

Y-AT-IL UN PHYSICIEN POUR EXPLIQUER LE FILM « INTERSTELLAR » ?

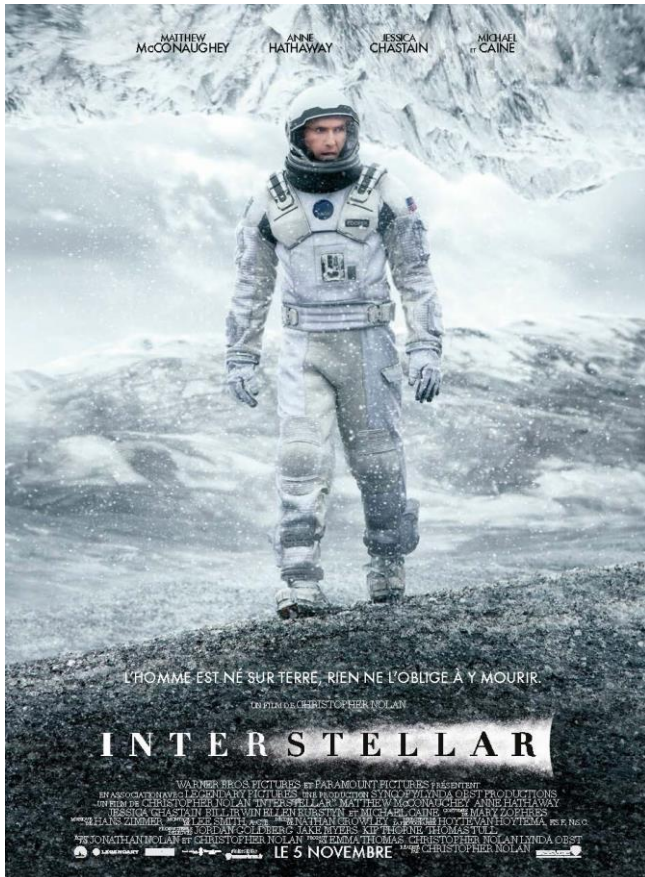
A photograph of a theater interior. The foreground is filled with rows of red upholstered seats, receding towards a large, bright white screen at the far end of the stage. The word "Introduction" is centered on the screen in a black, sans-serif font. The theater walls are dark, and the overall atmosphere is quiet and focused.

Introduction

Introduction

Particularité du film *Interstellar* (2014) :

Collaboration Kip Thorne & Christopher Nolan



Spécialiste de la gravitation dans le cadre de la relativité générale, Prix Nobel en 2017

Auteur et réalisateur anglais, oscarisé à multiples reprises



Introduction

Autres exemples de bonne collaboration scientifique – réalisateur :



Introduction

Autres exemples de bonne collaboration scientifique – réalisateur :



Carl Sagan

+



Robert Zemeckis

=



Contact (1997)



Introduction

Autres exemples de bonne collaboration scientifique – réalisateur :



Carl Sagan

+

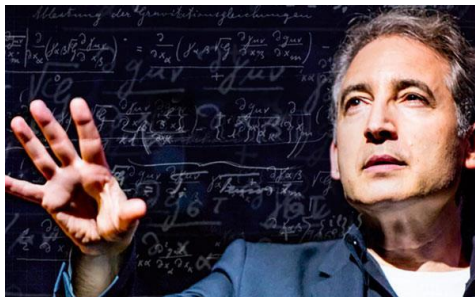


Robert Zemeckis

=



Contact (1997)



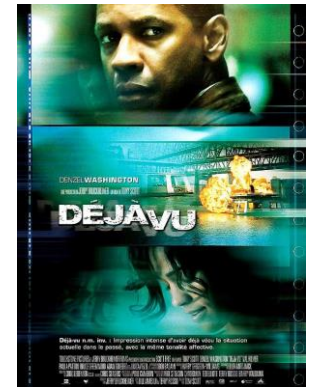
Brian Greene

+



Tony Scott

=



Déjà-vu (2007)



Introduction





Qui a déjà vu le film Interstellar ?



Introduction



Qui a déjà vu le film Interstellar ?

- Pas besoin de voir le film : on fera les rappels nécessaires.
- On ne dévoilera pas tous les ressorts du film.
- On ne traitera que les aspects du film relevant de la physique :
 - Les théories physiques de Kip Thorne 
 - Les romances et la métaphysique de Christopher Nolan 
- Les points évoqués se basent sur l'interprétation personnelle de Thierry & Éric sur le film



Introduction

Plan de la leçon du soir

1. Le contexte du film: entre science et science-fiction

2. Le voyage interstellaire

3. Les trous noirs

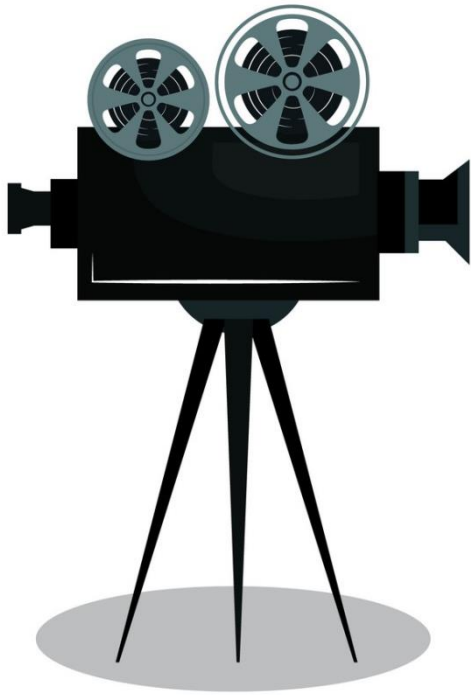
4. Physique spéculative : les trous de ver



A photograph of a cinema hall. The foreground is filled with rows of red upholstered seats, receding towards a large, bright white screen at the far end. The screen is the focal point, displaying the text '1. Le contexte du film'. The walls and ceiling are dark, and the overall atmosphere is that of a quiet movie theater.

1. Le contexte du film

1. Le contexte du film



Interstellar (2014)
« Bande annonce »



1. Le contexte du film

Les challenges que doit relever l'humanité pour continuer à vivre sur Terre

- **Le trou de la couche d'ozone**
- **Le réchauffement (changement) climatique**
 - Dérèglement du climat
 - Hausse du niveau de la mer
- **Surpopulation**
 - Problème d'eau
 - Problème de nourriture



1. Le contexte du film

Les challenges que doit relever l'humanité pour continuer à vivre sur Terre

- **Le trou de la couche d'ozone**

Tempêtes de sable

- **Le réchauffement (changement) climatique**

- Dérèglement du climat
- Hausse du niveau de la mer

- **Surpopulation**

- Problème d'eau
- Problème de nourriture



- **Catastrophe naturelle** : épidémie des plantes (Mildiou ou *blight* en anglais)

Crise alimentaire



1. Le contexte du film



Avis de Stephen Hawking

Difficile d'éviter une catastrophe sur la planète Terre dans les siècles futurs.

L'avenir de l'homme est dans l'espace.



1. Le contexte du film

2 problèmes sur la colonisation de l'espace soulevés par le film

Problème 1 : Comment mettre le « reste » de l'humanité dans l'espace ?

- Dans le film, la NASA a déjà construit le vaisseau.

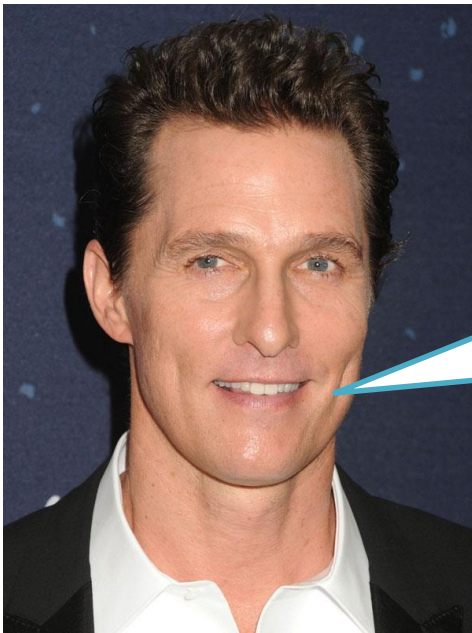


1. Le contexte du film

2 problèmes sur la colonisation de l'espace soulevés par le film

Problème 1 : Comment mettre le « reste » de 'humanité dans l'espace ?

- Dans le film, la NASA a déjà construit le vaisseau.



Comment envoyer le vaisseau dans l'espace ?

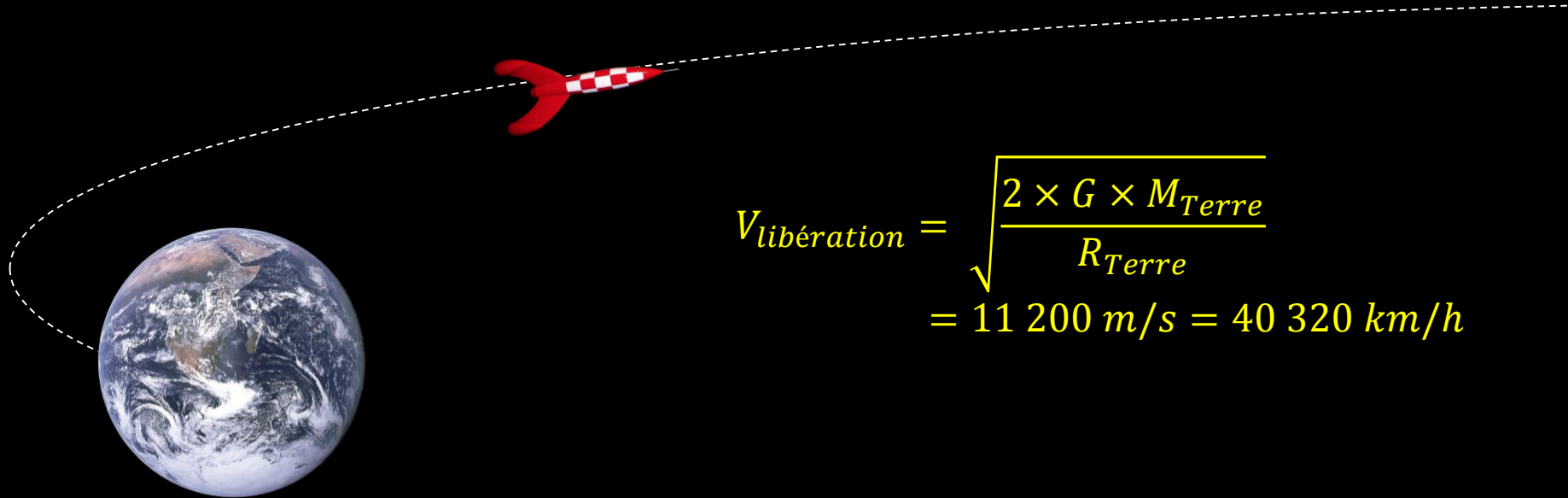


1. Le contexte du film

2 problèmes sur la colonisation de l'espace soulevés par le film

Problème 1 : Comment mettre le « reste » de 'humanité dans l'espace ?

- Dans le film, la NASA a déjà construit le vaisseau.



$$V_{libération} = \sqrt{\frac{2 \times G \times M_{Terre}}{R_{Terre}}} \\ = 11\,200 \text{ m/s} = 40\,320 \text{ km/h}$$

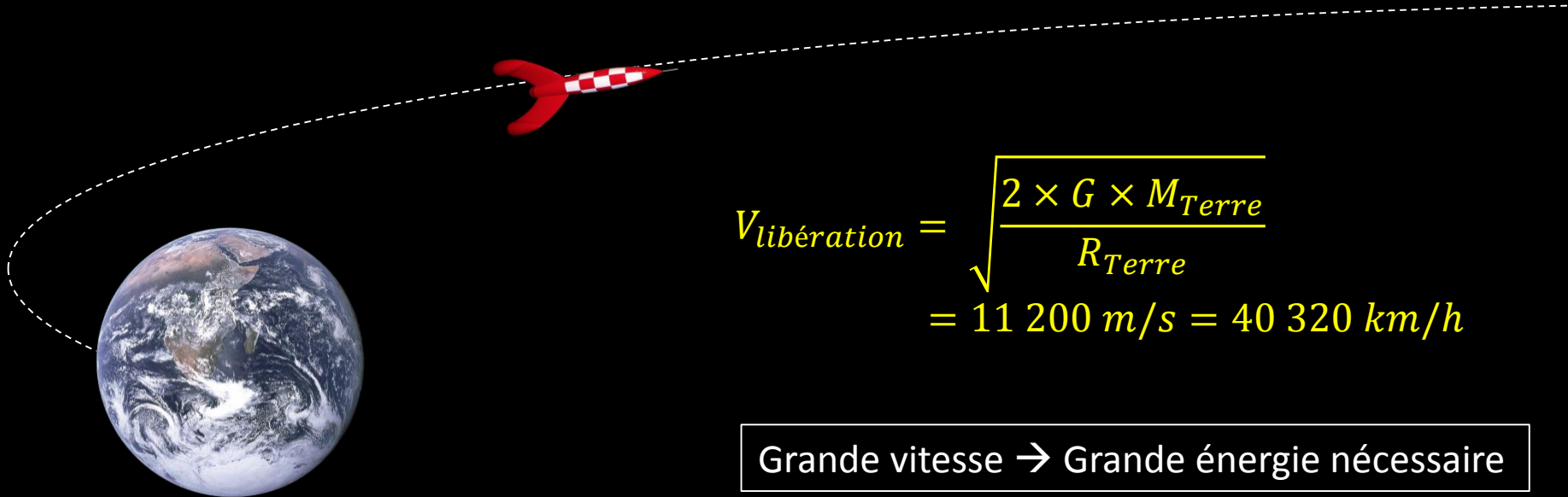


1. Le contexte du film

2 problèmes sur la colonisation de l'espace soulevés par le film

Problème 1 : Comment mettre le « reste » de 'humanité dans l'espace ?

- Dans le film, la NASA a déjà construit le vaisseau.



$$V_{\text{libération}} = \sqrt{\frac{2 \times G \times M_{\text{Terre}}}{R_{\text{Terre}}}} \\ = 11\,200 \text{ m/s} = 40\,320 \text{ km/h}$$

Grande vitesse → Grande énergie nécessaire



1. Le contexte du film

2 problèmes sur la colonisation de l'espace soulevés par le film

Problème 2 : Sur quelle planète vivre ?

- **Une planète du système solaire ?** Invivable
→ alternative proposée par la science-fiction : terraformer
- Une planète avec des conditions de vie similaires à la Terre : **une exoplanète**



Solution retenue par le film

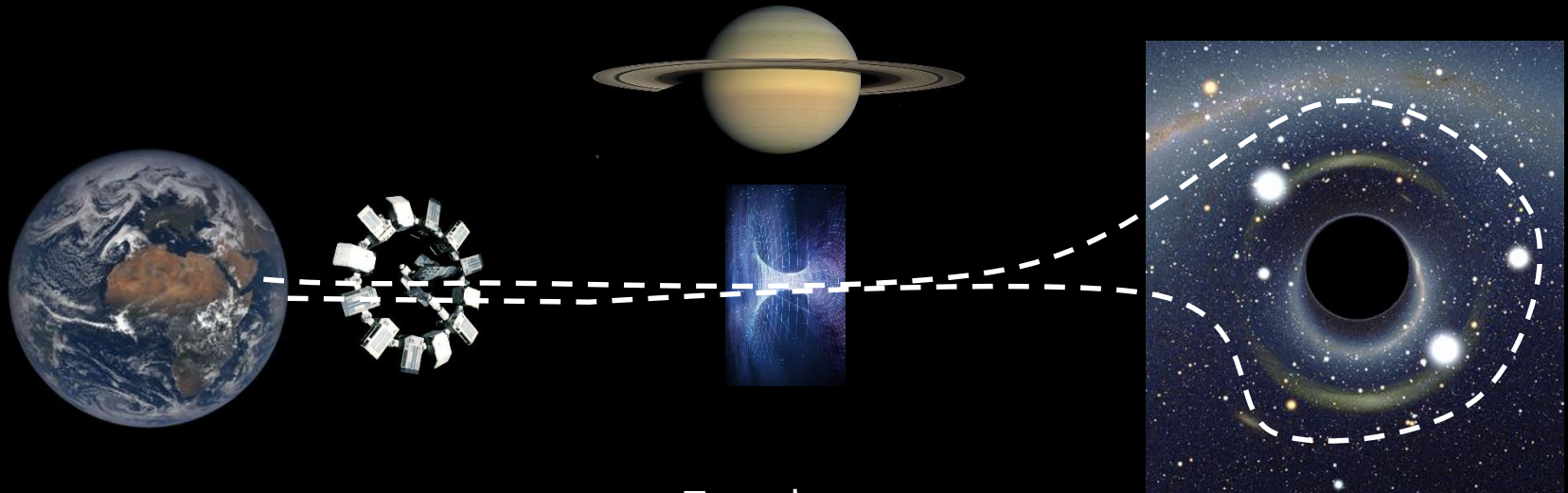


1. Le contexte du film

Le plan A


Trouver un moyen de faire
quitter le vaisseau géant

Trouver une planète viable
dans un système de planètes
en orbite autour d'un trou noir



Trou de ver
= raccourci



A photograph of a theater interior. The foreground is filled with rows of red upholstered seats, receding towards a large white projection screen at the far end. The screen displays the text '2. Le voyage interstellaire' in a black, sans-serif font. The theater walls are dark, and the overall lighting is dim, focusing attention on the screen.

2. Le voyage interstellaire

2. Le voyage interstellaire

La durée du voyage

Vitesse de libération : $V_{libération} = 40\,320 \text{ km/h}$

Voyage	Distance (moyenne)	Durée
Terre – Lune	384 400 km	10h (Apollo 11 = 4 jours)

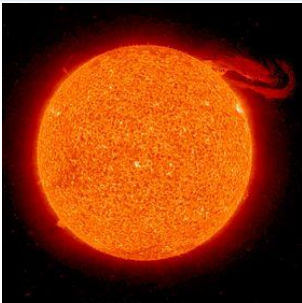


2. Le voyage interstellaire

La durée du voyage

Vitesse de libération : $V_{libération} = 40\,320 \text{ km/h}$

Voyage	Distance (moyenne)	Durée
Terre – Lune	384 400 km	10h (Apollo 11 = 4 jours)
Terre – Soleil	150 millions de km = 1 unité astronomique (UA)	5 mois



2. Le voyage interstellaire

La durée du voyage

Vitesse de libération : $V_{libération} = 40\,320 \text{ km/h}$

Voyage	Distance (moyenne)	Durée
Terre – Lune	384 400 km	10h (Apollo 11 = 4 jours)
Terre – Soleil	150 millions de km = 1 unité astronomique (UA)	5 mois
Terre – Mars	0,5 UA	3 mois



2. Le voyage interstellaire

La durée du voyage

Vitesse de libération : $V_{libération} = 40\,320 \text{ km/h}$

Voyage	Distance (moyenne)	Durée
Terre – Lune	384 400 km	10h (Apollo 11 = 4 jours)
Terre – Soleil	150 millions de km = 1 unité astronomique (UA)	5 mois
Terre – Mars	0,5 UA	3 mois
Terre – Saturne	9 UA	4 ans (2 ans dans le film)



2. Le voyage interstellaire

La durée du voyage

Vitesse de libération : $V_{libération} = 40\,320 \text{ km/h}$

Voyage	Distance (moyenne)	Durée
Terre – Lune	384 400 km	10h (Apollo 11 = 4 jours)
Terre – Soleil	150 millions de km = 1 unité astronomique (UA)	5 mois
Terre – Mars	0,5 UA	3 mois
Terre – Saturne	9 UA	4 ans (2 ans dans le film)
Terre – Proxima b	268 142 UA	11 073 ans



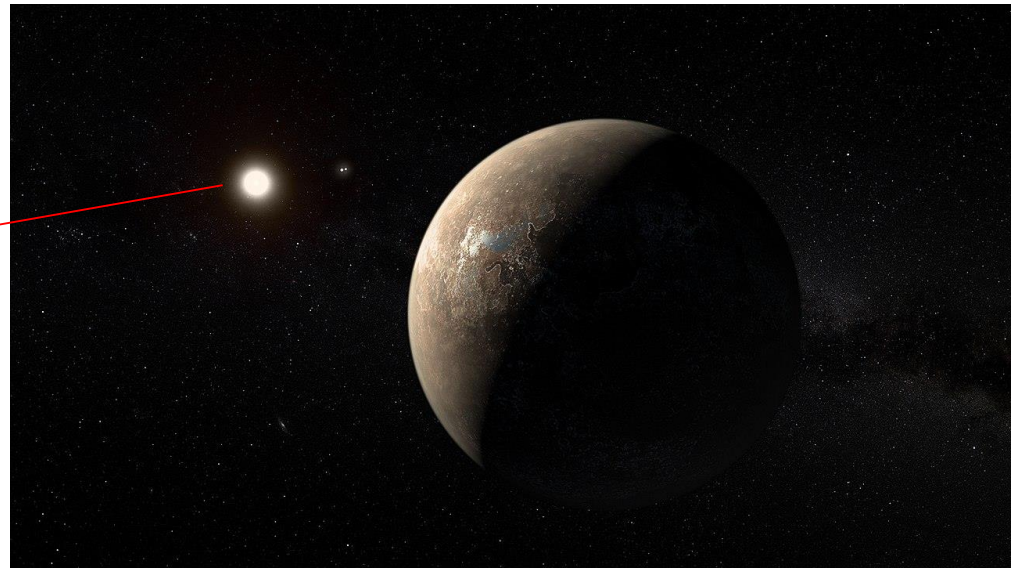
2. Le voyage interstellaire

Proxima b



Proxima Centauri

Vue artistique de Proxima b



- Exoplanète découverte en 2016
- La + proche de la planète Terre
- Située dans la « zone habitable » : température adéquate pour avoir de l'eau liquide



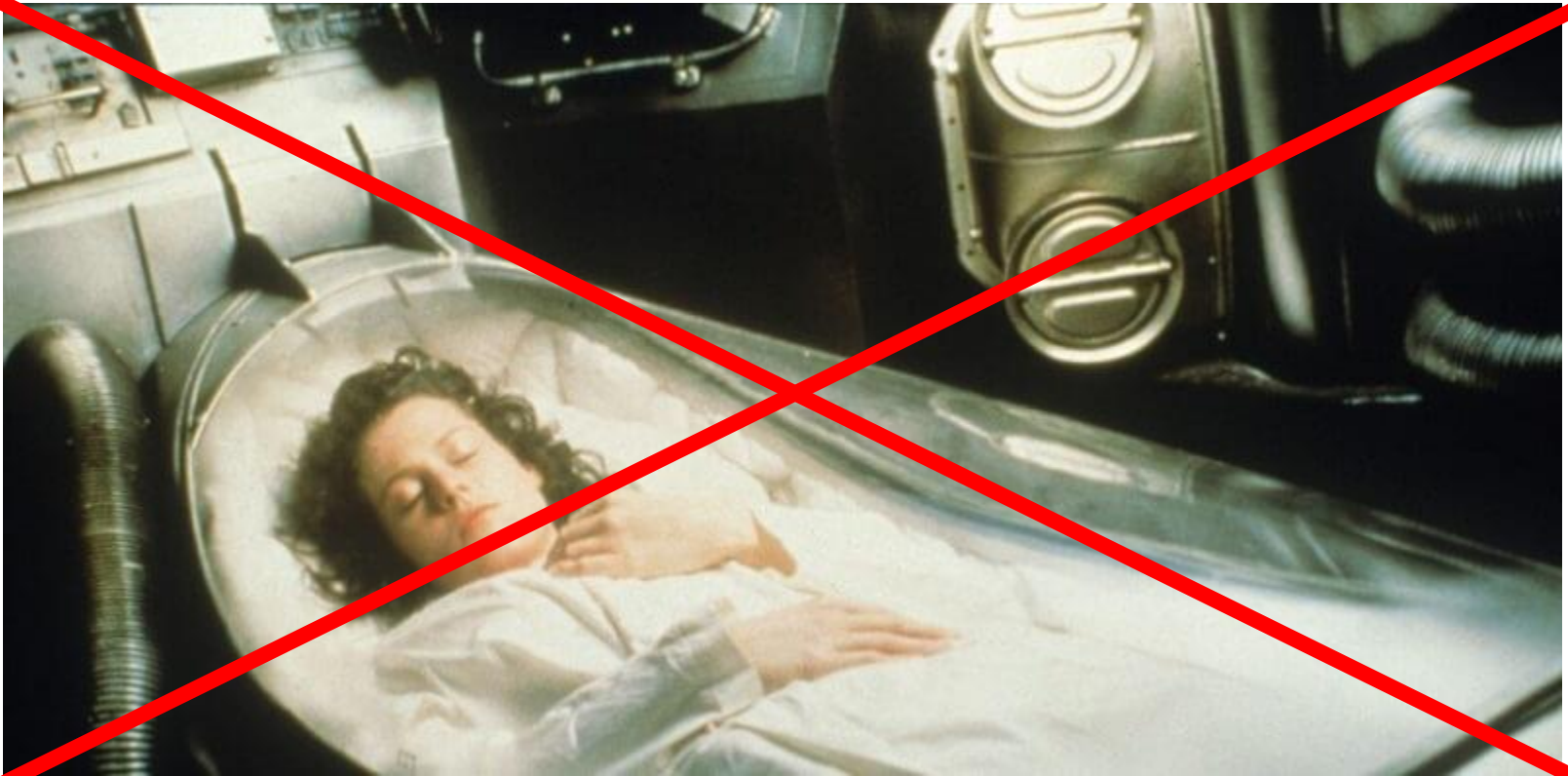
2. Le voyage interstellaire

La biostase



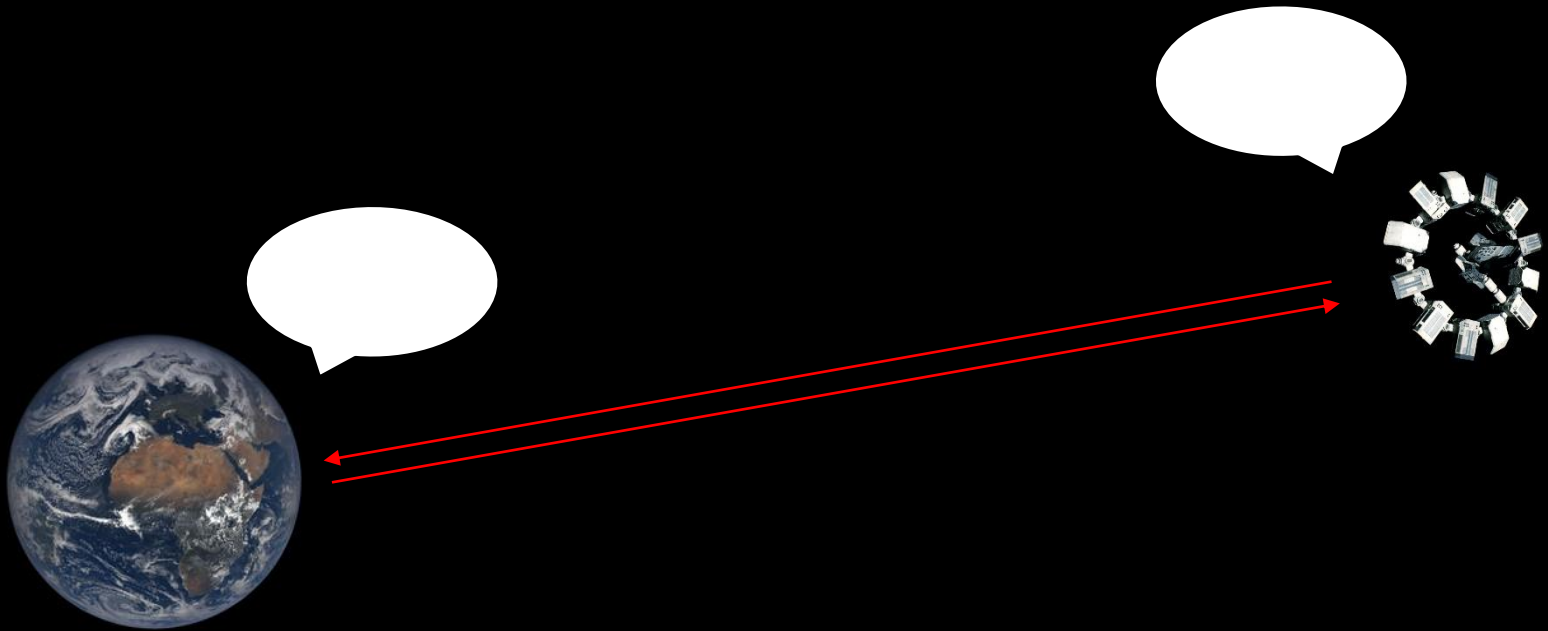
2. Le voyage interstellaire

La biostase



2. Le voyage interstellaire

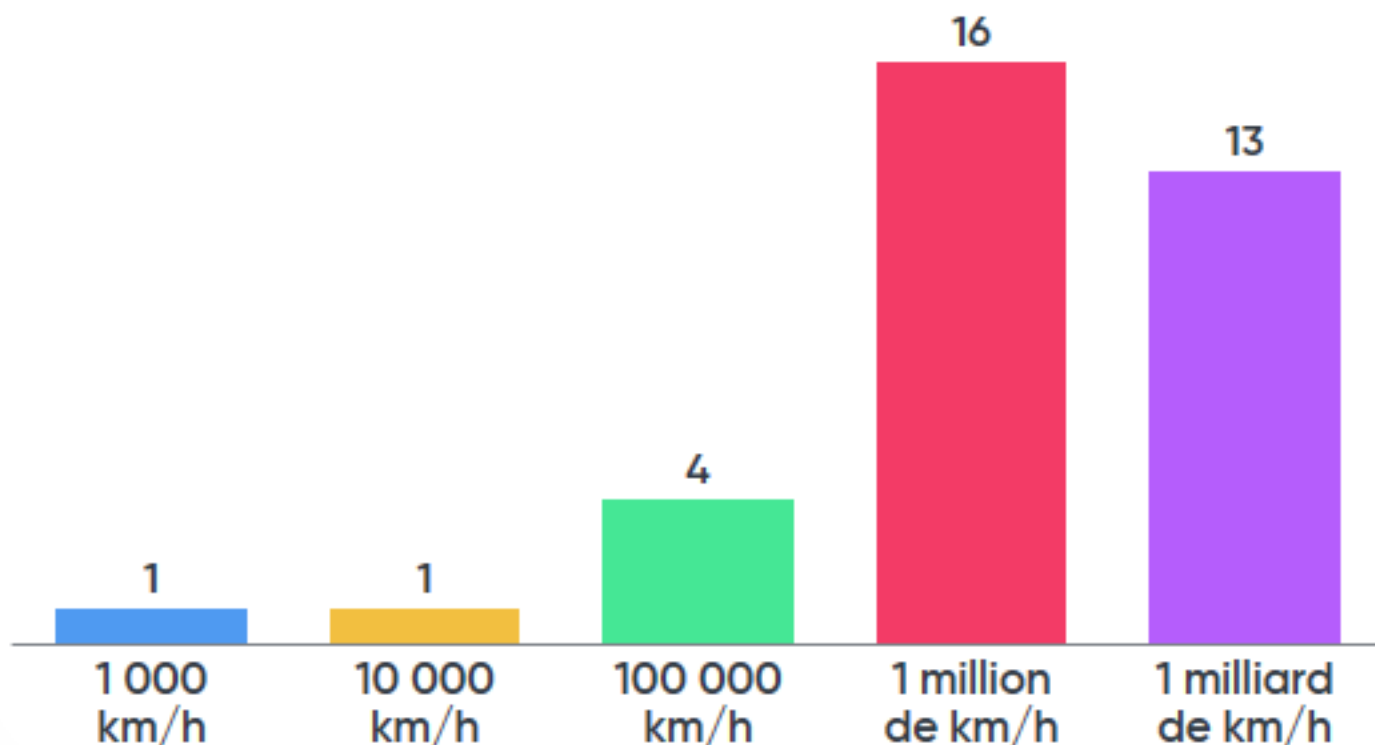
Les délais dans les communications



Go to www.menti.com and use the code **63 14 23**

Quelle est la vitesse de la lumière dans le vide ?

Mentimeter



Slide is not active

Activate

35

2. Le voyage interstellaire

Les délais dans les communications

Vitesse de la lumière dans le vide : $c = 299\,792\,458\text{ m/s} = 1\text{ milliard de km/h}$

Voyage	Distance (moyenne)	Durée
Terre – Lune	384 400 km	1,3 s
Terre – Soleil	150 millions de km = 1 unité astronomique (UA)	8,3 min
Terre – Mars	0,5 UA	4,2 min
Terre – Saturne	9 UA	1,2 h
Terre – Proxima b	268 142 UA	4,2 ans



2. Le voyage interstellaire

Les délais dans les communications

Vitesse de la lumière dans le vide : $c = 299\,792\,458\text{ m/s} = 1\text{ milliard de km/h}$

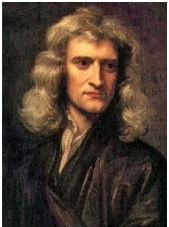
Voyage	Distance (moyenne)	Durée
Terre – Lune	384 400 km	1,3 s
Terre – Soleil	150 millions de km	8 min
Terre – Mars	220 millions de km	10 min
Terre – Saturne	9 UA	1,2 h
Terre – Proxima b	268 142 UA	4,2 ans

On définit l'**année-lumière (AL)** comme :
la distance parcourue par la lumière en une année.



