

Plan

Introduction à la relativité générale

Principes et formalisme

Tests expérimentaux

Difficultés

Richard Taillet
Juillet 2019

Université Savoie Mont Blanc
LAPTh (Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique Théorique)

Principes

Nécessité d'une théorie relativiste de la gravitation

L'interaction gravitationnelle ne peut pas être instantanée

Elle doit prendre en compte la relativité restreinte

Programme mené à bien par Albert Einstein en 1915

Principes

Quelques rappels de mécanique classique

Principes

Universalité de la chute libre :

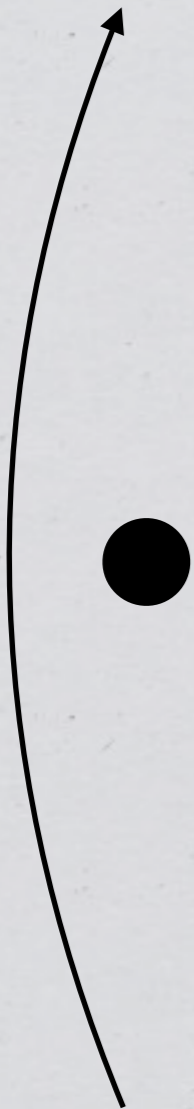
« Les objets lancés ou lâchés de la même façon et soumis à la gravitation tombent de la même façon, indépendamment de leur masse »

$$m_i \vec{a} = m_g \vec{g}$$

égalité de la masse grave et de la masse inertielle



Principes



$$\vec{a} = \vec{g}$$

égalité de la masse grave et de la masse inertielle

Principes

Dans le référentiel en chute libre

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

$$m \vec{a} = m\vec{g} - m\vec{a}_e = \vec{0}$$

Principe d'équivalence :

*« Les lois de la physique,
pour un observateur en chute libre dans un champ gravitationnel,
sont localement identiques à celles en l'absence de gravitation »*



Principes

La chute libre : reprenons !



Principes

Dans un référentiel en chute libre $m \vec{a} = \vec{0}$

Dans le référentiel qui nous intéresse (le laboratoire)

$$m \vec{a} = -m \vec{a}_e$$

Principes

Dans un référentiel en chute libre $\cancel{m} \vec{a} = \vec{0}$

Dans le référentiel qui nous intéresse (le laboratoire)

$$\cancel{m} \vec{a} = -\cancel{m} \vec{a}_e = \cancel{m} \vec{g}$$

Principes

Qu'est-ce que ça donne en relativité restreinte ?

Principes

Dans un référentiel en chute libre $\vec{a} = \vec{0}$

Dans le référentiel qui nous intéresse (le laboratoire)

$$\vec{a} = -\vec{a}_e = \vec{g}$$

Principes

Dans un référentiel en chute libre

$$\vec{a} = \vec{0}$$

$$\frac{d^2 \xi^\mu}{d\tau^2} = 0$$

Dans le référentiel qui nous intéresse (le laboratoire)

$$\xi^\mu \rightarrow x^\mu (\xi^0, \xi^1, \xi^2, \xi^3)$$

$$\vec{a} = -\vec{a}_e = \vec{g}$$

$$\sum_{\alpha=0}^3 \sum_{\beta=0}^3 \Gamma_{\alpha\beta}^{\mu} \frac{dx^{\alpha}}{d\tau} \frac{dx^{\beta}}{d\tau} + \frac{d^2 x^{\mu}}{d\tau^2} = 0$$

Principes

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\tau^2} + \Gamma_{\alpha\beta}^\mu \frac{dx^\alpha}{d\tau} \frac{dx^\beta}{d\tau} = 0$$

Principes

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\tau^2} + \Gamma_{\alpha\beta}^\mu \frac{dx^\alpha}{d\tau} \frac{dx^\beta}{d\tau} = 0$$

où $\Gamma_{\alpha\beta}^\mu = \sum_{\sigma=0}^3 \frac{\partial x^\mu}{\partial \xi^\sigma} \frac{\partial^2 \xi^\sigma}{\partial x^\alpha \partial x^\beta}$

$$\Gamma_{\alpha\beta}^\mu \equiv \frac{\partial x^\mu}{\partial \xi^\sigma} \frac{\partial^2 \xi^\sigma}{\partial x^\alpha \partial x^\beta}$$

c'est la **connexion affine**

Elle décrit les forces d'inertie

Principes

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\tau^2} + \Gamma_{\alpha\beta}^\mu \frac{dx^\alpha}{d\tau} \frac{dx^\beta}{d\tau} = 0$$

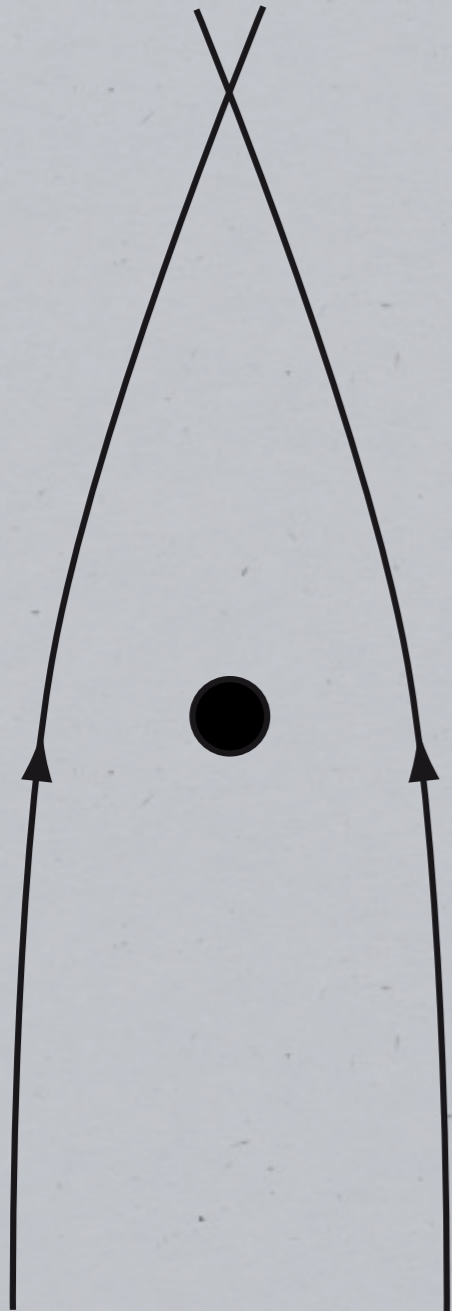
c'est l'**équation des géodésiques**

Elle donne l'équation des lignes droites dans n'importe quel système de coordonnées

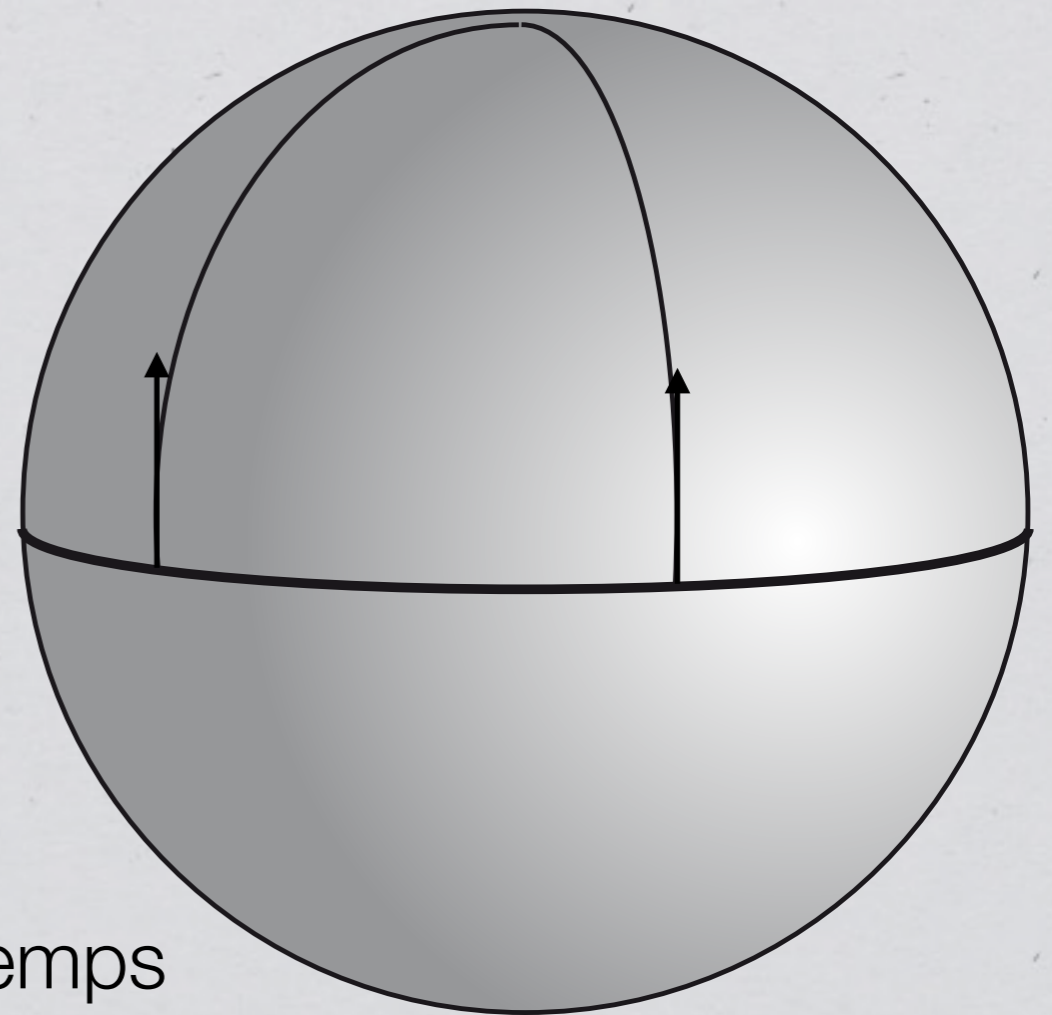
Elle donne l'équation des chemins les plus courts sur des surfaces courbes

Principes

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\tau^2} + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} \frac{dx^\alpha}{d\tau} \frac{dx^\beta}{d\tau} = 0$$



la gravitation est une
manifestation de la
courbure de l'espace-temps



Principes

La géométrie de l'espace-temps

Principes

Dans l'espace-temps usuel (plat) de la RR, l'**intervalle** est défini par

$$ds^2 = dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

cette relation définit la géométrie de l'espace-temps

Trajectoires des particules sans masse : $ds^2 = 0$

Principes

Dans l'espace-temps usuel (plat) de la RR, l'**intervalle** est défini par

$$ds^2 = dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

réécriture
compacte

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} d\xi^\mu d\xi^\nu$$

$$\eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

tenseur métrique

$g_{\mu\nu}$

Dans un référentiel accéléré ou dans un espace-temps courbe

détermine la relation entre coordonnées et « distances » (géométrie)

Principes

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} d\xi^\mu d\xi^\nu$$



$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

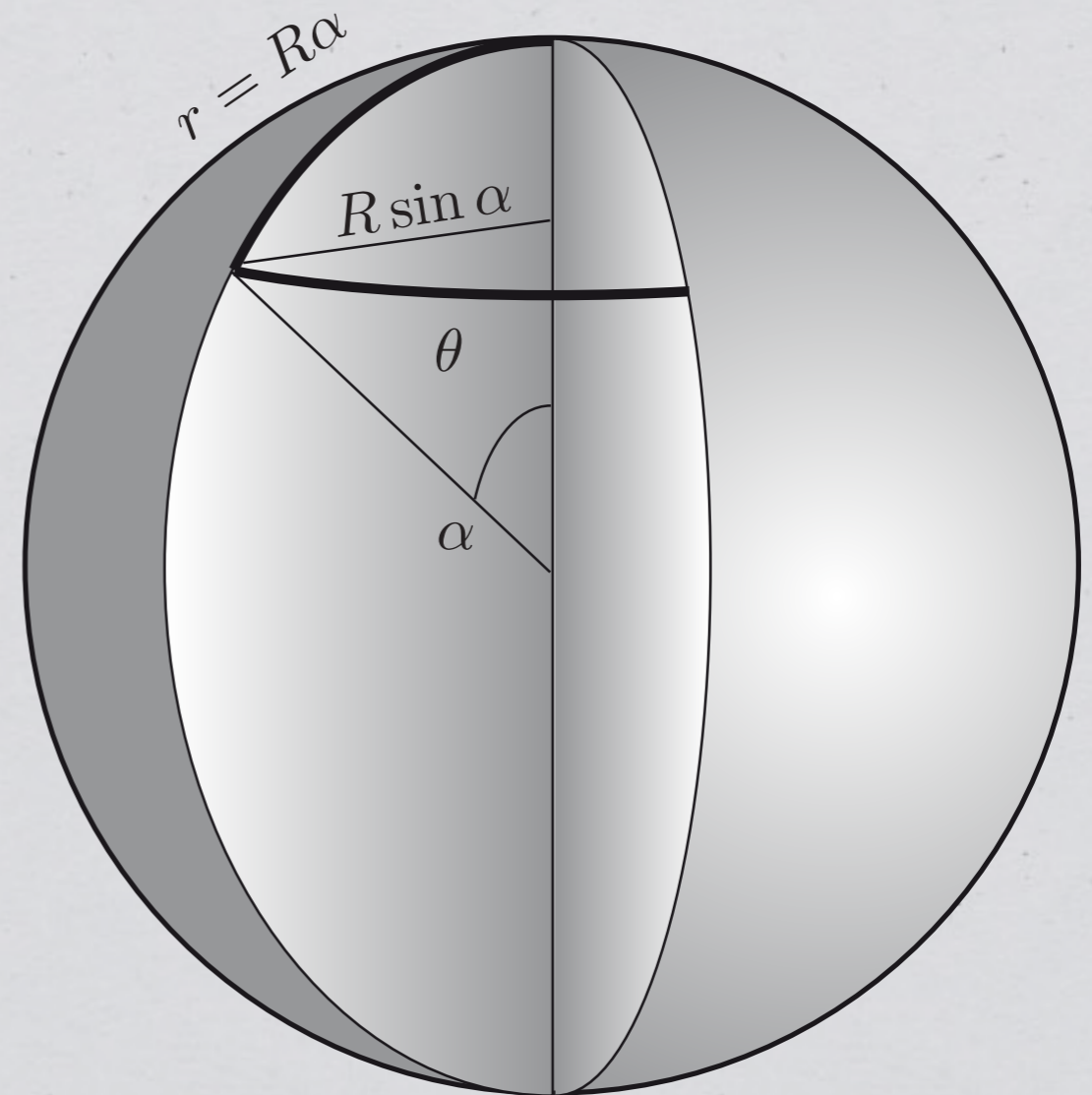
$g_{\mu\nu}$

Principes

Dans un référentiel accéléré ou dans un espace-temps courbe

détermine la relation entre coordonnées et « distances » (géométrie)

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$



$$d\ell^2 = R^2 d\alpha^2 + R^2 \sin^2 \alpha d\theta^2$$

$g_{\mu\nu}$

Principes

Dans un référentiel accéléré ou dans un espace-temps courbe

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

c'est aussi un potentiel gravitationnel

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\tau^2} = -\Gamma_{\alpha\beta}^\mu \frac{dx^\alpha}{d\tau} \frac{dx^\beta}{d\tau}$$

$$\Gamma_{\alpha\beta}^\mu = \frac{1}{2} g^{\sigma\mu} \left(\frac{\partial g_{\sigma\alpha}}{\partial x^\beta} + \frac{\partial g_{\sigma\beta}}{\partial x^\alpha} - \frac{\partial g_{\alpha\beta}}{\partial x^\sigma} \right)$$

Γμν

Γμν

La gémunustique, sport de l'extrême !

