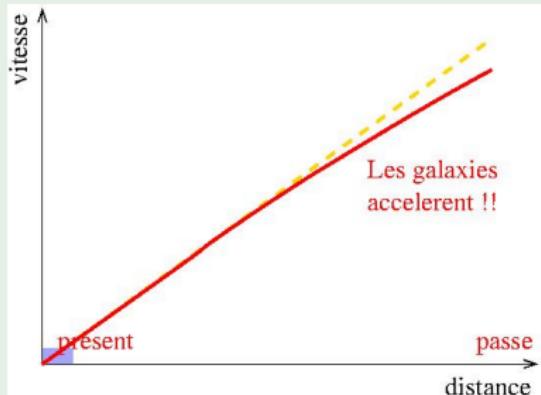
La force de gravitation les ralenti.

Dans le passé $H = (V/d)$ est plus grand.



Evolution primordiale.

... et on observe (depuis 1998) :



Force gravitationnelle répulsive ! ?

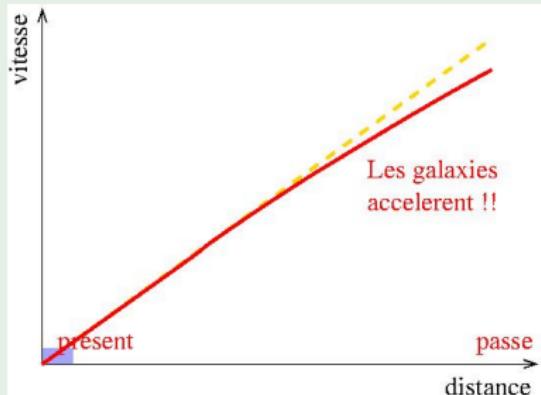
Huterer & Turner (1998) : *dark energy* qui aurait une pression négative

Le retour de la constante cosmologique !! qui modéliserait l'énergie du vide quantique.



Evolution primordiale.

... et on observe (depuis 1998) :



Force gravitationnelle répulsive ! ?

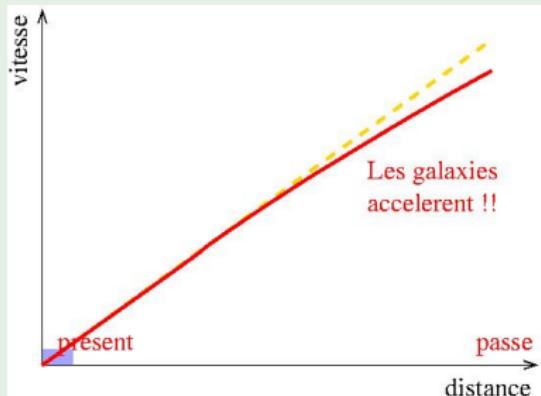
Huterer & Turner (1998) : *dark energy* qui aurait une pression négative

Le retour de la constante cosmologique !! qui modéliserait l'énergie du vide quantique.



Evolution primordiale.

... et on observe (depuis 1998) :



Force gravitationnelle répulsive ! ?

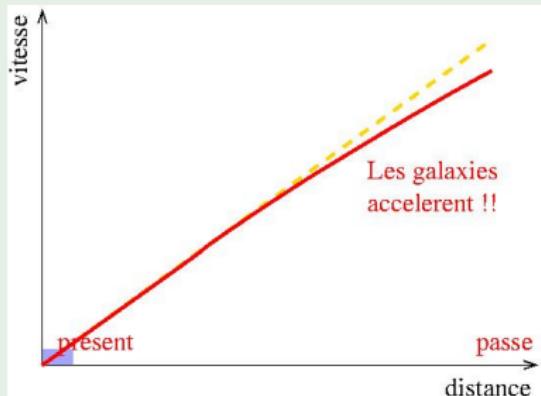
Huterer & Turner (1998) : *dark energy* qui aurait une pression négative

Le retour de la constante cosmologique !! qui modéliserait l'énergie du vide quantique.



Evolution primordiale.

... et on observe (depuis 1998) :



Force gravitationnelle répulsive ! ?

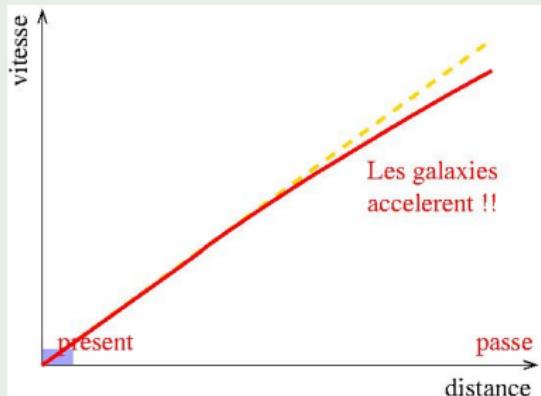
Huterer & Turner (1998) : *dark energy* qui aurait une pression négative

Le retour de la constante cosmologique !! qui modéliserait l'énergie du vide quantique.



Evolution primordiale.

... et on observe (depuis 1998) :



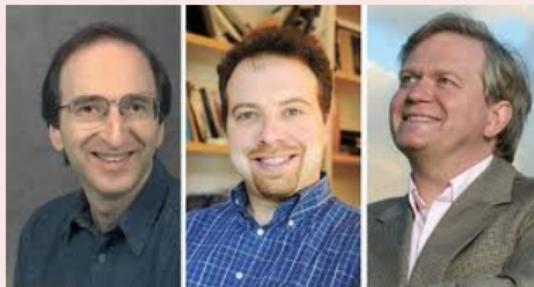
Force gravitationnelle répulsive ! ?

Huterer & Turner (1998) : *dark energy* qui aurait une pression négative

Le retour de la constante cosmologique !! qui modéliserait l'énergie du vide quantique.