2. Le voyage interstellaire

Peut-on voyager encore plus rapidement ?

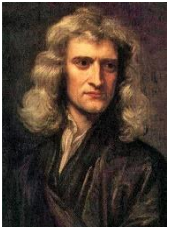


- D'après [Newton \(1687\)](#),
pas de vitesse limite : elle peut être aussi grande que l'on veut.

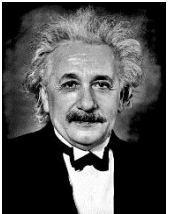


2. Le voyage interstellaire

Peut-on voyager encore plus rapidement ?



- D'après **Newton (1687)**,
pas de vitesse limite : elle peut être aussi grande que l'on veut.



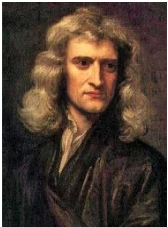
- D'après **Einstein (1905)**, il y a une vitesse limite que l'on ne pourra pas dépasser : **la vitesse de la lumière dans le vide notée c .**

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 1 \text{ milliard de km/h}$$

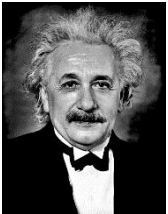


2. Le voyage interstellaire

Peut-on voyager encore plus rapidement ?

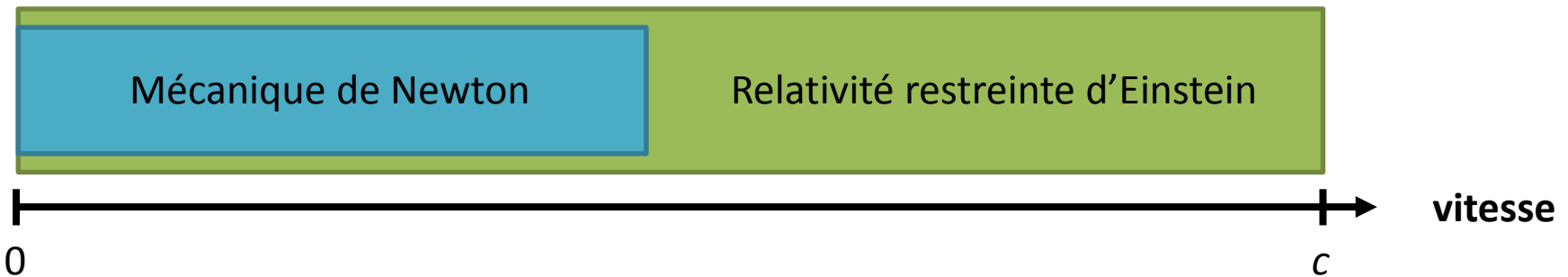


- D'après **Newton (1687)**, pas de vitesse limite : elle peut être aussi grande que l'on veut.



- D'après **Einstein (1905)**, il y a une vitesse limite que l'on ne pourra pas dépasser : la **vitesse de la lumière dans le vide notée c** .

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 1 \text{ milliard de km/h}$$



2. Le voyage interstellaire

Relativité restreinte : pourquoi « relativité » ?

- Les lois de la physique sont les mêmes dans les référentiels en mouvement rectilignes uniformes les un par rapport aux autres.



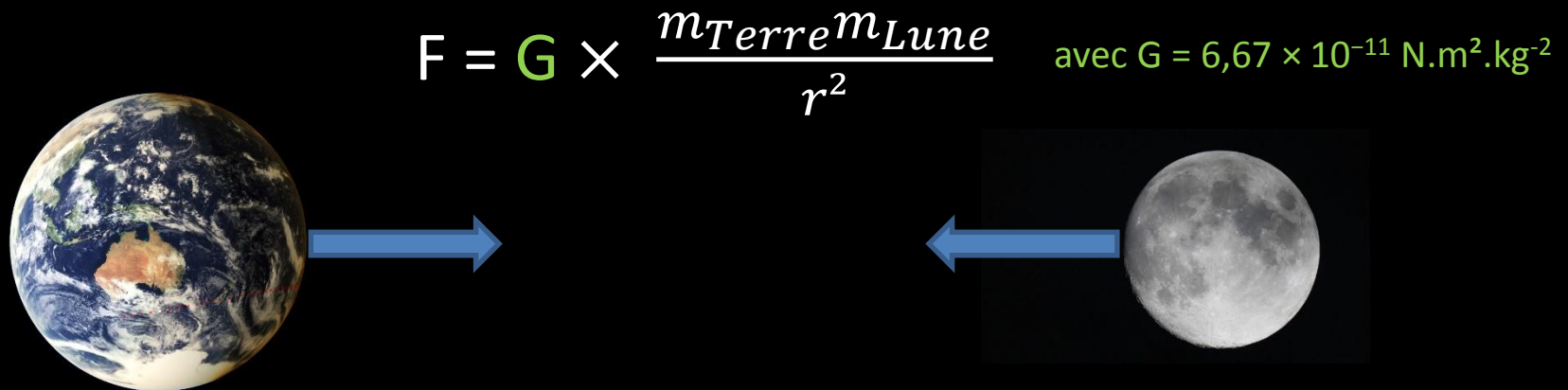
- Principe établi déjà par Galilée. Les transformations mathématiques pour passer d'un référentiel à un autre ont été modifiées par Einstein pour que :
 - La vitesse de la lumière dans le vide soit la même quelque soit le référentiel.
 - La vitesse de la lumière dans le vide soit indépassable.



2. Le voyage interstellaire

Relativité restreinte : pourquoi « relativité » ?

- « Restreinte » = sans considérer la gravitation
- Pourquoi la gravitation pose problème ?

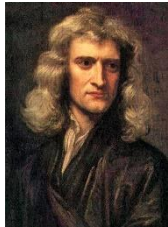


L'attraction gravitationnelle entre les corps massifs est instantanée chez Newton : elle se propage à une vitesse infinie donc supérieure à c
→ Cela va à l'encontre de la relativité d'Einstein.

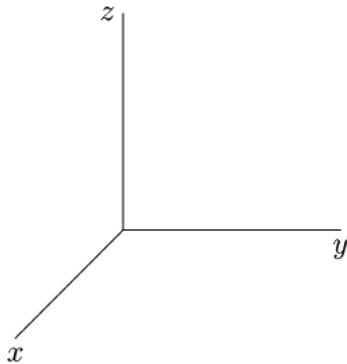


2. Le voyage interstellaire

Représentation de l'espace et du temps



Espace : 3D

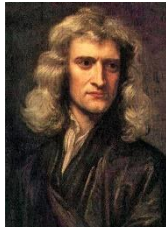


Temps : 1D

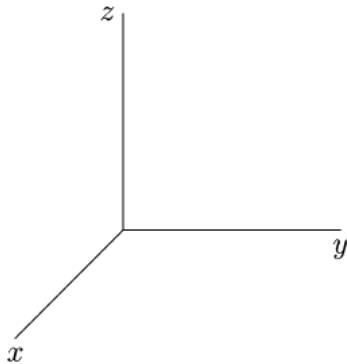


2. Le voyage interstellaire

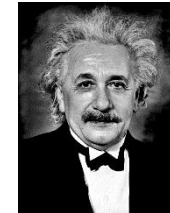
Représentation de l'espace et du temps



Espace : 3D



Temps : 1D

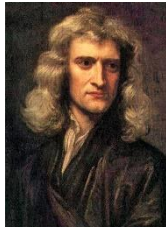


Temps & espace sont liés entre eux
→ **espace-temps** : 4D

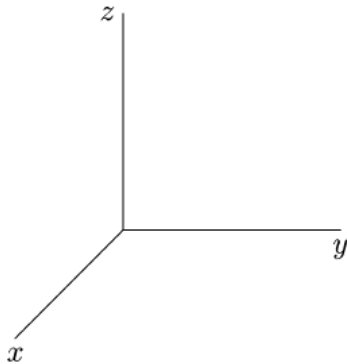


2. Le voyage interstellaire

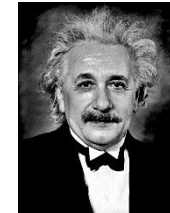
Représentation de l'espace et du temps



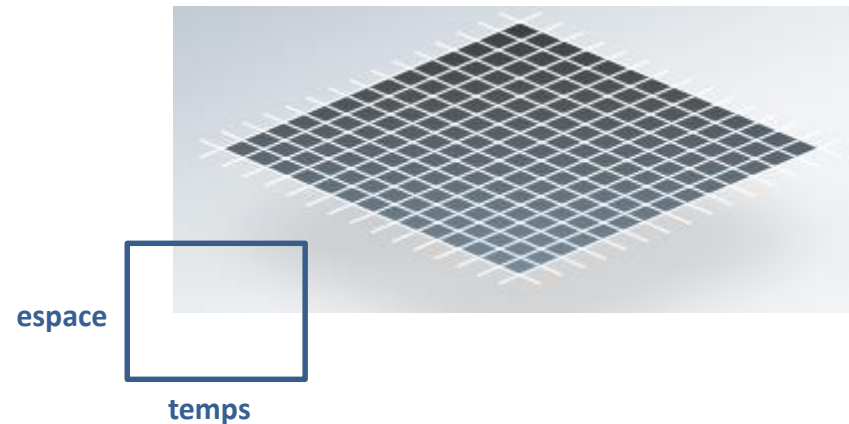
Espace : 3D



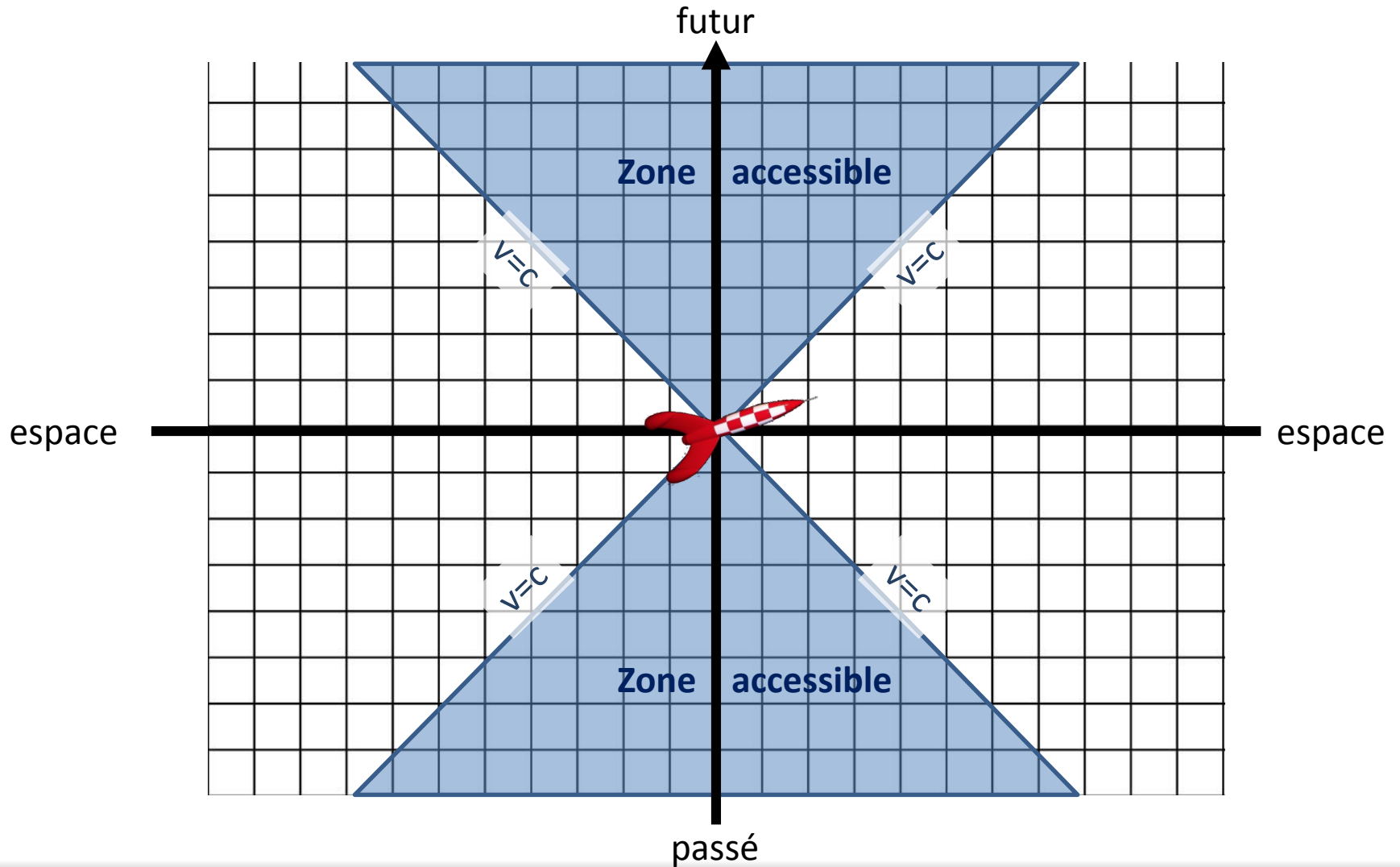
Temps : 1D



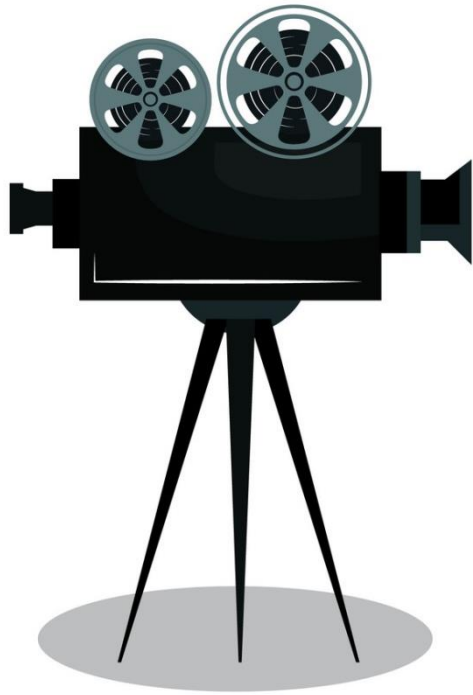
Temps & espace sont liés entre eux
→ **espace-temps** : 4D



2. Le voyage interstellaire



2. Le voyage interstellaire



Interstellar (2014)
« Les adieux »



Select or create a presentation

+ Create presentation

Select an existing presentation from your account

Select your presentation



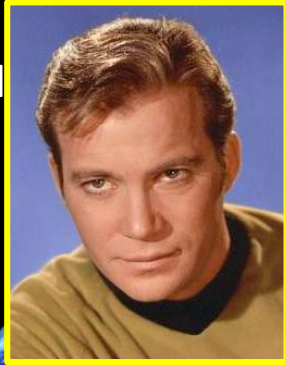
Are you stuck or missing updates? [Refresh](#)

🚪 Log out

2. Le voyage interstellaire

Le parad

ux



Voyage d'un an
à une vitesse proche de la
vitesse de la lumière



C'est celui qui subit les
accélérations et les décélérations
qui est le plus jeune.



2. Le voyage interstellaire

Dilatation temporelle

Les durées ne sont pas les mêmes d'un référentiel à un autre.

Dilatation temporelle due à la vitesse

$$d_v = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Vitesse du vaisseau
mesurée depuis
une planète

Vitesse de la lumière
dans le vide
= 299 792 458 m/s

Si une 1s s'écoule dans le vaisseau,
il s'écoule sur la planète une durée égale à $1s \times d_v$



2. Le voyage interstellaire

Dilatation temporelle

Type de déplacement	Vitesse du déplacement v	Dilatation temporelle due à la vitesse d_v (15 chiffres après virgule)
Un marcheur	3 km/h	1,0000000000000000



2. Le voyage interstellaire

Dilatation temporelle

Type de déplacement	Vitesse du déplacement v	Dilatation temporelle due à la vitesse d_v (15 chiffres après virgule)
Un marcheur	3 km/h	1,0000000000000000
Une voiture sur autoroute	110 km/h	1,0000000000000010



2. Le voyage interstellaire

Dilatation temporelle

Type de déplacement	Vitesse du déplacement v	Dilatation temporelle due à la vitesse d_v (15 chiffres après virgule)
Un marcheur	3 km/h	1,0000000000000000
Une voiture sur autoroute	110 km/h	1,0000000000000010
Un avion	900 km/h	1,0000000000000350



2. Le voyage interstellaire

Dilatation temporelle

Type de déplacement	Vitesse du déplacement v	Dilatation temporelle due à la vitesse d_v (15 chiffres après virgule)
Un marcheur	3 km/h	1,0000000000000000
Une voiture sur autoroute	110 km/h	1,0000000000000010
Un avion	900 km/h	1,0000000000000350
Le son dans l'air	1 125 km/h	1,0000000000000540



2. Le voyage interstellaire

Dilatation temporelle

Type de déplacement	Vitesse du déplacement v	Dilatation temporelle due à la vitesse d_v (15 chiffres après virgule)
Un marcheur	3 km/h	1,0000000000000000
Une voiture sur autoroute	110 km/h	1,0000000000000010
Un avion	900 km/h	1,0000000000000350
Le son dans l'air	1 125 km/h	1,0000000000000540
La vitesse de libération pour la Terre	40 320 km/h	1,000000000697850



2. Le voyage interstellaire

Dilatation temporelle

Type de déplacement	Vitesse du déplacement v	Dilatation temporelle due à la vitesse d_v (15 chiffres après virgule)
Un marcheur	3 km/h	1,0000000000000000
Une voiture sur autoroute	110 km/h	1,0000000000000010
Un avion	900 km/h	1,0000000000000350
Le son dans l'air	1 125 km/h	1,0000000000000540
La vitesse de libération pour la Terre	40 320 km/h	1,000000000697850
Les muons cosmiques dans l'atmosphère terrestre	99,5% de c	10,012523486435300



2. Le voyage interstellaire

Dilatation temporelle

Type de déplacement	Vitesse du déplacement v	Dilatation temporelle due à la vitesse d_v (15 chiffres après virgule)
Un marcheur	3 km/h	1,0000000000000000
Une voiture sur autoroute	110 km/h	1,0000000000000010
Un avion	900 km/h	1,0000000000000350
Le son dans l'air	1 125 km/h	1,0000000000000540
La vitesse de libération pour la Terre	40 320 km/h	1,000000000697850
Les muons cosmiques dans l'atmosphère terrestre	99,5% de c	10,012523486435300
La lumière dans le vide	c	infini



2. Le voyage interstellaire

Dilatation temporelle

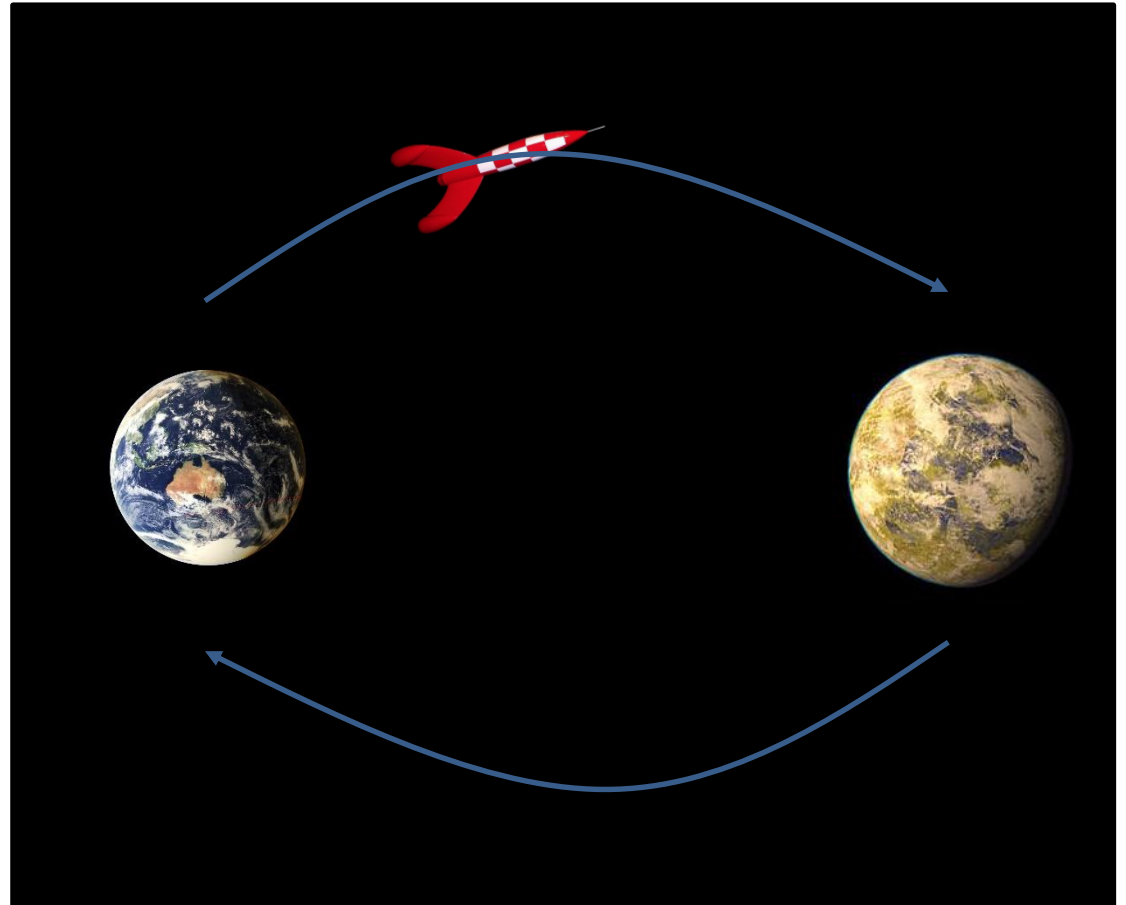
Type de déplacement	Vitesse du déplacement v	Dilatation temporelle due à la vitesse d_v (15 chiffres après virgule)
Un marcheur	3 km/h	1,0000000000000000
Une voiture sur autoroute	110 km/h	1,0000000000000010
Un avion	900 km/h	1,0000000000000350
Le son dans l'air	1 125 km/h	1,0000000000000540
La vitesse de libération pour la Terre	40 320 km/h	1,000000000697850
Les muons cosmiques dans l'atmosphère terrestre	99,5% de c	10,012523486435300
La lumière dans le vide	c	infini

La mécanique de Newton peut être utilisée dans ces cas là.



2. Le voyage interstellaire

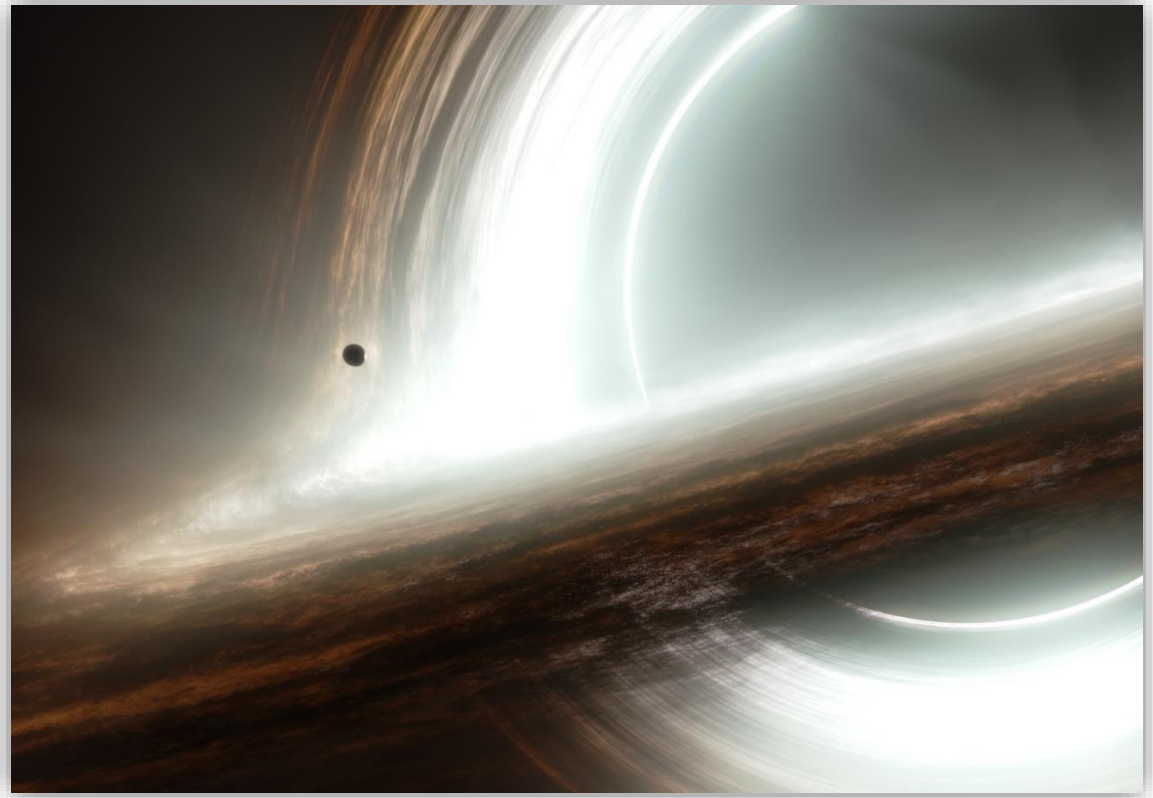
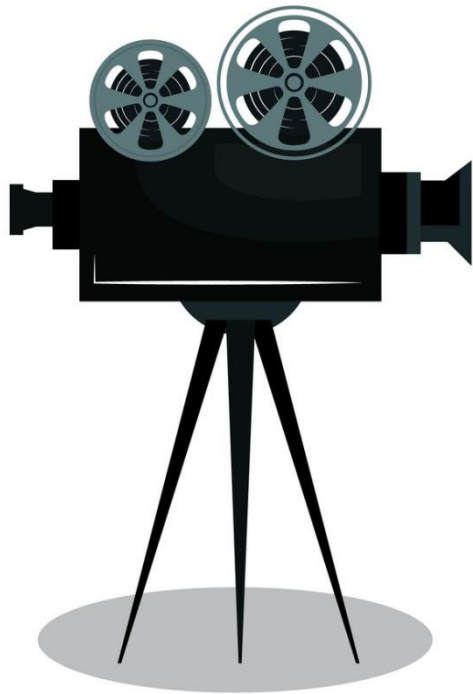
Dilatation temporelle dans la fiction : « La planète des singes » de Pierre Boule (1963)



A photograph of a theater interior. The foreground is filled with rows of red upholstered seats, receding towards a large, bright white screen at the far end of the stage. The screen displays the text "3. Les trous noirs" in a simple, black, sans-serif font. The theater walls and ceiling are dark, and the overall atmosphere is quiet and focused on the presentation on the screen.

3. Les trous noirs

3. Les trous noirs

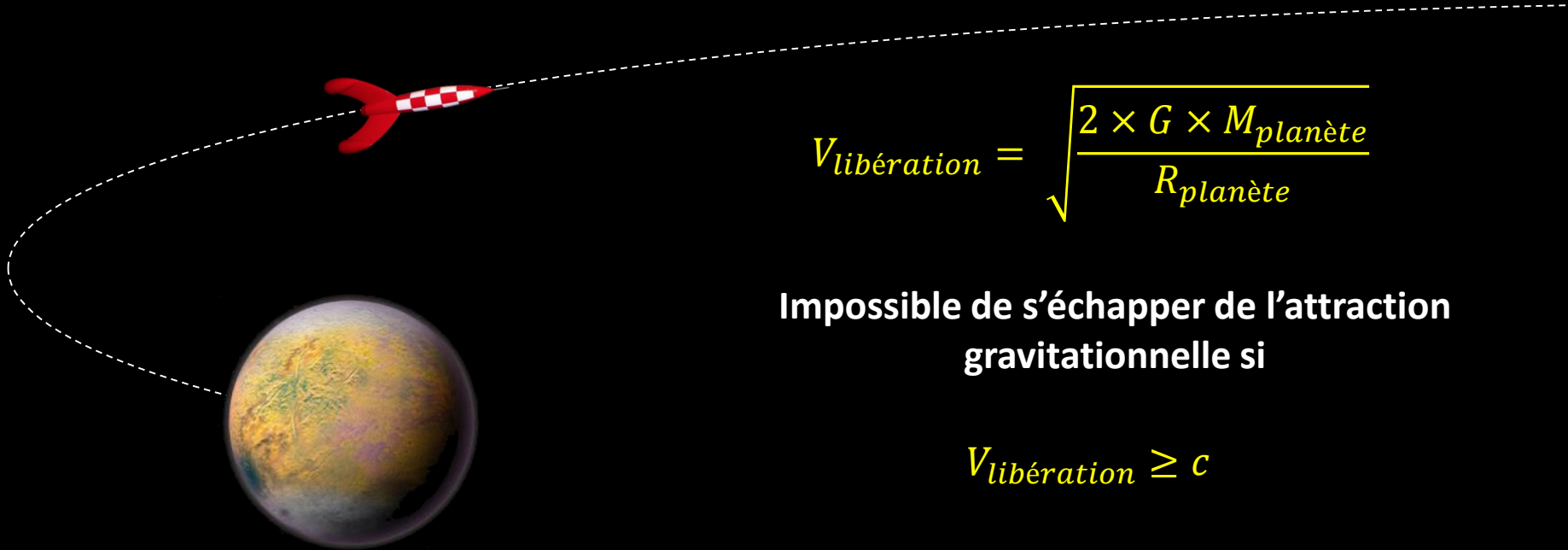


Interstellar (2014)
« Trou noir »



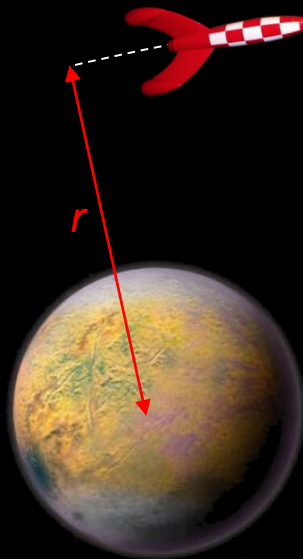
3. Les trous noirs

Tentative de description par la mécanique de Newton : la planète que l'on ne peut pas quitter



3. Les trous noirs

Tentative de description par la mécanique de Newton : la planète que l'on ne peut pas quitter



On peut définir la vitesse de libération pour un point dans l'espace

$$V_{libération} = \sqrt{\frac{2 \times G \times M_{planète}}{r}}$$

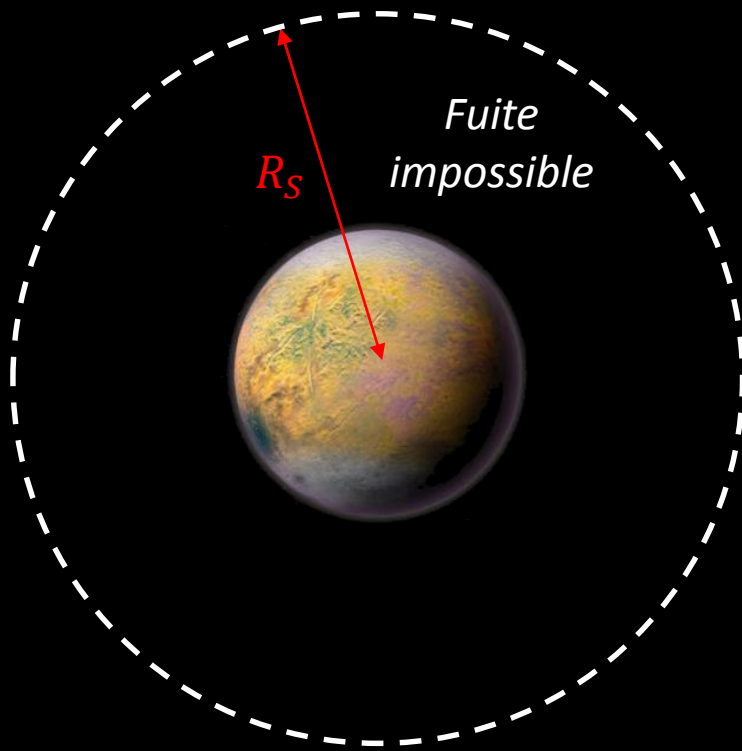
Impossible de s'échapper de l'attraction gravitationnelle si

$$V_{libération} \geq c$$



3. Les trous noirs

Tentative de description par la mécanique de Newton : la planète que l'on ne peut pas quitter