Principes

Remarques

Principes

Remarque #1 sur le potentiel gravitationnel

La présence d'un champ gravitationnel affecte les distances et les durées

$$ds^2 = g_{00} dt^2 + 2 g_{10} dt dx + 2 g_{20} dt dy + 2 g_{30} dt dz \\ + g_{11} dx^2 + 2 g_{12} dx dy + 2 g_{13} dx dz + 2 g_{23} dy dz + g_{33} dz^2$$

MATTHEW
McCONAUGHEY

ANNE
HATHAWAY

JESSICA
CHASTAIN

MICHAEL
AND CAINE



A FILM BY CHRISTOPHER NOLAN

INTERSTELLAR

THE END OF EARTH WILL NOT BE THE END OF US.

WARNER BROS. PICTURES AND PARAMOUNT PICTURES PRESENT

IN ASSOCIATION WITH LEGENDARY PICTURES A SYNCOPY/LYNDA OBST PRODUCTIONS PRODUCTION A FILM BY CHRISTOPHER NOLAN "INTERSTELLAR"
MATTHEW McCONAUGHEY ANNE HATHAWAY JESSICA CHASTAIN BILL IRWIN ELLEN BURSTYN AND MICHAEL CAINE COSTUMES DESIGNED BY MARY ZOPHRES

MUSIC BY HANS ZIMMER EDITOR LEE SMITH, A.C.E. PRODUCTION DESIGNER NATHAN CROWLEY DIRECTOR OF PHOTOGRAPHY HOYTE VAN HOYTEMA, F.S.F., N.S.C.
EXECUTIVE PRODUCERS JORDAN GOLDBERG JAKE MYERS KIP THORNE THOMAS TULL WRITTEN BY JONATHAN NOLAN AND CHRISTOPHER NOLAN
PRODUCED BY EMMA THOMAS CHRISTOPHER NOLAN LYNDA OBST DIRECTED BY CHRISTOPHER NOLAN



LEGENDARY



twitter.com/InterstellarUK

NOVEMBER 7

facebook.com/Interstellarmovie

WARNER BROS. PICTURES
© 2014 Warner Bros. Inc. All Rights Reserved

Principes

Remarque #2 sur le potentiel gravitationnel

$$\frac{GM}{r} \quad \text{a la dimension physique de } v^2$$

$$\frac{GM}{c^2} \quad \text{a la dimension physique d'une longueur}$$

Principes

Rayon de Schwarzschild

$$r_s \equiv \frac{2GM}{c^2} \approx \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \times 2,97 \text{ km}$$

environ 3 km pour le Soleil,

environ 1 cm pour la Terre,

quelques millions de km pour un trou noir supermassif

Principes

La courbure détermine le mouvement

Qu'est-ce qui détermine la courbure ?

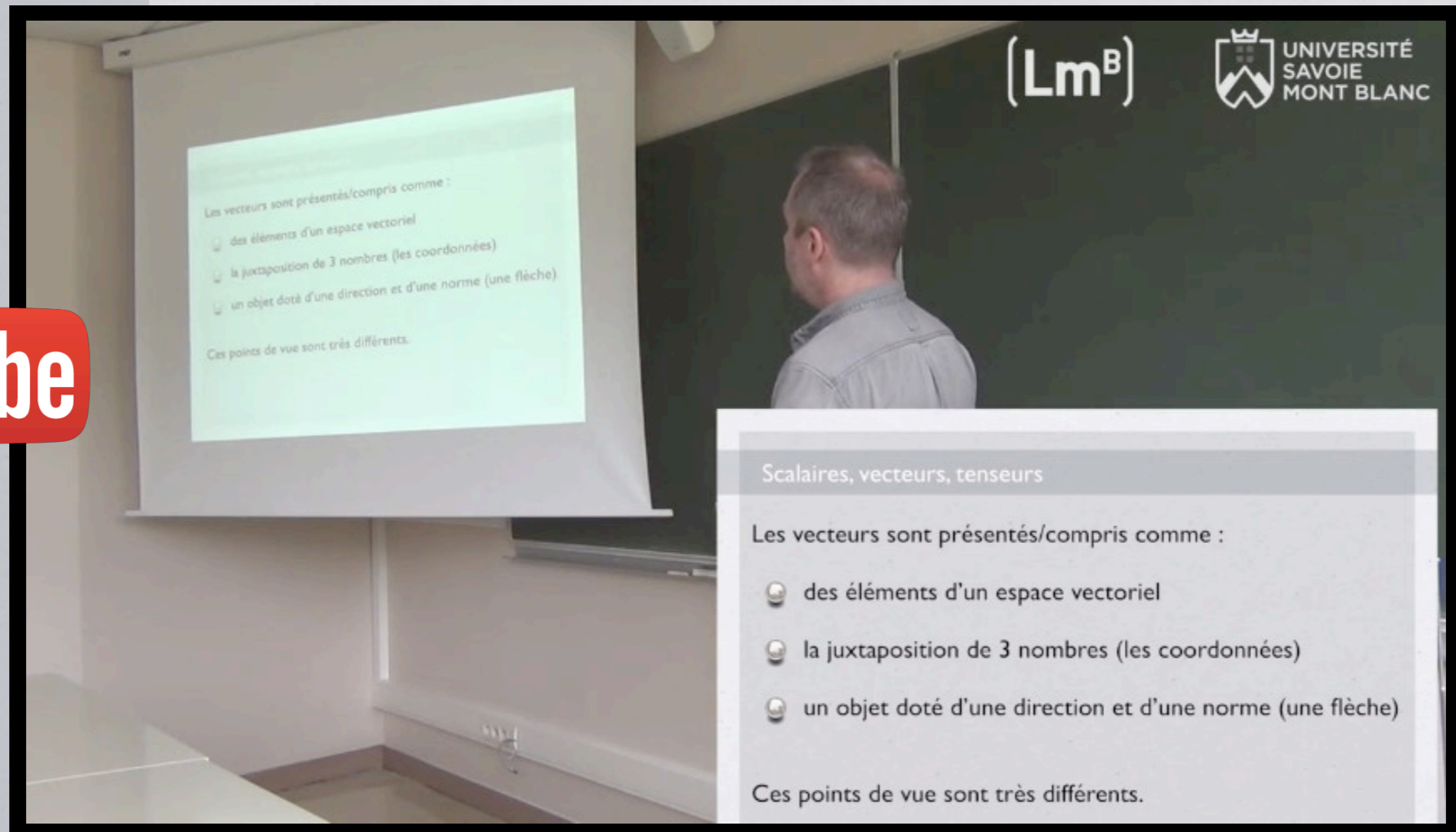
(= qu'est-ce qui détermine la métrique ?)

Principes

Covariance

Principes

« Conférence sur les grandeurs physiques »



https://www.youtube.com/watch?v=Z1li_c7-D1k

Principes

Une théorie satisfaisante doit être formulée de façon covariante

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

En relativité restreinte : objets qui se transforment de façon identique par transformations de Lorentz

[quadrivecteur] = [quadrivecteur]

[tenseur] = [tenseur]

Principes

En RG, les **tenseurs** sont des grandeurs qui se transforment d'une façon bien définie par changement de coordonnées $x^\mu \rightarrow x'^\mu$

vecteurs

$$V'^\mu = \frac{\partial x'^\mu}{\partial x^\alpha} V^\alpha$$

$$V'_\mu = \frac{\partial x^\alpha}{\partial x'^\mu} V_\alpha$$

tenseur de rang 2

$$T'^{\mu\nu} = \frac{\partial x'^\mu}{\partial x^\alpha} \frac{\partial x'^\nu}{\partial x^\beta} T^{\alpha\beta}$$

scalaire

$$A' = A$$

Principes

Exemple : temps propre τ , position x^μ , quadri-vitesse $\frac{dx^\mu}{d\tau}$

tenseur de courbure

$$R_{\mu\nu\alpha}^{\lambda} = \frac{\partial \Gamma_{\mu\alpha}^{\lambda}}{\partial x^{\nu}} - \frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}}{\partial x^{\alpha}} + \Gamma_{\nu\eta}^{\lambda} \Gamma_{\mu\alpha}^{\eta} - \Gamma_{\alpha\eta}^{\lambda} \Gamma_{\mu\nu}^{\eta}$$

tenseur de Ricci

$$R_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu\alpha}^{\alpha}$$

scalaire de Ricci

$$R = R_{\alpha}^{\alpha}$$

gradient

$$\partial_{\mu} \Phi \equiv \frac{\partial \Phi}{\partial x^{\mu}}$$

Principes

On s'impose d'écrire des égalités entre tenseurs

Principes

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = -8\pi GT_{\mu\nu}$$

$$R = R^\alpha_\alpha$$

$$R_{\mu\nu} \equiv R^\alpha_{\mu\nu\alpha}$$

$$R^\lambda_{\mu\nu\alpha} = \frac{\partial \Gamma^\lambda_{\mu\alpha}}{\partial x^\nu} - \frac{\partial \Gamma^\lambda_{\mu\nu}}{\partial x^\alpha} + \Gamma^\lambda_{\nu\eta} \Gamma^\eta_{\mu\alpha} - \Gamma^\lambda_{\alpha\eta} \Gamma^\eta_{\mu\nu}$$

$$\Gamma^\mu_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}g^{\sigma\mu} \left(\frac{\partial g_{\sigma\alpha}}{\partial x^\beta} + \frac{\partial g_{\sigma\beta}}{\partial x^\alpha} - \frac{\partial g_{\alpha\beta}}{\partial x^\sigma} \right)$$

Principes

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = -8\pi GT_{\mu\nu}$$

équations d'Einstein

Ce sont 16 équations différentielles portant sur le tenseur métrique.

Elles sont hautement non linéaires

$$R = R_{\alpha}^{\alpha}$$

$$R_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu\alpha}^{\alpha}$$

$$R_{\mu\nu\alpha}^{\lambda} = \frac{\partial \Gamma_{\mu\alpha}^{\lambda}}{\partial x^{\nu}} - \frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}}{\partial x^{\alpha}} + \Gamma_{\nu\eta}^{\lambda} \Gamma_{\mu\alpha}^{\eta} - \Gamma_{\alpha\eta}^{\lambda} \Gamma_{\mu\nu}^{\eta}$$

$$\Gamma_{\alpha\beta}^{\mu} = \frac{1}{2}g^{\sigma\mu} \left(\frac{\partial g_{\sigma\alpha}}{\partial x^{\beta}} + \frac{\partial g_{\sigma\beta}}{\partial x^{\alpha}} - \frac{\partial g_{\alpha\beta}}{\partial x^{\sigma}} \right)$$