Prix Nobel de Physique 2011.



Saul Perlmutter, Brian Schmidt, Adam Riess

pour
"la découverte de l'expansion accélérée de l'Univers
grâce à l'observation de supernovae très lointaines."

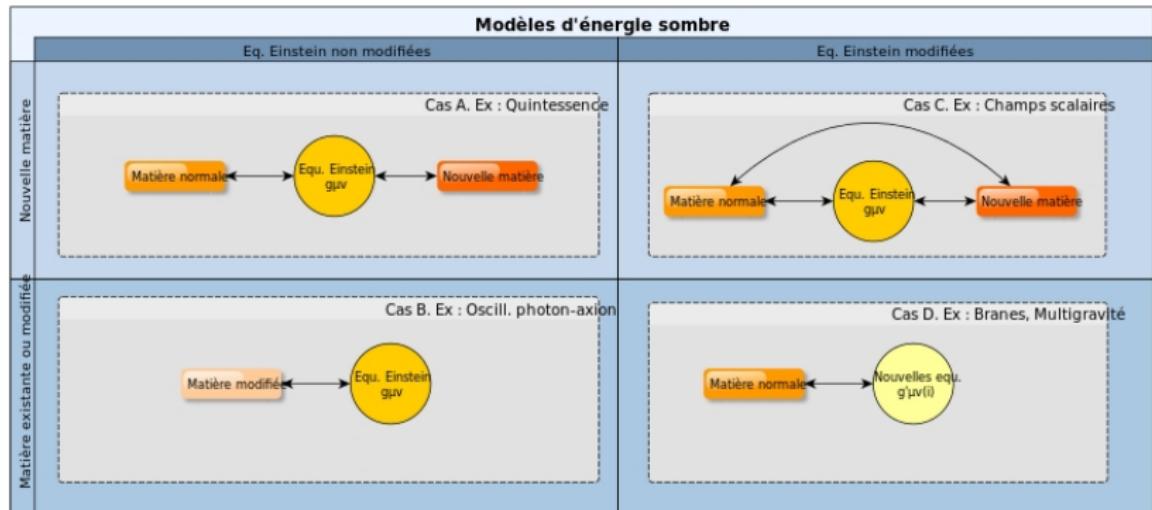


Controverse Λ CDM.

- Λ est une cste *ad hoc*.
- Densité d'énergie : $\rho_{\text{vide}}^{\text{mod.std.}} = 10^{74} \text{ Gev}$ vs $\rho_{\Lambda}^{\text{Cosmo.}} = 10^{-47} \text{ Gev} !!$
-



Alternatives



A. Nouveaux champs/particules variables. interagissant peu avec la matière et ressentis par ses effets.

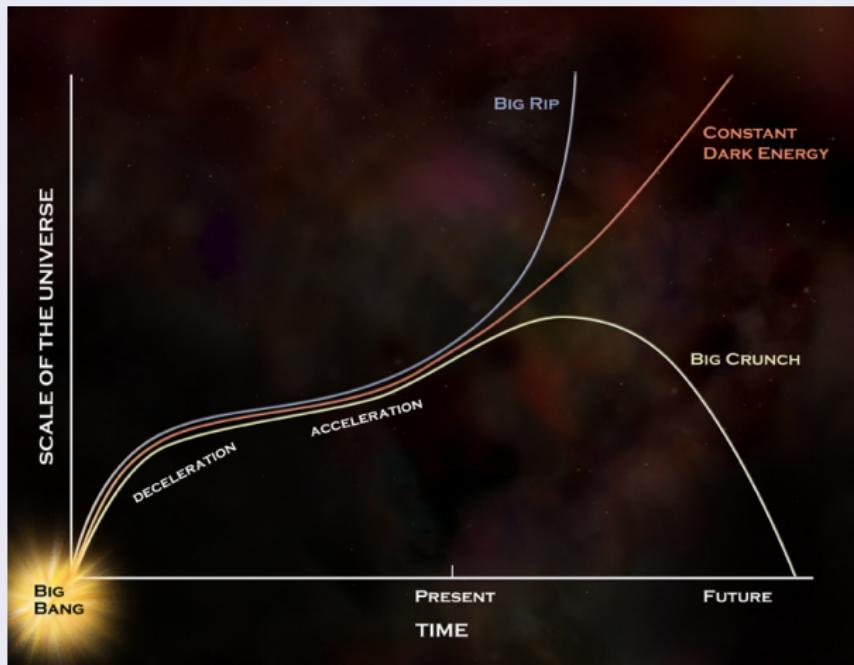
B. Champs (faibles) couplés aux photons. "affaiblissement de la lumière" des supernovae. (osc γ -axions.)

C. Couplage fort de nouveaux champs avec les champs du modèle standard.

D. Modifications importantes de la relativité générale (plusieurs types de gravitons). Modèles branaires.

La constante de Hubble et l'avenir de l'Univers.

Evolution possible.



Scénario du Big Rip.

Modèle (spéculatif) reposant sur l'existence de l'énergie fantôme (Caldwell 1999).

- Densité d'énergie fantôme augmente avec le temps !!
- Donc la pression négative est de plus en plus grande !!
- Donc expansion de plus en plus "violente".
- Densité d'énergie infinie localement en un temps fini. Big Rip !!

Chronologie du Big Rip :

- 10 M années : Dislocation de la Voie Lactée.
- Qq années : Arrachage de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.
- qq mois : Arrachage de la Terre.
- qq dizaines de minutes : Dislocation de la Terre.
- qq minutes : Dislocation du Soleil.
- 10^{-17} seconde : Dislocation des atomes.



Scénario du Big Rip.

Modèle (spéculatif) reposant sur l'existence de l'énergie fantôme (Caldwell 1999).