On définit le rayon de Schwarzschild

$$R_S = \frac{2 \times G \times M}{c^2}$$

$$R_S = 1,49 \times 10^{-27} \times M$$

en mètre

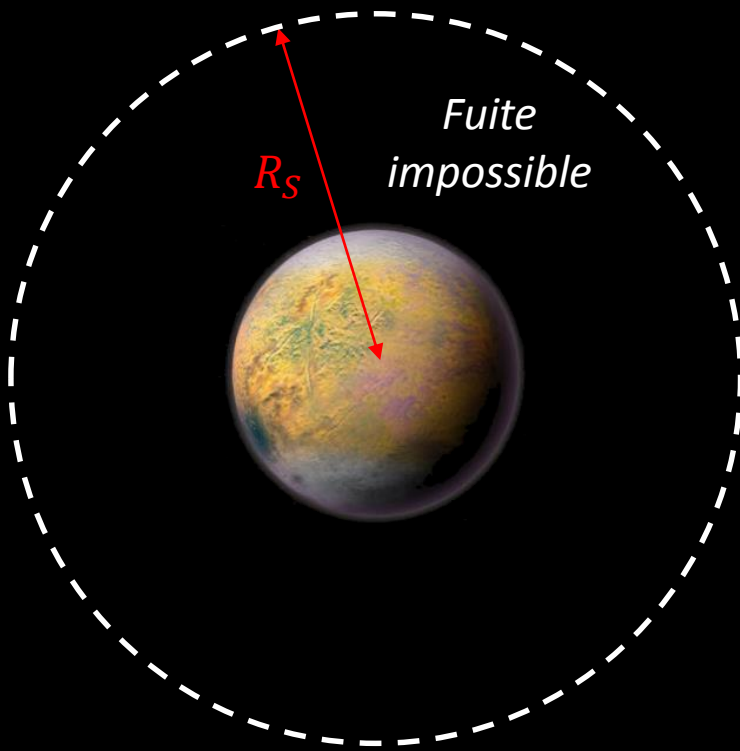
en kilogramme



3. Les trous noirs

Tentative de description par la mécanique de Newton : la planète que l'on ne peut pas quitter

Pouvons-nous définir un rayon de Schwarzschild à la Terre ?



$$m_{\text{Terre}} = 5,972 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$R_{\text{Terre}} = 6\,371\,000 \text{ m}$$

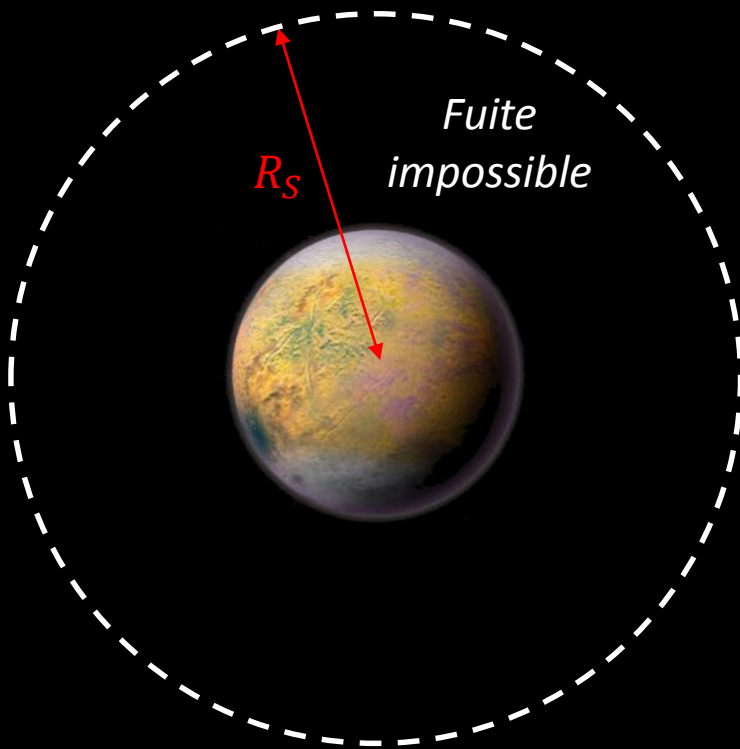
$$R_S = 1,49 \times 10^{-27} \times M$$



3. Les trous noirs

Tentative de description par la mécanique de Newton : la planète que l'on ne peut pas quitter

Pouvons-nous définir un rayon de Schwarzschild à la Terre ?



$$m_{\text{Terre}} = 5,972 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$R_{\text{Terre}} = 6\,371\,000 \text{ m}$$

$$R_S = 1,49 \times 10^{-27} \times M$$

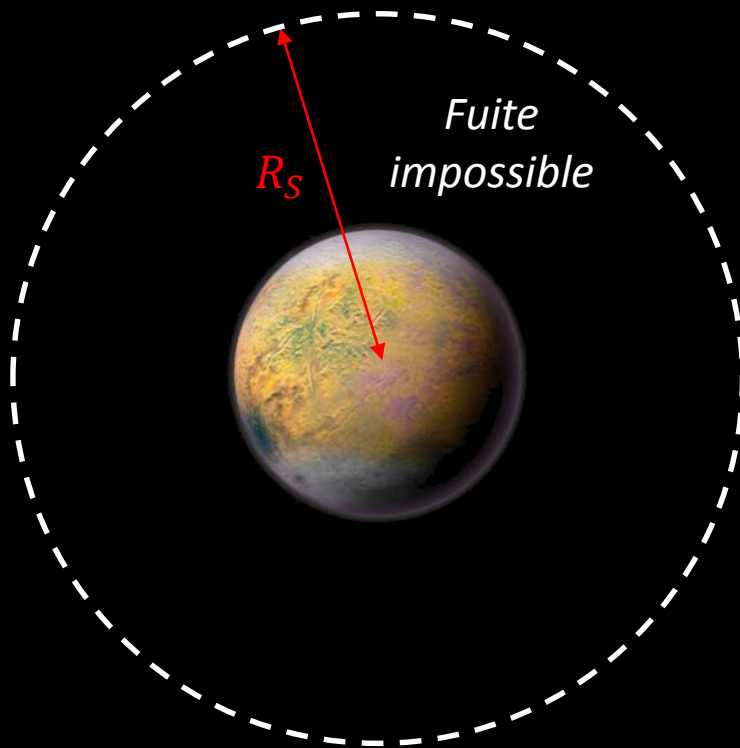
- Si on prend M égale à masse de la Terre, alors $R_S = 0,009 \text{ m} = 9 \text{ mm}$



3. Les trous noirs

Tentative de description par la mécanique de Newton : la planète que l'on ne peut pas quitter

Pouvons-nous définir un rayon de Schwarzschild à la Terre ?



$$m_{\text{Terre}} = 5,972 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$R_{\text{Terre}} = 6\,371\,000 \text{ m}$$

$$R_S = 1,49 \times 10^{-27} \times M$$

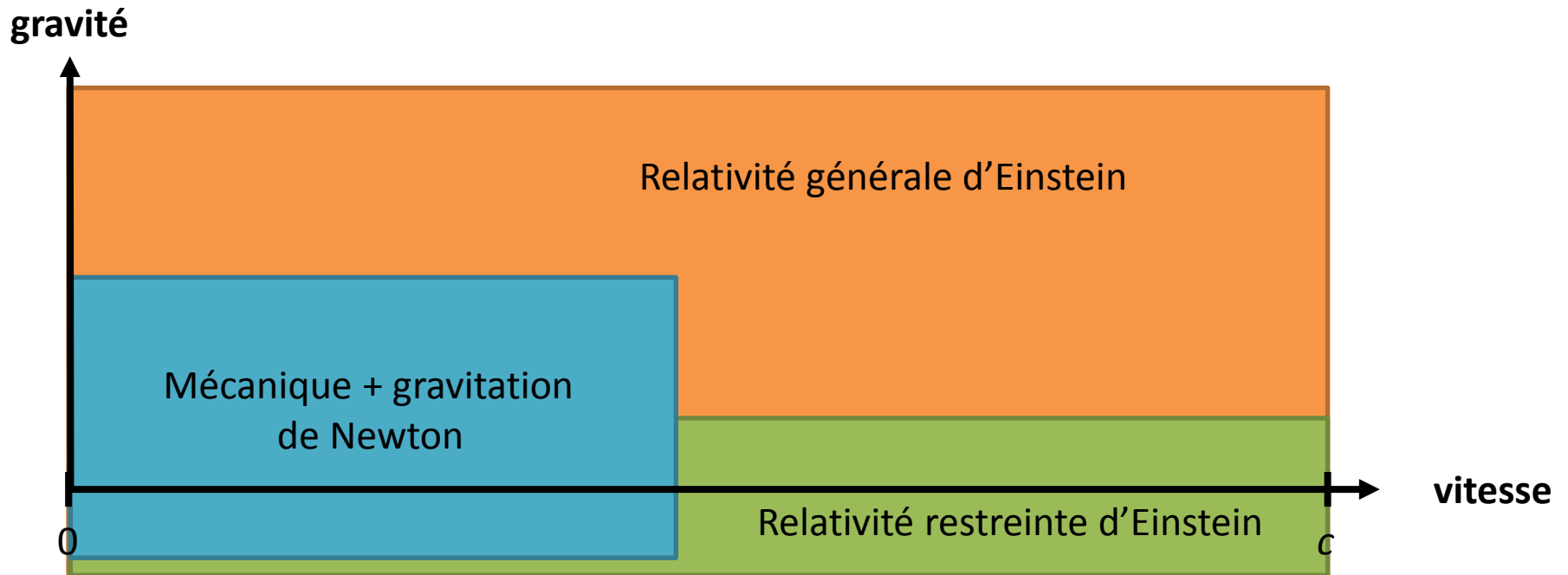
- Si on prend M égale à masse de la Terre, alors $R_S = 0,009 \text{ m} = 9 \text{ mm}$
- Si on prend R_S égal au rayon de la Terre, alors $M = 4,28 \times 10^{33} \text{ kg} = 1 \text{ million de fois de } m_{\text{Terre}}$



3. Les trous noirs

La relativité générale

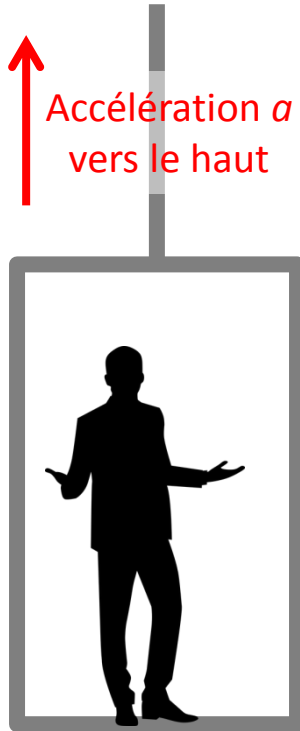
Les trous noirs ne peuvent être décrits que dans le cadre de la « relativité générale » :
Relativité restreinte + gravitation



3. Les trous noirs

Principe d'équivalence : accélération \leftrightarrow gravité

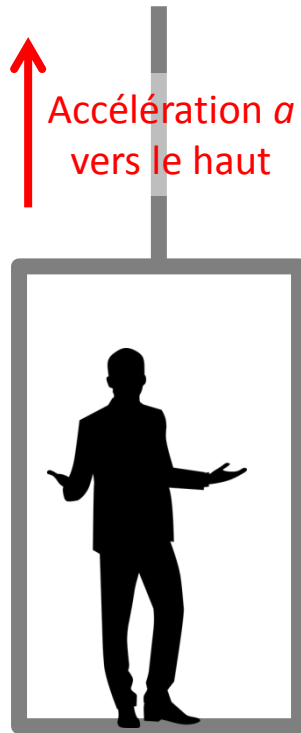
Dans l'espace en absence de toutes forces,
l'accélération reproduit la pesanteur.



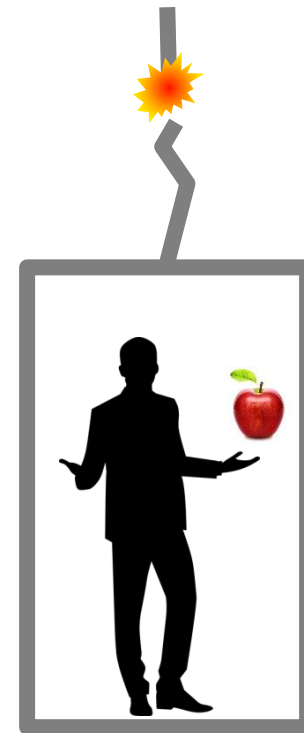
3. Les trous noirs

Principe d'équivalence : accélération \leftrightarrow gravité

Dans l'espace en absence de toutes forces, l'accélération reproduit la pesanteur.



Sur Terre, la chute libre permet d'annuler la gravité

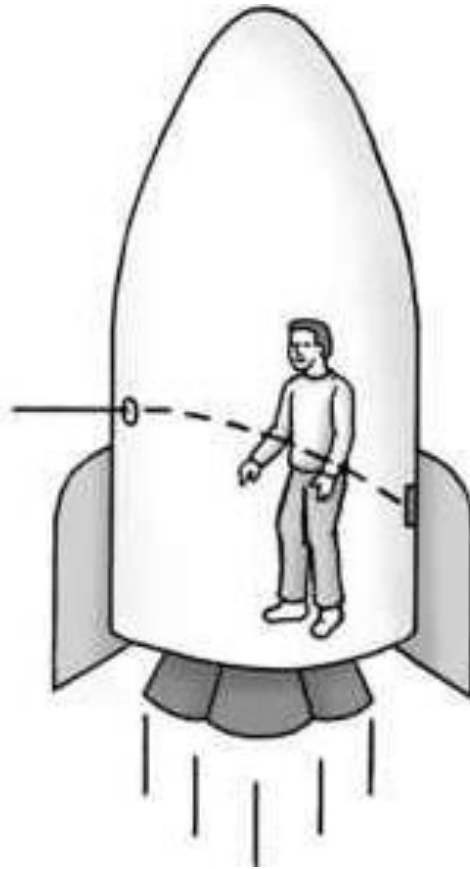


3. Les trous noirs

Principe d'équivalence : accélération ↔ gravité

La gravitation affecte la lumière :

elle courbe sa trajectoire.

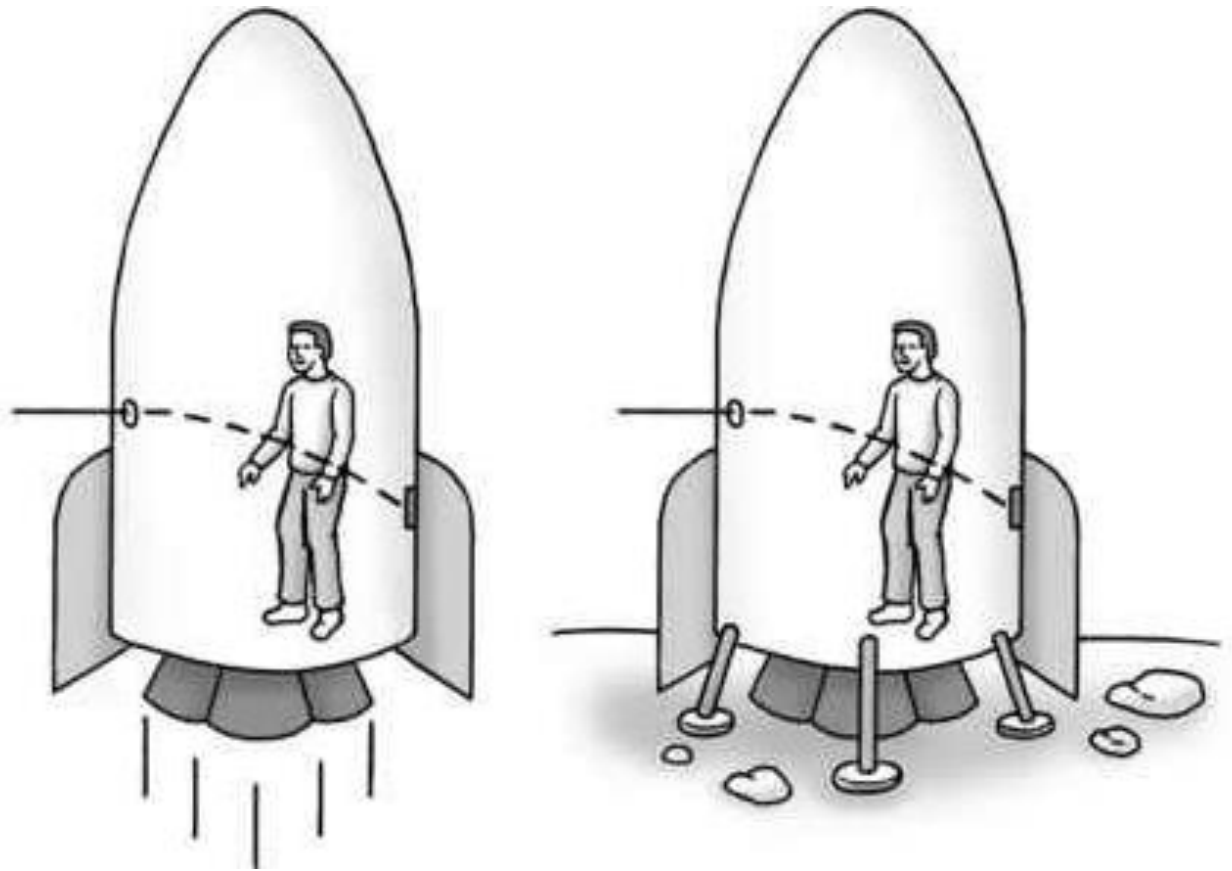


3. Les trous noirs

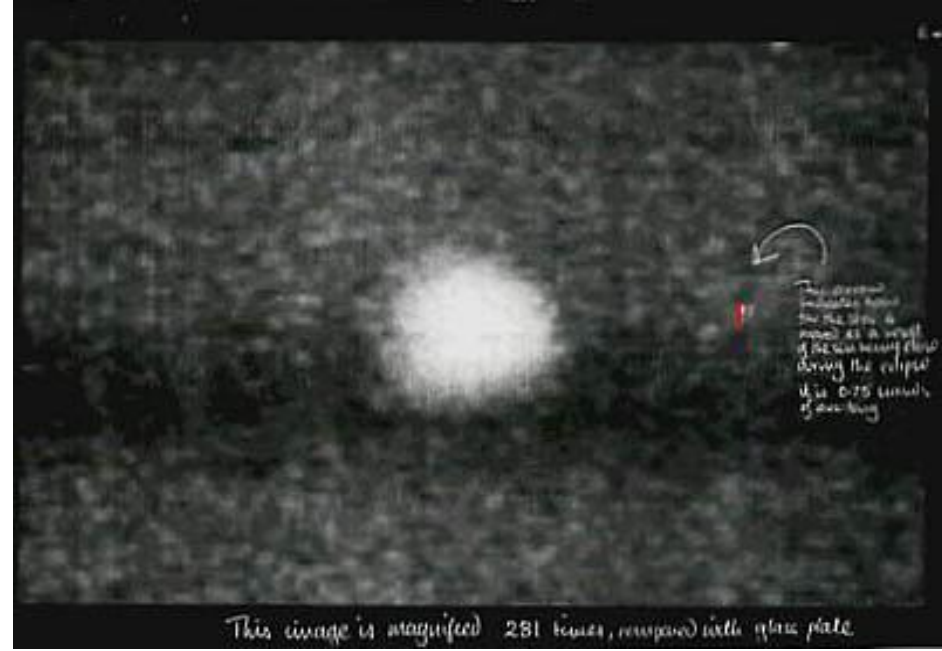
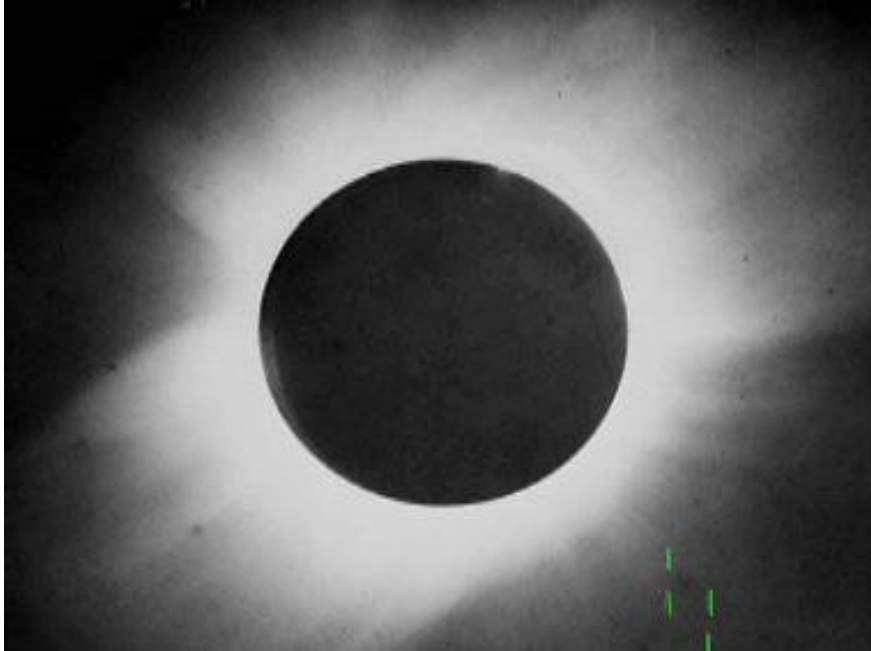
Principe d'équivalence : accélération ↔ gravité

La gravitation affecte la lumière :

elle courbe sa trajectoire.



3. Les trous noirs



Sir Eddington, 1919 – Eclipse de Soleil
→ « Espace-temps » courbe !



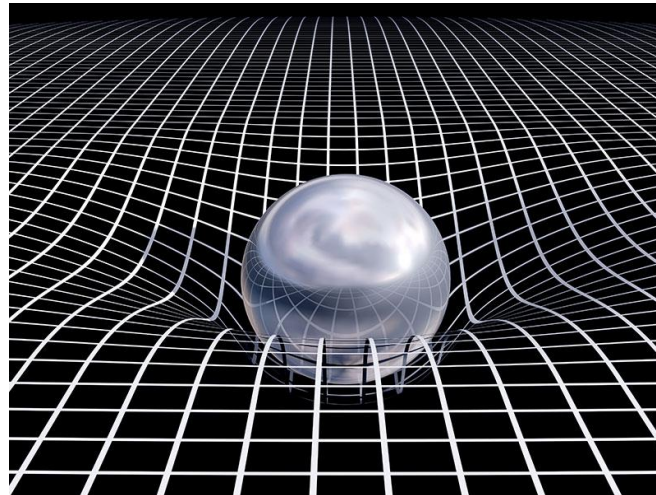
3. Les trous noirs

L'équation d'Einstein (1915)

Il s'agit d'une équation locale : uniquement valable dans une région proche du point étudié

$$G = \frac{8\pi G}{c^4} T$$

Objet mathématique
représentant
la déformation
de la région d'espace-
temps étudiée

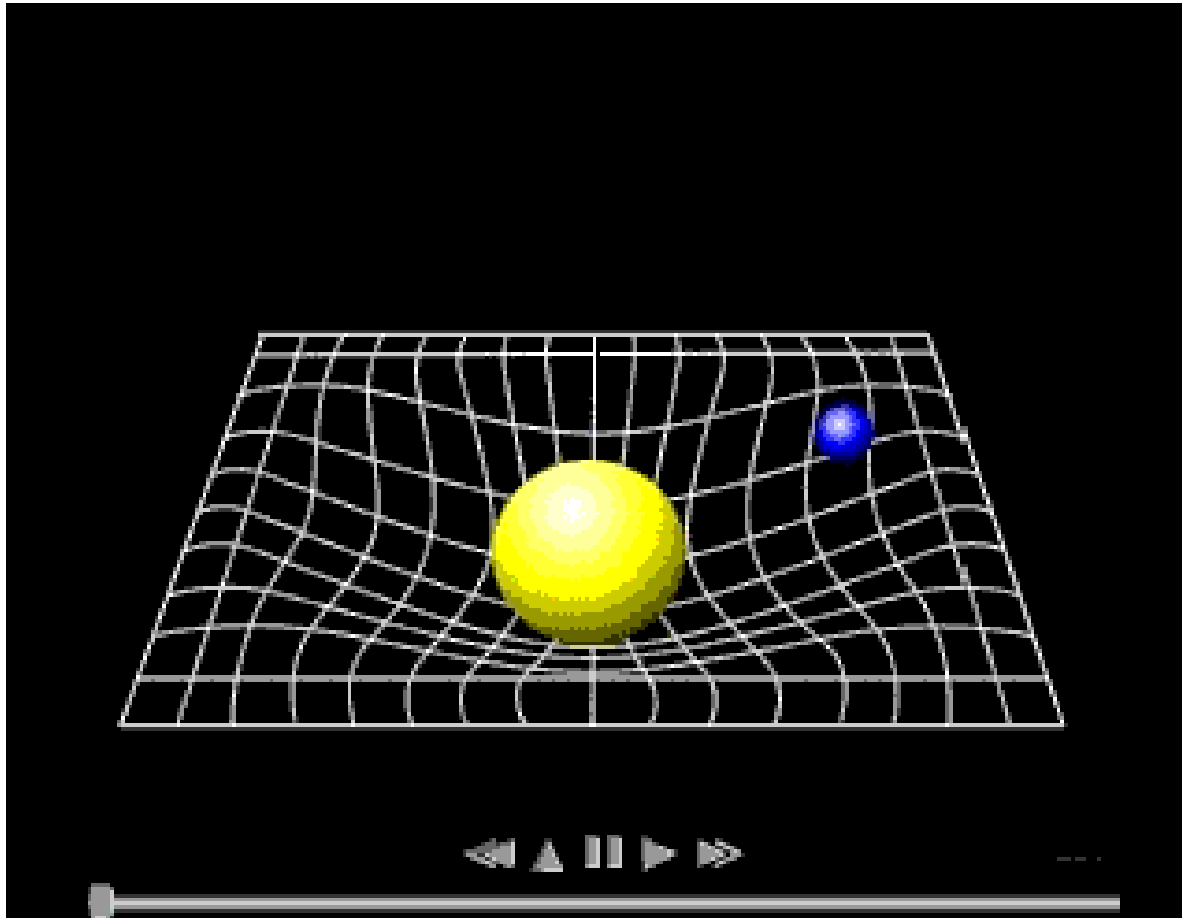


Objet mathématique
représentant
la distribution
en énergie et en masse
dans la région d'espace-
temps étudiée



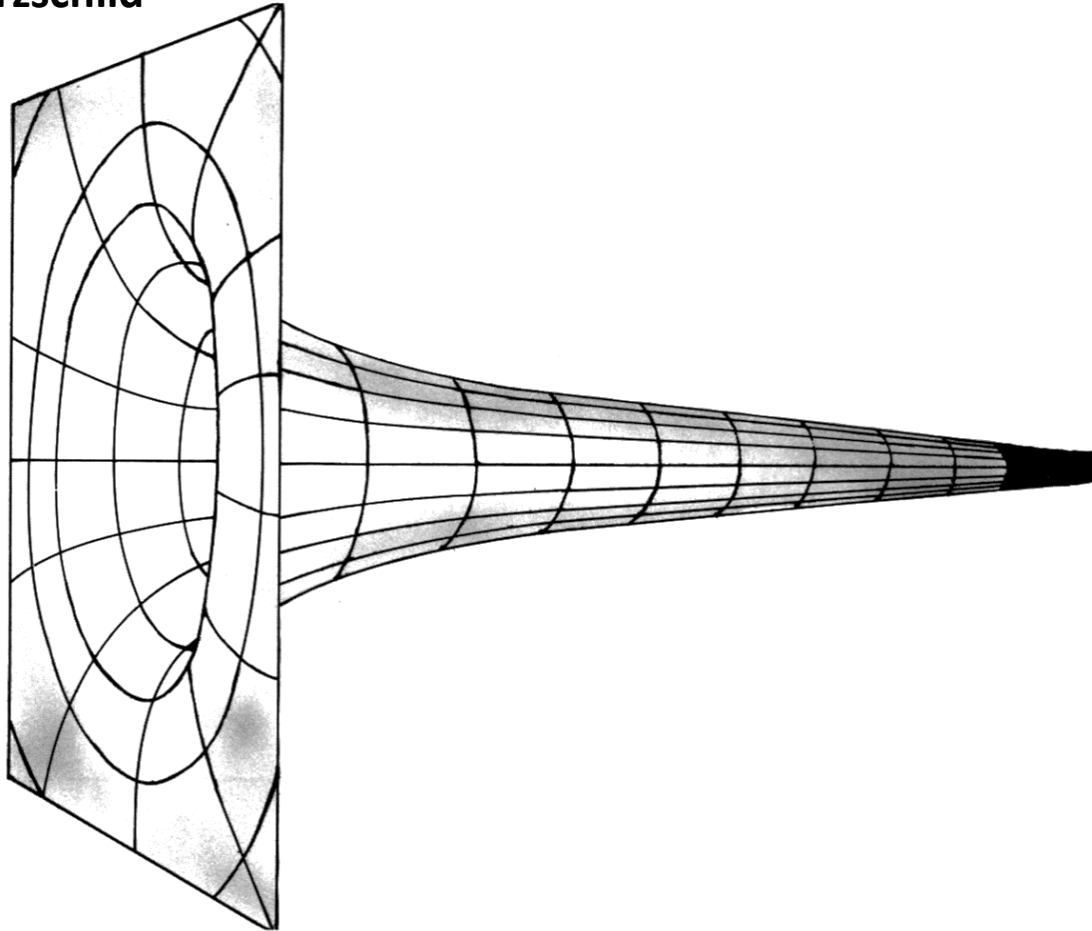
3. Les trous noirs

Orbite de la Terre autour du Soleil



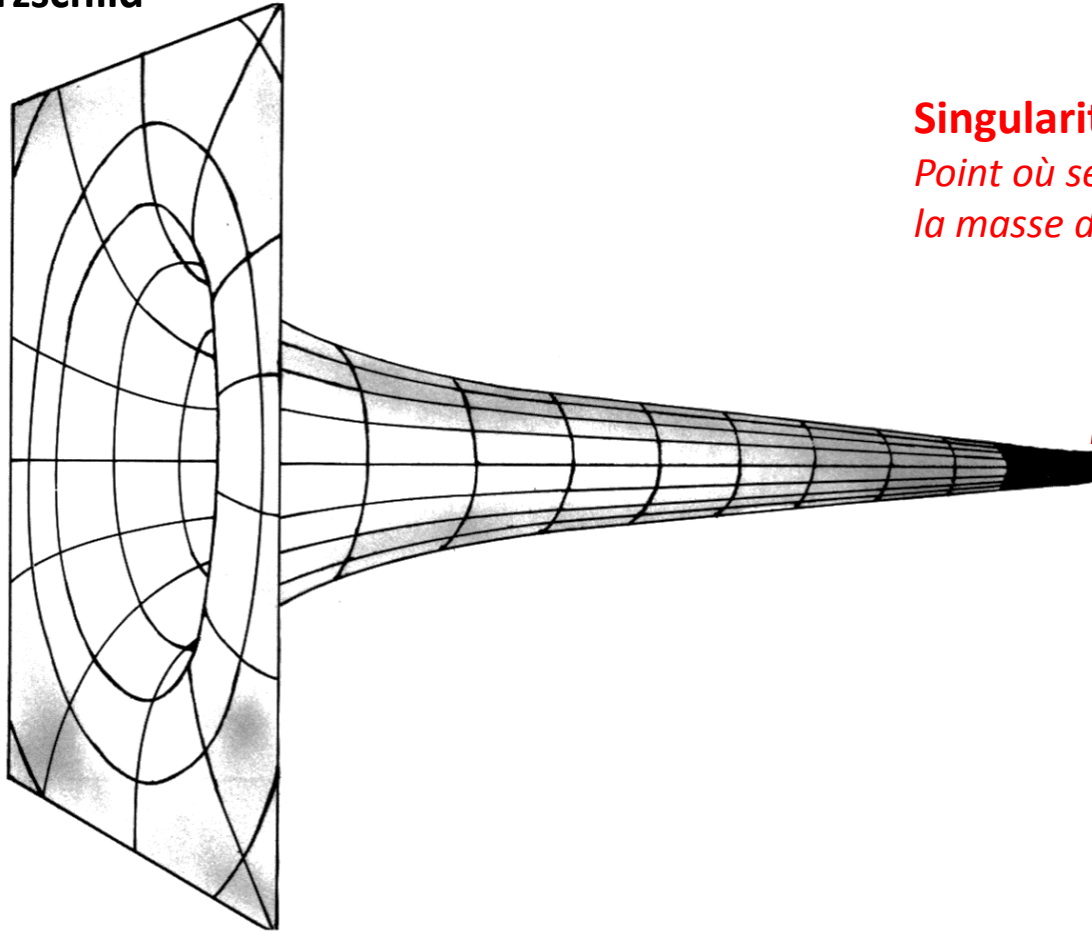
3. Les trous noirs

Caractéristique d'un trou noir
de Schwarzschild



3. Les trous noirs

Caractéristique d'un trou noir
de Schwarzschild



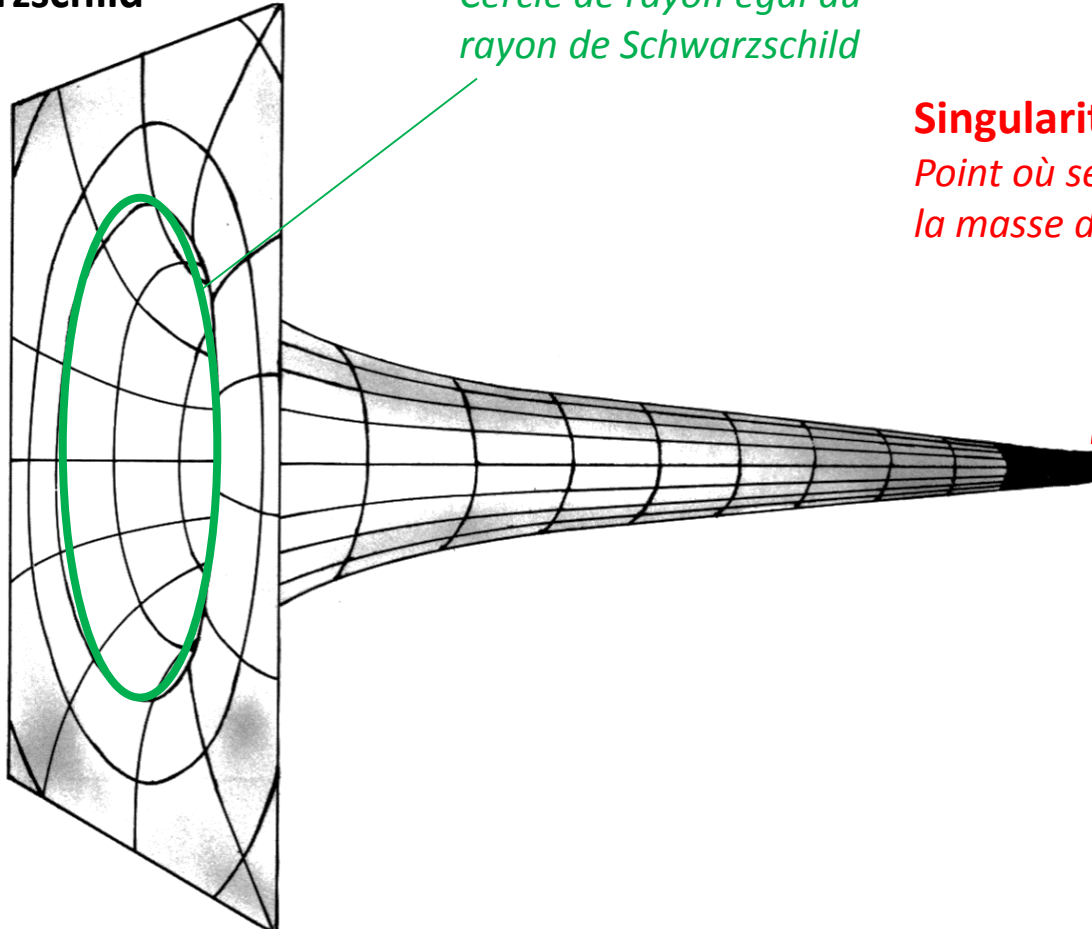
Singularité :