Principes

Métrie de Schwarzschild

dans le vide

pas de charge électrique

distribution de masse à symétrie sphérique

isotropie

conditions aux limites plates

coordonnées sphériques

constante cosmologique nulle

Métrie de Schwarzschild

Principes

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{r_s}{r} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix}$$

$$\frac{r_s}{r} = \frac{2GM}{rc^2} = \frac{2\phi}{c^2}$$

$$\frac{r_s}{r} \approx 10^{-9}$$

à la surface de la Terre

$$\frac{r_s}{r} \approx 10^{-6}$$

à la surface du Soleil

Remarque sur la géométrie

Principes

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\phi^2$$

temps fixé

plan équatorial

$$dl^2 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\theta^2$$

distance radiale entre
deux points

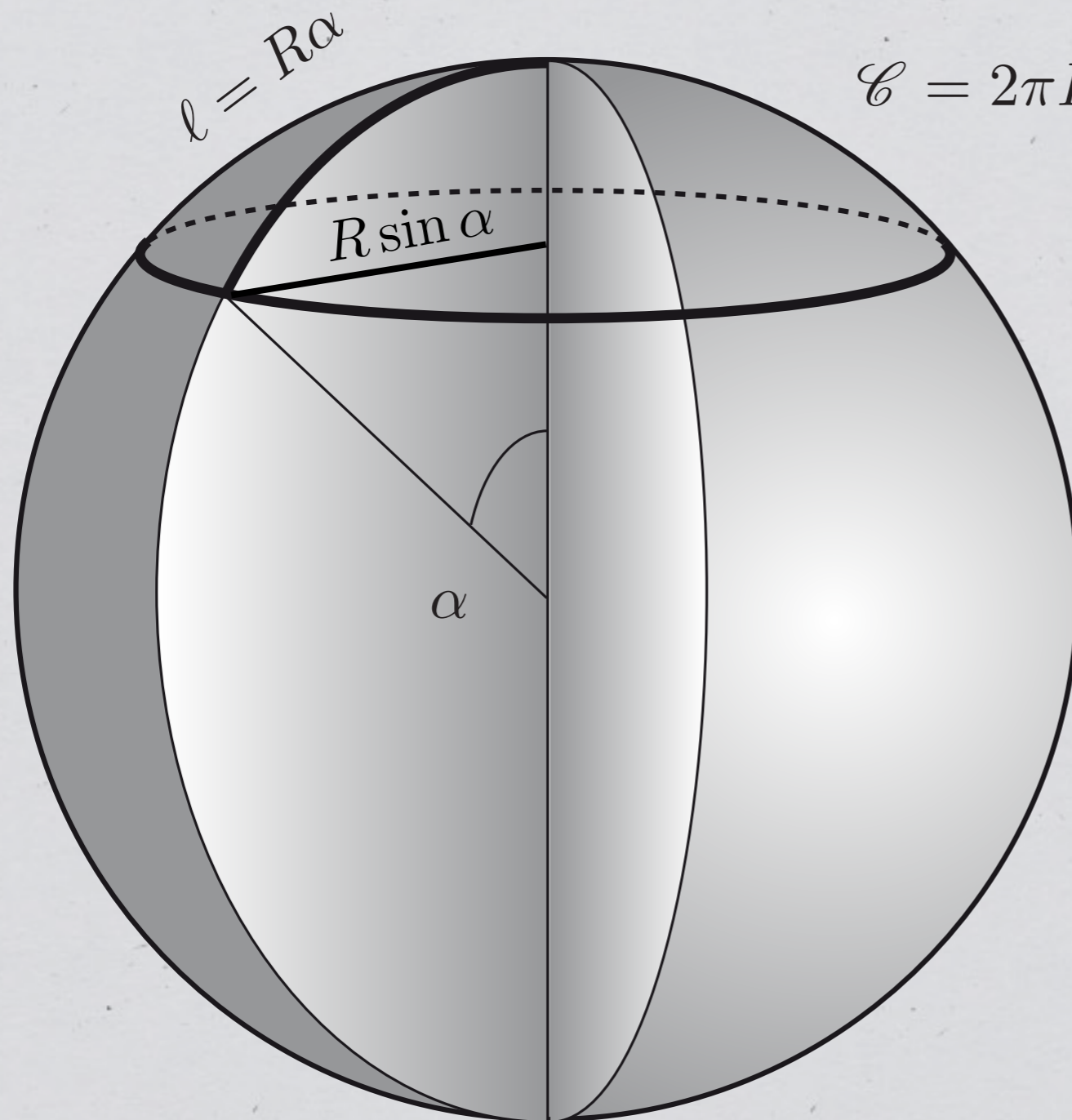
$$\Delta l_{AB} \approx r_B - r_A + \frac{1}{2} r_s \ln \left(\frac{r_B}{r_A} \right)$$

circonférence d'un cercle
de rayon-coordonnée r

$$\mathcal{C} = 2\pi r$$

Remarque sur la géométrie

Principes



$$\mathcal{C} = 2\pi R \sin \left(\frac{l}{R} \right)$$

sur une sphère

$$\mathcal{C} = 2\pi l$$

sur un plan

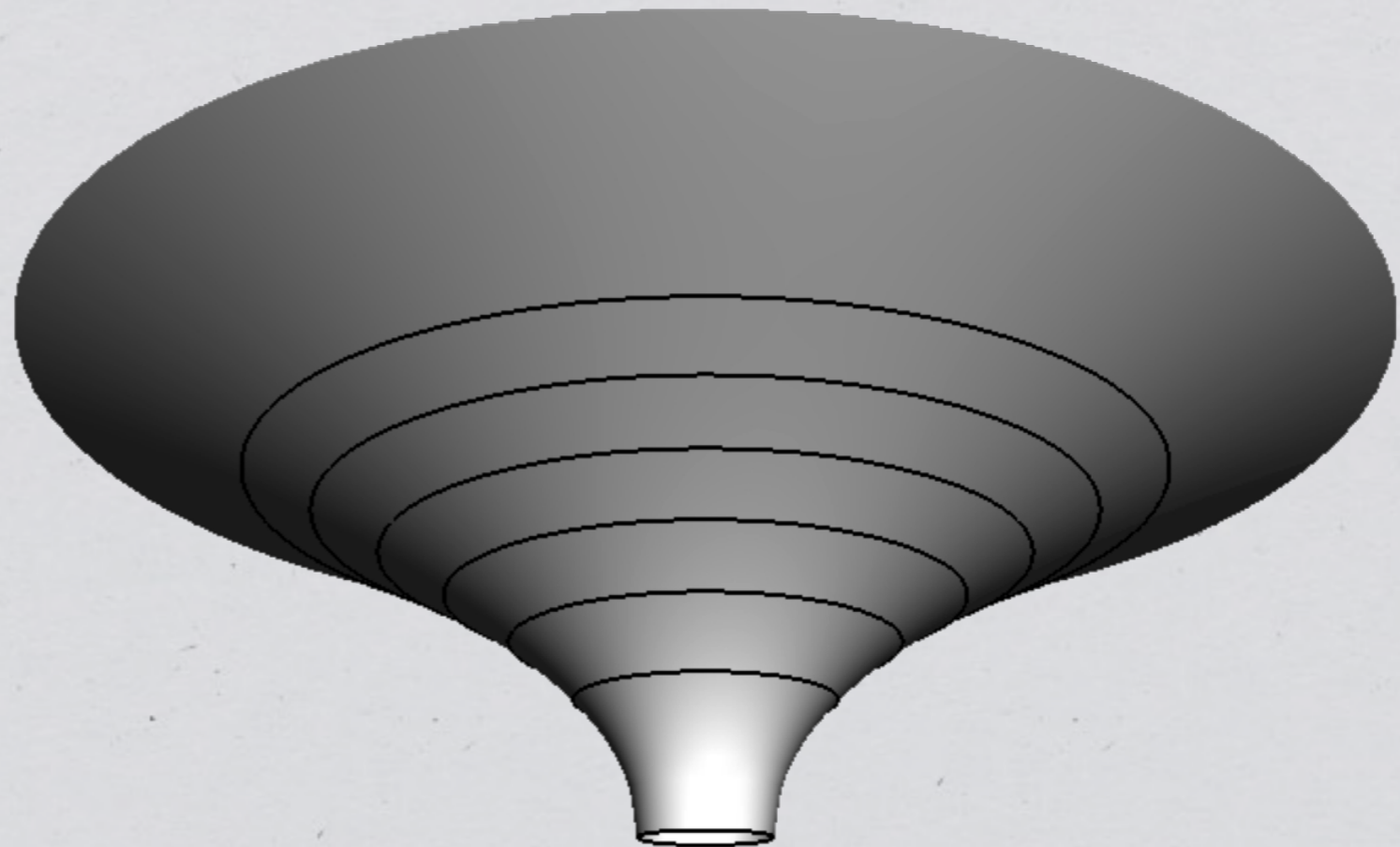
Principes

Remarque sur la géométrie

pour la métrique de Schwarzschild, dans le plan équatorial :

$$\Delta l_{AB} \approx r_B - r_A + \frac{1}{2} r_s \ln \left(\frac{r_B}{r_A} \right)$$
$$\mathcal{C} = 2\pi r$$

paraboloïde
de Flamm



Principles

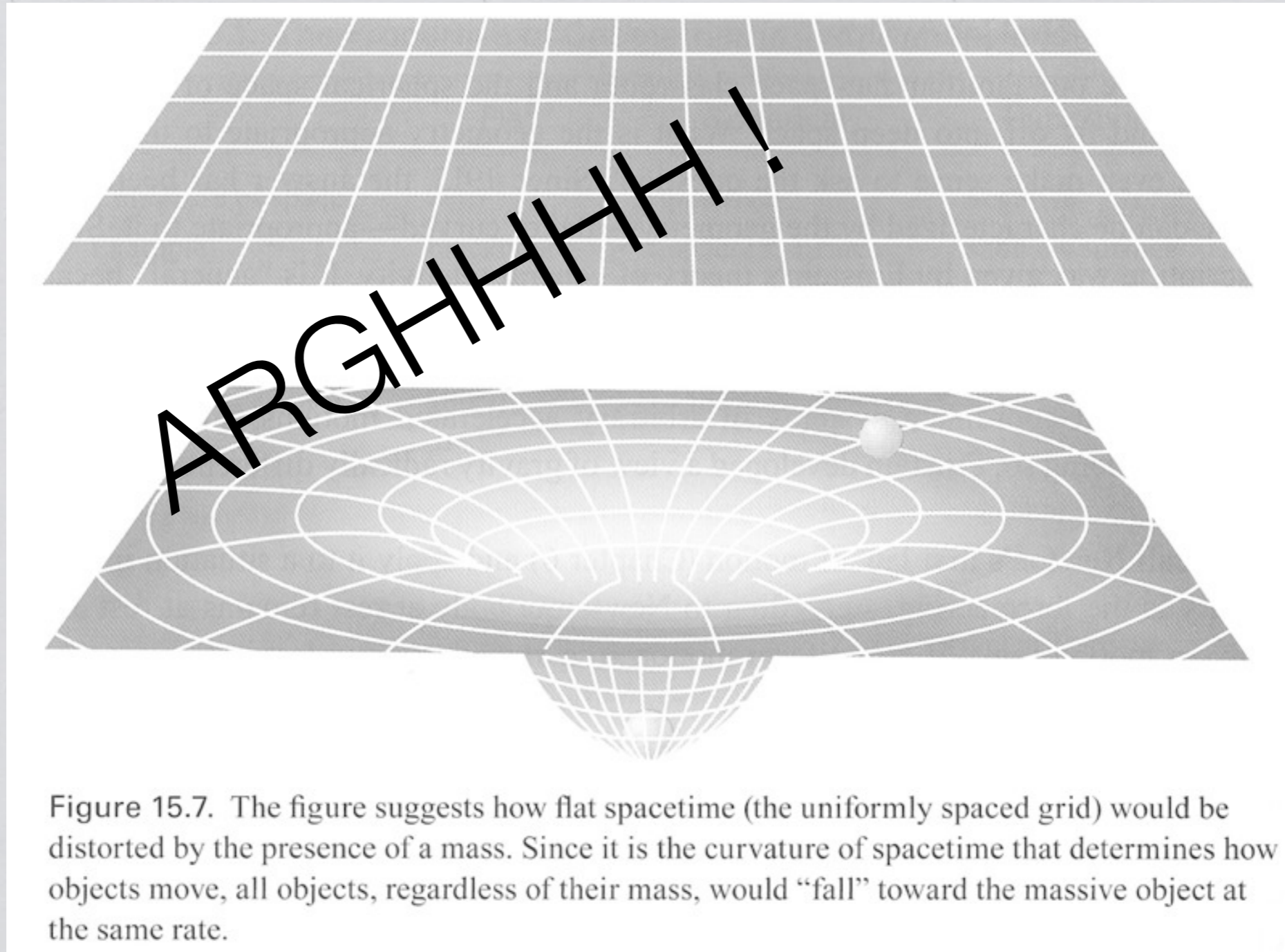
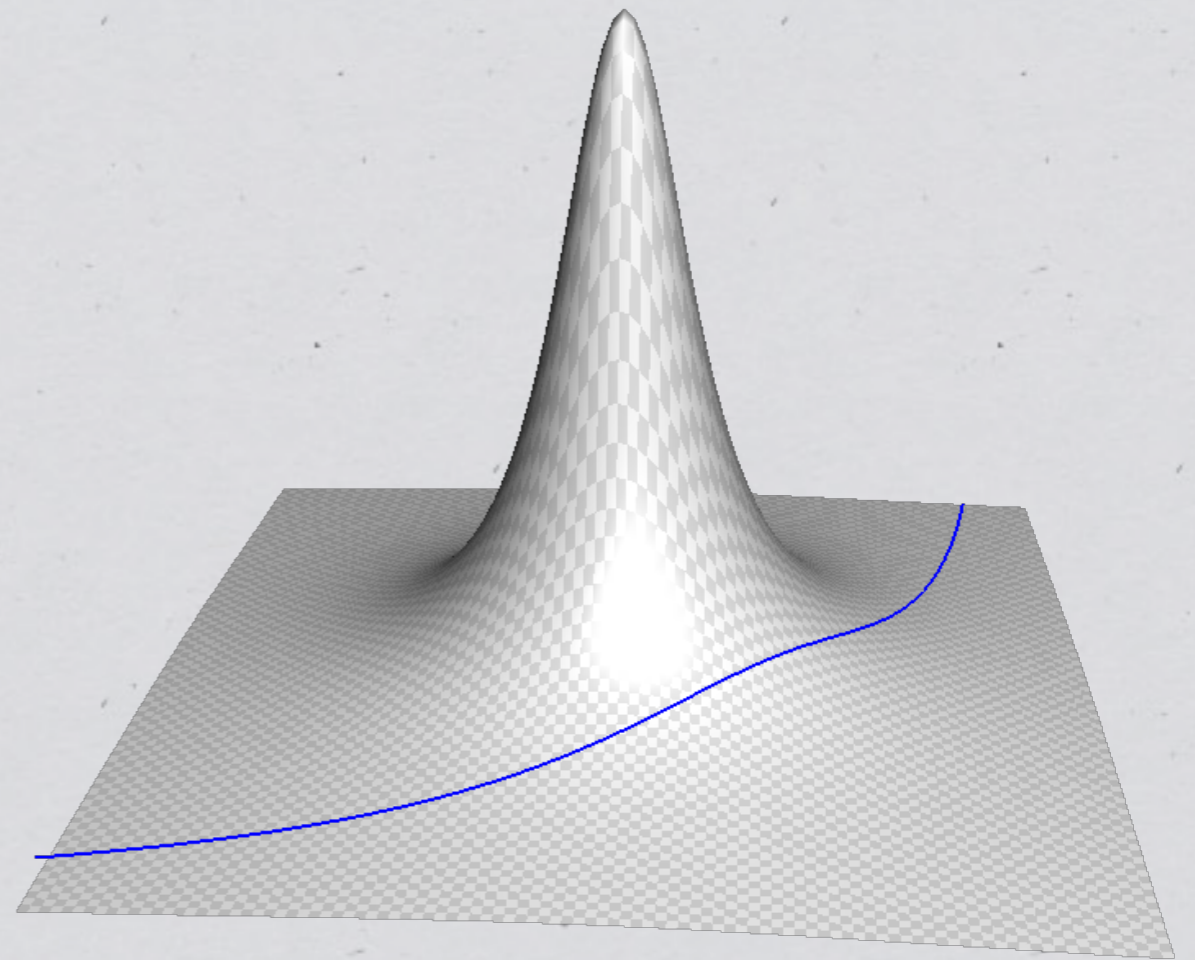
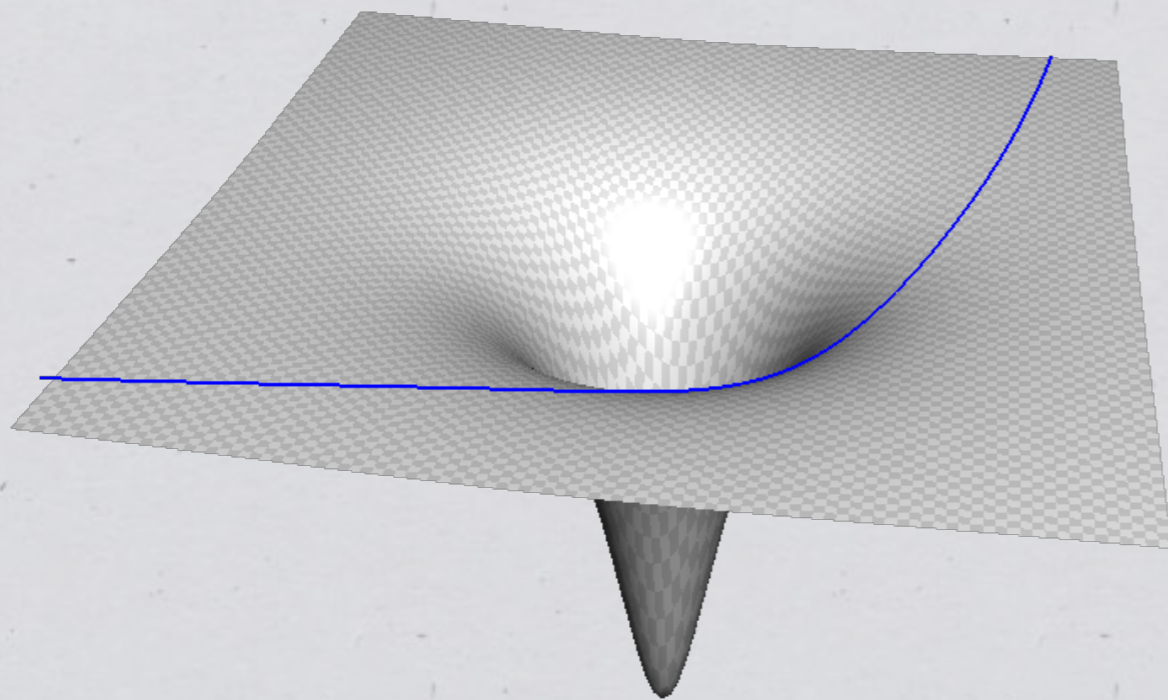