- Densité d' énergie fantôme augmente avec le temps !!
 - Donc la pression négative est de plus en plus grande !!
 - Donc expansion de plus en plus "violente".
 - Densité d'énergie infinie localement en un temps fini. Big Rip !!!



Scénario du Big Rip.

Modèle (spéculatif) reposant sur l'existence de l'énergie fantôme (Caldwell 1999).

- Densité d' énergie fantôme augmente avec le temps !!
 - Donc la pression négative est de plus en plus grande !!
 - Donc expansion de plus en plus "violente".
 - Densité d'énergie infinie localement en un temps fini. Big Rip !!!



Scénario du Big Rip.

Modèle (spéculatif) reposant sur l'existence de l'énergie fantôme (Caldwell 1999).

- Densité d' énergie fantôme augmente avec le temps !!
 - Donc la pression négative est de plus en plus grande !!
 - Donc expansion de plus en plus "violente".
 - Densité d'énergie infinie localement en un temps fini. Big Rip !!



Scénario du Big Rip.

Modèle (spéculatif) reposant sur l'existence de l'énergie fantôme (Caldwell 1999).

- Densité d'énergie fantôme augmente avec le temps !!
- Donc la pression négative est de plus en plus grande !!
- Donc expansion de plus en plus "violente".
- Densité d'énergie infinie localement en un temps fini. Big Rip !!

Chronologie du Big Rip :

- 10 M années : Dislocation de la Voie Lactée.
- Qq années : Arrachage de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.
- qq mois : Arrachage de la Terre.
- qq dizaines de minutes : Dislocation de la Terre.
- qq minutes : Dislocation du Soleil.
- 10^{-17} seconde : Dislocation des atomes.



Scénario du Big Rip.

Modèle (spéculatif) reposant sur l'existence de l'énergie fantôme (Caldwell 1999).

- Densité d'énergie fantôme augmente avec le temps !!
- Donc la pression négative est de plus en plus grande !!
- Donc expansion de plus en plus "violente".
- Densité d'énergie infinie localement en un temps fini. **Big Rip !!**

Chronologie du Big Rip :

- 10 M années : Dislocation de la Voie Lactée.
- Qq années : Arrachage de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.
- qq mois : Arrachage de la Terre.
- qq dizaines de minutes : Dislocation de la Terre.
- qq minutes : Dislocation du Soleil.
- 10^{-17} seconde : Dislocation des atomes.



Scénario du Big Rip.

Modèle (spéculatif) reposant sur l'existence de l'énergie fantôme (Caldwell 1999).

- Densité d'énergie fantôme augmente avec le temps !!
- Donc la pression négative est de plus en plus grande !!
- Donc expansion de plus en plus "violente".
- Densité d'énergie infinie localement en un temps fini. Big Rip !!

Chronologie du Big Rip :

- 10 M années : Dislocation de la Voie Lactée.
- Qq années : Arrachage de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.
- qq mois : Arrachage de la Terre.
- qq dizaines de minutes : Dislocation de la Terre.
- qq minutes : Dislocation du Soleil.
- 10^{-17} seconde : Dislocation des atomes.



Scénario du Big Rip.

Modèle (spéculatif) reposant sur l'existence de l'énergie fantôme (Caldwell 1999).

- Densité d'énergie fantôme augmente avec le temps !!
- Donc la pression négative est de plus en plus grande !!
- Donc expansion de plus en plus "violente".
- Densité d'énergie infinie localement en un temps fini. **Big Rip !!**

Chronologie du Big Rip :

- 10 M années : Dislocation de la Voie Lactée.
- Qq années : Arrachage de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.
- qq mois : Arrachage de la Terre.
- qq dizaines de minutes : Dislocation de la Terre.
- qq minutes : Dislocation du Soleil.
- 10^{-17} seconde : Dislocation des atomes.



Scénario du Big Rip.

Modèle (spéculatif) reposant sur l'existence de l'énergie fantôme (Caldwell 1999).

- Densité d'énergie fantôme augmente avec le temps !!
- Donc la pression négative est de plus en plus grande !!
- Donc expansion de plus en plus "violente".
- Densité d'énergie infinie localement en un temps fini. Big Rip !!

Chronologie du Big Rip :

- 10 M années : Dislocation de la Voie Lactée.
- Qq années : Arrachage de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.
- qq mois : Arrachage de la Terre.
- qq dizaines de minutes : Dislocation de la Terre.
- qq minutes : Dislocation du Soleil.
- 10^{-17} seconde : Dislocation des atomes.



Scénario du Big Rip.

Modèle (spéculatif) reposant sur l'existence de l'énergie fantôme (Caldwell 1999).

- Densité d'énergie fantôme augmente avec le temps !!
- Donc la pression négative est de plus en plus grande !!
- Donc expansion de plus en plus "violente".
- Densité d'énergie infinie localement en un temps fini. Big Rip !!

Chronologie du Big Rip :

- 10 M années : Dislocation de la Voie Lactée.
- Qq années : Arrachage de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.
- qq mois : Arrachage de la Terre.
- qq dizaines de minutes : Dislocation de la Terre.
- qq minutes : Dislocation du Soleil.
- 10^{-17} seconde : Dislocation des atomes.



Observations.

L'expansion de l'Univers est accélérée !!

et la cause de cette accélération
(gravitation répulsive)
nous est inconnue

Propriété fondamentale de l'Univers...

- ... uniformément répartie
- ... depuis au moins 6 milliards d'années.
- ... beaucoup plus abondante que la matière visible

Attention.

Energie noire \neq Matière noire

L'expansion de l'Univers est accélérée !!

et la cause de cette accélération
(gravitation répulsive)
nous est inconnue

Propriété fondamentale de l'Univers...