*Point où se concentre toute
la masse du trou noir*



3. Les trous noirs

Caractéristique d'un trou noir de Schwarzschild



Horizon

Cercle de rayon égal au rayon de Schwarzschild

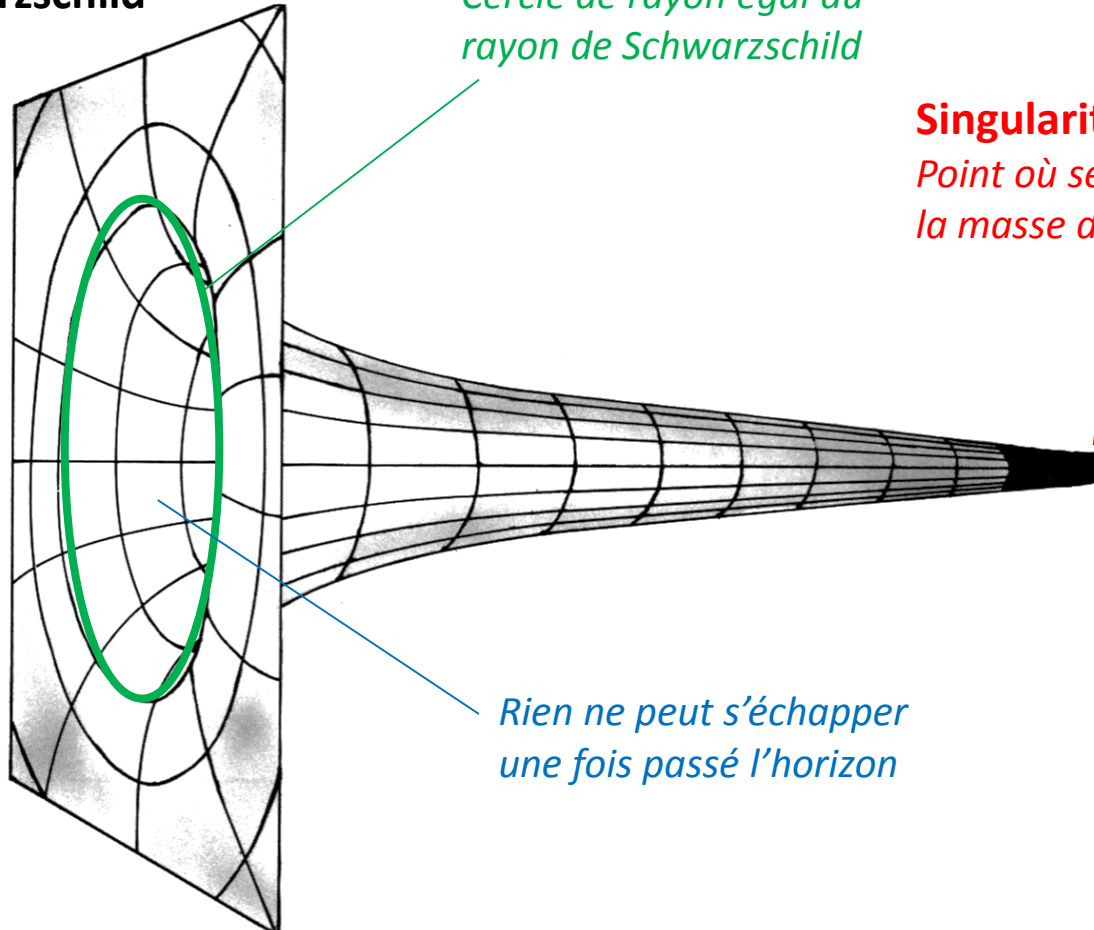
Singularité :

Point où se concentre toute la masse du trou noir



3. Les trous noirs

Caractéristique d'un trou noir de Schwarzschild



Horizon

Cercle de rayon égal au rayon de Schwarzschild

Singularité :

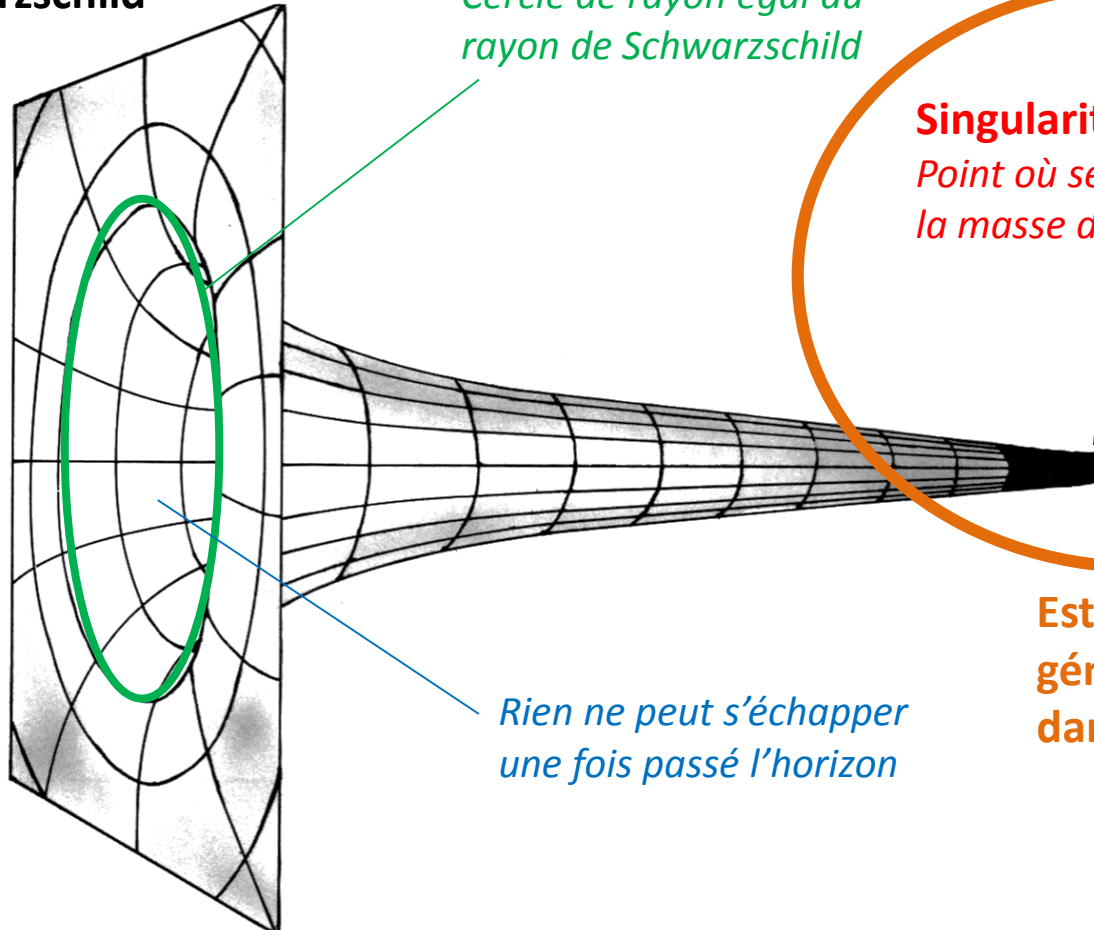
Point où se concentre toute la masse du trou noir

Rien ne peut s'échapper une fois passé l'horizon



3. Les trous noirs

Caractéristique d'un trou noir de Schwarzschild



Horizon

Cercle de rayon égal au rayon de Schwarzschild

Singularité :

Point où se concentre toute la masse du trou noir

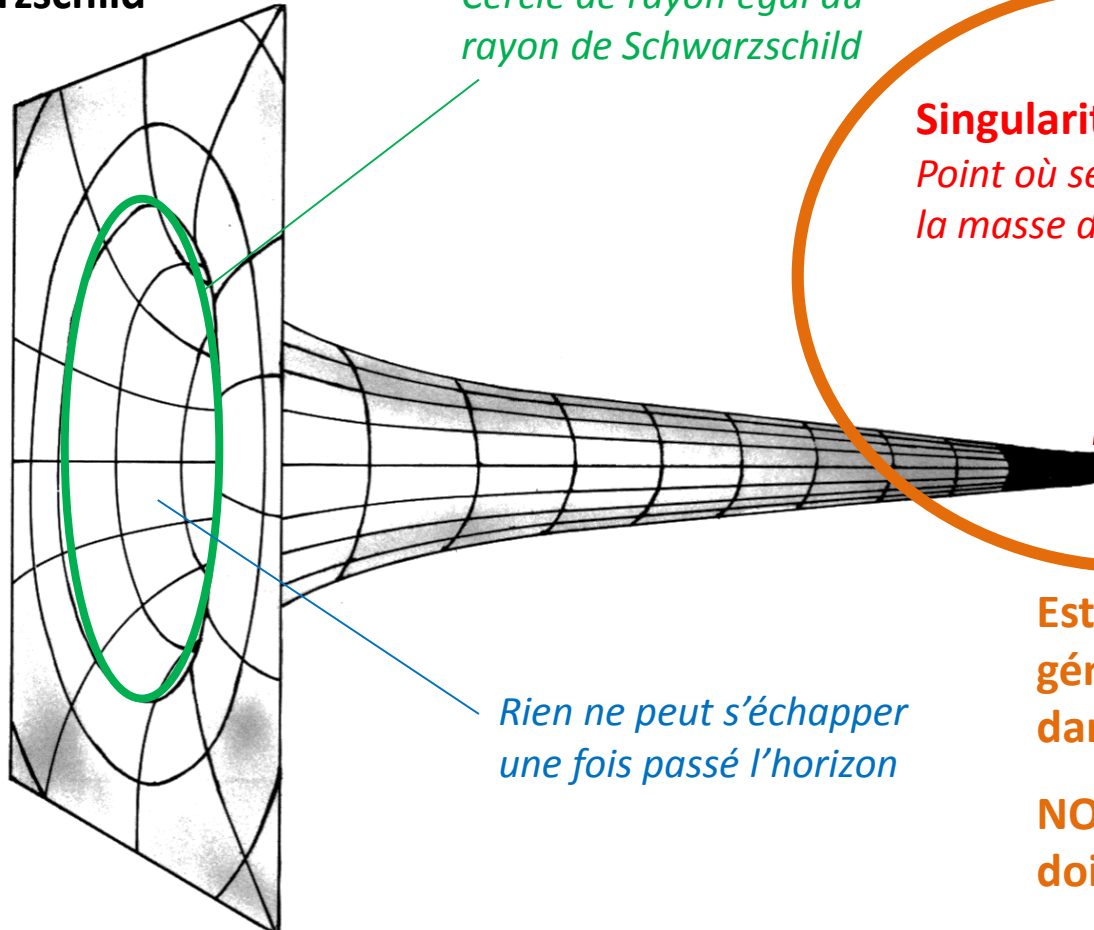
Rien ne peut s'échapper une fois passé l'horizon

Est-ce que la relativité générale est encore valide dans cette région ?



3. Les trous noirs

Caractéristique d'un trou noir de Schwarzschild



Horizon

Cercle de rayon égal au rayon de Schwarzschild

Singularité :

Point où se concentre toute la masse du trou noir

Rien ne peut s'échapper une fois passé l'horizon

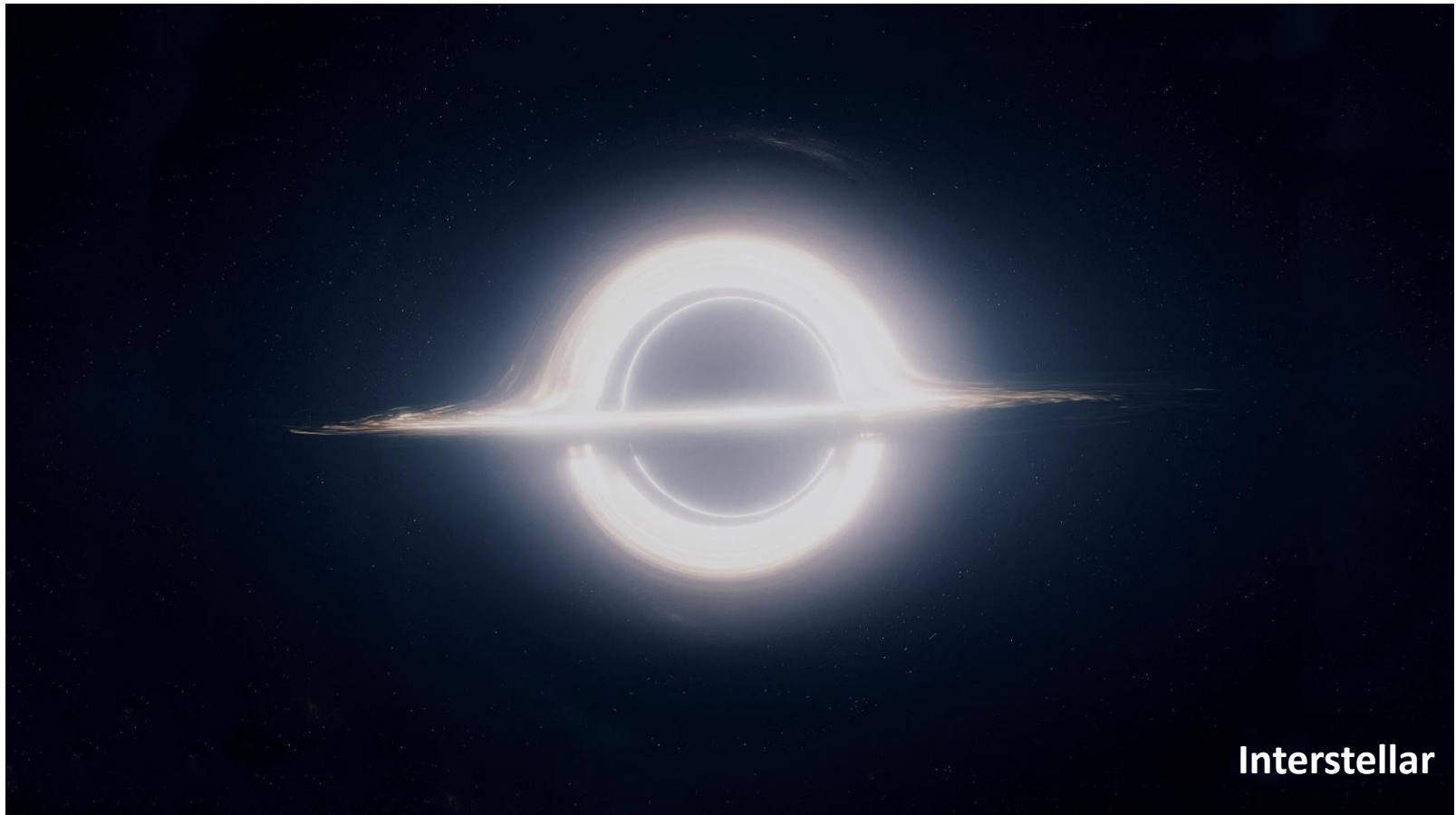
Est-ce que la relativité générale est encore valide dans cette région ?

NON, effets quantiques doivent être pris en compte.



3. Les trous noirs

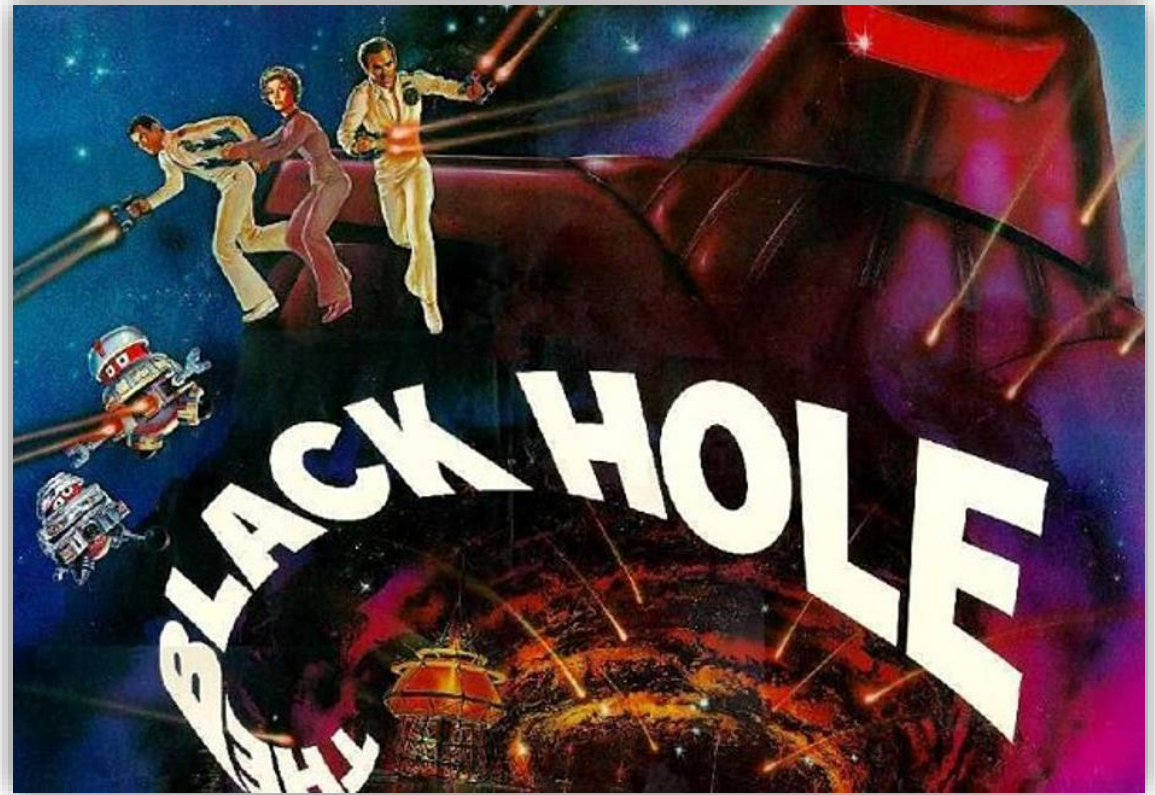
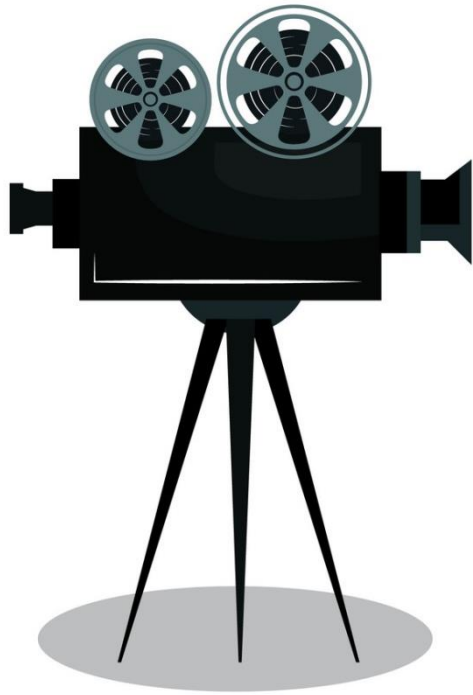
Apparence d'un trou noir au cinéma



Interstellar



3. Les trous noirs

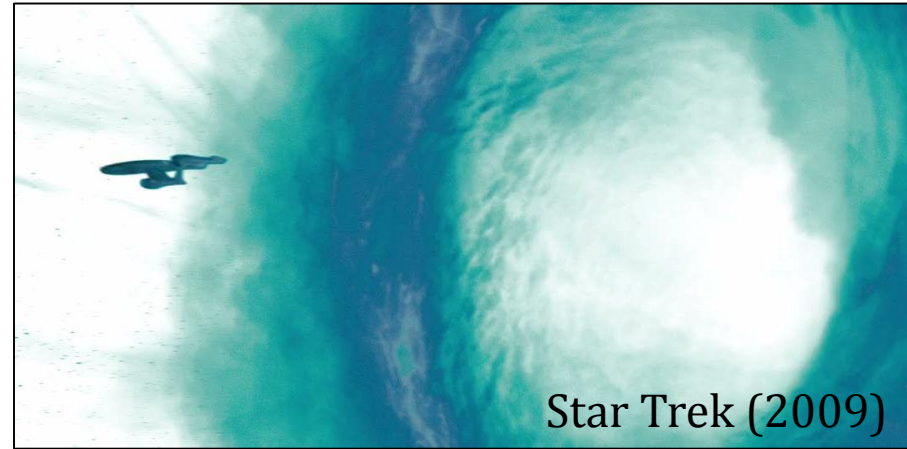
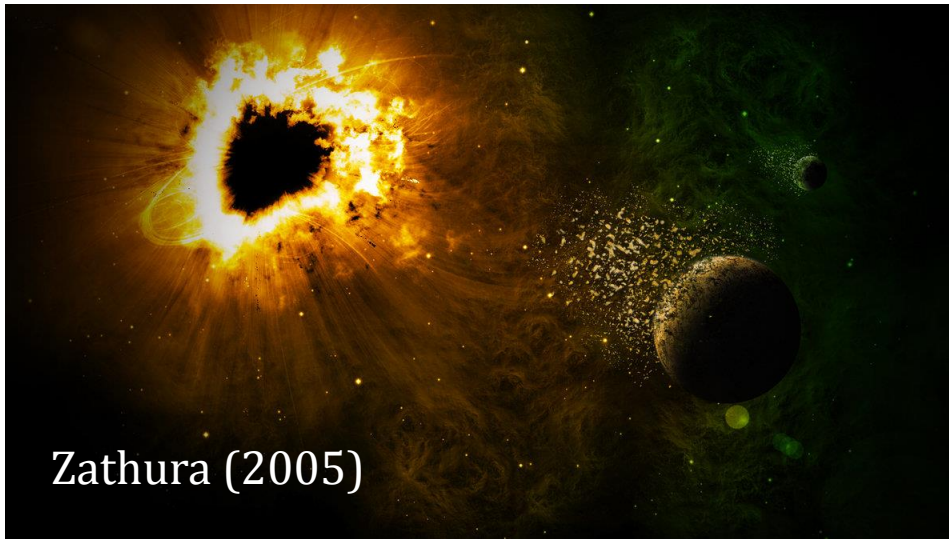


Le trou noir (1979)



3. Les trous noirs

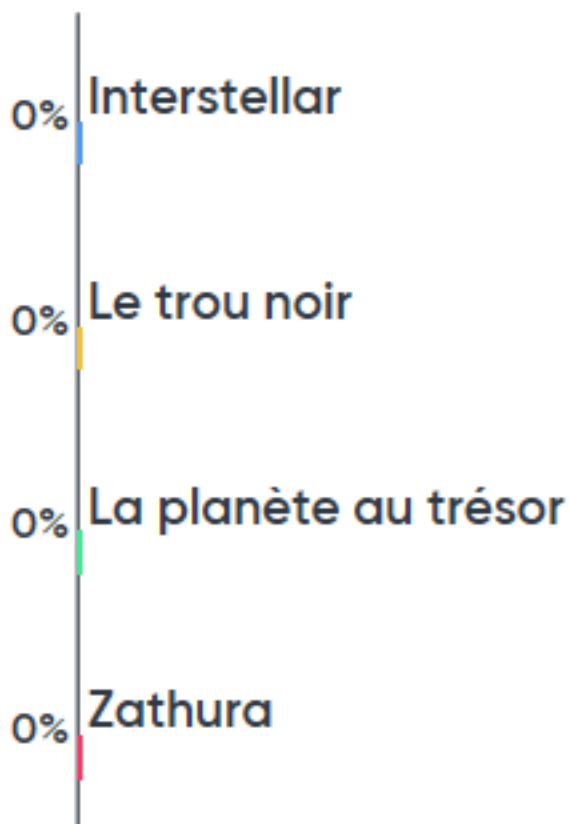
Apparence d'un trou noir au cinéma



Go to www.menti.com and use the code **63 14 23**

Classez les films selon le réalisme de leur trou noir

Mentimeter



Voting is closed

[Open voting](#)



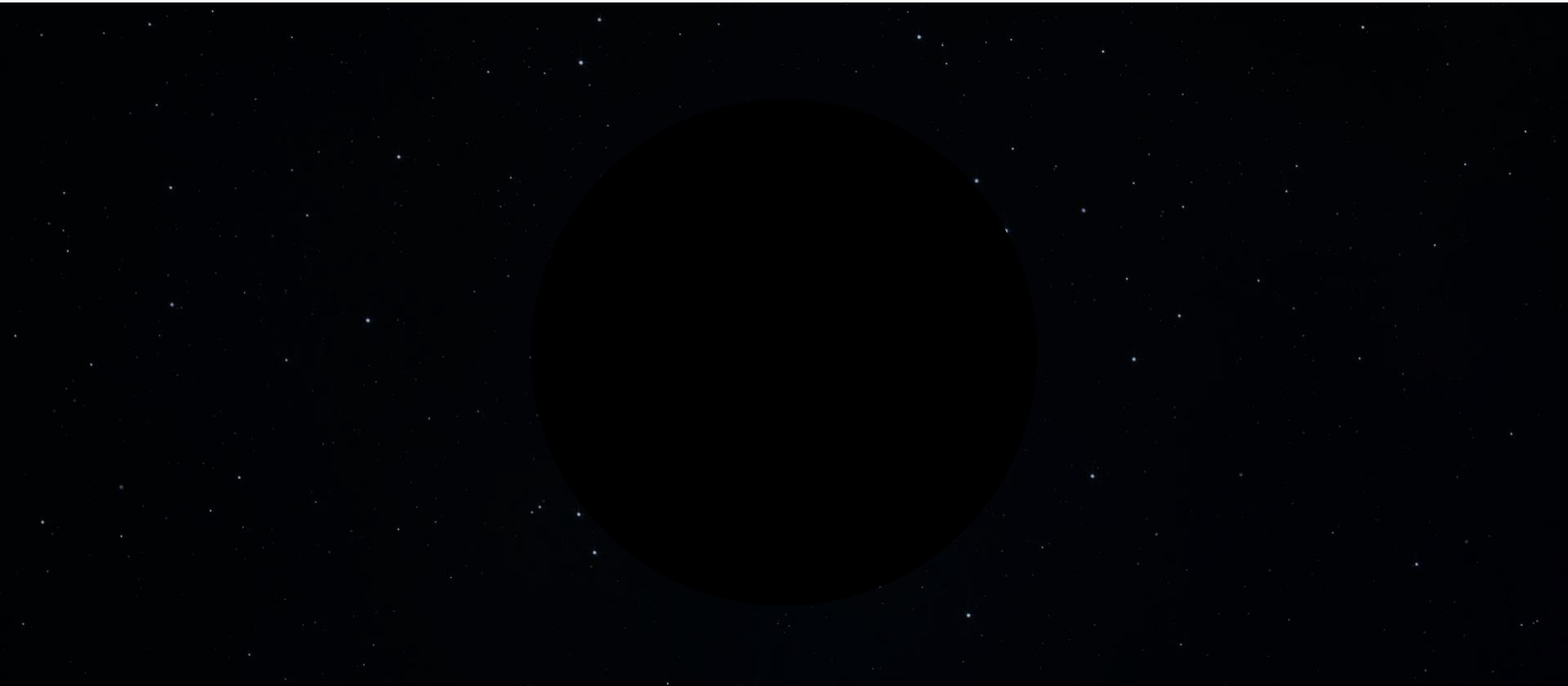
Slide is not active

[Activate](#)



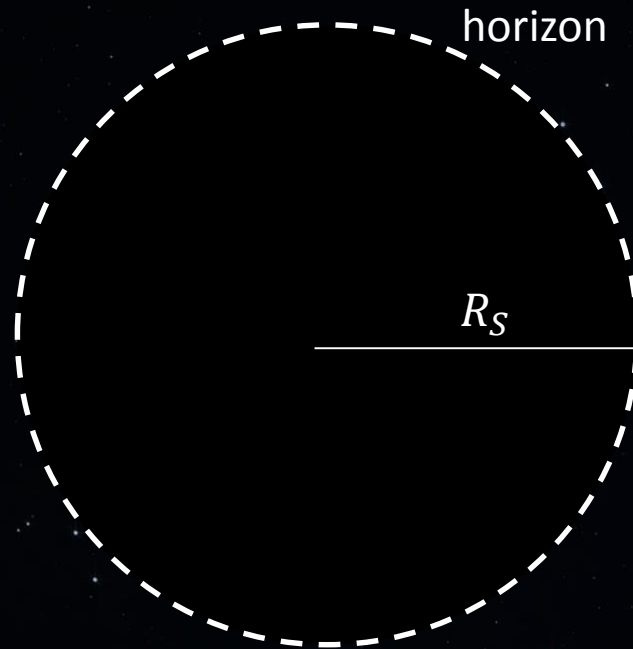
3. Les trous noirs

Est-il possible de voir un trou noir ?