Figure 15.7. The figure suggests how flat spacetime (the uniformly spaced grid) would be distorted by the presence of a mass. Since it is the curvature of spacetime that determines how objects move, all objects, regardless of their mass, would “fall” toward the massive object at the same rate.

Principes



Accueil

Cerveau

Maths - Physique

Passé

Vivant

Science et société

Pour la Science

Cerveau & Psycho

Dessine-moi un trou noir !

08.12.2013 | par [Richard Taillet](#) | [Regards](#)



Dans de nombreuses présentations de la relativité générale au grand public (et parfois à des étudiants), au moment d'expliquer que la gravitation est due à la courbure de l'espace-temps, on voit très souvent présenté le schéma suivant.

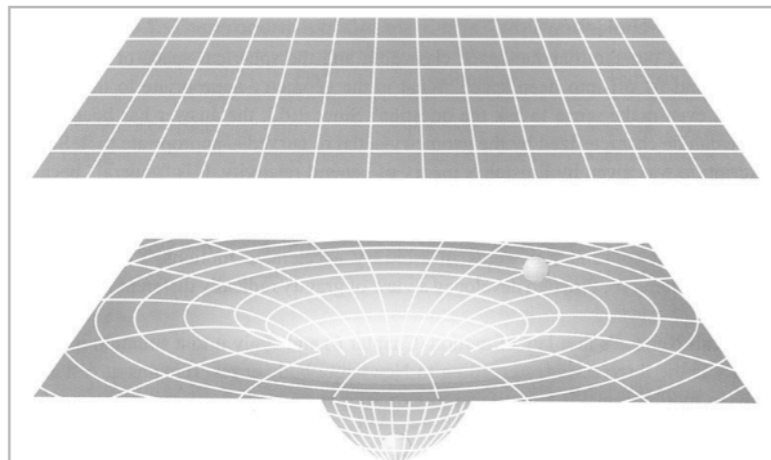


Figure 15.7. The figure suggests how flat spacetime (the uniformly spaced grid) would be distorted by the presence of a mass. Since it is the curvature of spacetime that determines how objects move, all objects, regardless of their mass, would "fall" toward the massive object at the same rate.



| **Richard Taillet**

| À propos de ce blog

| Page d'accueil du blog

Chercher dans Signal sur

Chercher

POURLA SCIENCE



Abonnez-vous
au magazine
de référence
de l'actualité
scientifique
internationale.



À partir de
4,90€
par mois.

Articles récents

- Parcours sup, et après ? Épisode 2 : l'accueil des « oui si » à l'université

Principes

Bref...

La métrique de Schwarzschild permet de calculer les mouvements autour d'une masse à symétrie sphérique

Tests expérimentaux

#0

Tests expérimentaux

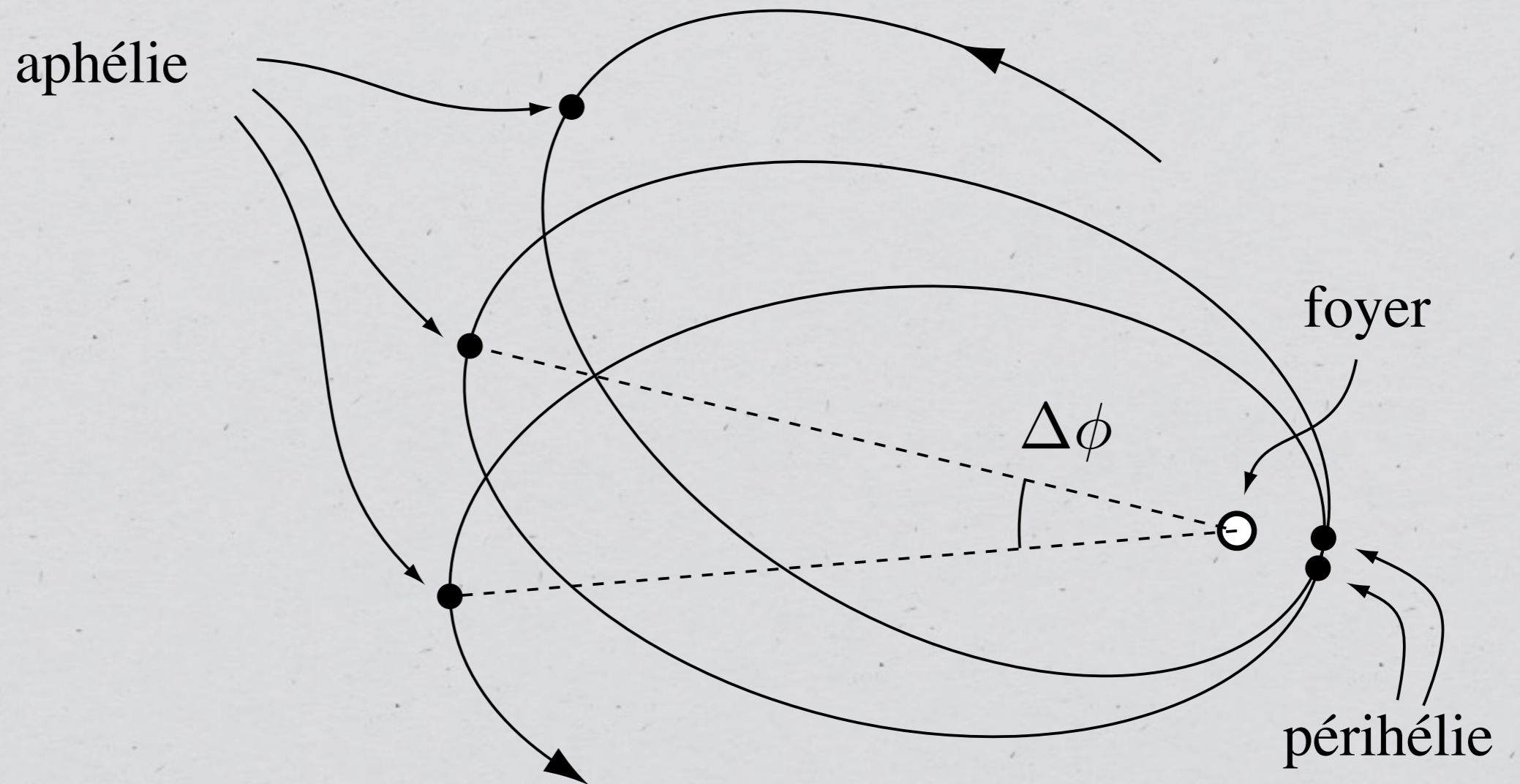
Succès théorique :

on peut formuler une théorie relativiste de la gravitation !

#1

Tests expérimentaux

Avance du périhélie de Mercure (1915)



#1

Tests expérimentaux

Avance du périhélie de Mercure (1915)

$$\Delta\phi = \frac{3\pi r_s}{a(1 - e^2)}$$

Avance observée : 5600"/siècle

Contribution purement astronomique : 5026"/siècle

Perturbations gravitationnelles : 531"/siècle

Anomalie : 43"/siècle

Remarque : mesuré pour d'autres corps (3,8"/siècle pour la Terre)

#2

Tests expérimentaux

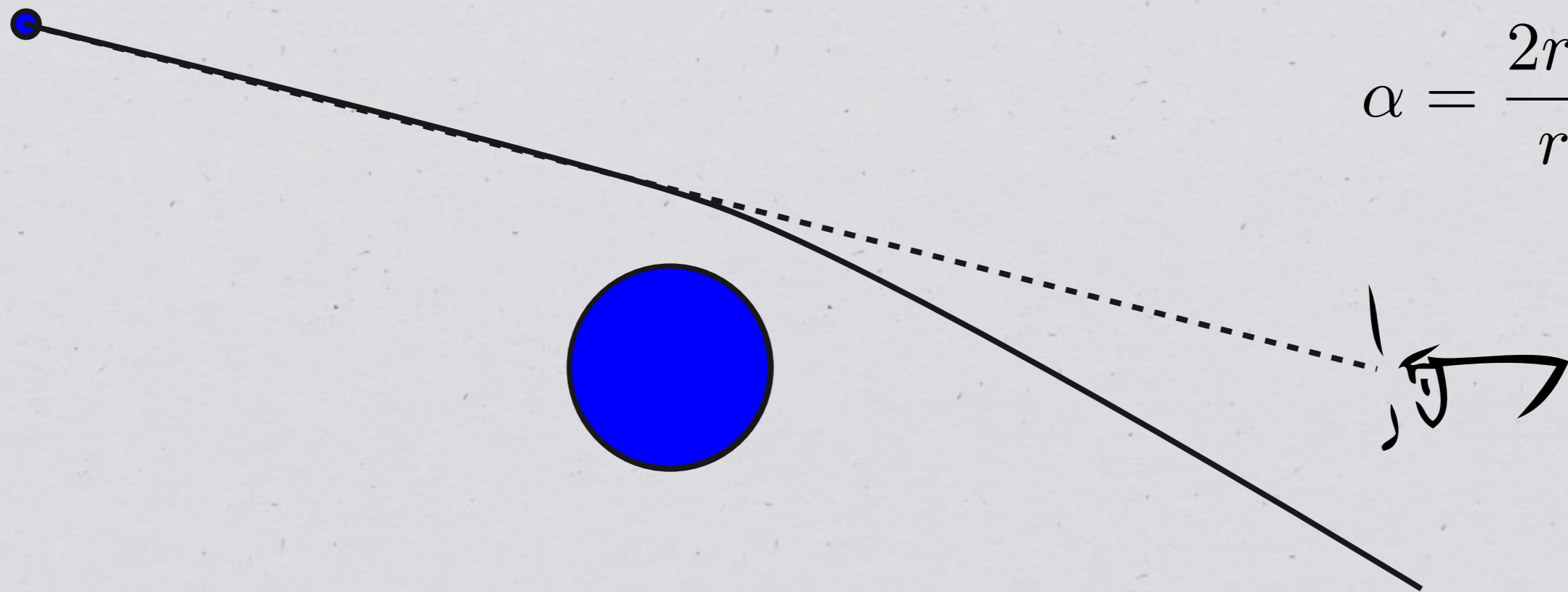
Déviations gravitationnelles des rayons lumineux (1919)