... uniformément répartie

... depuis au moins 6 milliards d'années.

... beaucoup plus abondante que la matière visible

Attention.

Energie noire \neq Matière noire

Plan

1 Astronomie antique

2 De l'astronomie à la loi de la gravitation.

- Modèles astronomiques.

3 Précurseurs.

4 La Révolution newtonienne

- Formulation de la loi de la gravitation.
- Détermination de la masse de la Terre et du Soleil.

5 Les épreuves

6 Cartographie système solaire.

- Découverte d'Uranus et premier cas de "matière noire".
- Mercure et la relativité générale".

7 Les mesures et la structure

8 Cartographie de l'Univers.

- Mesure de distance inter-stellaire ou inter-galactique.
- Les théories et observations.
- Structure de l'Univers.

9 Energie noire

10 Evolution de l'Univers.

- D'où venons nous et où allons nous.

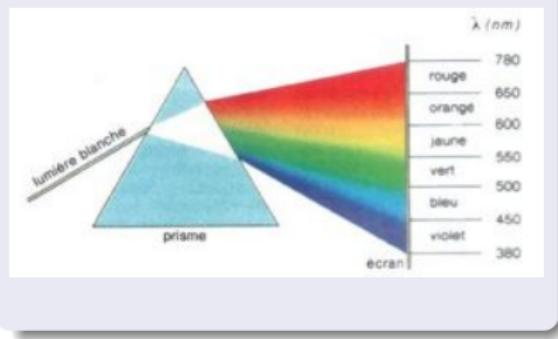
11 Matière noire.

- Mesure de vitesse des galaxies.
- Anomalies dans les trajectoires des galaxies.



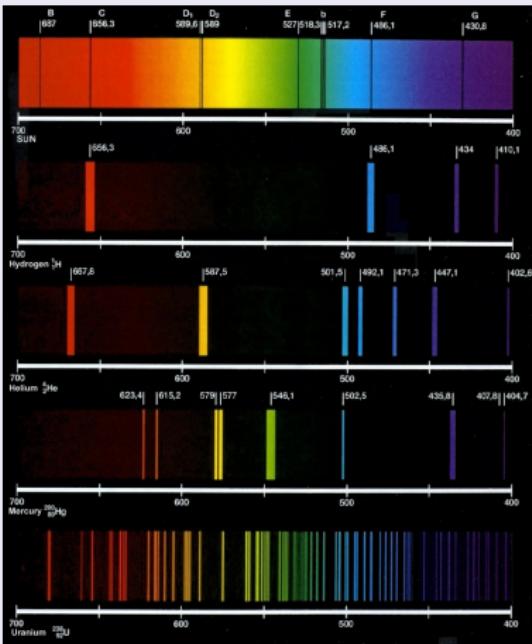
Mesures de vitesses.

Décomposition du spectre.



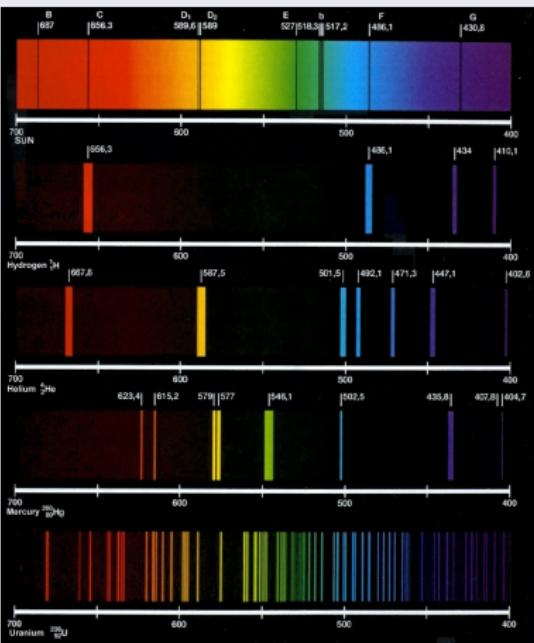
Mesures de vitesses.

Spectre d'émission

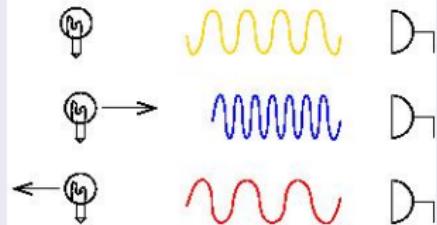
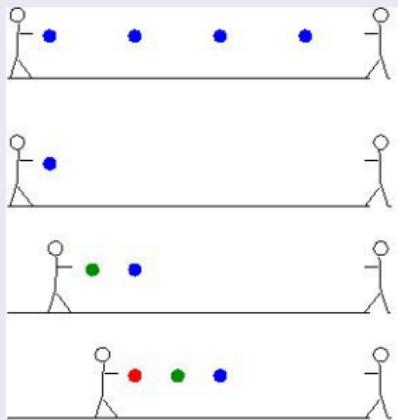


Mesures de vitesses.

Spectre d'émission



Effet Doppler



Quelques galaxies voisines.

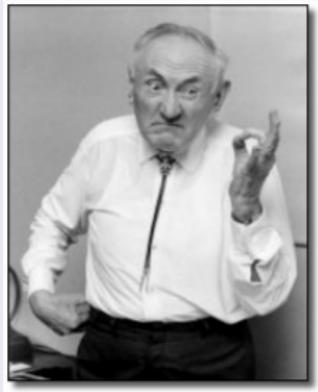
Groupe de Coma



Chevelure de Bérénice

Chronologie des observations.

1933 : Fritz Zwicky étudie la dispersion des vitesses de 7 galaxies dans Coma.



Théorème du Viriel

$2E_c + E_p \approx 0 \Rightarrow$ stabilité "dynamique".