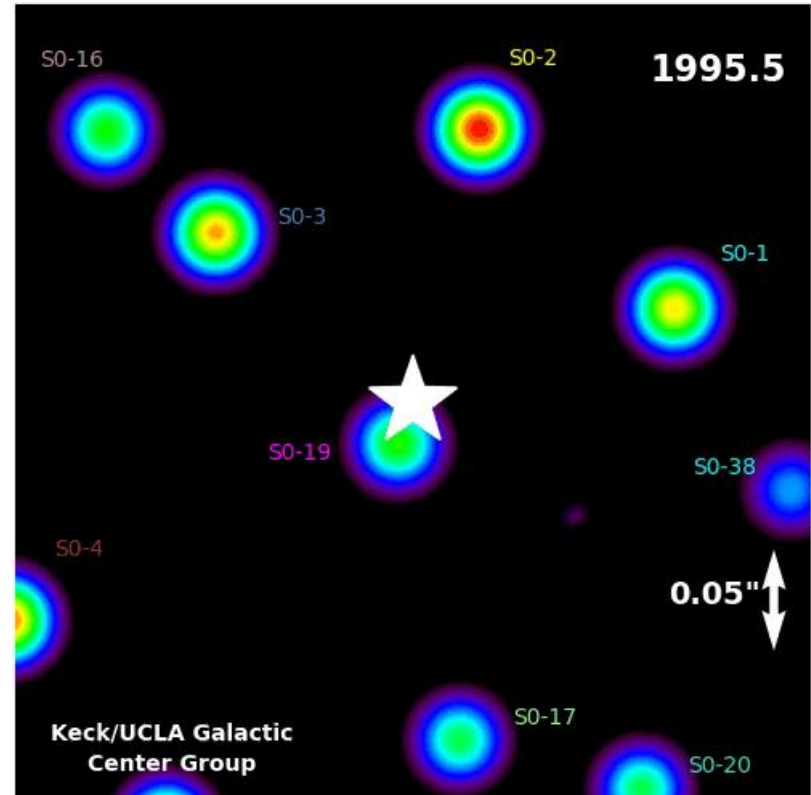
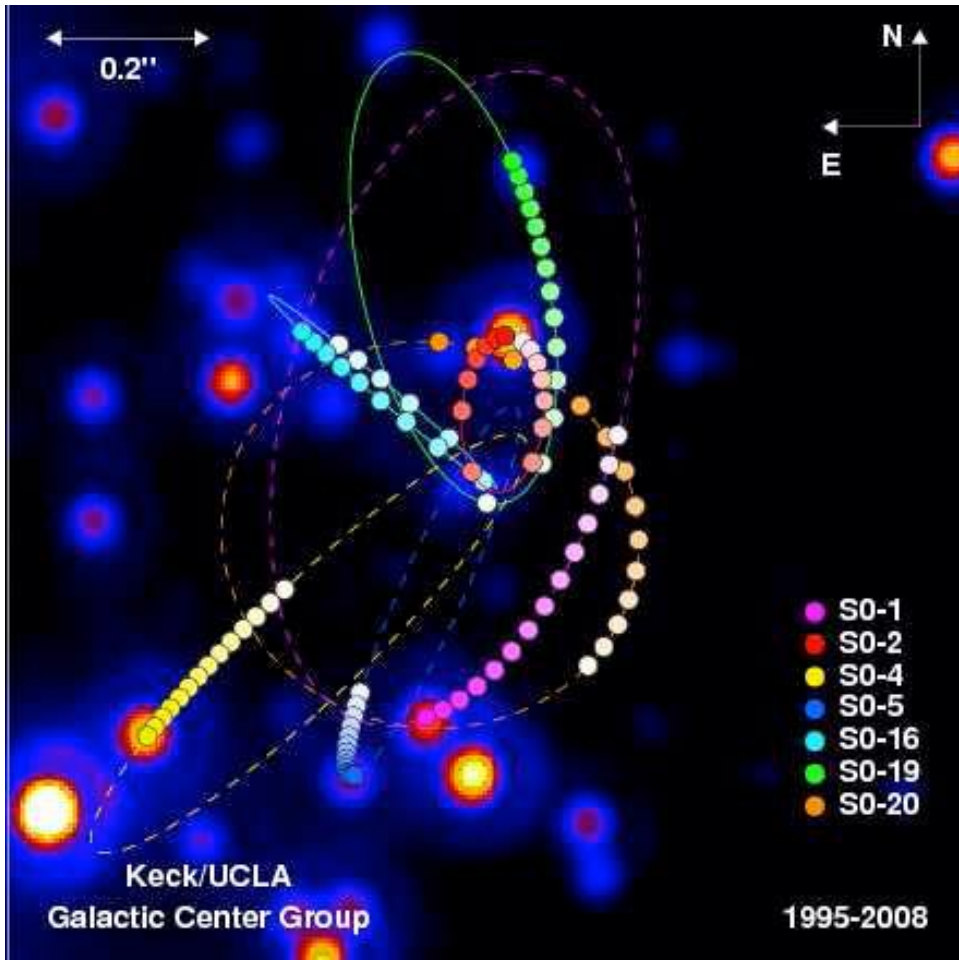
3. Les trous noirs

Est-il possible de voir un trou noir ?



3. Les trous noirs

Voir les trous noirs

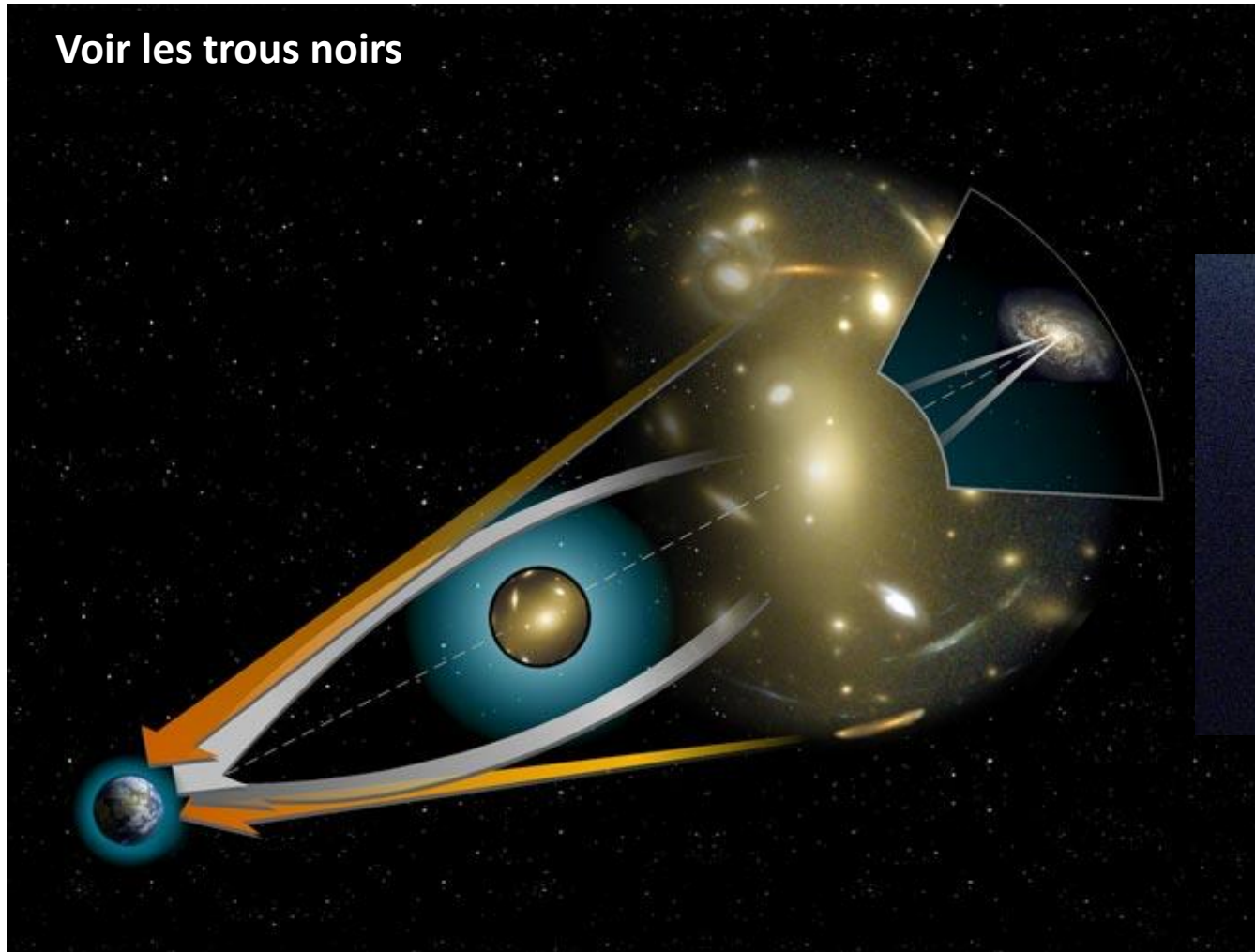


Masse centrale $\sim 7 \times 10^6 M_{\text{soleil}}$



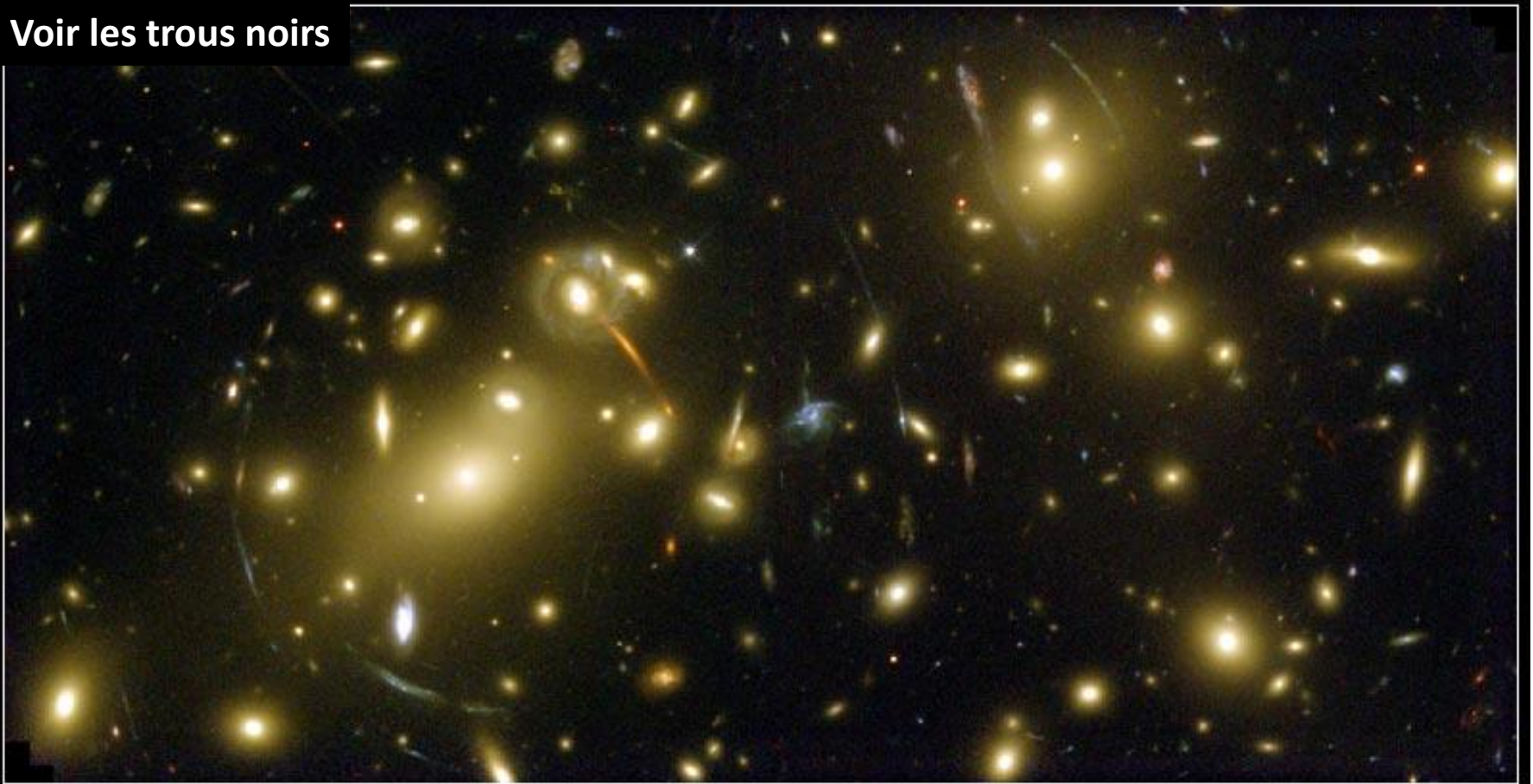
3. Les trous noirs

Voir les trous noirs



3. Les trous noirs

Voir les trous noirs



Galaxy Cluster Abell 2218

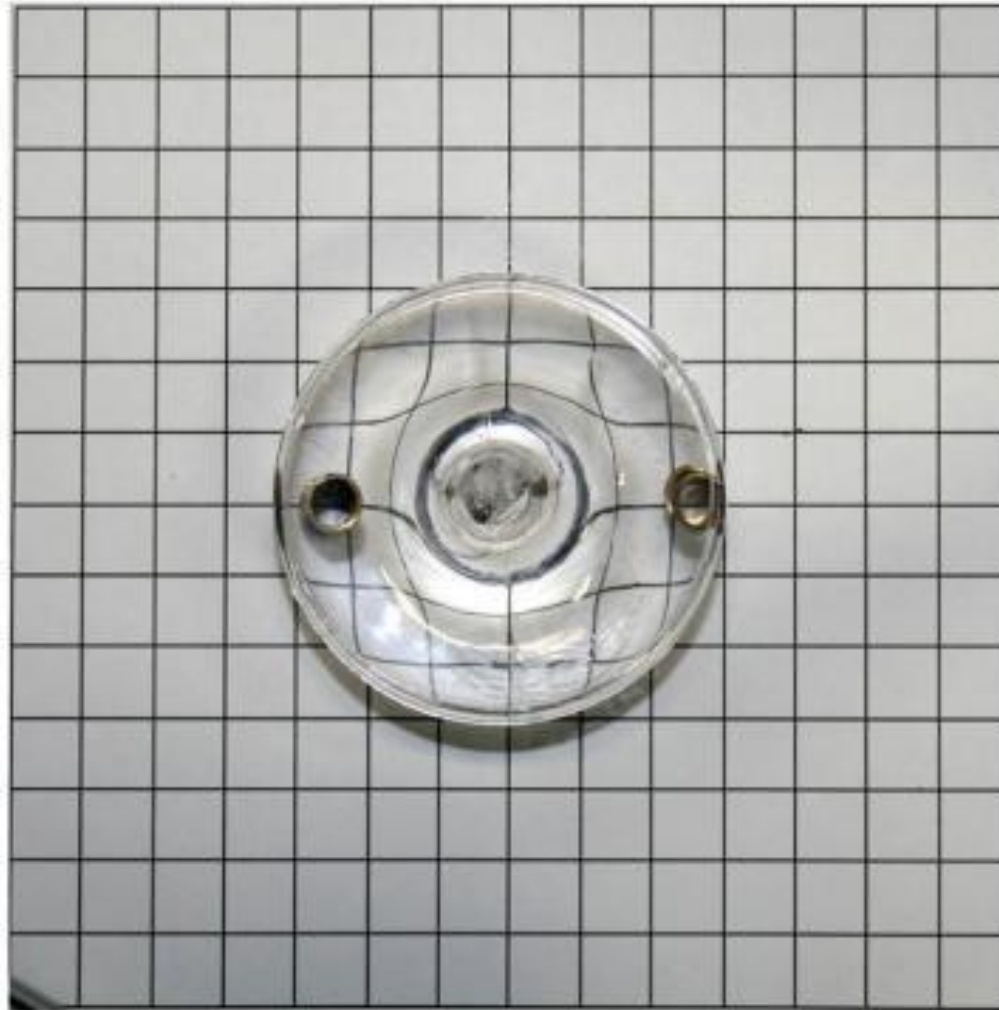
HST • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-08



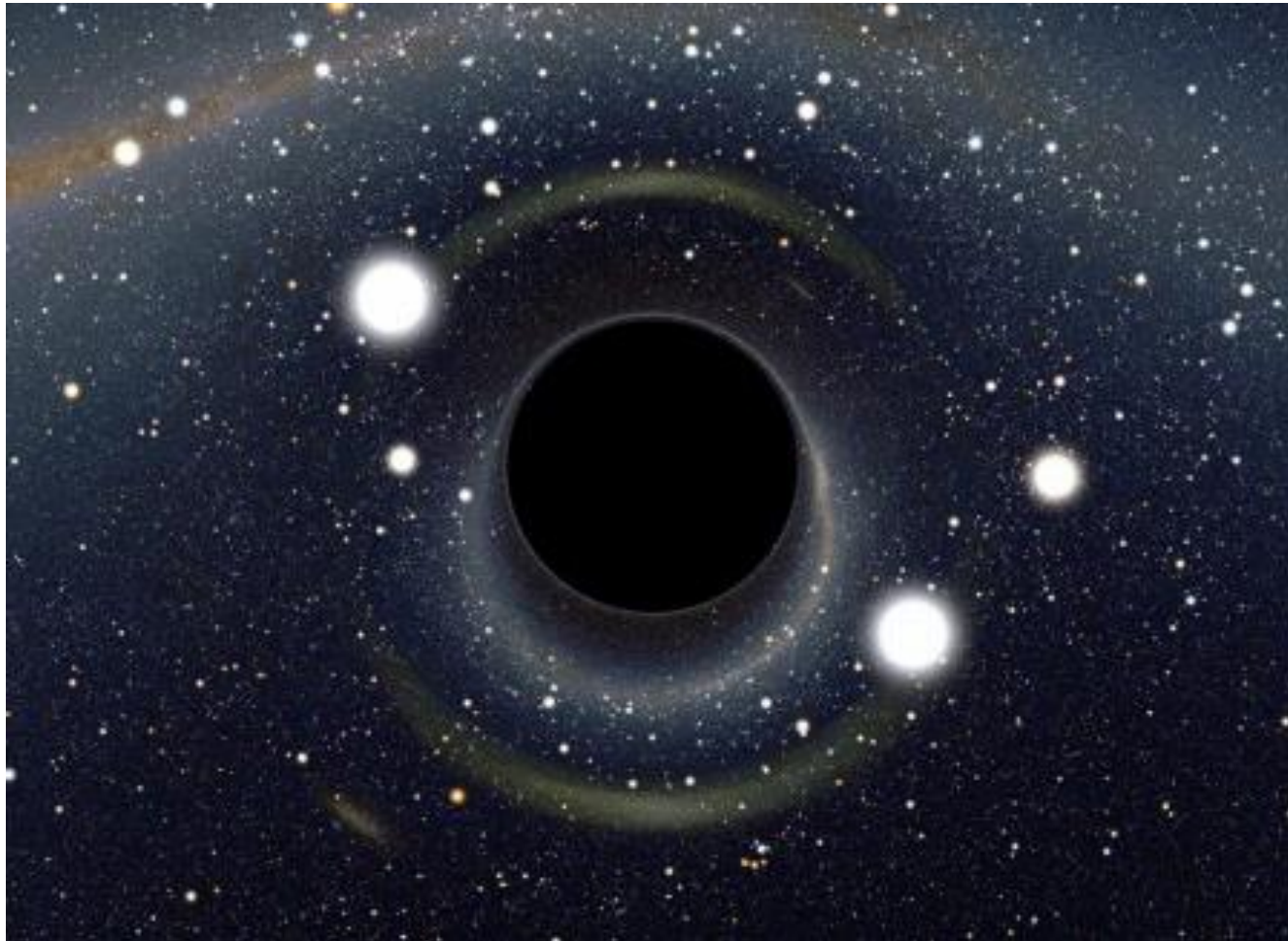
3. Les trous noirs

Voir les trous noirs



3. Les trous noirs

Voir les trous noirs



© Alain Riazuelo, CNRS/IAP -
<http://www2.iap.fr/users/riazuelo/interstellar/index.php>



3. Les trous noirs

Voir les trous noirs



Gravitational Lensing by Spinning Black Holes in Astrophysics, and in the Movie Interstellar – O. James, E. von Tunzelmann, P. Franklin, K. S. Thorne - Classical and Quantum Gravity 32 (2015) 065001 – DOI : [10.1088/0264-9381/32/6/065001](https://doi.org/10.1088/0264-9381/32/6/065001)



3. Les trous noirs

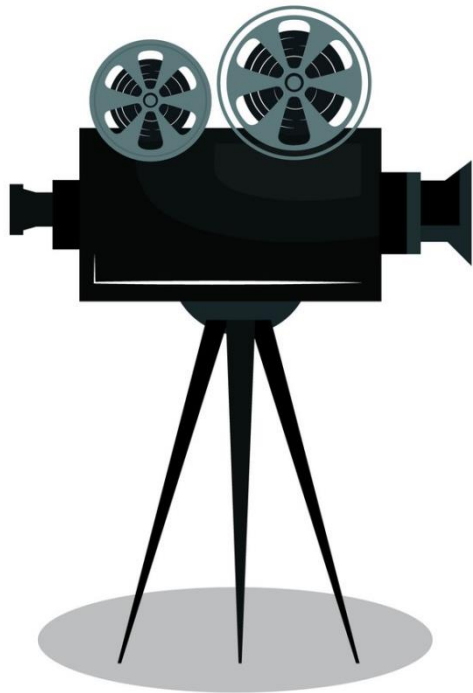
Voir les trous noirs



3. Les trous noirs



3. Les trous noirs



Interstellar (2014)
« Dilatation temporelle »



Select or create a presentation

+ Create presentation

Select an existing presentation from your account

Select your presentation



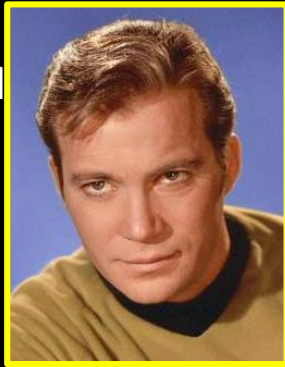
Are you stuck or missing updates? [Refresh](#)

🔒 Log out

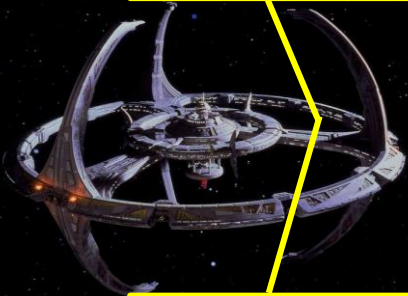
3. Les trous noirs

Le parad

ux 2



Voyage d'un an
proche d'un trou noir



3. Les trous noirs

Dilatation temporelle

**Le temps ralentit quand on s'approche d'un corps massif.
Formule valable à l'extérieur de l'horizon d'un trou noir :**

Dilatation temporelle due à la gravitation

$$d_g = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{r_S}{r}}}$$

Rayon de Schwarzschild

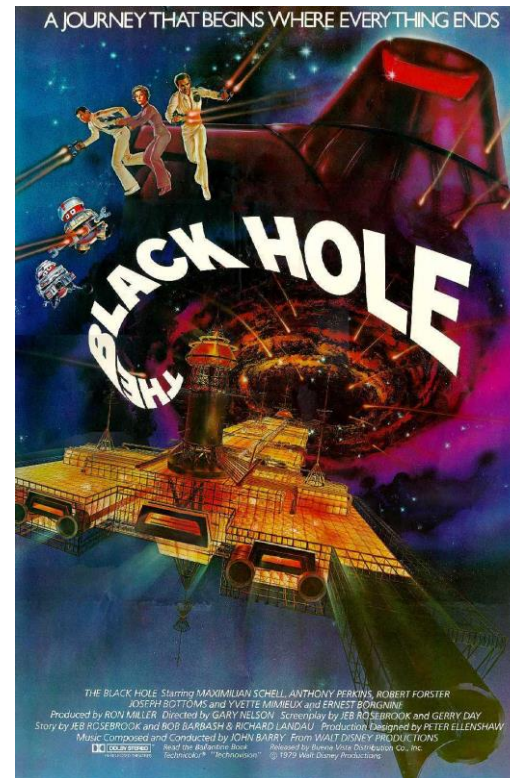
Distance du vaisseau par rapport au centre du trou noir

Si une 1s s'écoule dans le vaisseau proche du trou noir, il s'écoule une durée égale à $1s \times d_g$ pour quelqu'un loin du trou noir



3. Les trous noirs

Que se passe-t-il si on va dans un trou noir ?
Point de vue de l'intérieur



Réponse
étonnante dans
ces deux films



3. Les trous noirs

Que se passe-t-il si on va dans un trou noir ?
Point de vue de l'intérieur



La spaghettification

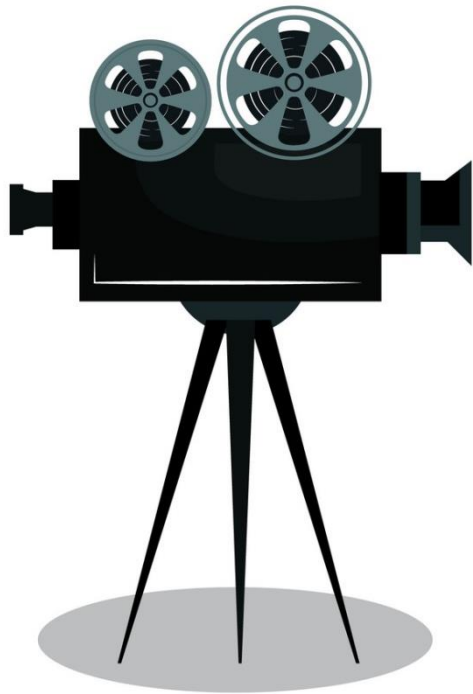


3. Les trous noirs

Que se passe-t-il si on va dans un trou noir ?
Point de vue de l'extérieur



3. Les trous noirs



Stargate SG1 (2002)
Saison 2, épisode 16



3. Les trous noirs

Que se passe-t-il si on va dans un trou noir ?
Point de vue de l'extérieur



La chute éternelle



Go to www.menti.com and use the code **63 14 23**

Avez-vous des questions sur les trous noirs ?

 Mentimeter



Voting is closed

Open voting



Slide is not active

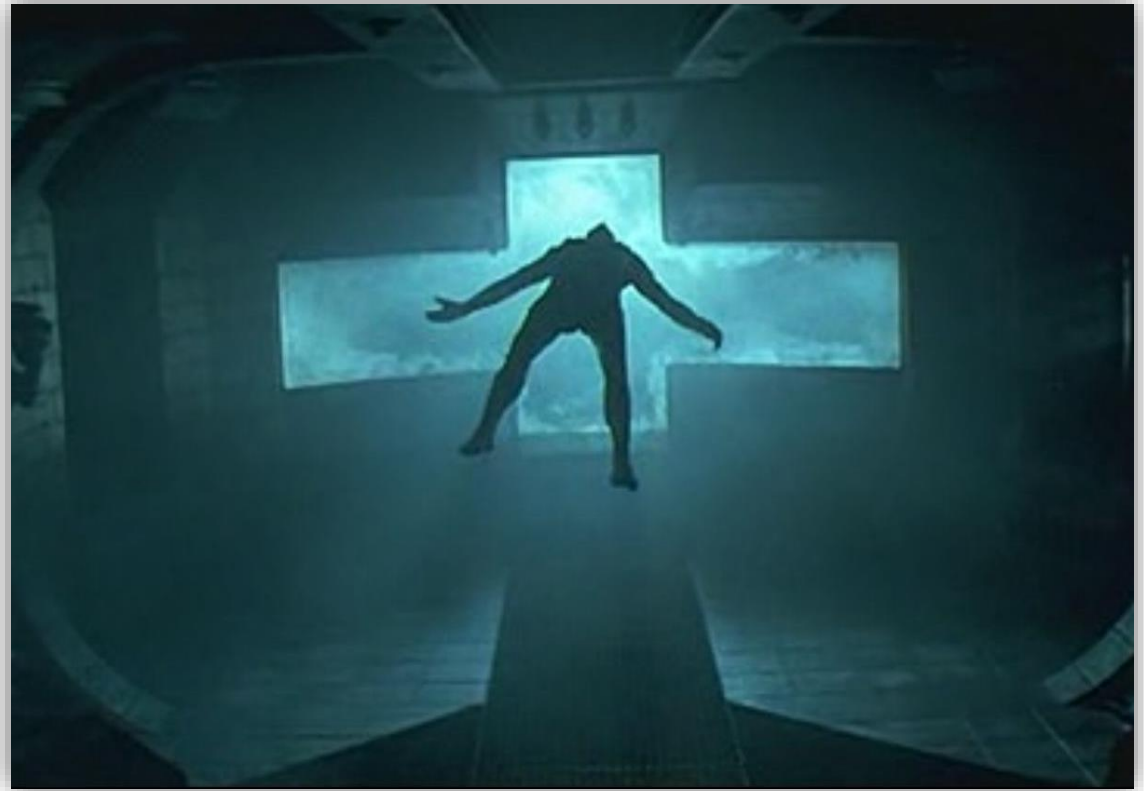
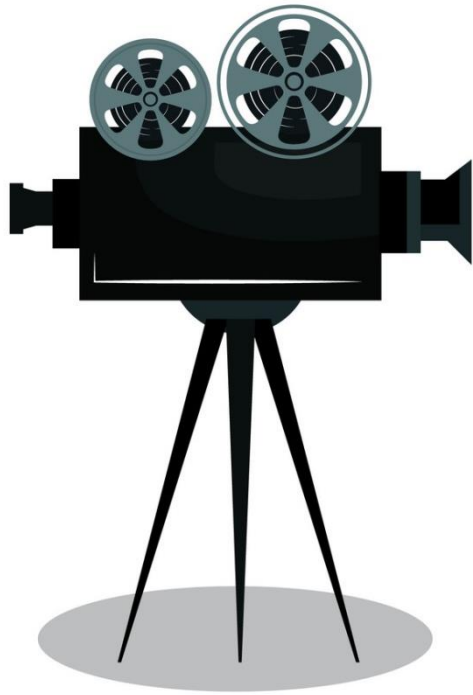
Activate



A photograph of a theater interior. The foreground is filled with rows of red upholstered seats, receding towards a large, bright white screen at the far end of the stage. The screen displays the text "4. Les trous de ver" in a black, sans-serif font. The theater walls are dark, and the overall atmosphere is dimly lit, focusing attention on the screen.