#2

Tests expérimentaux

Déviations gravitationnelles des rayons lumineux (1919)

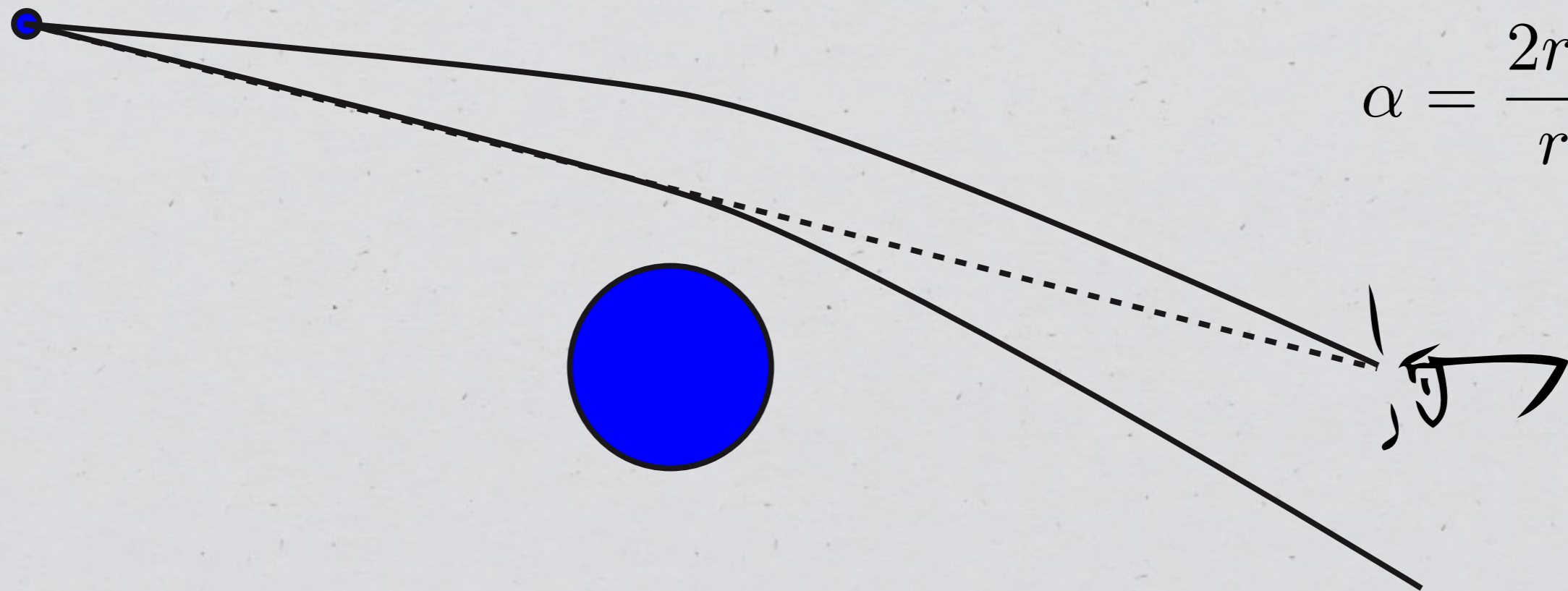


1,75 seconde d'arc pour le bord du Soleil

#2

Tests expérimentaux

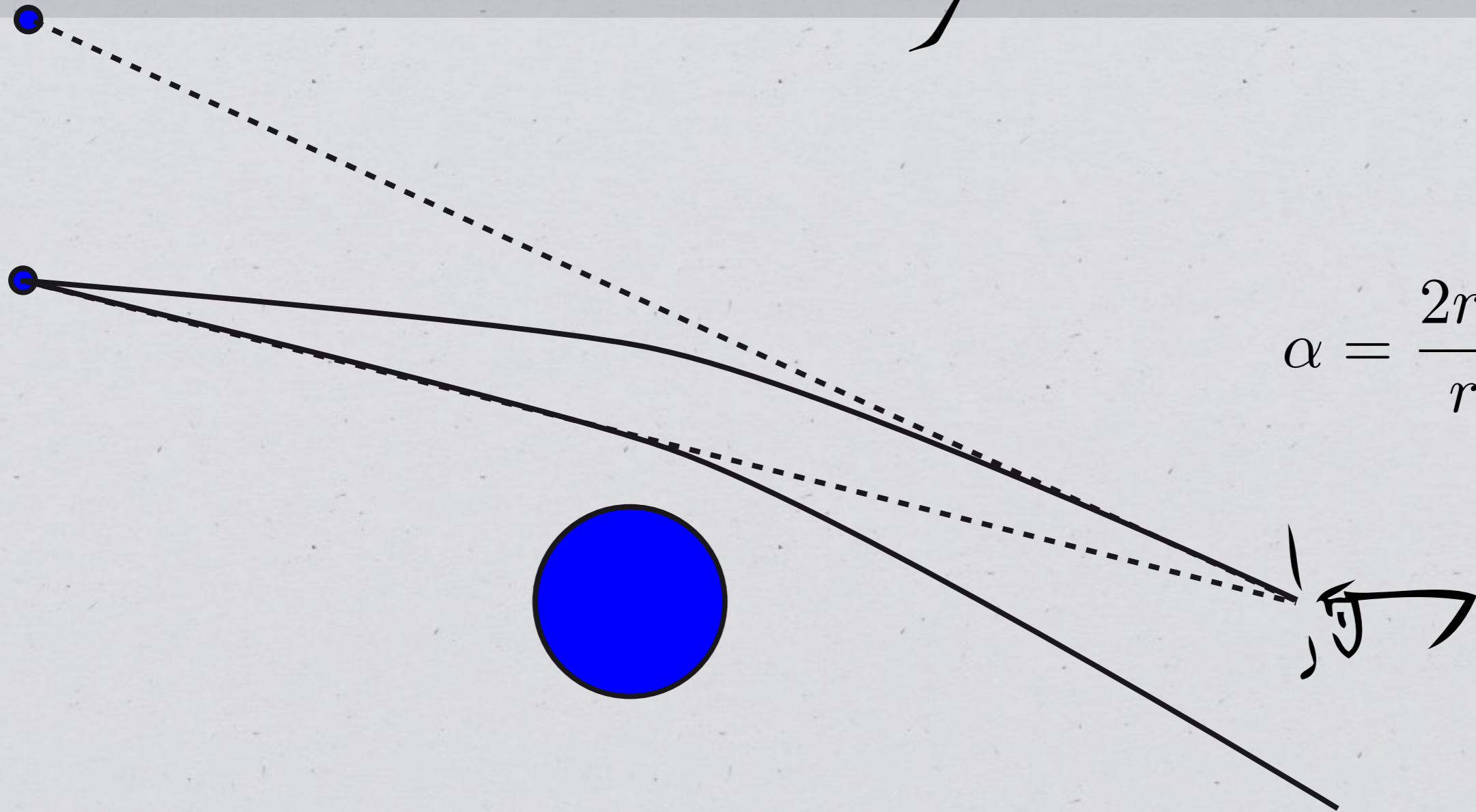
Déviations gravitationnelles des rayons lumineux (1919)



1,75 seconde d'arc pour le bord du Soleil

#2

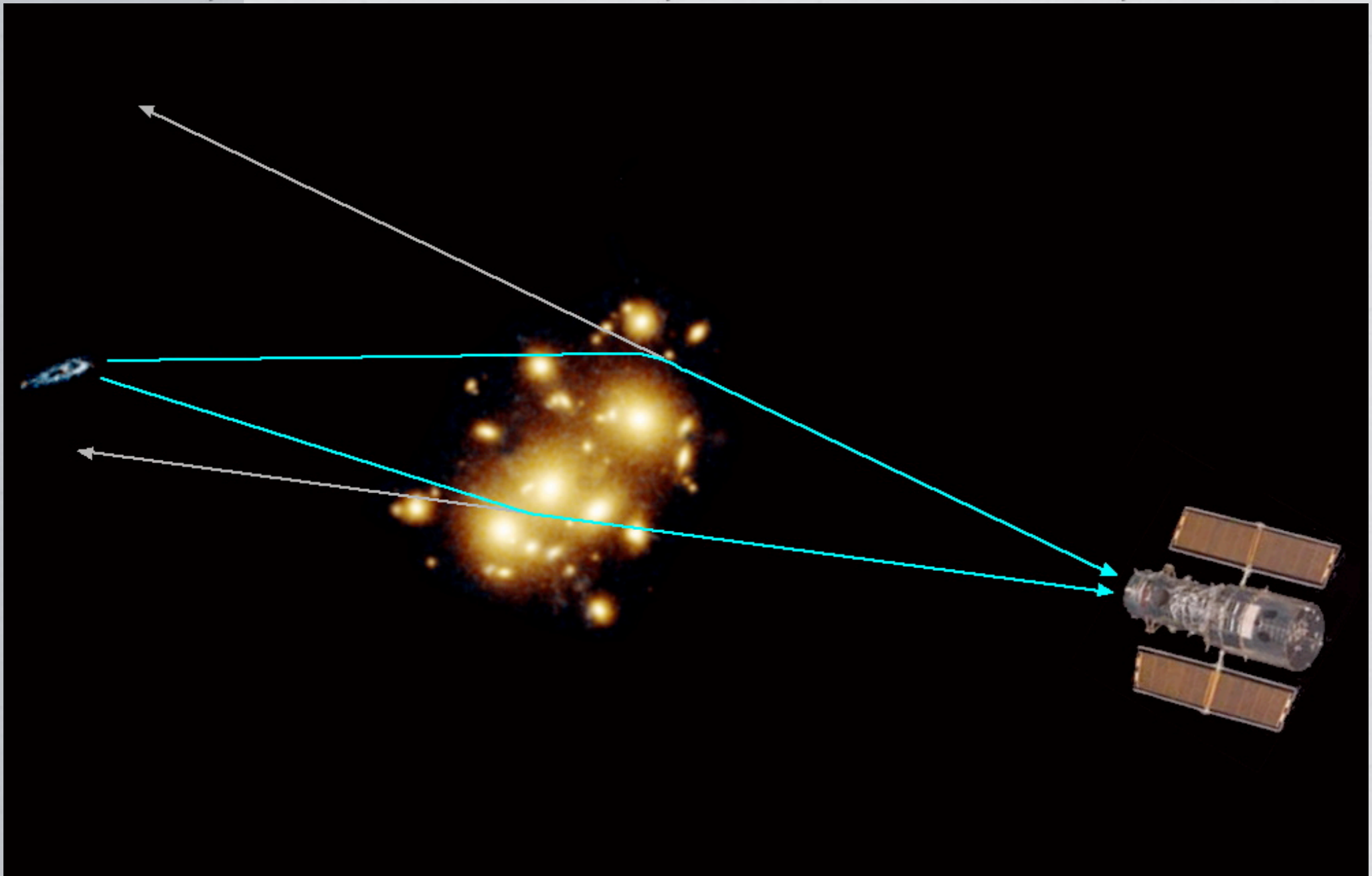
Tests expérimentaux



1,75 seconde d'arc pour le bord du Soleil

#2

Tests expérimentaux

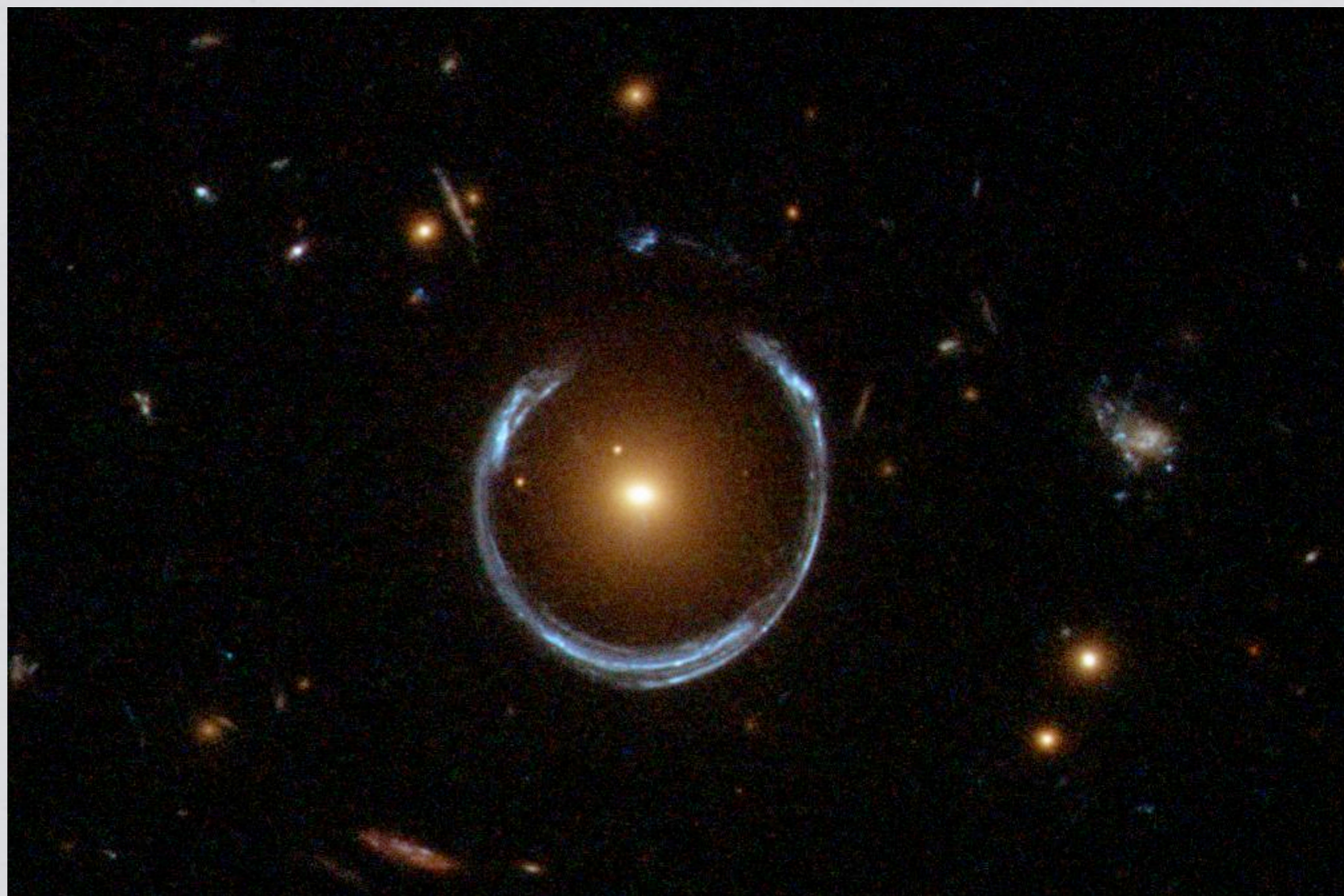




#2

Tests expérimentaux

Lentilles gravitationnelles



#3

Tests expérimentaux

Expérience de Pound et Rebka (1959)



$$\frac{\Delta f}{f} \approx \frac{1}{2} \frac{r_s}{r} \frac{\Delta r}{r} \approx 2,5 \times 10^{-15}$$