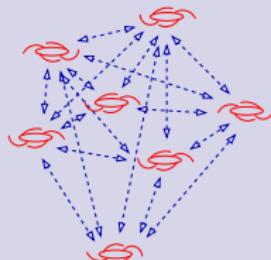


Chronologie des observations.

1933 : Fritz Zwicky étudie la dispersion des vitesses de 7 galaxies dans Coma.



Energie potentielle : E_p



Positions (céphéides)
Masses (luminescence)

$$E_p = \sum_i \sum_{j>i} G \frac{M_j M_i}{r_{ij}}$$

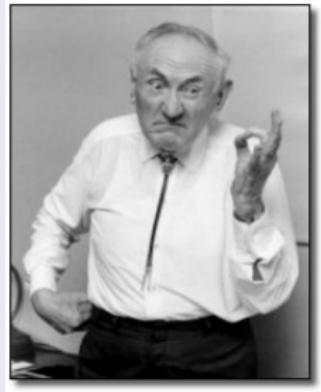


Théorème du Viriel

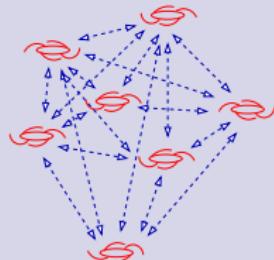
$2E_c + E_p \approx 0 \Rightarrow$ stabilité "dynamique".

Chronologie des observations.

1933 : Fritz Zwicky étudie la dispersion des vitesses de 7 galaxies dans Coma.



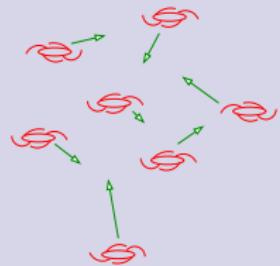
Energie potentielle : E_p



Positions (céphéides)
Masses (luminescence)

$$E_p = \sum_i \sum_{j>i} G \frac{M_j M_i}{r_{ij}}$$

Energie cinétique : E_c



Vitesses (effet Doppler)
Masses (luminescence)

$$E_c = \sum_i \frac{1}{2} M_i v_i^2$$

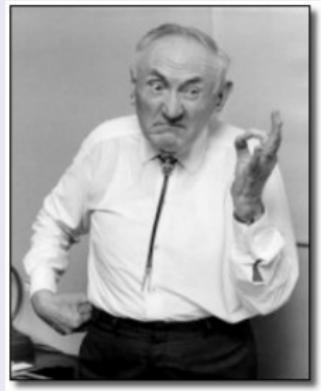


Théorème du Viriel

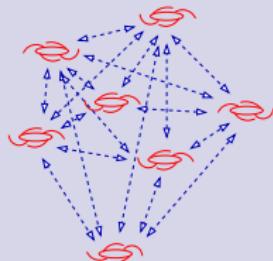
$$2E_c + E_p \approx 0 \Rightarrow \text{stabilité "dynamique".}$$

Chronologie des observations.

1933 : Fritz Zwicky étudie la dispersion des vitesses de 7 galaxies dans Coma.

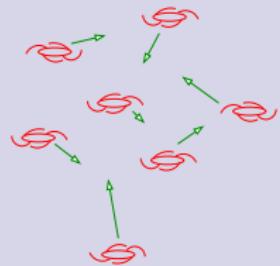


Energie potentielle : E_p



Positions (céphéides)
Masses (luminescence)

Energie cinétique : E_c



Vitesses (effet Doppler)
Masses (luminescence)

$$E_p = \sum_i \sum_{j>i} G \frac{M_j M_i}{r_{ij}}$$

$$E_c = \sum_i \frac{1}{2} M_i v_i^2$$



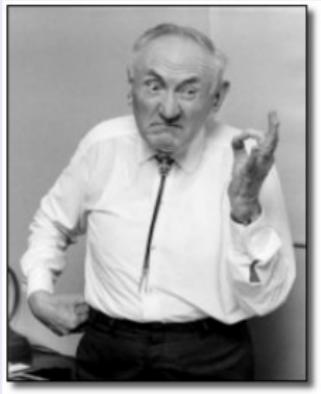
Théorème du Viriel

$2E_c + E_p \approx 0 \Rightarrow$ stabilité "dynamique".

Chronologie des observations.

1933 : Fritz Zwicky étudie la dispersion des vitesses de 7 galaxies dans Coma.

- Matière émet un rayonnement électromatique :
Masse lumineuse (M_{Lum}) = la masse grave (M)



Theoreme Viriel : $\frac{1}{2} \sum_i M_i v_i^2 \approx \sum_i \sum_{j>i} G \frac{M_i M_j}{r_{ij}}$ (1)

Résultats Zwicky : $\frac{1}{2} \sum_i M_i^{\text{Lum}} v_i^2 \approx 400 \sum_j G \frac{M_i^{\text{Lum}} M_j^{\text{Lum}}}{r_{ij}}$ (2)

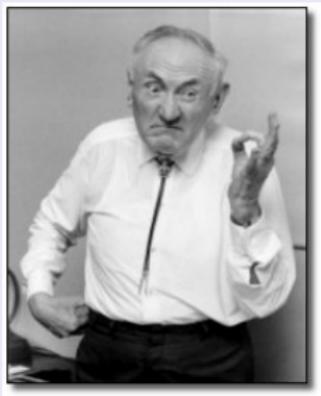
$$M_{\text{Mat}} \approx 400 M_{\text{Lum}} !!!$$

- Il y aurait une quantité énorme de matière "invisible" !!! qui assurerait la cohésion des galaxies.

Chronologie des observations.

1933 : Fritz Zwicky étudie la dispersion des vitesses de 7 galaxies dans Coma.