4. Les trous de ver

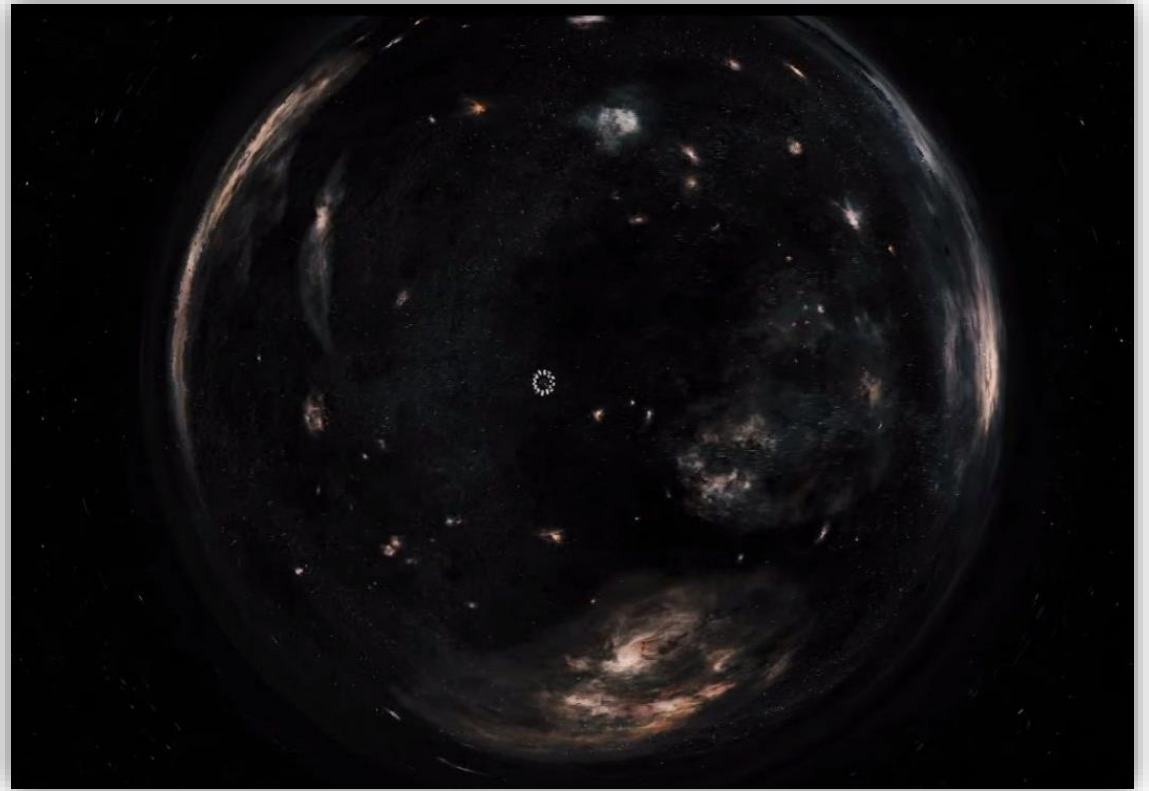
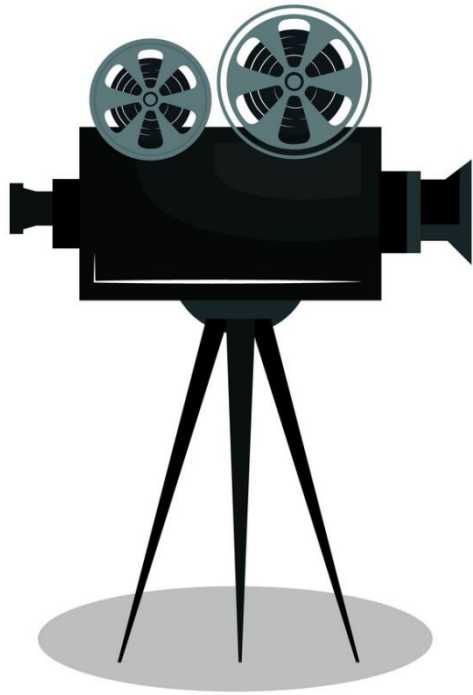
4. Trou de ver



Event Horizon (1997)



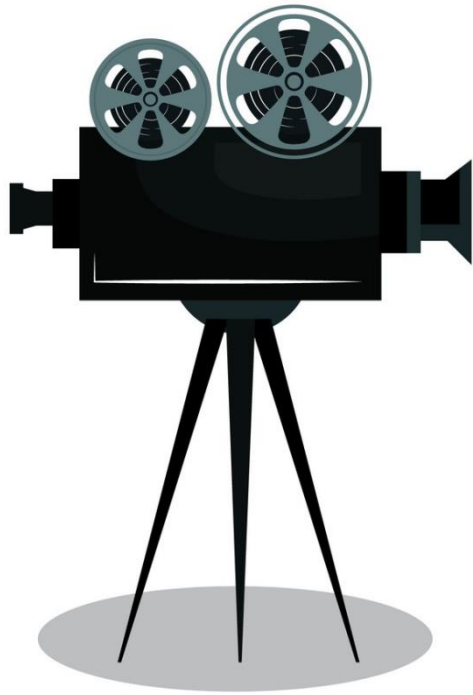
4. Trou de ver



Interstellar (2014)
« Trou de ver »



4. Trou de ver

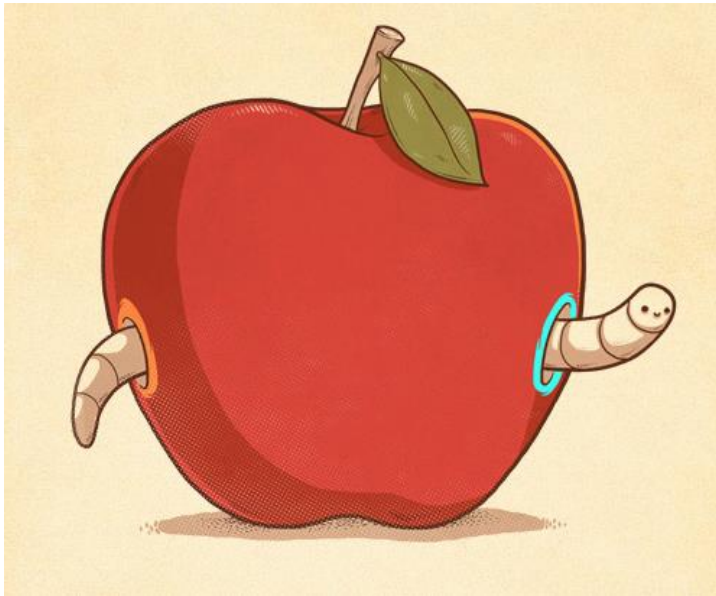


Contact (1997)



4. Trou de ver

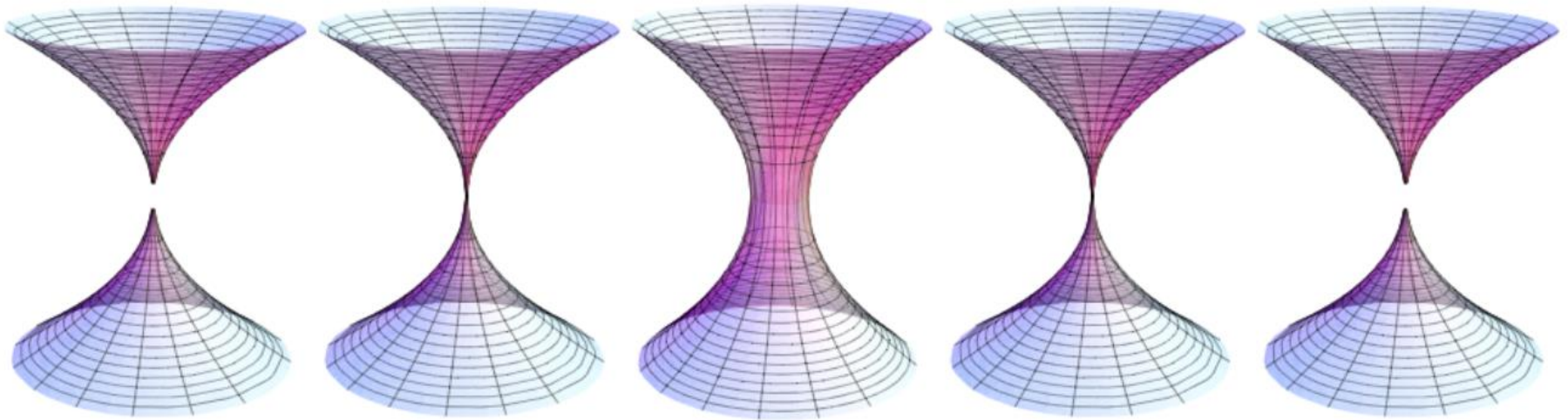
Le trou de ver de Schwarzschild



4. Trou de ver

Le trou de ver de Schwarzschild

Evolution temporelle



Sens unique



Pas traversable :

- Spaghettisation
- Durée extrêmement courte



4. Trou de ver

Trou de ver traversable de Morris-Thorne

Wormholes in spacetime and their use for interstellar travel: A tool for teaching general relativity

Michael S. Morris and Kip S. Thorne

Theoretical Astrophysics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125

(Received 16 March 1987; accepted for publication 17 July 1987)

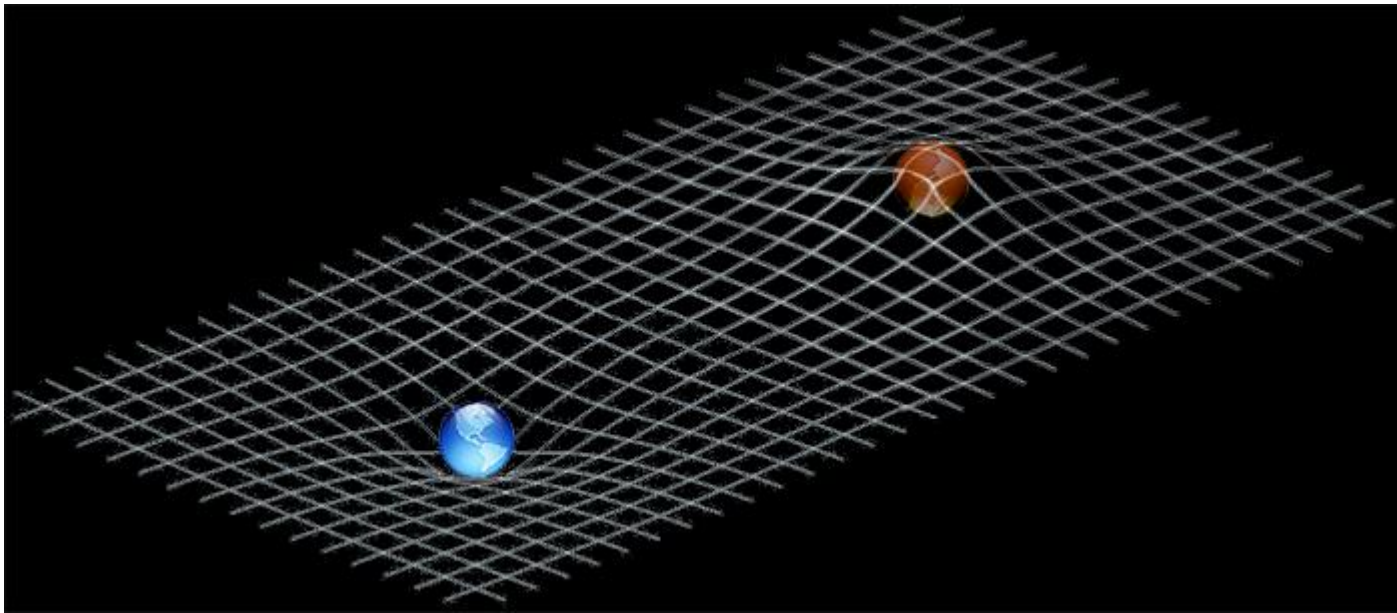
Rapid interstellar travel by means of spacetime wormholes is described in a way that is useful for teaching elementary general relativity. The description touches base with Carl Sagan's novel *Contact*, which, unlike most science fiction novels, treats such travel in a manner that accords with the best 1986 knowledge of the laws of physics. Many objections are given against the use of black holes or Schwarzschild wormholes for rapid interstellar travel. A new class of solutions of the Einstein field equations is presented, which describe wormholes that, in principle, could be traversed by human beings. It is essential in these solutions that the wormhole possess a throat at which there is no horizon; and this property, together with the Einstein field equations, places an extreme constraint on the material that generates the wormhole's spacetime curvature: In the wormhole's throat that material must possess a radial tension τ_0 with the enormous magnitude $\tau_0 \sim (\text{pressure at the center of the most massive of neutron stars}) \times (20 \text{ km})^2 / (\text{circumference of throat})^2$. Moreover, this tension must exceed the material's density of mass-energy, $\rho_0 c^2$. No known material has this $\tau_0 > \rho_0 c^2$ property, and such material would violate all the "energy conditions" that underlie some deeply cherished theorems in general relativity. However, it is not possible today to rule out firmly the existence of such material; and quantum field theory gives tantalizing hints that such material might, in fact, be possible.



4. Trou de ver

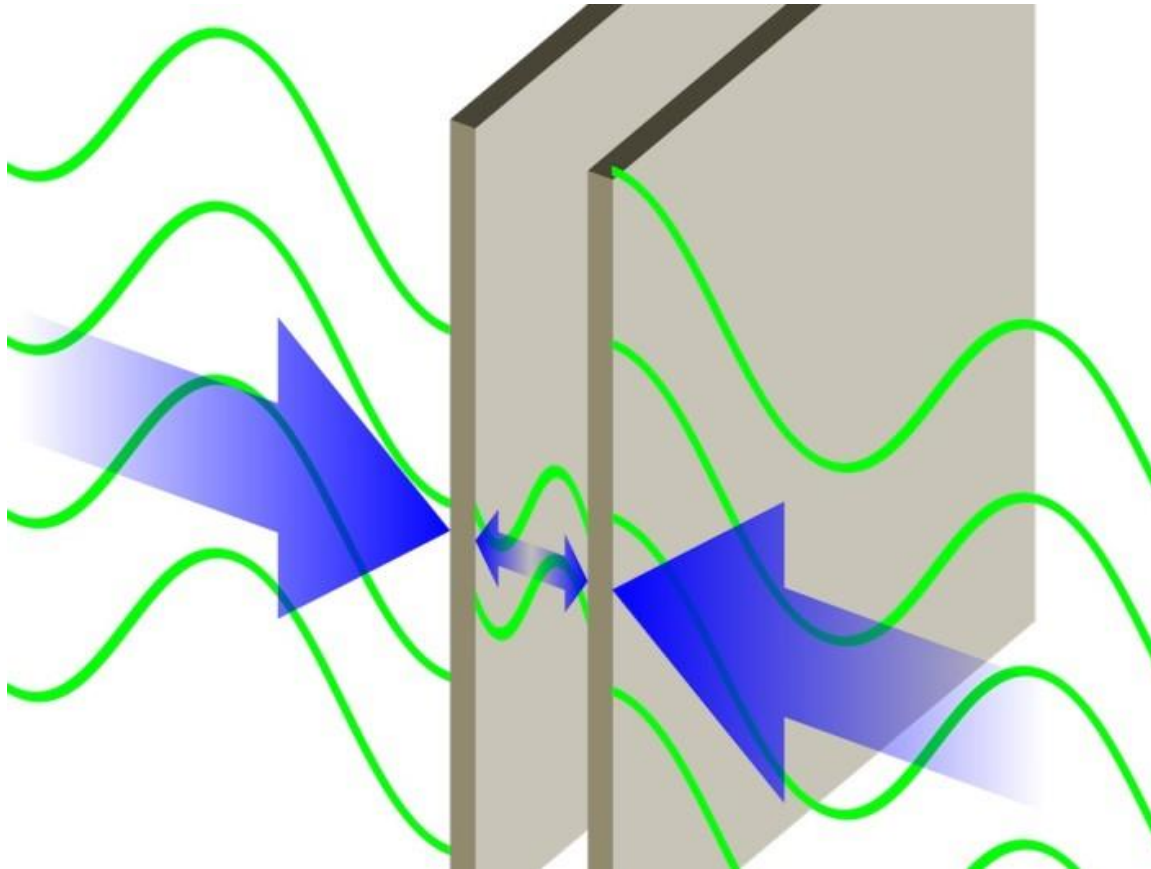
Trou de ver traversable de Morris-Thorne

Traversable si présence de « matière exotique » obéissant à l'équation $E = -mc^2$



4. Trou de ver

Où trouver la « matière exotique » de Thorne ?



Effet Casimir :

- Prédit en 1948
- Vérifié expérimentalement sans ambiguïté en 1978.



4. Trou de ver

Trou de ver & fluctuations quantiques



4. Trou de ver

Construire un trou de ver en science fiction ?

1. Extraire un trou de ver des fluctuations quantiques du vide.
2. L'agrandir jusqu'à ce qu'il atteigne taille humaine.
3. Utiliser de la « matière exotique » pour maintenir le trou ouvert.



4. Trou de ver

Représentation au cinéma



A photograph of a theater interior. The foreground is filled with rows of red upholstered seats, receding towards a large, bright white screen at the far end of the stage. The word "Conclusion" is centered on the screen in a black, sans-serif font. The theater walls are dark, and the overall atmosphere is quiet and focused.

Conclusion

Conclusion

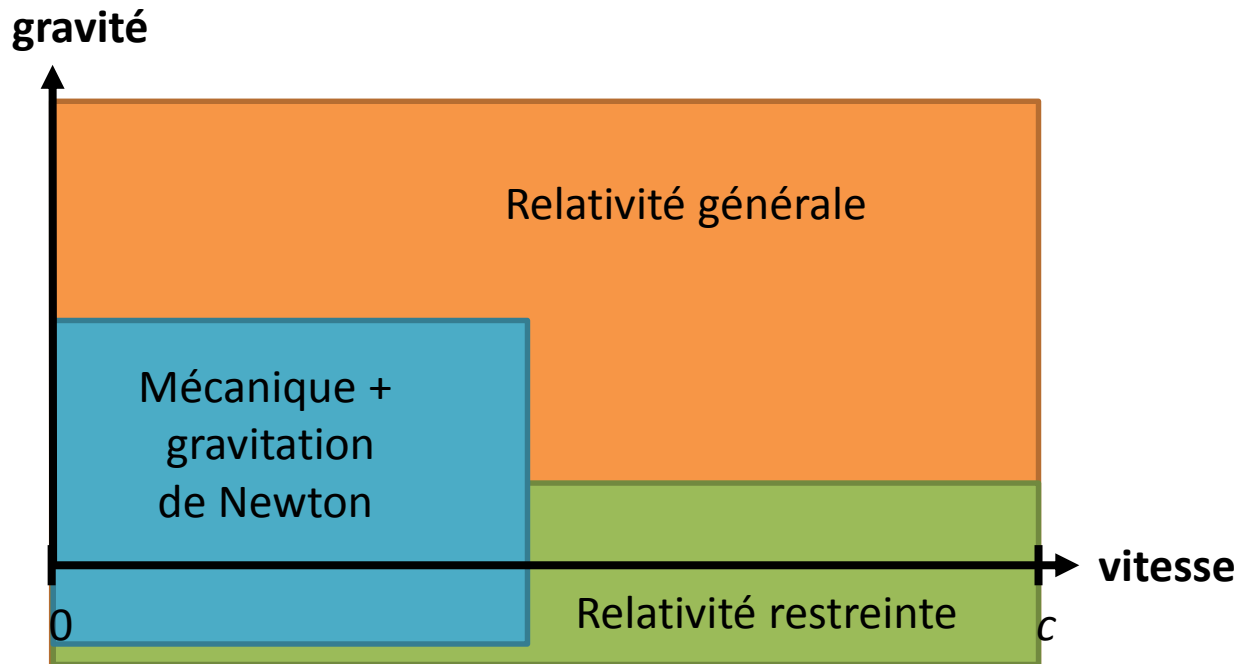
Y-AT-IL UN PHYSICIEN POUR EXPLIQUER LE FILM « INTERSTELLAR » ?

- Les limites du voyage interstellaire, entre autres la durée des voyages
- Curiosité prédite par la relativité générale : le trou noir
Observation indirecte + mécanisme de production connu
- Dilatation temporelle :
 - Vitesse proche de celle de la lumière
 - Voyage près d'un corps très massif
- Fantaisies scientifiques :
 - L'hypersommeil
 - Le trou de ver traversable



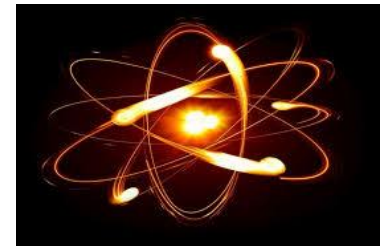
Conclusion

Y-AT-IL UN PHYSICIEN POUR EXPLIQUER LE FILM « INTERSTELLAR » ?



Infiniment grand et macroscopique

Physique quantique



Infiniment petit



Conclusion

Interro surprise !

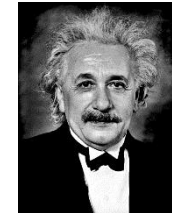
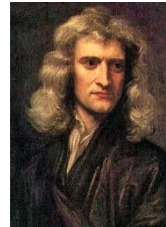


A photograph of a theater interior. The foreground is filled with rows of red upholstered seats, receding towards a large, bright white screen at the far end of the stage. The word "Annexes" is centered on the screen in a black, sans-serif font. The theater walls are dark, and the overall atmosphere is quiet and empty.

Annexes

2. Le voyage interstellaire

Comparaison entre mécanique de Newton et relativité d'Einstein



Relation fondamentale
de la dynamique

$$F = m \times a$$

$$\underline{F} = m \times \underline{a}$$

Energie mécanique
d'un système au repos
soumis à aucune force

$$E = 0$$

$$E = mc^2$$



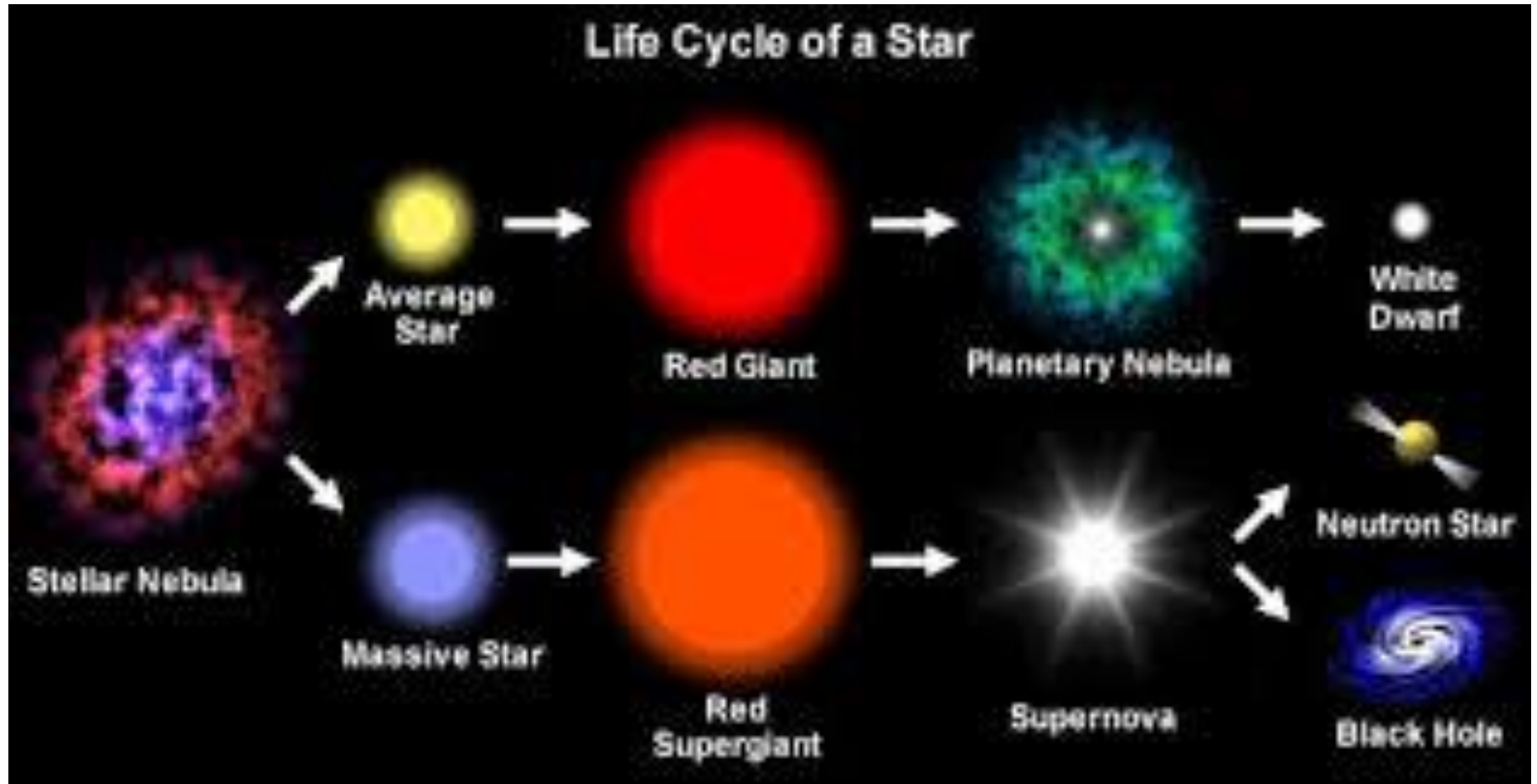
3. Les trous noirs



10^{11} étoiles dans une Galaxie...
 10^{11} Galaxies dans l'Univers !



3. Les trous noirs



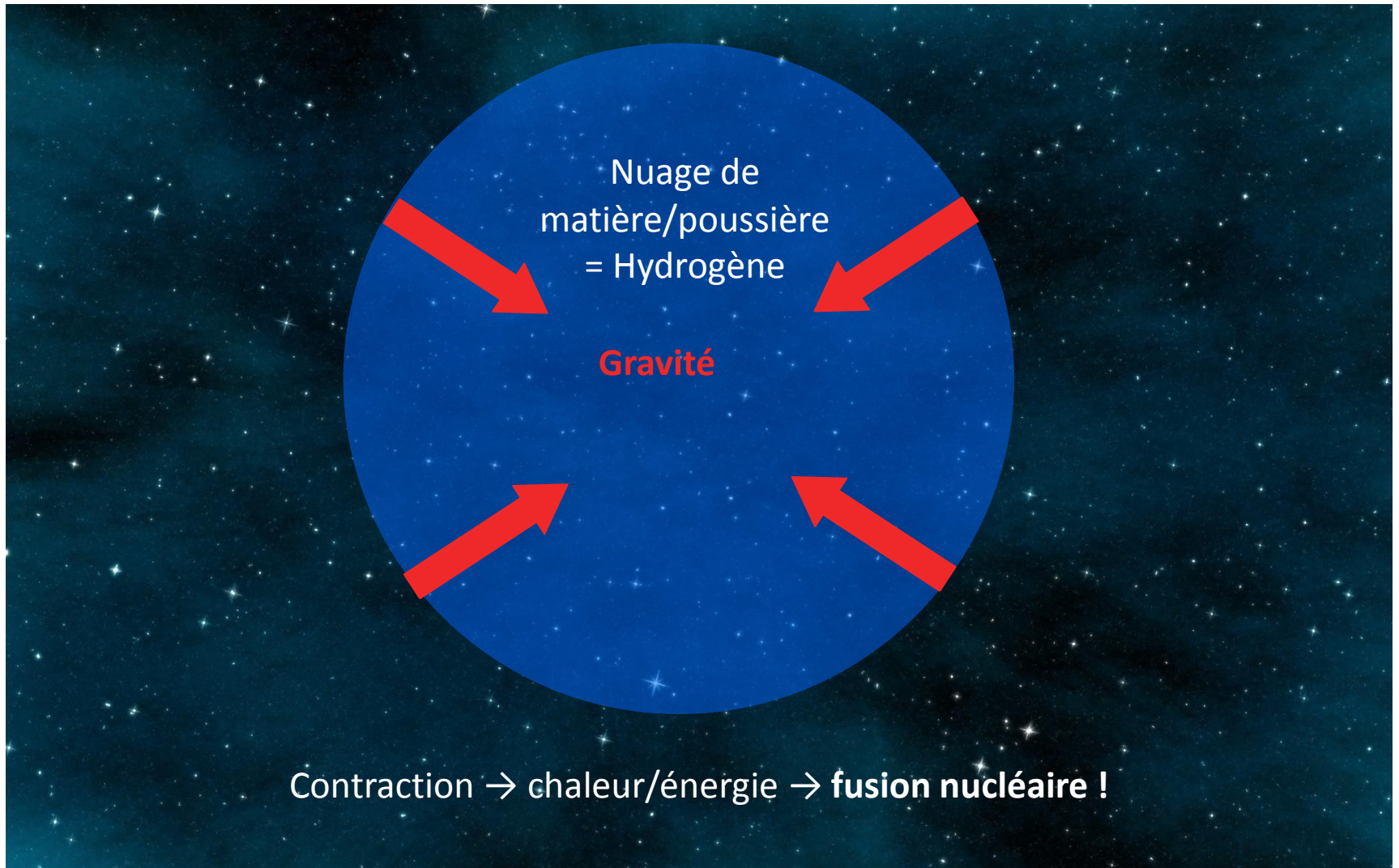
3. Les trous noirs



Nébuleuse d'Orion

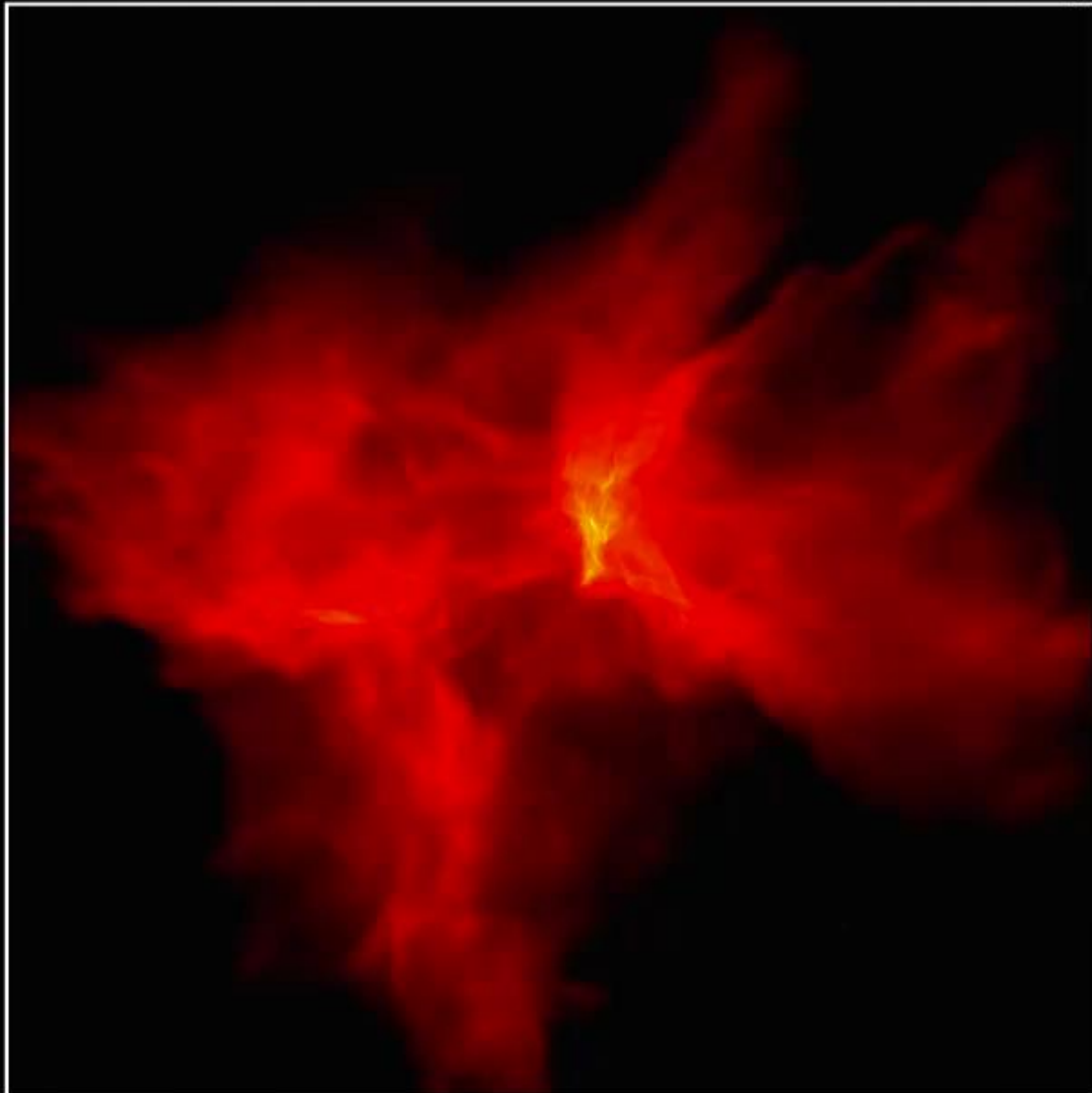


3. Les trous noirs



Dimensions: 82500. AU

Time: 197220. yr



-1.5

-1.0

-0.5

0.0

0.5

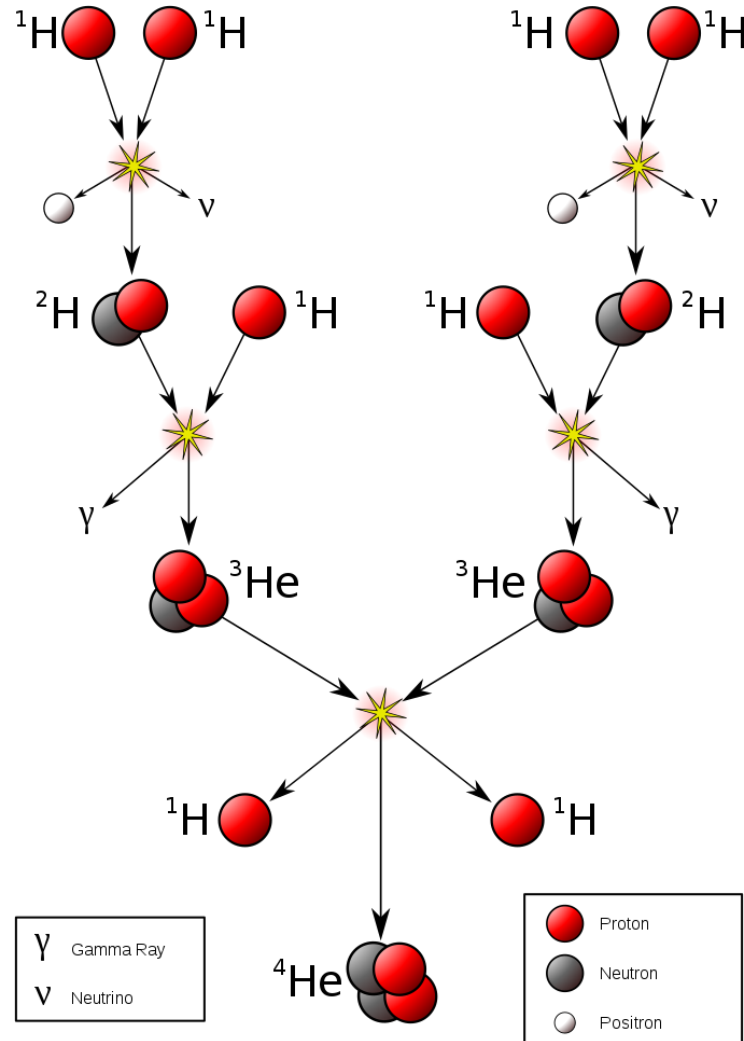
1.0

Log Column Density [g/cm^2]