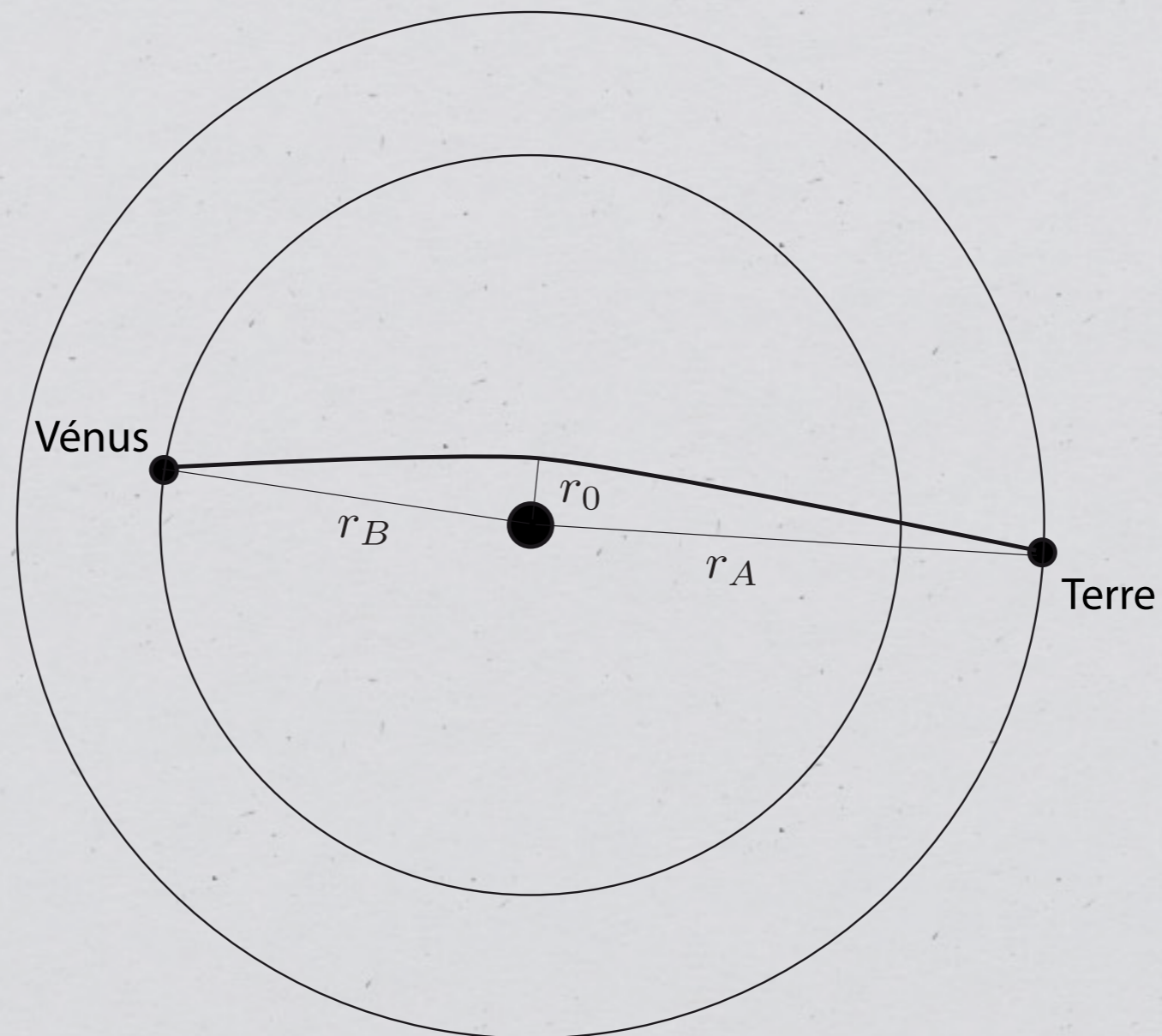
Expérience de Hafele & Keating (1971)

GPS (Global Positioning System)

#4

Tests expérimentaux

Retard de l'écho radar : effet Shapiro (prédit 1964 - mesuré 1968)



#4

Tests expérimentaux



#4

Tests expérimentaux

Retard de l'écho radar : effet Shapiro (prédit 1964 - mesuré 1968)

$$\Delta t = \frac{r_s}{c} \left[1 + \ln \left(\frac{4r_1 r_2}{r_0^2} \right) \right]$$

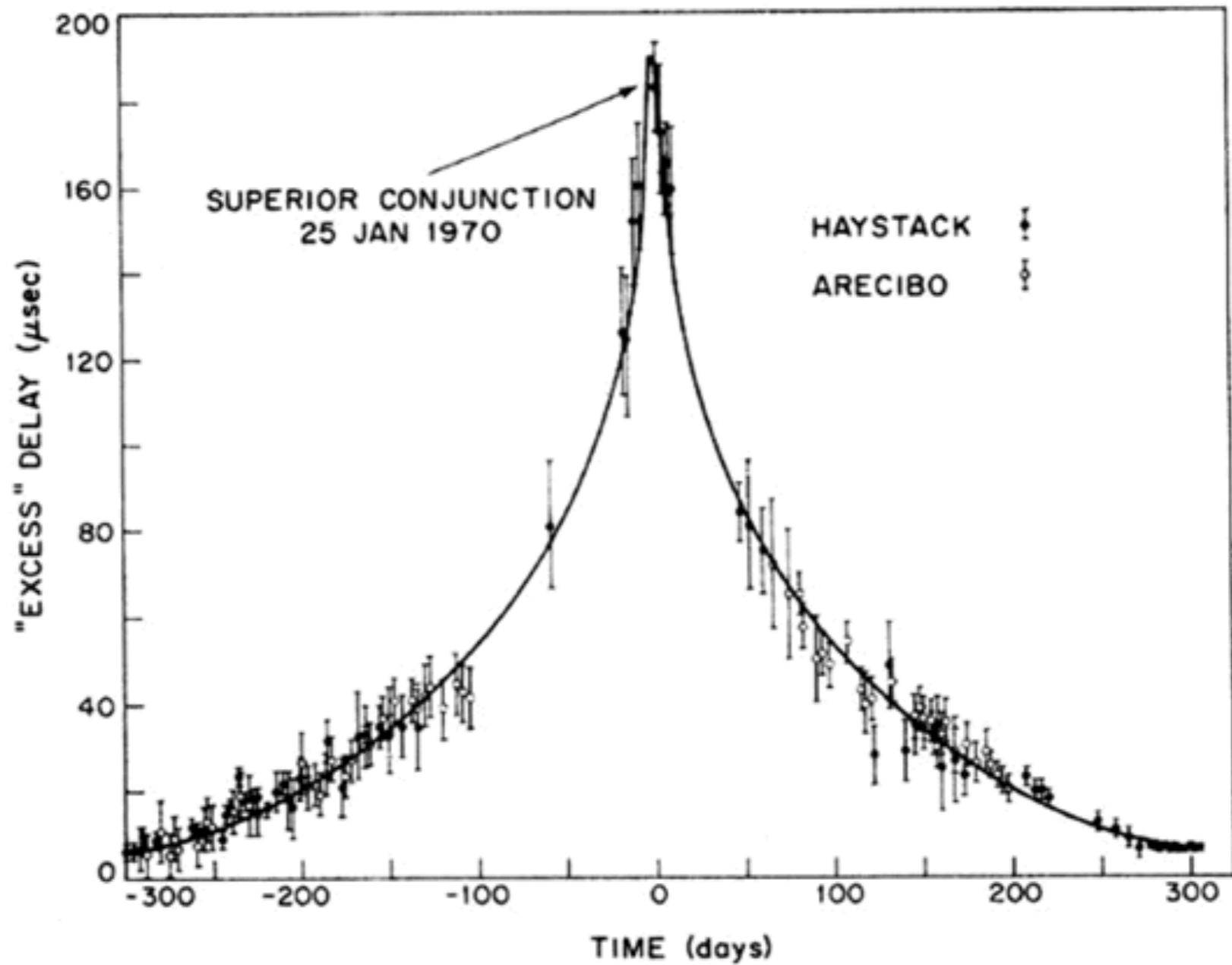
$$r_s/c \approx 10 \mu\text{s}$$

Quelques centaines de microsecondes pour Vénus et Mercure.

On utilise aussi les sondes du Système solaire.

#4

Tests expérimentaux



Planetary Radar

J. H. Thomson

(A Council Report on the Progress of Astronomy)

Summary

The discussion is confined to radar studies of the planets, lunar and solar radar being excluded. There are two limiting cases of radar systems, pulse and continuous wave; the former enables the range and angular power spectrum of the target planet to be measured, the latter the line of sight velocity and the frequency spectrum. Actual radar systems are often a combination of the two. Methods are described for measuring the rotation of the target, and for mapping its surface. The probable strength of echoes is discussed; present techniques allow the three inner planets to be detected. Necessary computational and electronic techniques are discussed. The history of the subject since 1958 is recorded. Obser-

Vous êtes ici : Home

Dans ce site

- Accueil
- Erratum
- Nouvelles entrées
- **Bibliographie**
- Histoire des sciences
- Enseignement
- Vu sur le net

Bibliographie

Liste de liens bibliographiques pertinents (plus de 10 000). Cette liste a été conçue en cherchant dans plusieurs revues de qualité des articles qui portaient directement sur le sujet abordé :

- « *American Journal of Physics* » est une revue américaine destinée aux physiciens, avec une portée pédagogique exceptionnelle [[accès restreint](#)] [1969-aujourd'hui] ;
- Les « *Resource Letters* » de l'*American Journal of Physics* sont des compilations bibliographiques extrêmement complètes en anglais [[accès restreint](#)] ;
- « *Physics Reports* », articles de revue destinés aux chercheurs du domaine, sur des sujets pointus. [[accès restreint](#)]
- « *Images de la physique* » est une revue annuelle publiée par le CNRS, destinée à faire connaître les avancées récentes en physique à un public de physiciens [[accès libre](#)] ;
- « *La Recherche* » est une revue de vulgarisation française, s'adressant au grand public [[accès restreint](#)] [1990-aujourd'hui] ;
- « *Pour la Science* », version française du « *Scientific American* », est une revue de vulgarisation s'adressant au grand public [[accès restreint](#)] [1993-aujourd'hui] ;
- Les « *Cahiers de science et vie* » sont des dossiers s'intéressant à l'histoire des sciences, pour le grand public ;
- « *Ciel et Espace* », revue d'astronomie amateur proposant aussi des articles de vulgarisation sur l'astrophysique, la cosmologie et l'histoire des sciences [[accès restreint](#)] [2007-aujourd'hui] ;
- « *Physics Today* » est une revue de diffusion de la physique, en anglais, s'adressant plutôt à des physiciens [[accès restreint](#)] [1989-aujourd'hui] ;

Diffusé par le CEA, est une revue de vulgarisation (diffusé par le CEA [[accès libre](#)]) ;