- Matière émet un rayonnement électromatique :
Masse lumineuse (M_{Lum}) = la masse grave (M)



$$\text{Theoreme Viriel : } \frac{1}{2} \sum_i M_i v_i^2 \approx \sum_i \sum_{j>i} G \frac{M_i M_j}{r_{ij}} \quad (1)$$

$$\text{Resultats Zwicky : } \frac{1}{2} \sum_i M_i^{\text{Lum}} v_i^2 \approx 400 \sum_j G \frac{M_i^{\text{Lum}} M_j^{\text{Lum}}}{r_{ij}} \quad (2)$$

$$M_{\text{Mat}} \approx 400 M_{\text{Lum}} !!!$$

- Il y aurait une quantité énorme de matière "invisible" !!! qui assurerait la cohésion des galaxies.

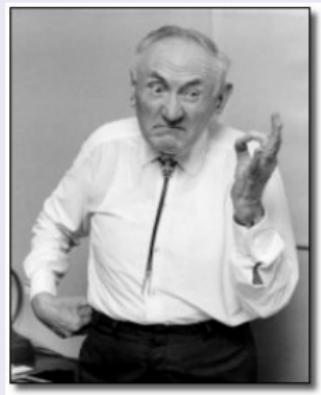
Chronologie des observations.

1933 : Fritz Zwicky étudie la dispersion des vitesses de 7 galaxies dans Coma.

- Matière émet un rayonnement électromatique :
Masse lumineuse (M_{Lum}) = la masse grave (M)

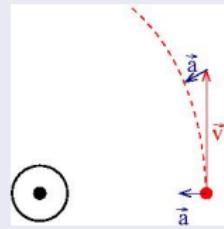
Theoreme Viriel : $\frac{1}{2} \sum_i M_i v_i^2 \approx \sum_i \sum_{j>i} G \frac{M_i M_j}{r_{ij}}$ (1)

Résultats Zwicky : $\frac{1}{2} \sum_i M_i^{\text{Lum}} v_i^2 \approx 400 \sum_j G \frac{M_i^{\text{Lum}} M_j^{\text{Lum}}}{r_{ij}}$ (2)



- Rapport entre Energie cinétique et potentielle (beaucoup) trop élevé.
 $2E_c + 400E_p = 0$

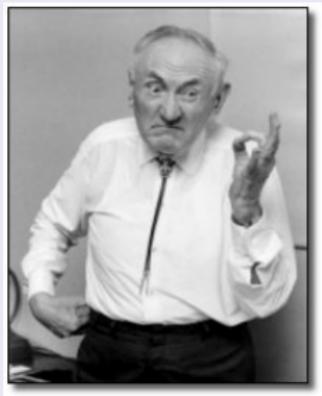
$$2E_c \gg -E_p \Rightarrow \text{dissociation} !!$$



Chronologie des observations.

1933 : Fritz Zwicky étudie la dispersion des vitesses de 7 galaxies dans Coma.

- Matière émet un rayonnement électromatique :
Masse lumineuse (M_{Lum}) = la masse grave (M)



$$\text{Theoreme Viriel : } \frac{1}{2} \sum_i M_i v_i^2 \approx \sum_i \sum_{j>i} G \frac{M_i M_j}{r_{ij}} \quad (1)$$

$$\text{Resultats Zwicky : } \frac{1}{2} \sum_i M_i^{\text{Lum}} v_i^2 \approx 400 \sum_j G \frac{M_i^{\text{Lum}} M_j^{\text{Lum}}}{r_{ij}} \quad (2)$$

$$M_{\text{Mat}} \approx 400 M_{\text{Lum}} !!!$$

- Il y aurait une quantité énorme de **matière "invisible"** !!! qui assurerait la cohésion des galaxies.

Chronologie des observations.

- ① 1936 : Sinclair Smith arrive même conclusion avec Virgo.
- ② 1939 : Babcock mesure une rotation globale beaucoup trop élevée pour M31.
- ③ 1959 : Kahn et Woltjer montrent un déficit de masse dans l'Amas Local.
- ④ 1963 : Arrigo Finzi propose une adaptation de la loi de Newton
- ⑤ 1973 : Peebles et Ostriker : Modèle numérique des galaxies est instable

La masse lumineuse est-elle mal mesurée dans certains cas (?)



Chronologie des observations.

- ① 1936 : Sinclair Smith arrive même conclusion avec Virgo.
- ② 1939 : Babcock mesure une rotation globale beaucoup trop élevée pour M31.
- ③ 1959 : Kahn et Woltjer montrent un déficit de masse dans l'Amas Local.
- ④ 1963 : Arrigo Finzi propose une adaptation de la loi de Newton
- ⑤ 1973 : Peebles et Ostriker : Modèle numérique des galaxies est instable

La masse lumineuse est-elle mal mesurée dans certains cas (?)



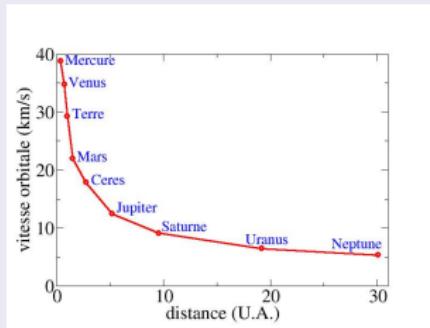
Vera Rubin et Andromède.

1975 : Vera Rubin : Vitesses trop importantes des étoiles périphériques de M31



Vera Rubin et Andromède.

1975 : Vera Rubin : Vitesses trop importantes des étoiles périphériques de M31

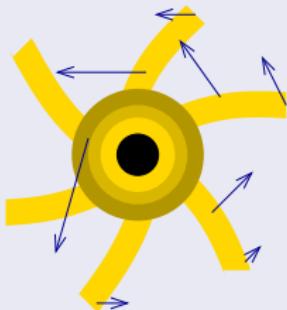


Vera Rubin et Andromède.