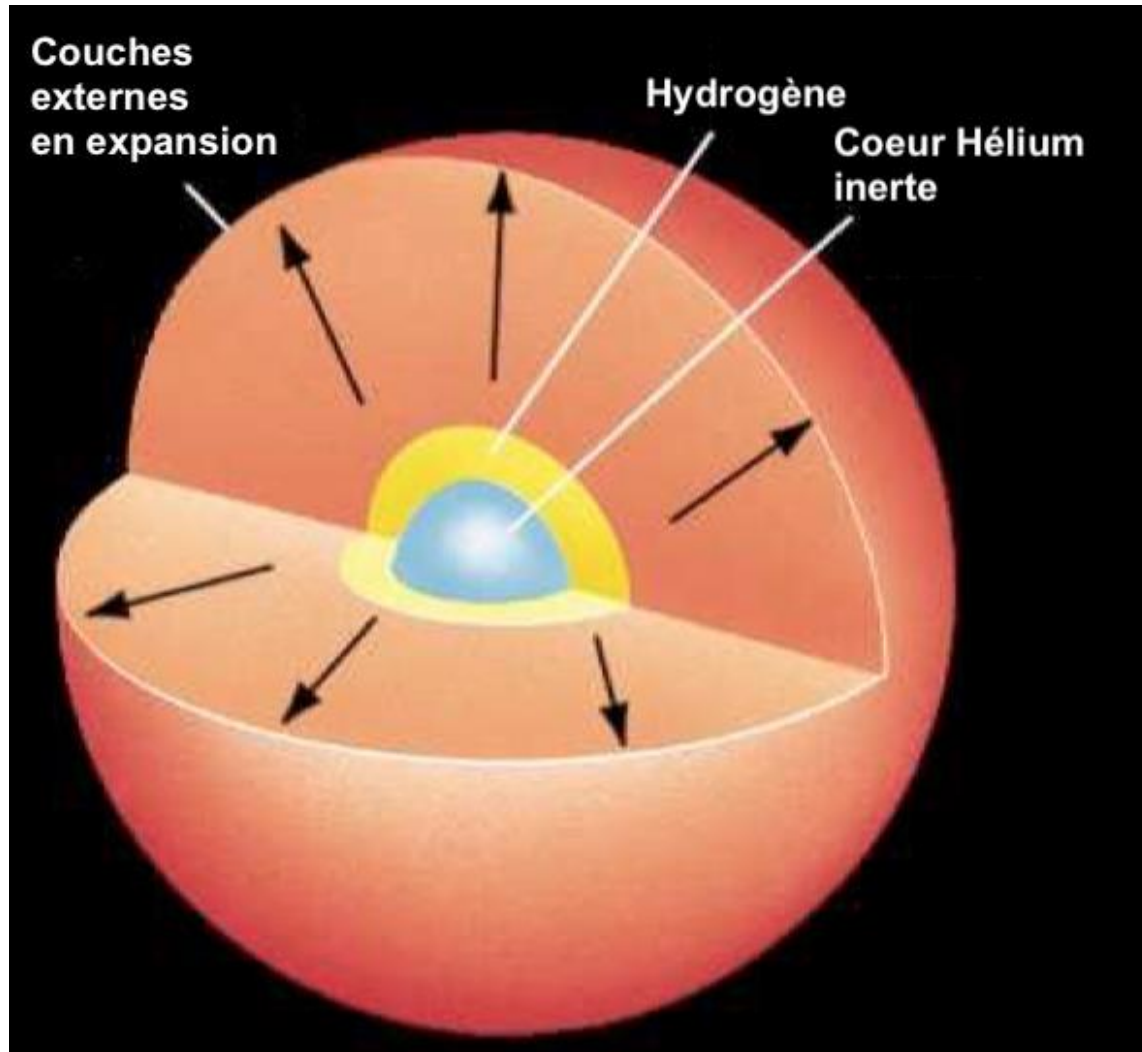
Matthew Bate



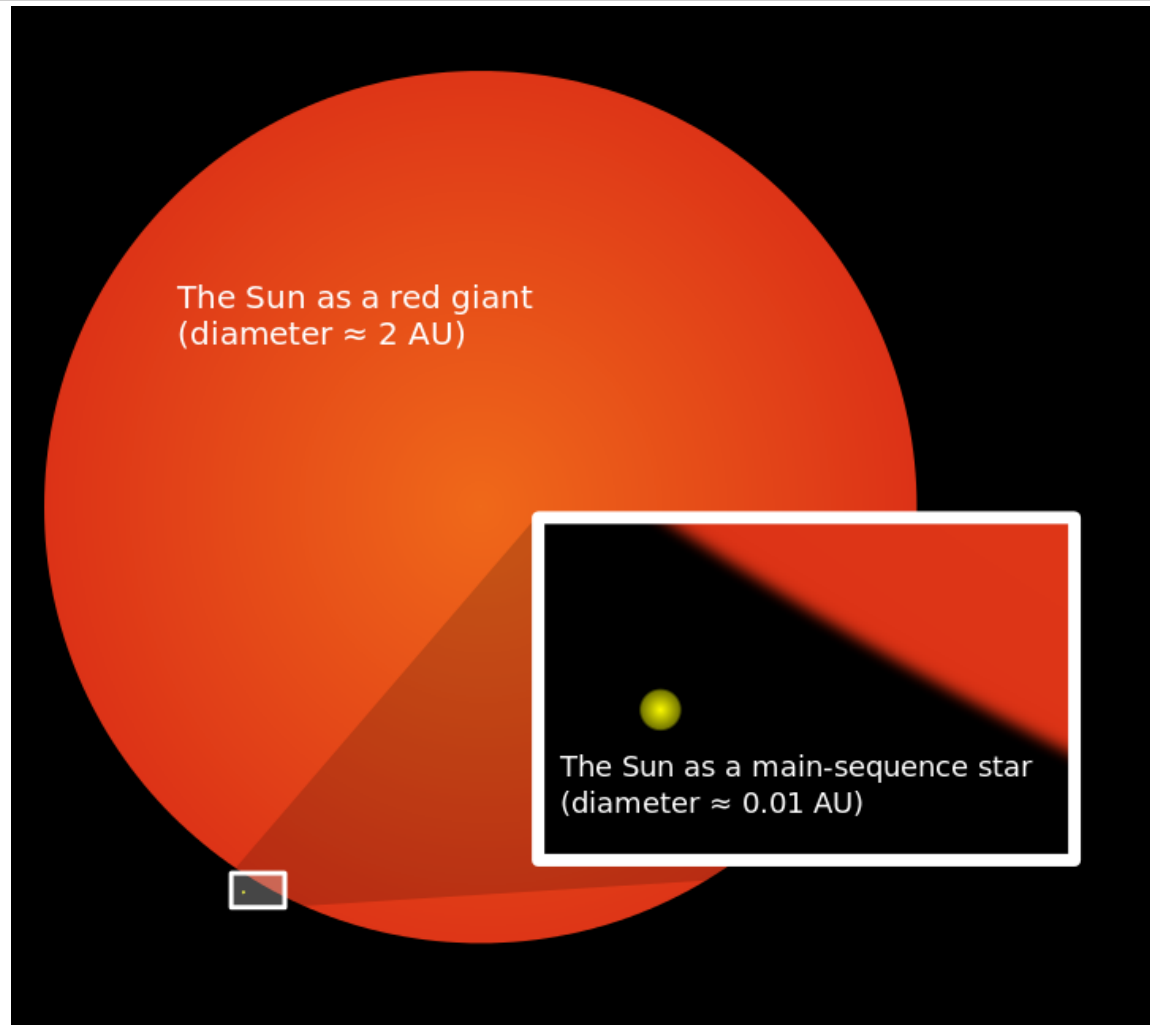
3. Les trous noirs



3. Les trous noirs



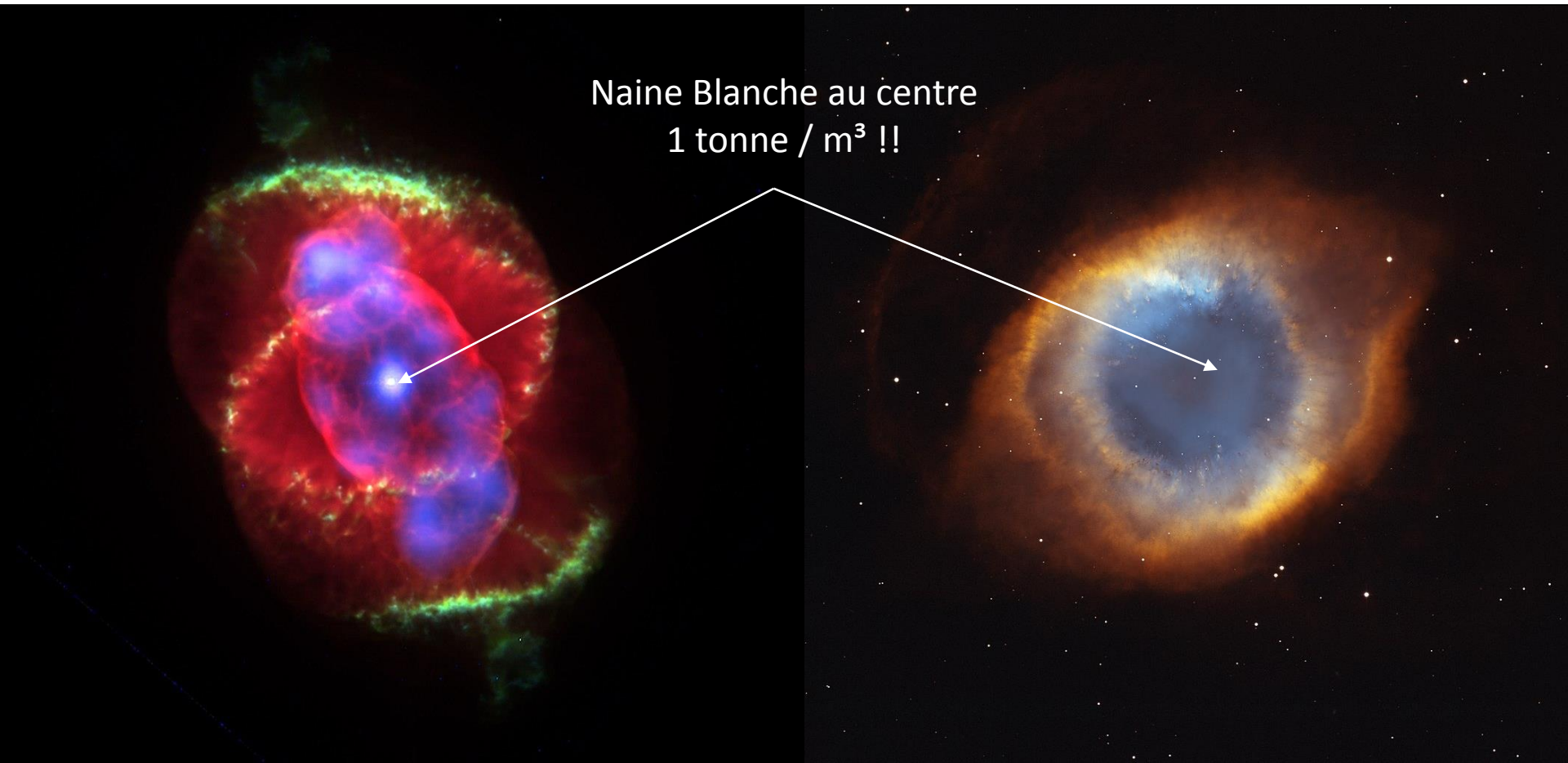
3. Les trous noirs



Dans environ 7 milliards d'années ...



3. Les trous noirs



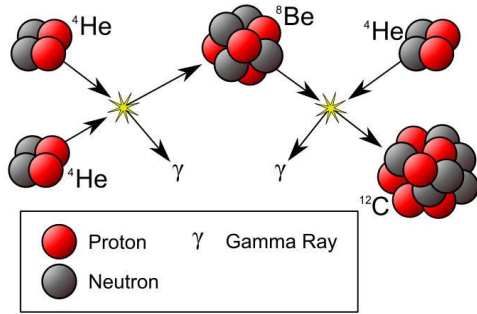
Naine Blanche au centre
1 tonne / m³ !!

Nébuleuse Planétaire (NGC 6543)

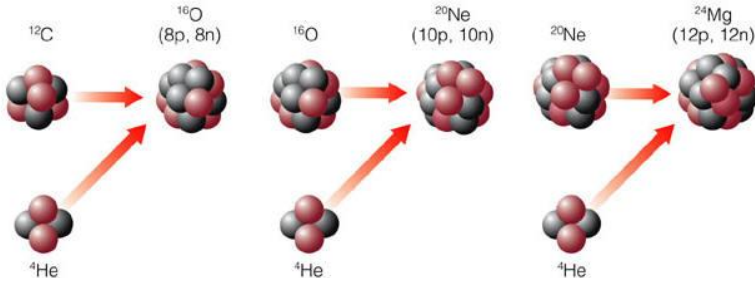
Nébuleuse Planétaire (NGC 7293)



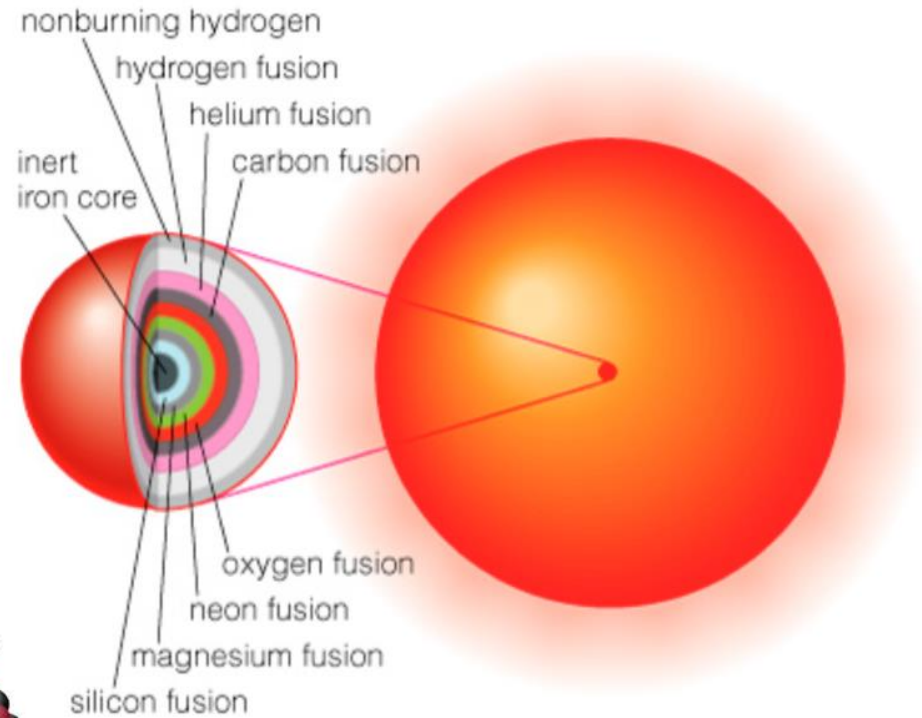
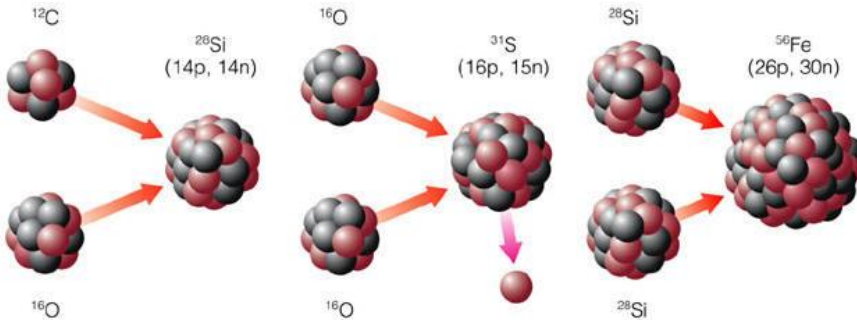
3. Les trous noirs



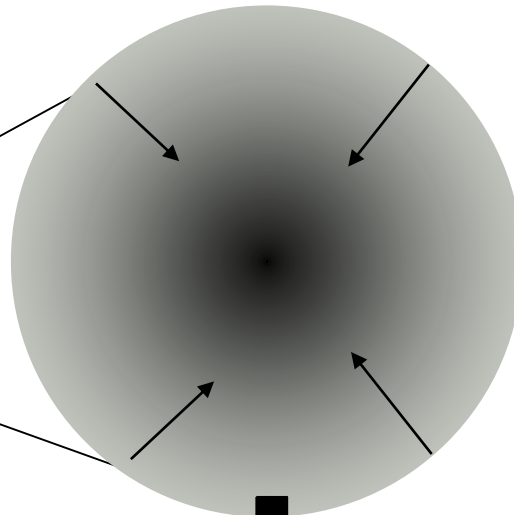
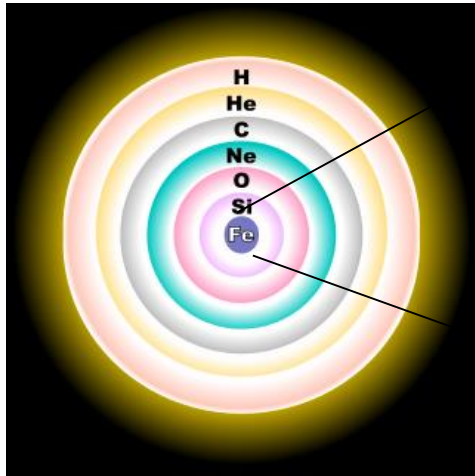
Helium-capture reactions



Other reactions



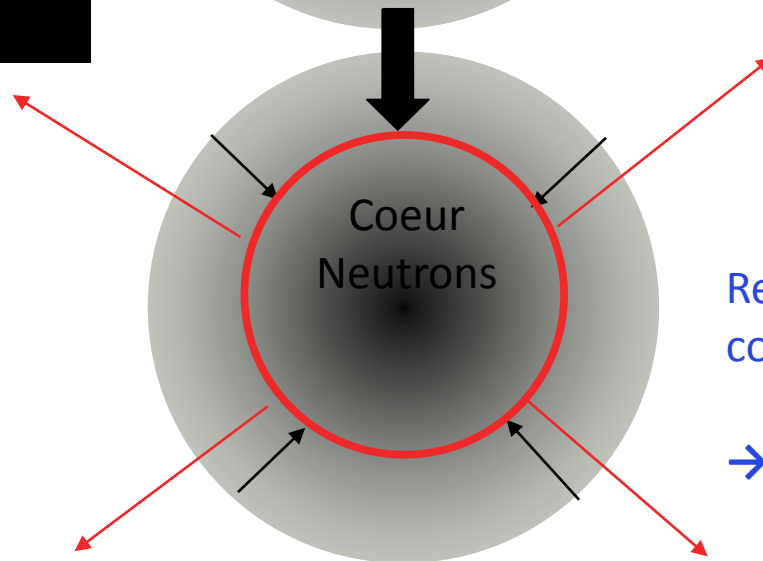
3. Les trous noirs



$T \sim 10$ milliards de $^{\circ}\text{C}$!!

→ Désintégration des atomes

→ protons, neutrons, électrons

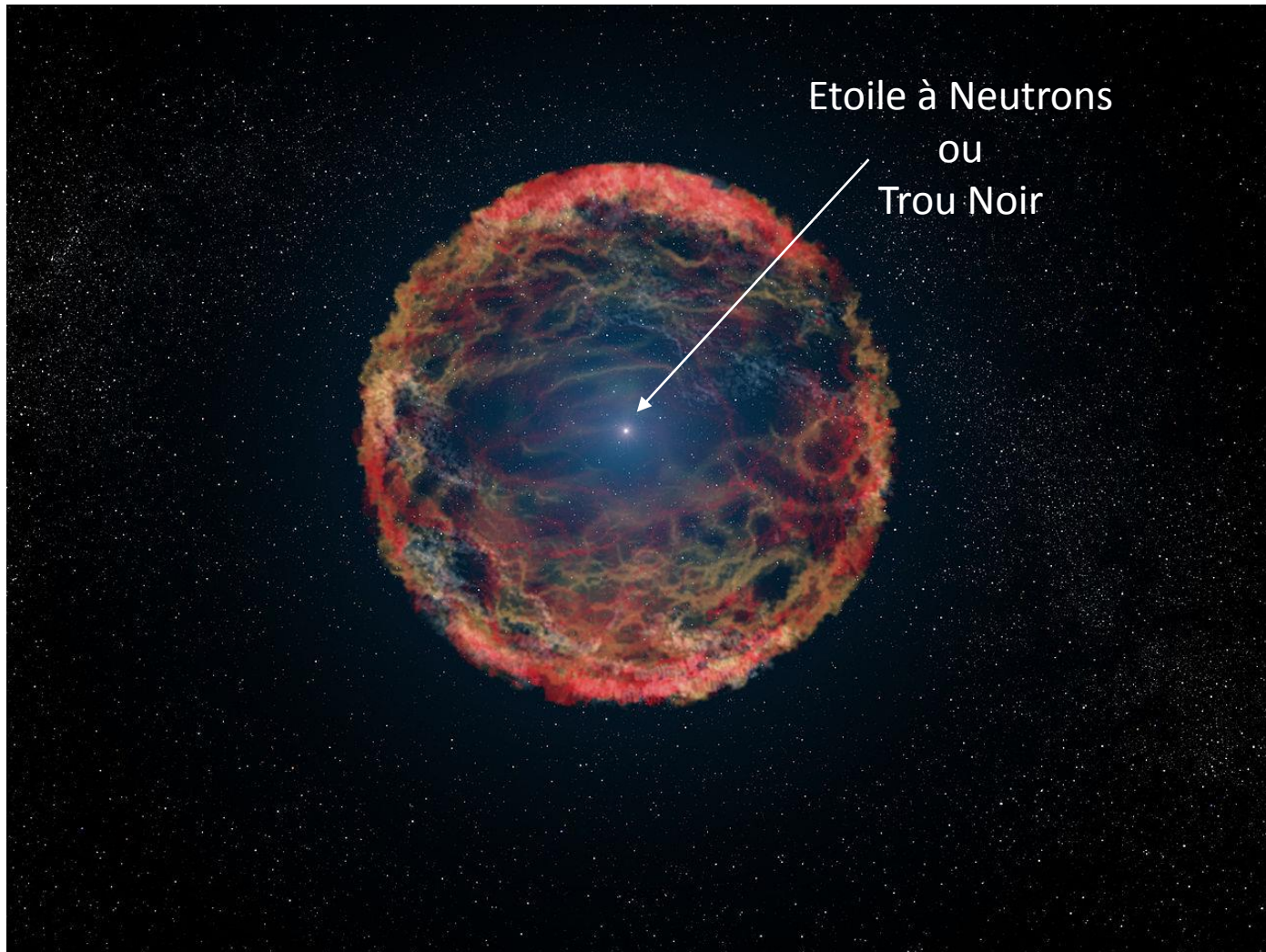


Rebond → expulsion des couches superficielles

→ Supernova !



3. Les trous noirs



3. Les trous noirs



3. Les trous noirs

Principe d'équivalence : accélération \leftrightarrow gravité

Extension du principe de relativité : les lois de la physique sont identiques dans les référentiels :

- En mouvement rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre
- En chute libre

En tout point, il existe toujours un référentiel inertiel dans lequel on ne ressent pas la gravité.

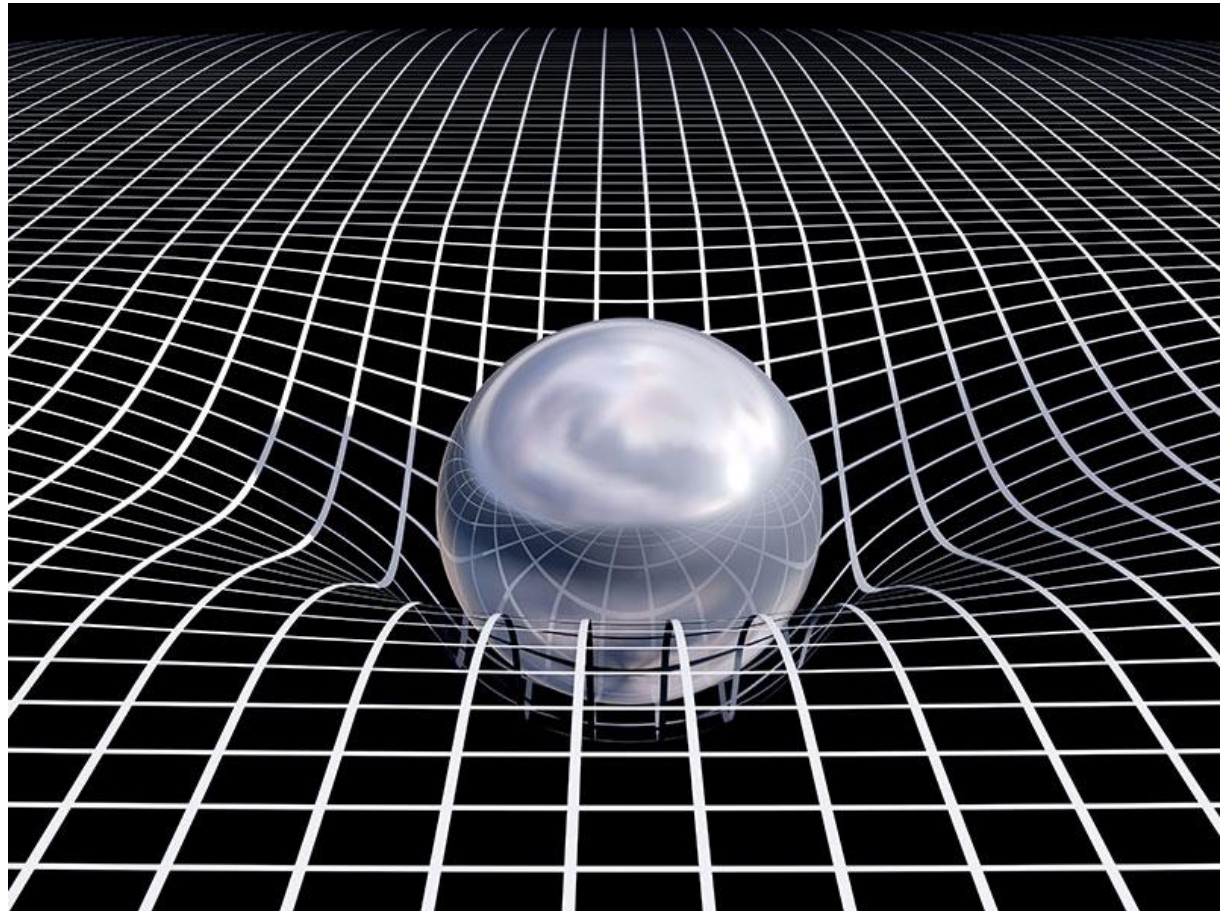
Dans ce référentiel, on peut appliquer les lois de la relativité restreinte.



3. Les trous noirs

Solution de Karl Schwarzschild (1915) à l'équation d'Einstein

Solution valable pour
des points au
voisinage d'un corps
massif sphérique



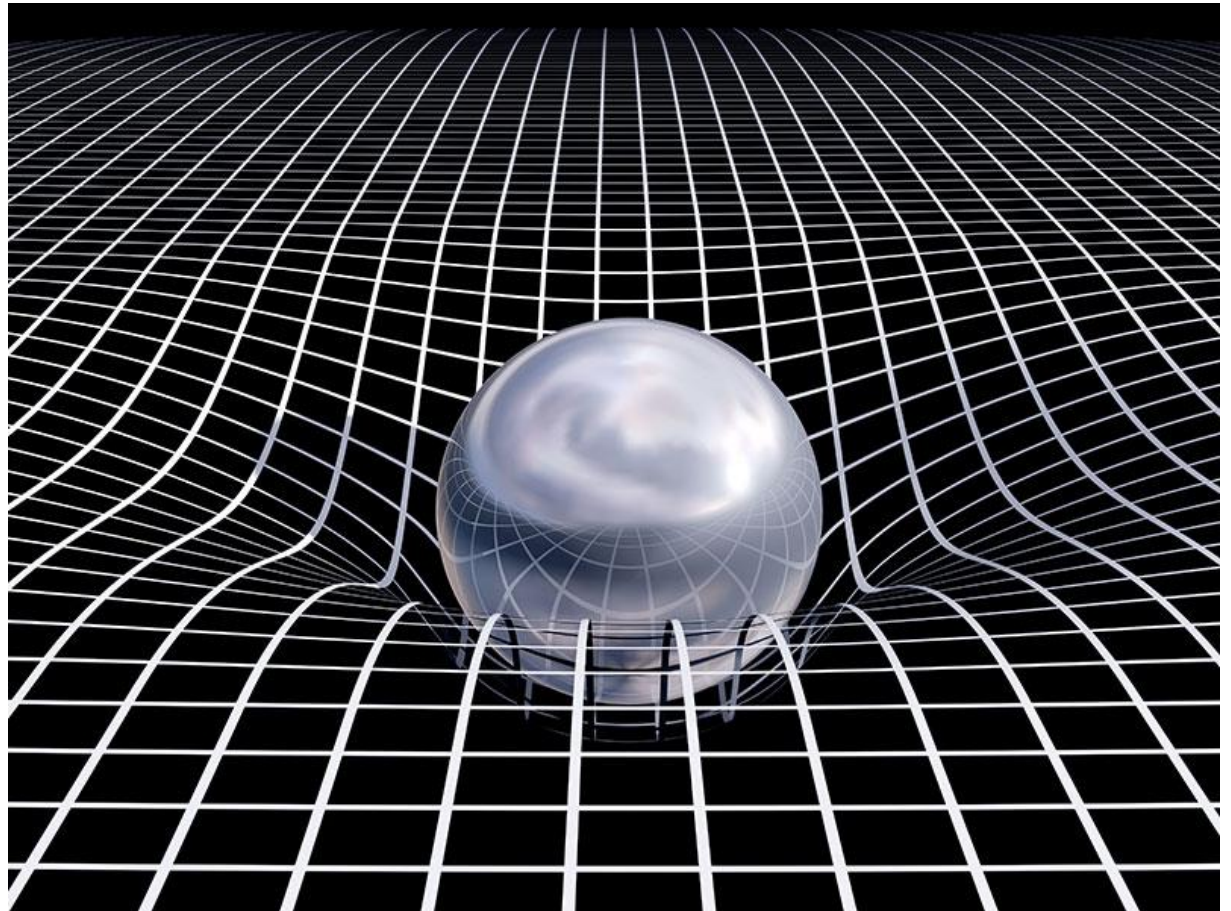
3. Les trous noirs

Solution de Karl Schwarzschild (1915) à l'équation d'Einstein

Présence d'une singularité quand le rayon est inférieur au rayon de Schwarzschild

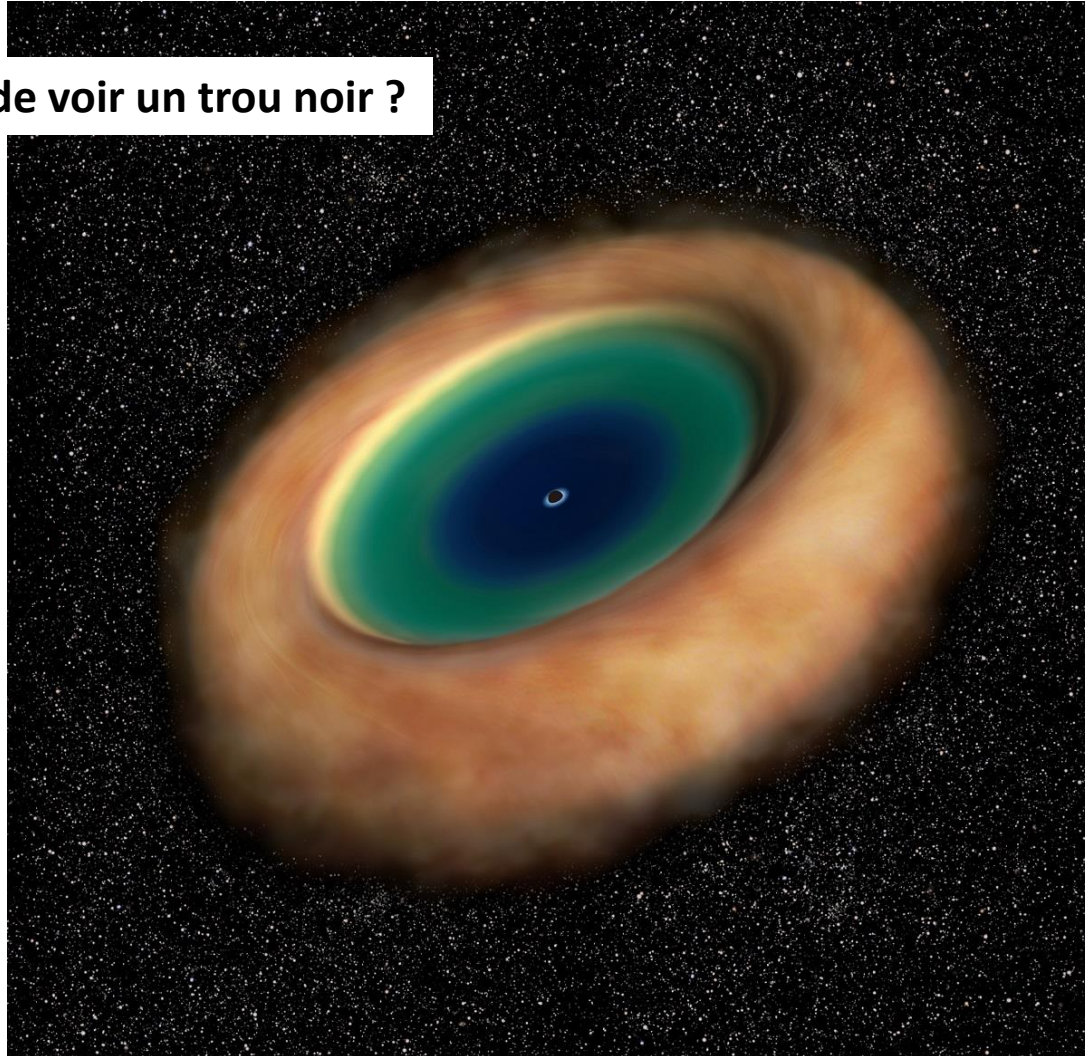
$$R_s = \frac{2 \times G \times M}{c^2}$$

L'espace-temps se déforme à l'infini.



3. Les trous noirs

Est-il possible de voir un trou noir ?