#5

Tests expérimentaux

Effet Einstein-de Sitter ou précession géodétique (1916/1988)

$$\Omega \approx \frac{3c}{2r} \left(\frac{r_s}{2r} \right)^{3/2}$$

quelques arcsec/siècle

vérifié en 1988 (système Terre-Lune)
puis en 2011 par Gravity Probe B



#6

Tests expérimentaux

Entraînement des référentiels : effet Lense-Thirring (1918/2004)

gravitomagnétisme

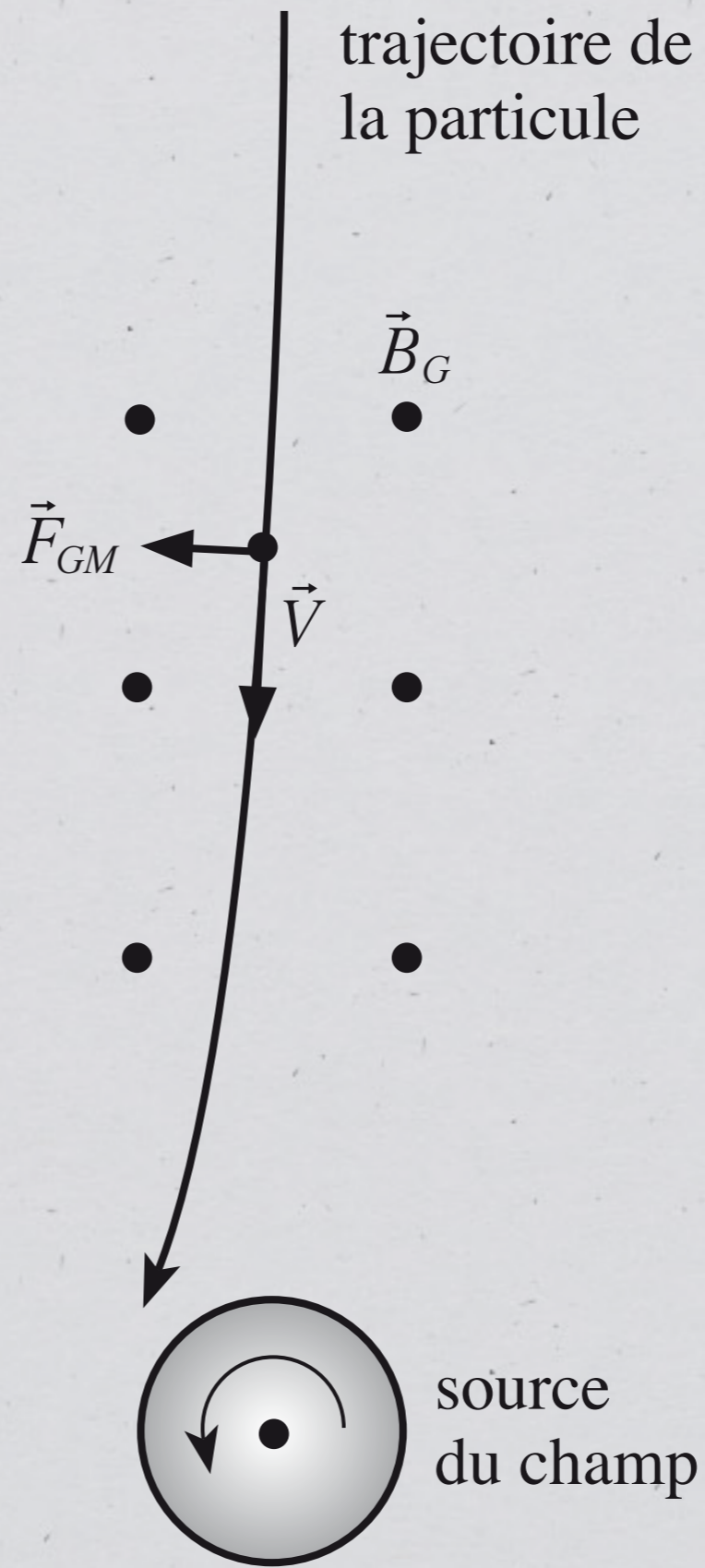
$$\vec{F} = m(\vec{E}_G + \vec{v} \wedge 4\vec{B}_G)$$

$$\vec{E}_G \equiv -\vec{\nabla}\Phi_G - \frac{\partial\vec{A}_G}{\partial t}$$

$$\Phi_G = -\iiint \frac{G\rho_0}{r} d^3V$$

$$\vec{B}_G \equiv \vec{\nabla} \wedge \vec{A}_G$$

$$A_G^i = -\iiint \frac{GJ_i}{r} d^3V$$



#6

Tests expérimentaux

Entraînement des référentiels : effet Lense-Thirring (1918/2004)

$$\vec{\Omega} \approx \frac{r_s}{2r^3} \frac{3(\vec{J} \cdot \vec{u}_r) - J}{M}$$

vérifié par LAGEOS en 2004



#7

Tests expérimentaux

Ondes gravitationnelles

dit rapidement : ondes dans la structure de l'espace-temps

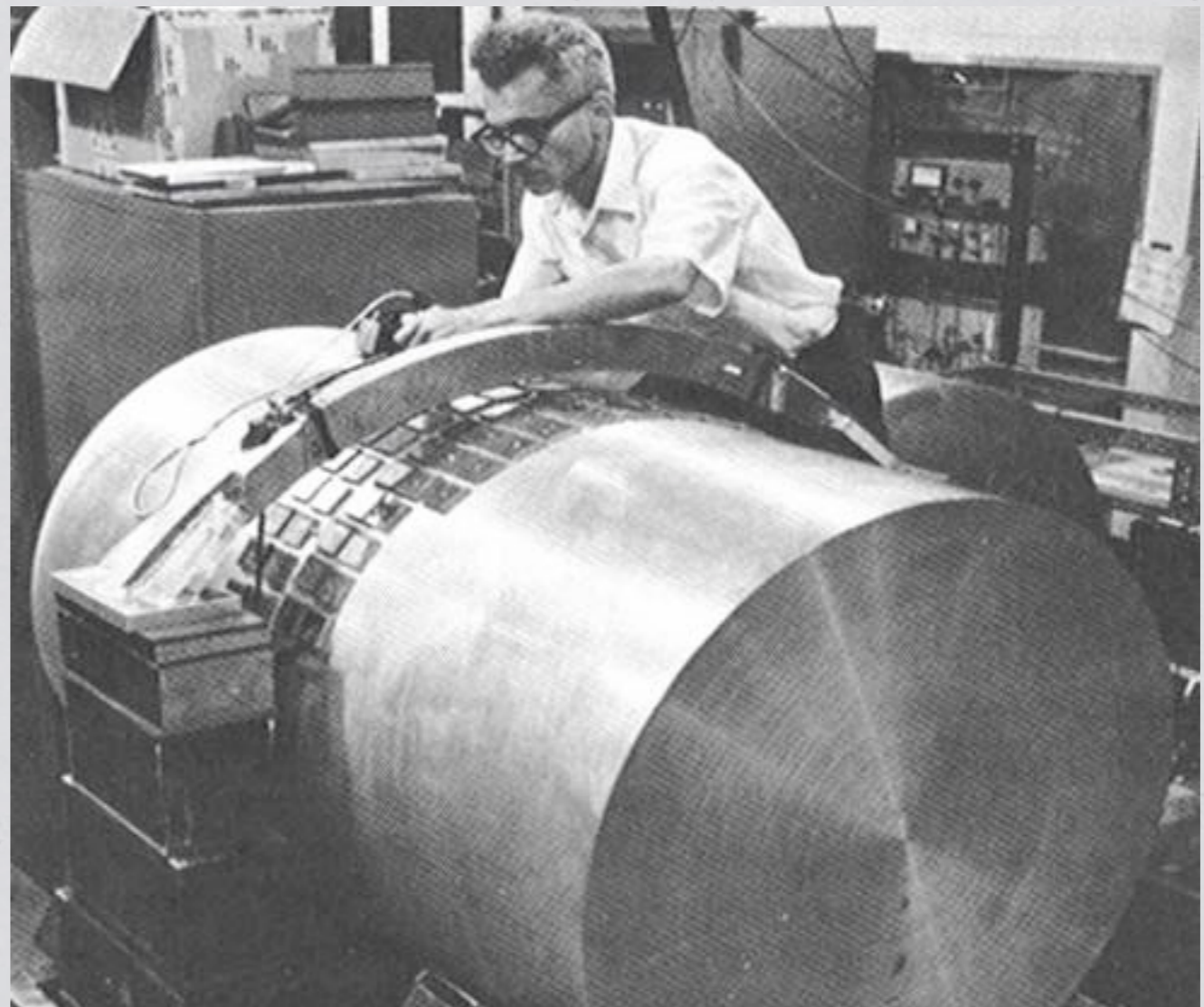
En fait, c'est subtil. La notion d'énergie gravitationnelle est très délicate à définir en relativité générale.

Longue controverse historique sur la réalité physique de ces ondes

#7

ondes gravitationnelles

barres de
Weber
(années 1960)

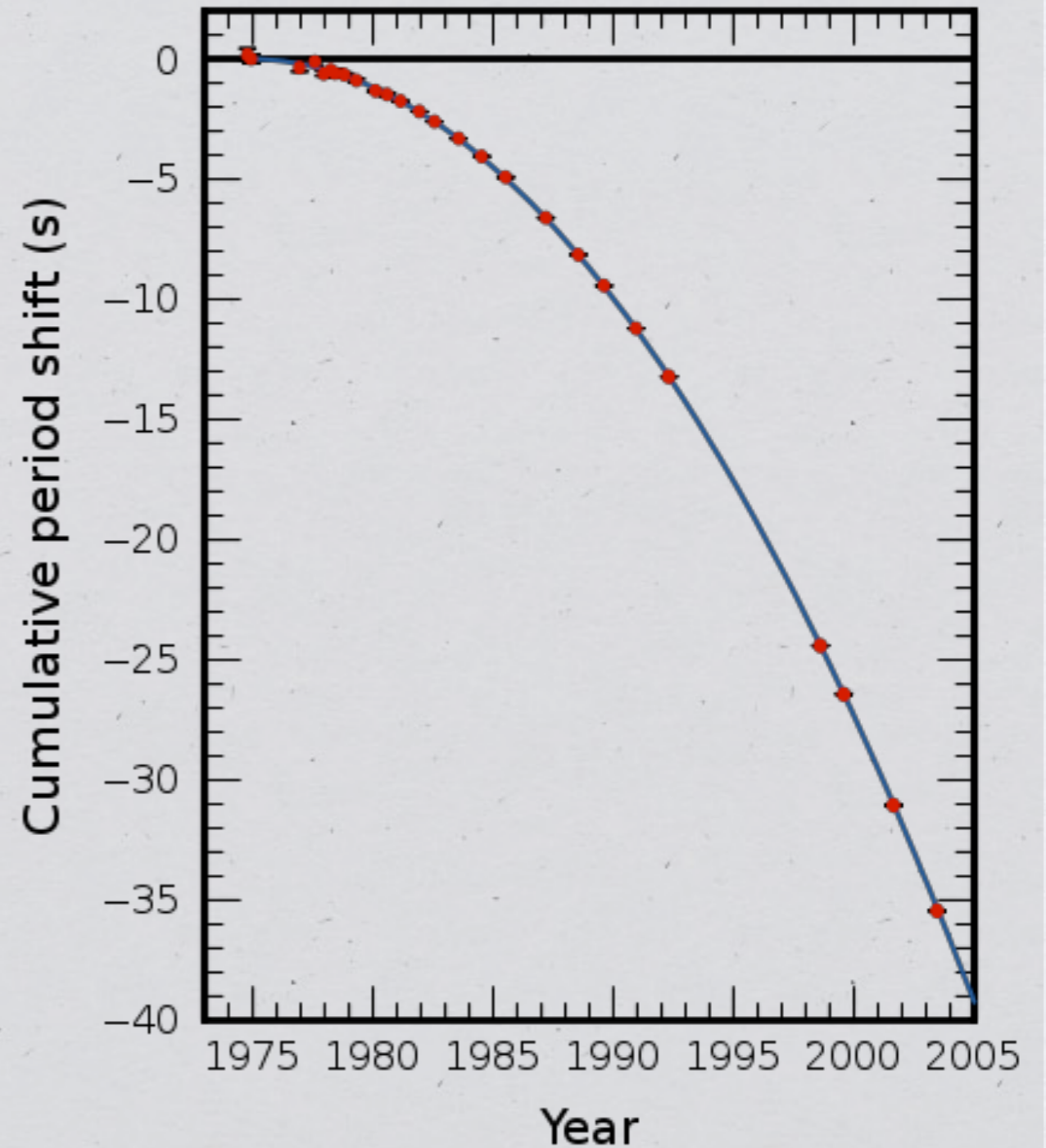


#7

ondes gravitationnelles

Détection indirecte dans le pulsar binaire PSR 1913+16

Hulse et Taylor (1974)



#7

ondes gravitationnelles



#7

ondes gravitationnelles

Détection directe en 2016 par LIGO/Virgo

#8

Cosmologie

#8

Cosmologie

Principe cosmologique

« À grande échelle, l'Univers est homogène et isotrope »