1975 : Vera Rubin : Vitesses trop importantes des étoiles périphériques de M31



Mesure vitesse des étoiles
d'Andromède en fonction de
leur distance au centre de la
Galaxie.
... et de 200 autres galaxies

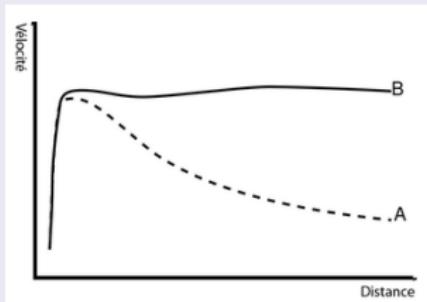
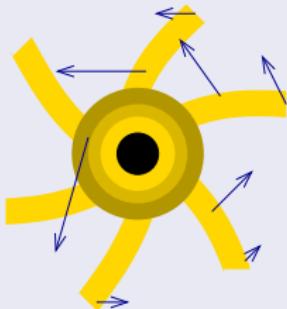


Vera Rubin et Andromède.

1975 : Vera Rubin : Vitesses trop importantes des étoiles périphériques de M31



Mesure vitesse des étoiles d'Andromède en fonction de leur distance au centre de la Galaxie.
... et de 200 autres galaxies





Hypothèse de la matière noire.

Force de gravitation : $\vec{F} = G \frac{mM}{r^2} \vec{u}$

Rubin postule l'existence d'un gigantesque halo de matière....

- ① qui entourerait les galaxies
- ② qui serait une source puissante de gravitation
- ③ qui ne s'apparaitrait à aucune matière connue
- ④ qui aurait une faible section efficace
- ⑤ qui serait 5 à 6 fois plus abondante que la matière baryonique



Hypothèse MOND.



Deuxième loi de Newton : $\vec{F} = m \vec{a}$

Les vitesses de rotation des étoiles sont grandes.

Les distances au centre de la galaxies sont très grandes.

Les accélérations des étoiles ($\approx v^2/r$) sont très faibles.

$$(d = 2.5 \cdot 10^{17} \text{ km}, \quad v = 217 \text{ km/s} \quad \Rightarrow \quad a = 1.8 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-2})$$

Milgrom modifie la deuxième loi de Newton pour les faibles accélérations :

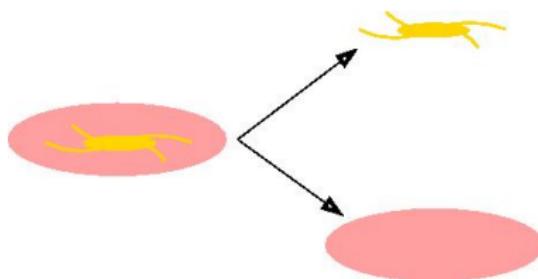
$$\vec{F} = m \vec{a} \mu \left(\frac{a}{a_0} \right) \quad \text{avec} \quad \mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \gg 1 \\ x & \text{si } x \ll 1 \end{cases}$$

$$\text{et } a_0 = 1.2 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-2}$$



Collision galactique 1.

10% étoiles + 90% gaz hydrogène



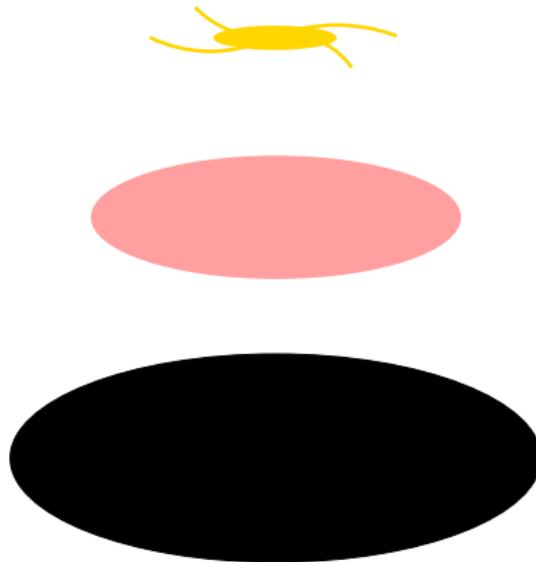
Collision galactique 1.

Si hypothèse MOND est correcte.

10% étoiles + 90% gaz hydrogène

Collision galactique 2.

2% étoiles + 13% gaz hydrogène + 85% matière noire



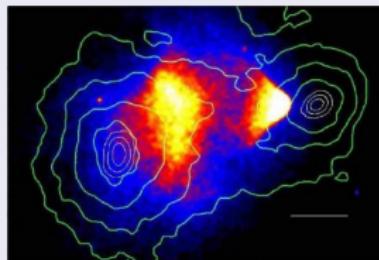
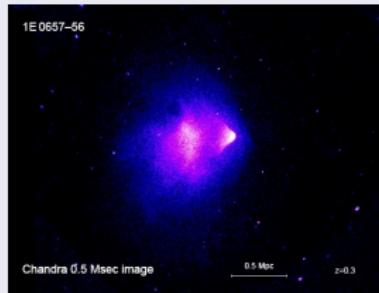
Collision galactique 2.

Si hypothèse matière noire est correcte.

2% étoiles + 13% gaz hydrogène + 85% matière noire

Amas du Boulet - Constellation de la Carène.

Collision de galaxies.