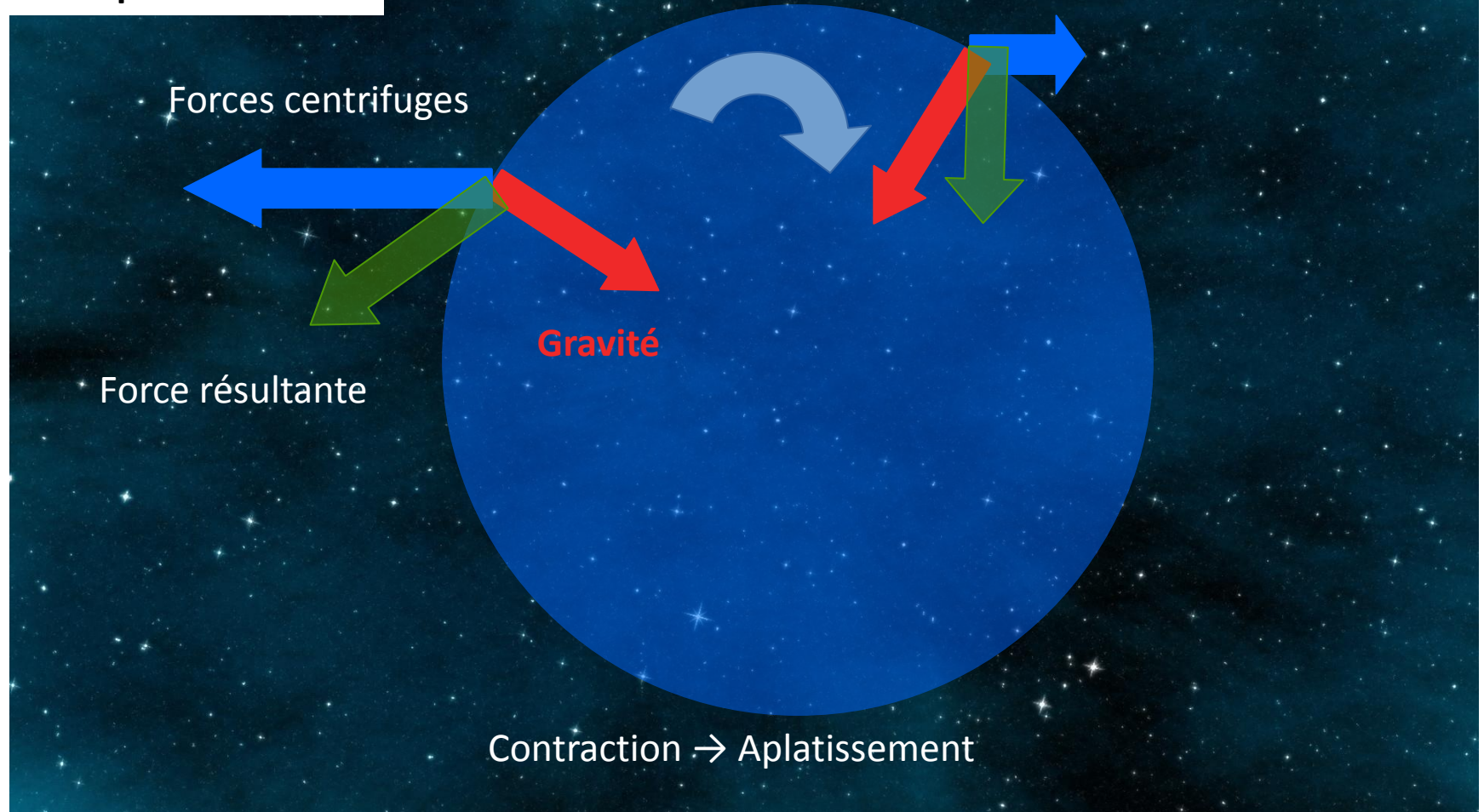


ALMA
(ESO/NAOJ/NRAO)



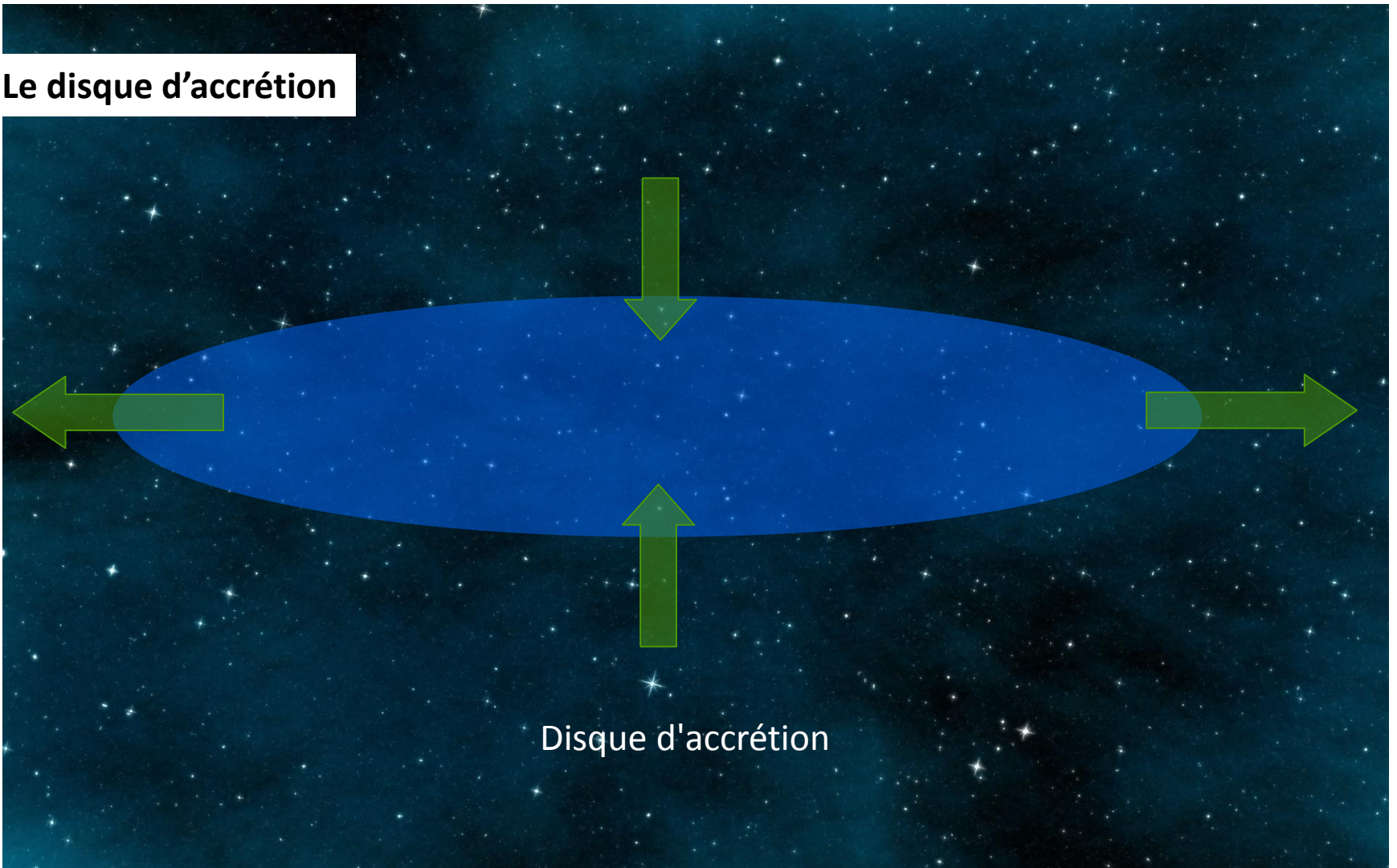
3. Les trous noirs

Le disque d'accrétion



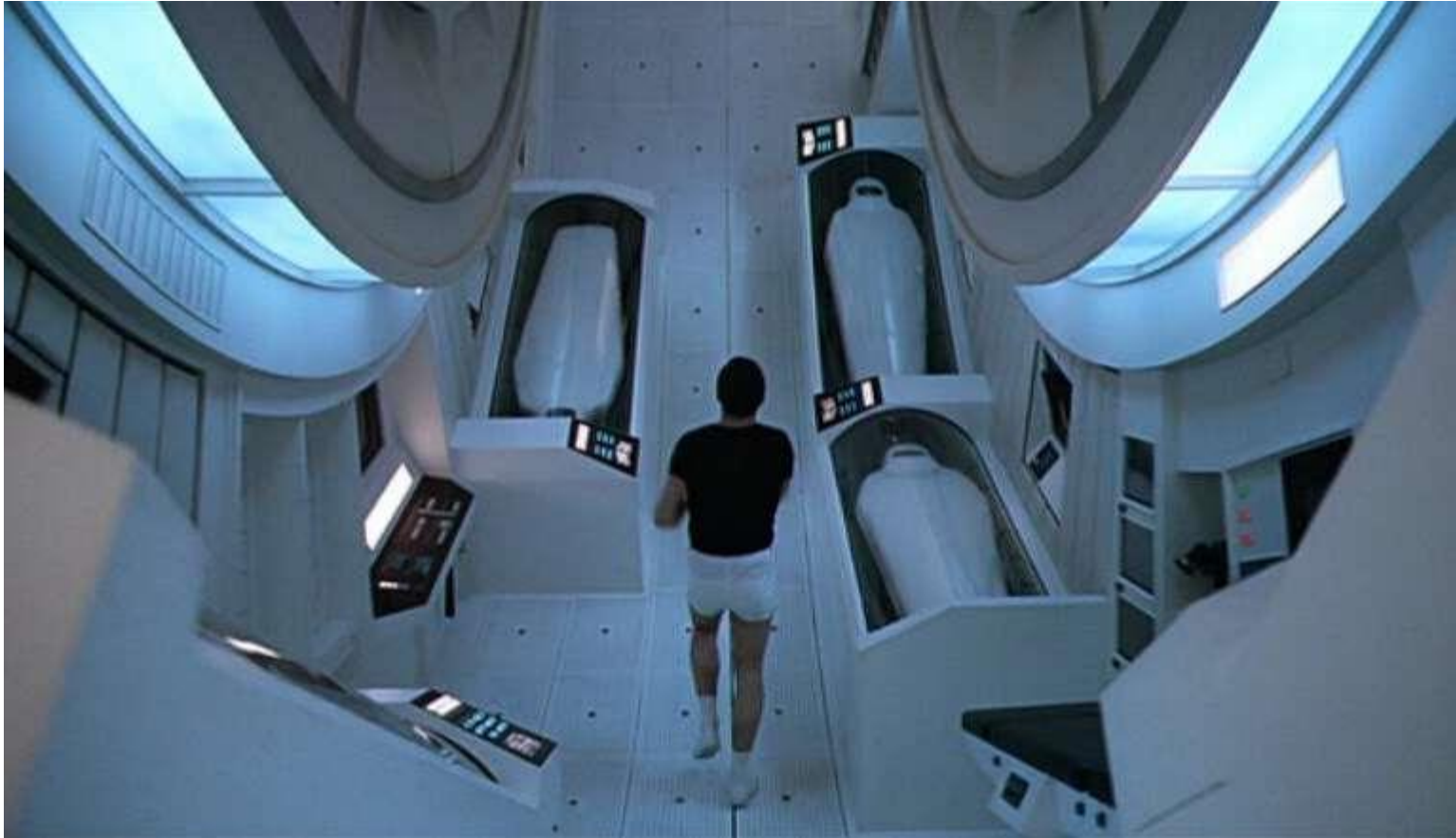
3. Les trous noirs

Le disque d'accrétion



2. Le voyage interstellaire

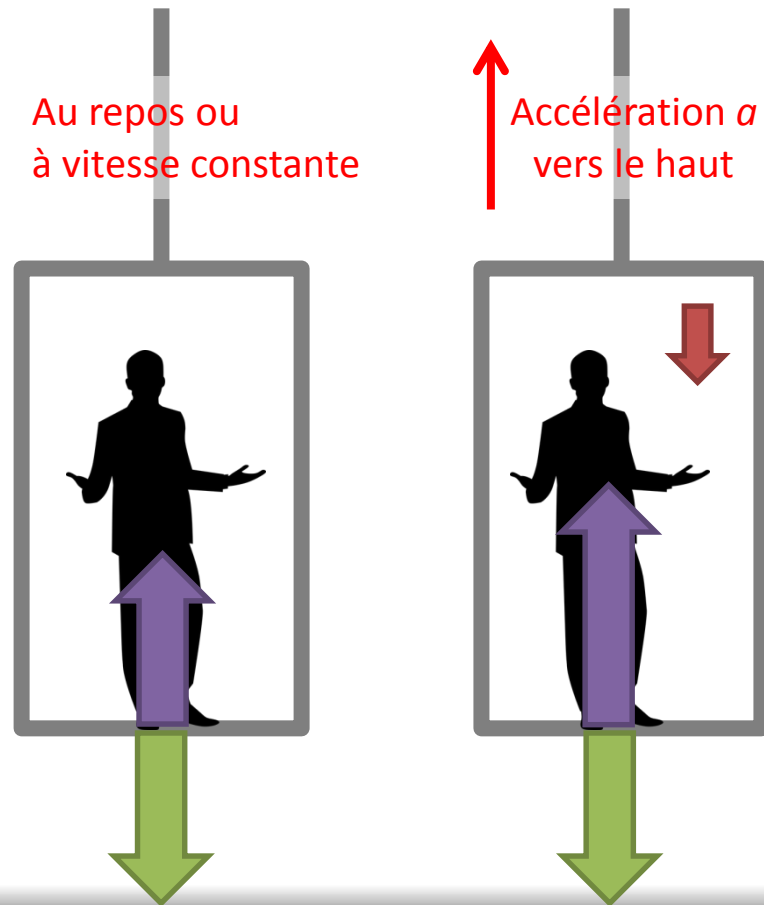
La gravité artificielle



2. Le voyage interstellaire

La gravité artificielle : l'accélération uniforme

Sur Terre



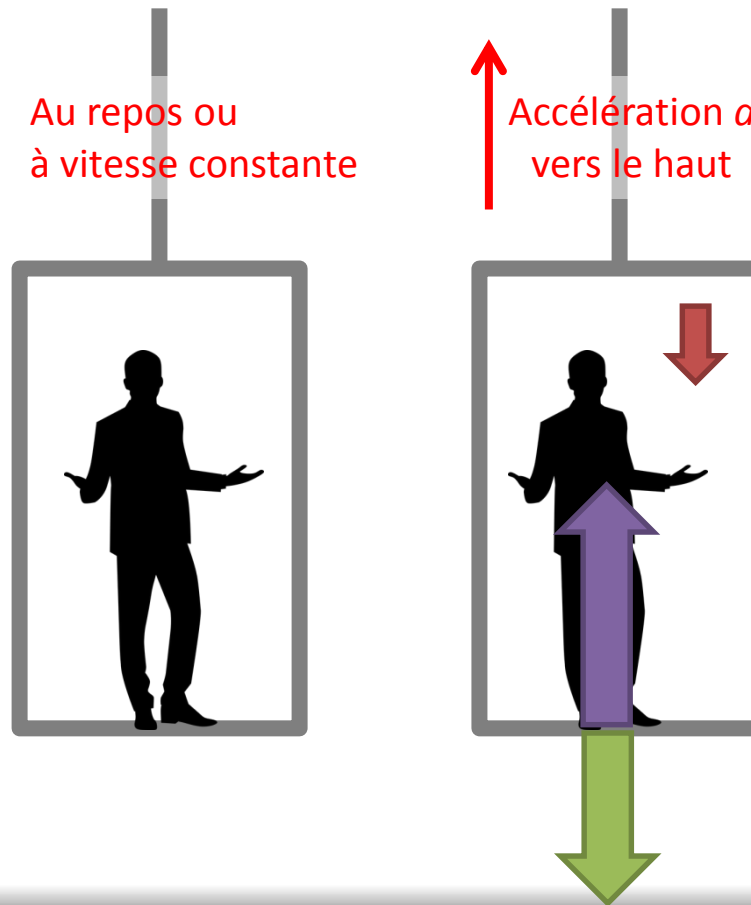
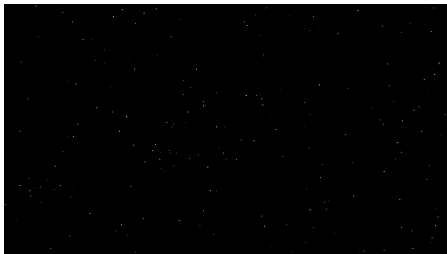
Poids apparent =
poids + masse \times a



2. Le voyage interstellaire

La gravité artificielle : l'accélération uniforme

Dans l'espace



Poids apparent =
masse \times a



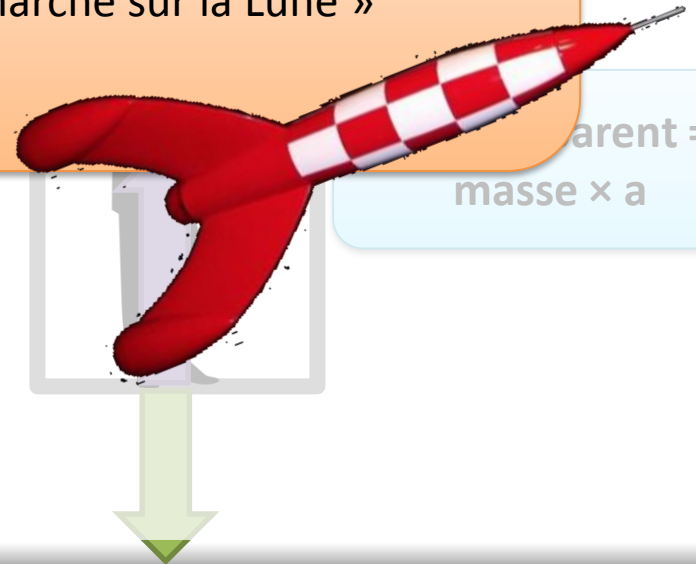
2. Le voyage interstellaire

La gravité artificielle : l'accélération uniforme

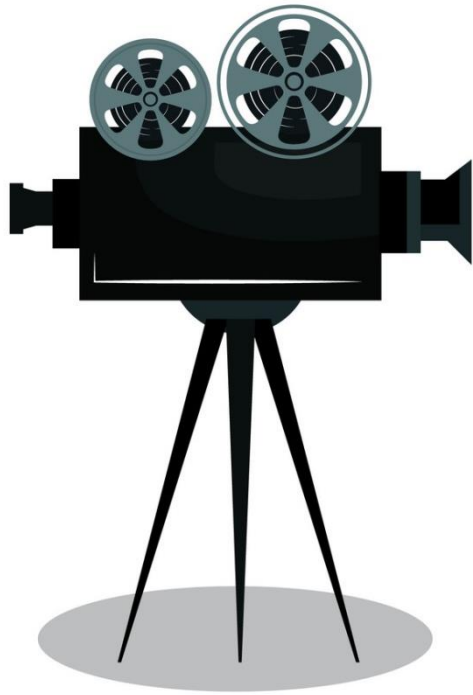
Solution possible mais coûteuse en énergie

Solution mise en scène dans « On a marché sur la Lune »

arent =
masse \times a



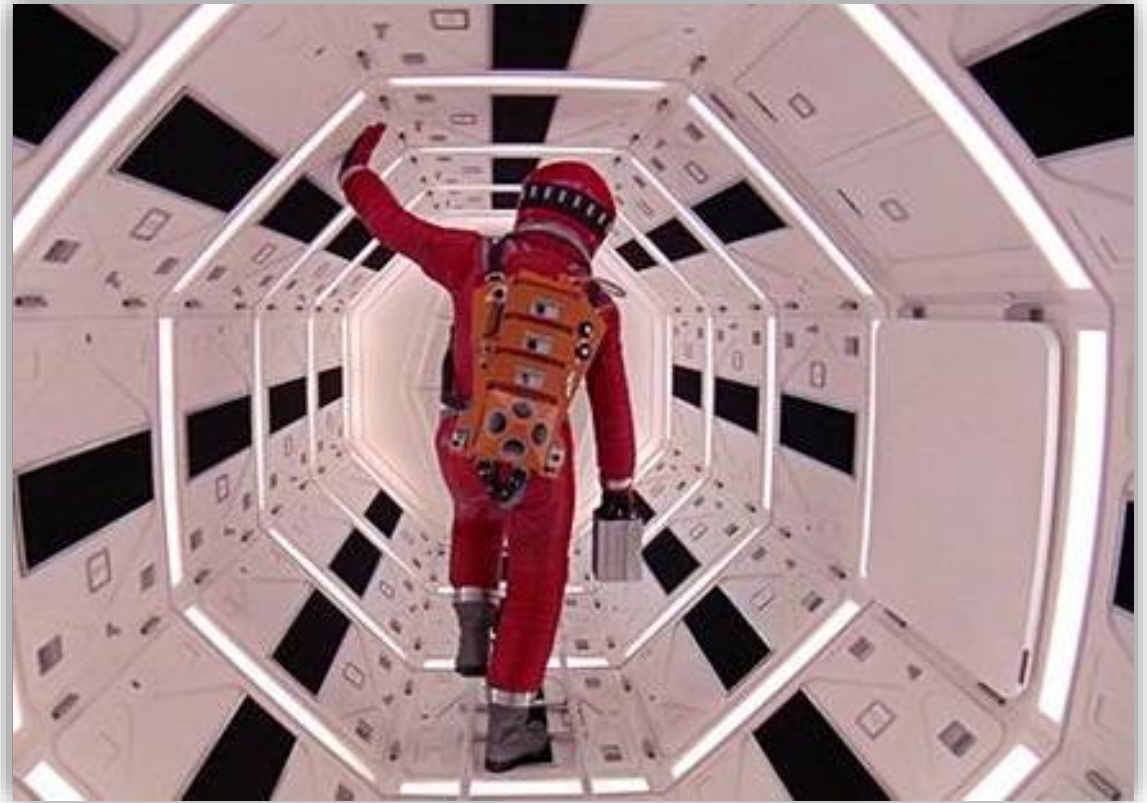
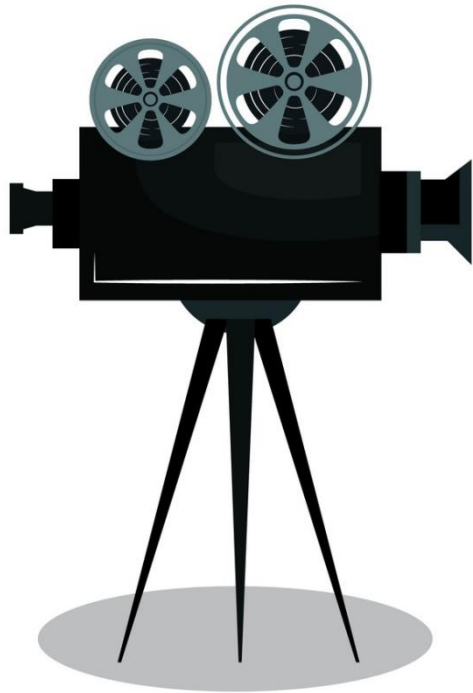
2. Le voyage interstellaire



Interstellar (2014)
« Gravité artificielle sur l'Endurance »



2. Le voyage interstellaire

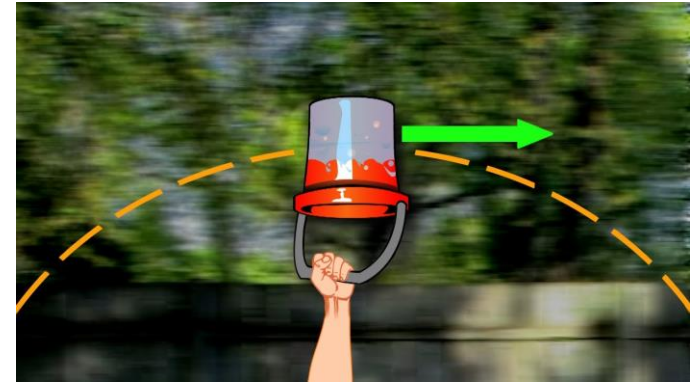
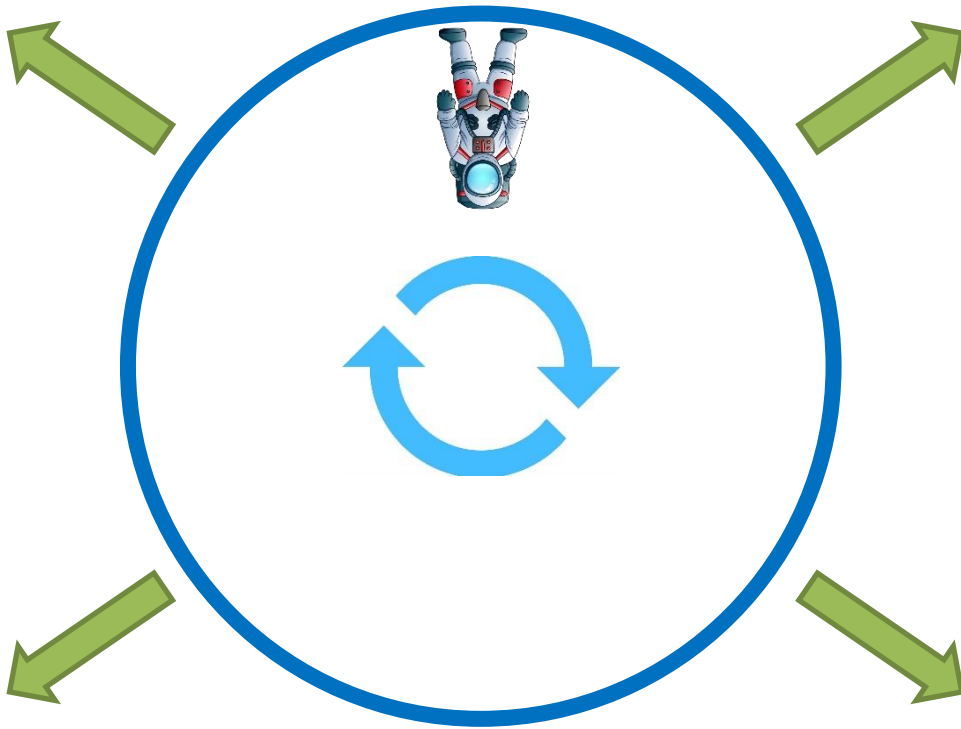


2001 l'odyssée de l'espace (1968)



2. Le voyage interstellaire

La gravité artificielle : la force centrifuge



2. Le voyage interstellaire

La gravité artificielle : la force centrifuge

Expression de la force centrifuge

$$F_{centrifuge} = m_{station} \times \left(\frac{\Omega}{2\pi \times 60} \right)^2 \times R$$

Intensité de la force centrifuge [en Newton]

Masse de la station [en kg]

Rayon de la station [en m]

Vitesse de rotation [en tour/minute]

On veut que $F_{centrifuge} = P_{homme} = m_{homme} \times g$



2. Le voyage interstellaire

La gravité artificielle : la force centrifuge

Application à la station spatiale internationale : calcul de la vitesse de rotation

$$\Omega = \sqrt{\frac{m_{\text{homme}} \times g}{m_{\text{station}} \times R}} \times 2\pi \times 60$$

M_homme = 80 kg

M_station = 400 tonnes

R = longueur = 50 m

Nb de tours par min = 2,3



1. Le contexte du film

**Brain-
storming**

Quels sont les problèmes que doit résoudre l'humanité dans les prochains siècles ?



1. Le contexte du film

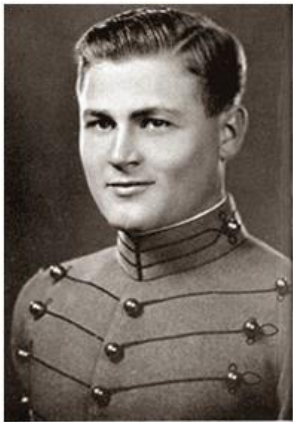
Loi de Murphy ou loi de l'emmerdement maximum

Pas une loi au sens physique, plutôt un adage qui n'a rien de scientifique

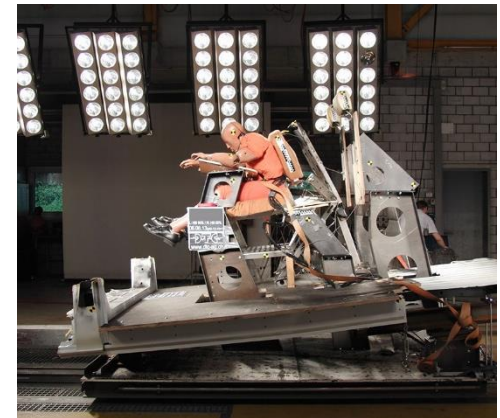
Anglais : *"If it can go wrong, it will!"*

Français : *"Si ça peut tourner mal, cela arrivera!"*

Histoire / mythe : Edward Murphy Jr., ingénieur en aéronautique



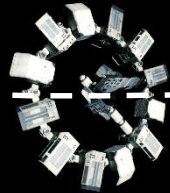
- 1947–1949 à base Edwards : étude de l'effet de la décélération sur l'être humain.
- Problème de mesure de la décélération → mise en place de jauges de contraintes.
- Les jauges de contraintes indiquent 0 car placés à l'envers.



1. Le contexte du film

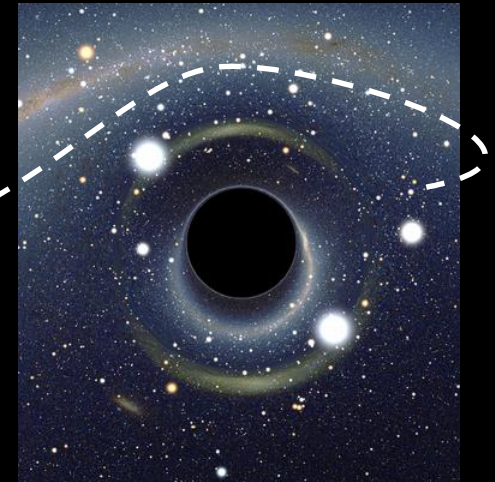
Le plan B : la bombe démographique

Laisser l'humanité
s'éteindre



Trou de ver
= raccourci

Trouver une planète viable et
recréer l'humanité à l'aide
d'ovules fécondés



1. Le contexte du film

Le plan B : la bombe démographique

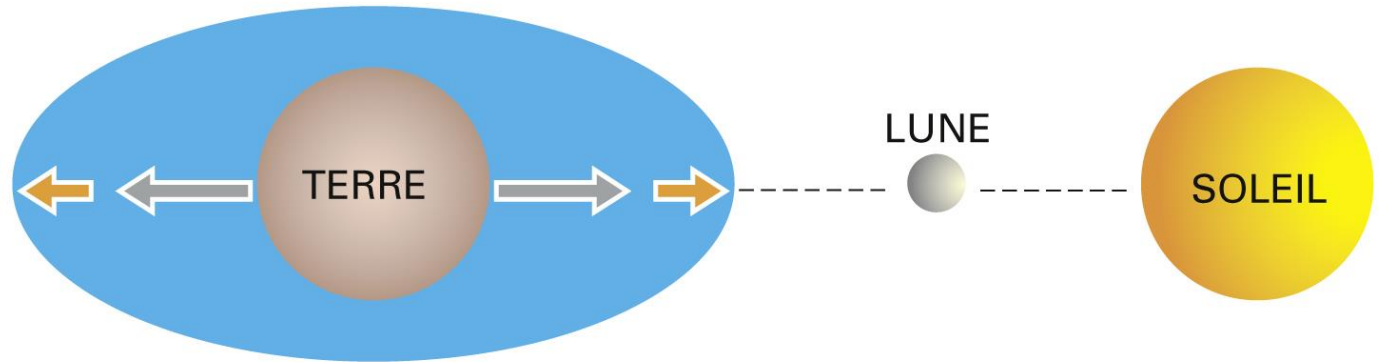
- 5 000 ovules fécondés pour un poids total de 900 kg
- Incubation des 10 premiers grâce à l'équipement embarqué
- Croissance exponentielle avec la GPA (Gestation Pour Autrui)
- 100 ans = 100 humains
- Problème pour une colonisation
= diversité génétique



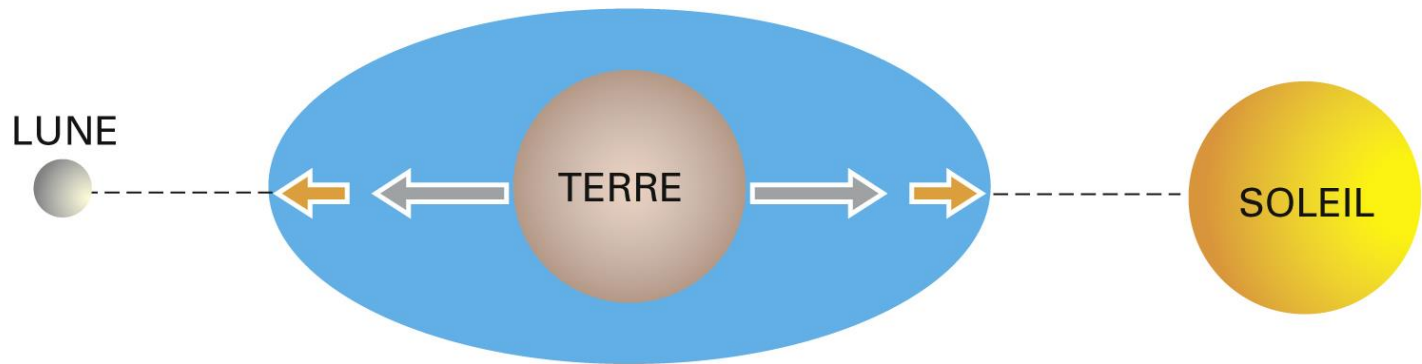
4. Que se passe-t-il sur la planète Miller ?

La marée

Marée de vive-eau en nouvelle lune (syzygie)



Marée de vive-eau en pleine lune (syzygie)



Equation d'Einstein

Courbure scalaire

Constante cosmologique

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

Tenseur de Ricci
= déformation de
l'espace temps

Tenseur métrique
= caractéristique de l'espace-temps
= inconnue

Tenseur énergie-impulsion
= répartition énergie-
masse dans l'espace-temps

Comme tenseurs symétriques 4x4 → 10 relations indépendantes entre les composantes