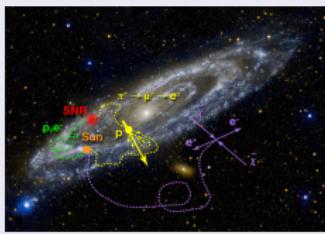
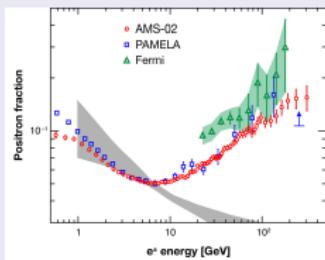
source : Chandra X-ray observatory & Hubble - NASA

Rouge	Chandra	fortement ralenti	Hydrogène
Bleu	Hubble	faiblement ralentie	matière baryonique
Ligne	Lentille gravitationnelle	très peu ralentie	Matière noire



Alpha Magnetic Spectrometer.

AMS.



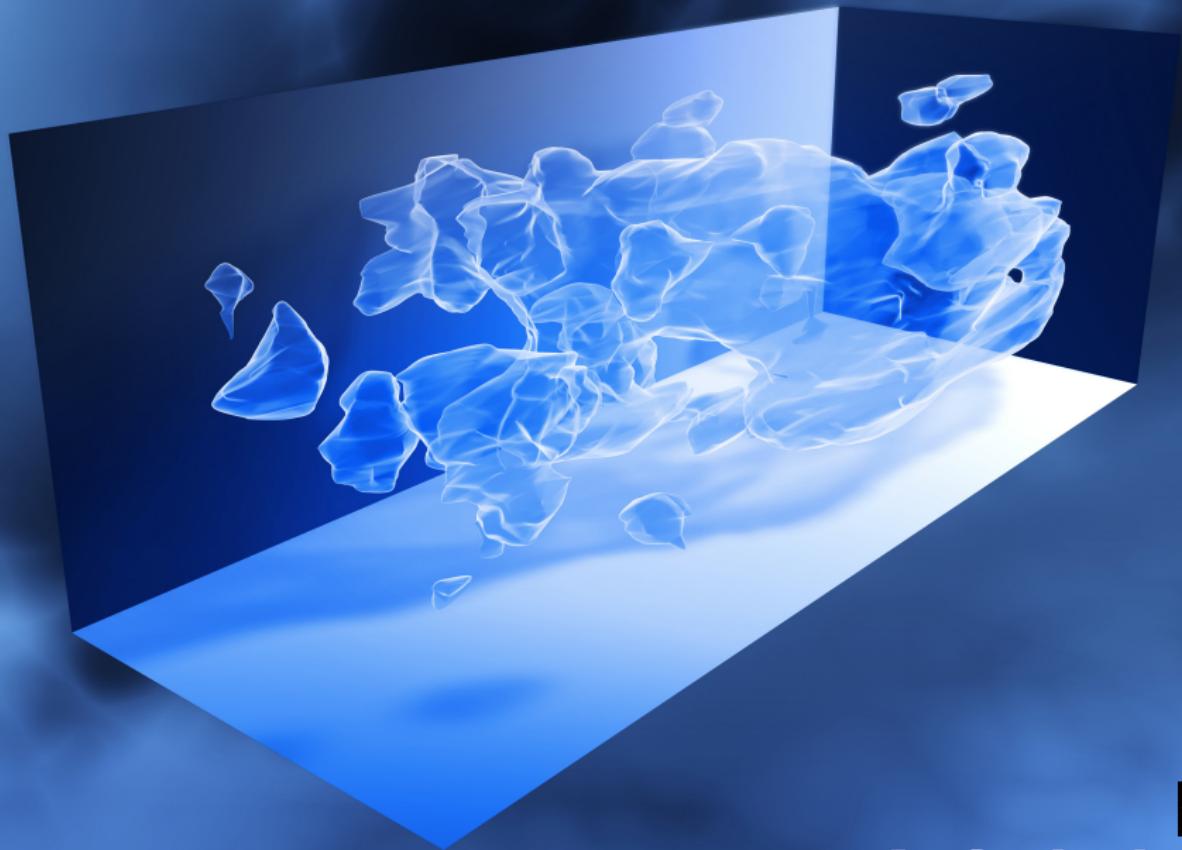
source : P.R.L. 3 avril 2013

The AMS measurement confirms an excess in the high-energy positron fraction, above what is expected from positrons produced in cosmic-ray interactions.

... the positrons come from the annihilation of dark matter particles, which may populate the Milky Way and its halo



Les "candidats" possibles.



Les "candidats" possibles.

- ① Matière froide (planètes, étoiles avortées)
 - peu nombreuse
 - trop légère.
- ② neutrinos :
 - beaucoup trop légers
 - pas assez nombreux.
- ③ trous noirs :
 - plusieurs milliards de M_{\odot}
 - ... mais déformations galactiques seraient trop importante.
- ④ nuages de gaz :
 - plusieurs millions de degrés (pas d'émission visible)
 - quantités semblent suffisantes
 - ... mais requièrent un champ de gravitation gigantesque pour confinement
- ⑤ W.I.M.P. :
 - prédites théoriquement....
 - "assez bonnes candidates"...
 - ... mais particules non observées actuellement



A SUIVRE

Les "candidats" possibles.

- ① Matière froide (planètes, étoiles avortées)
 - peu nombreuse
 - trop légère.
- ② neutrinos :
 - beaucoup trop légers
 - pas assez nombreux.
- ③ trous noirs :
 - plusieurs milliards de M_{\odot}
 - ... mais déformations galactiques seraient trop importante.
- ④ nuages de gaz :
 - plusieurs millions de degrés (pas d'émission visible)
 - quantités semblent suffisantes
 - ... mais requièrent un champ de gravitation gigantesque pour confinement
- ⑤ W.I.M.P. :
 - prédites théoriquement....
 - "assez bonnes candidates" ...
 - ... mais particules non observées actuellement



A SUIVRE