Métrie de Robertson-Walker

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right)$$

#8

Cosmologie

Expansion de l'Univers

Histoire thermique

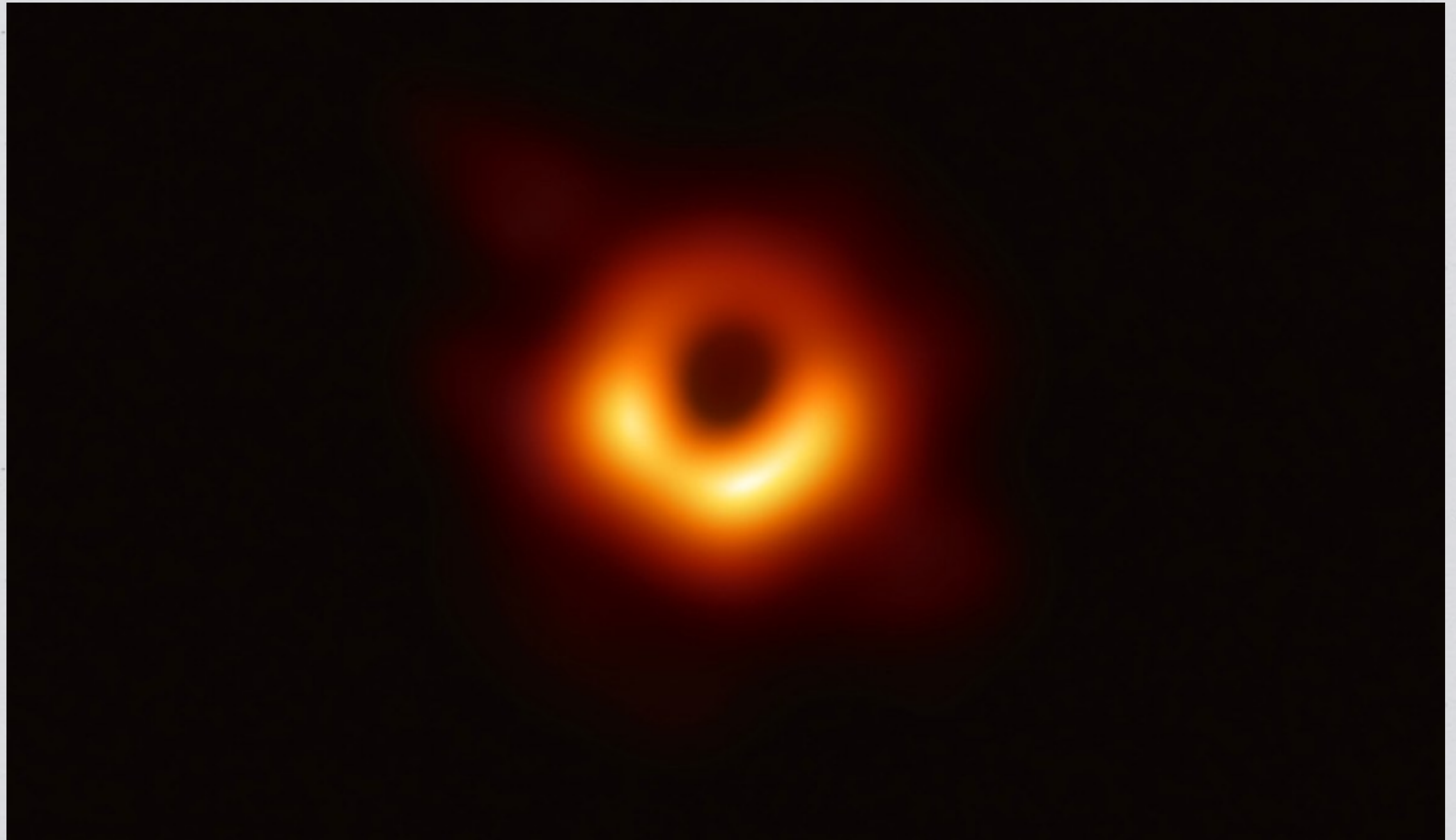
Nucléosynthèse primordiale

Formation des grandes structures

Rayonnement de fond cosmologique

#9

Trous noirs



Difficultés

Manipuler des tenseurs

Singularités

Interprétation des coordonnées

Singularités

Métrie de Schwarzschild

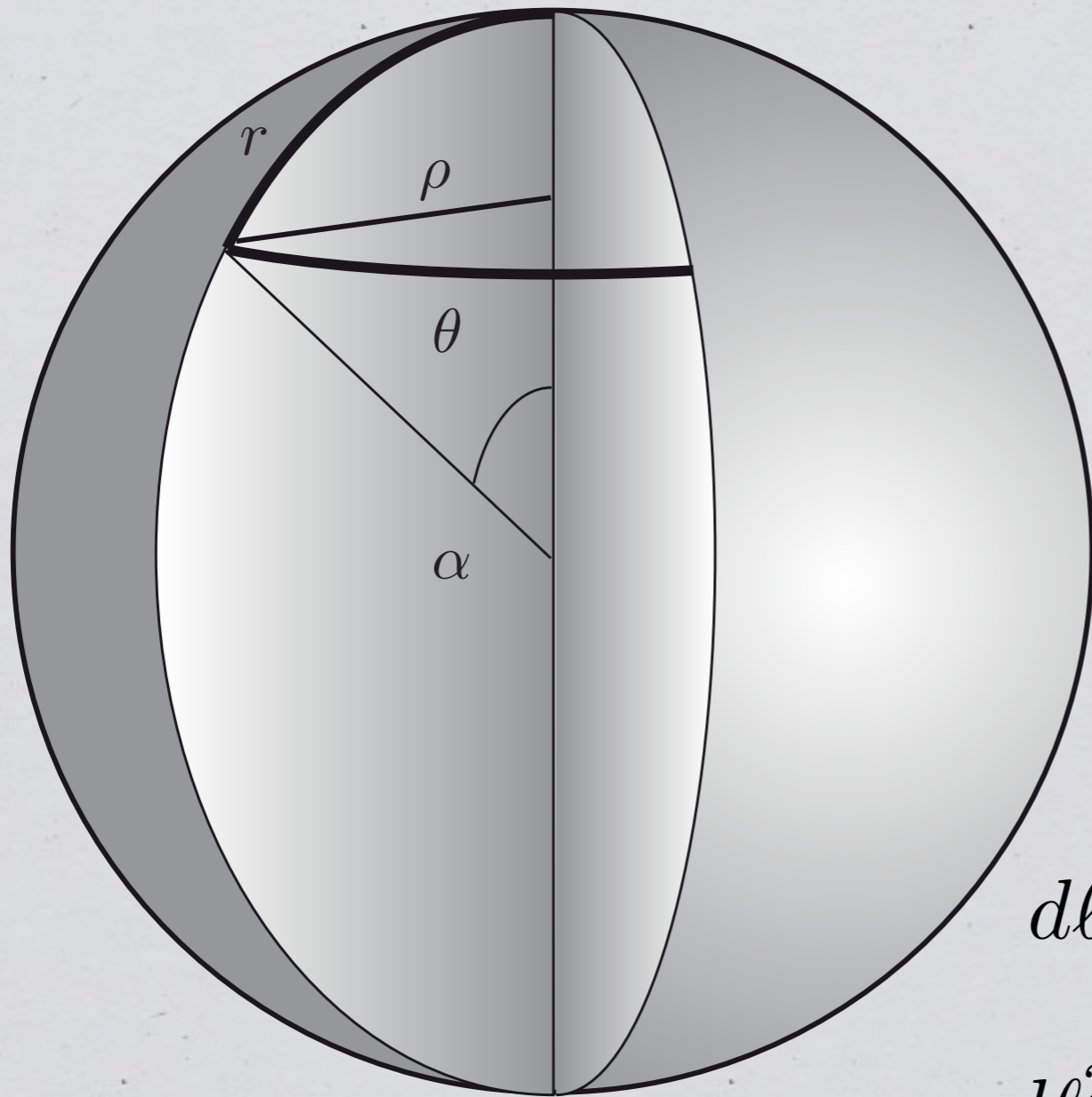
$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\phi^2$$

quantités singulières pour deux valeurs de r :

$$r = 0$$

$$r = r_s$$

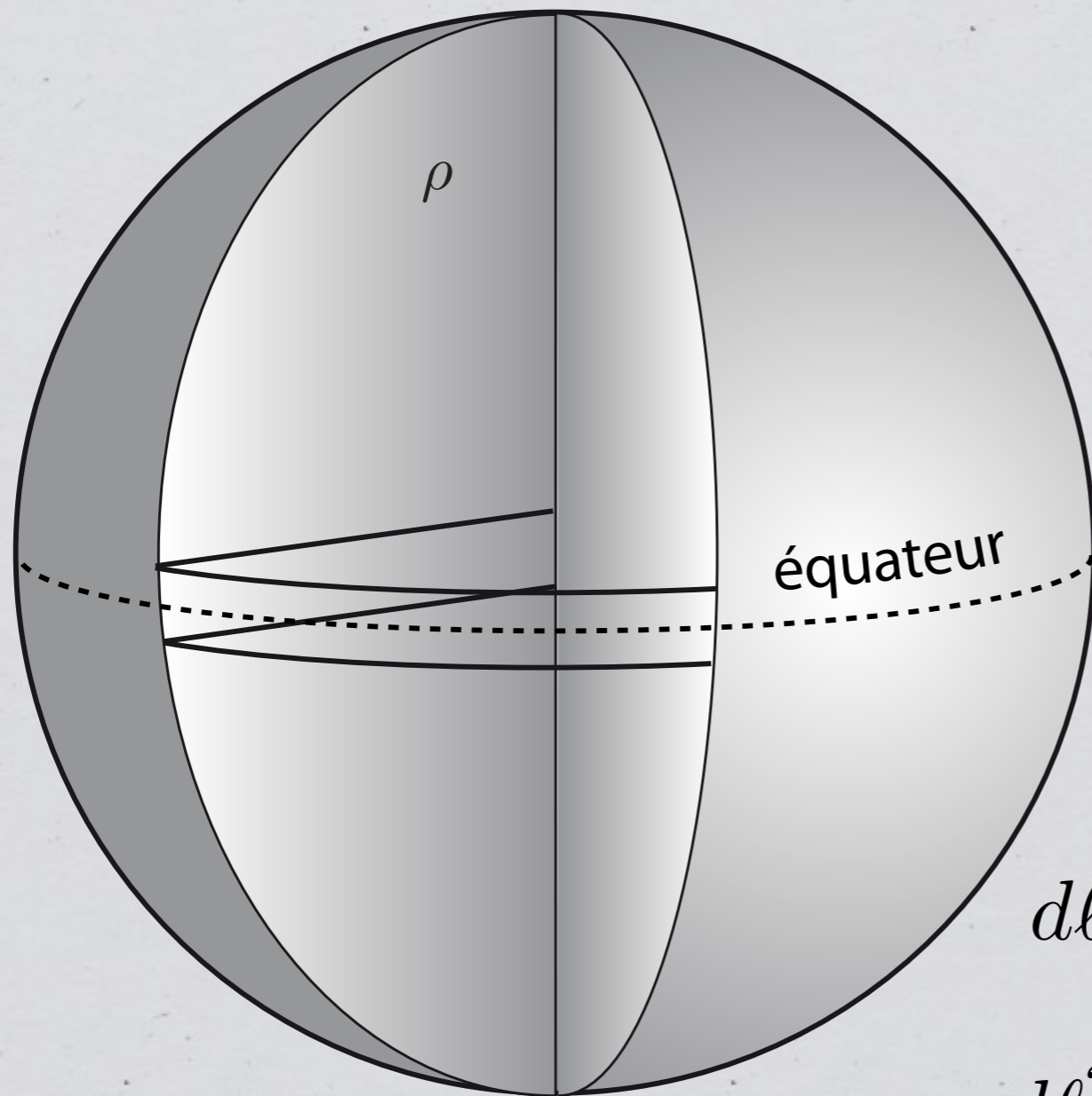
Singularités



$$dl^2 = R^2 d\alpha^2 + R^2 \sin^2 \alpha d\theta^2$$

$$dl^2 = \frac{d\rho^2}{1 - \rho^2/R^2} + (\dots) d\theta^2$$

Singularités



singularité de coordonnées

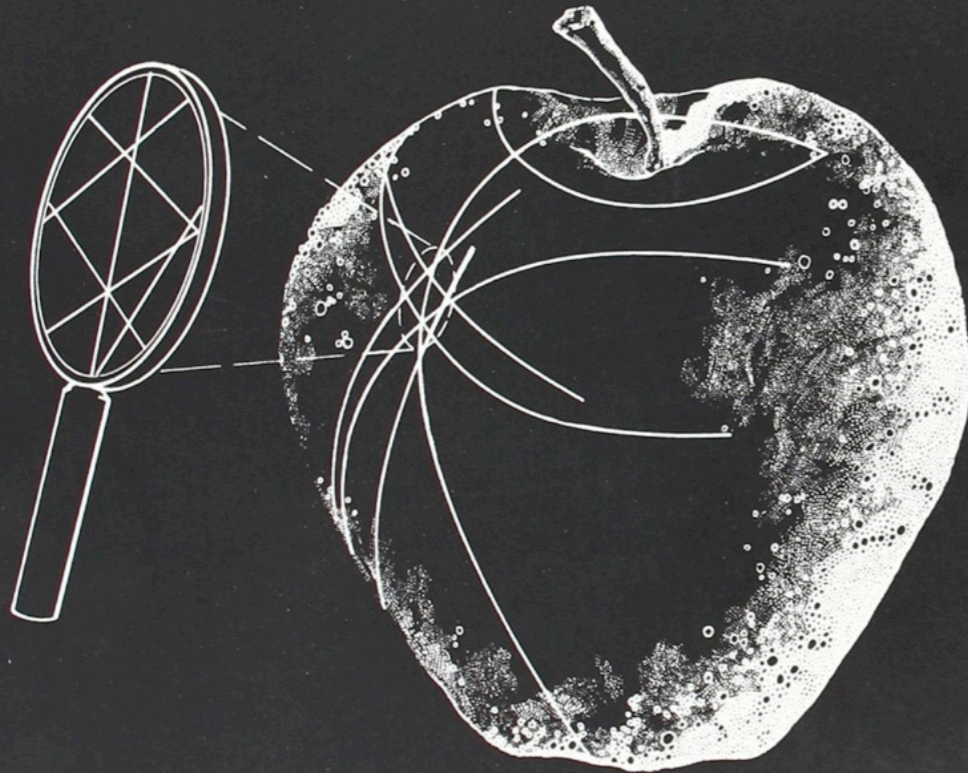
$$d\ell^2 = R^2 d\alpha^2 + R^2 \sin^2 \alpha d\theta^2$$

$$d\ell^2 = \frac{d\rho^2}{1 - \rho^2/R^2} + (\dots) d\theta^2$$

Références

GRAVITATION

Charles W. MISNER Kip S. THORNE John Archibald WHEELER



Références

GRAVITATION AND COSMOLOGY

PRINCIPLES AND APPLICATIONS OF
THE GENERAL THEORY OF
RELATIVITY

STEVEN WEINBERG

Références



Références

« The Confrontation between General Relativity and Experiment »

Clifford M. Will

Living Reviews in relativity

<http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2006-3/>

26 épisodes de 25 à 45 minutes (HD 720)

Références



<http://podcast.grenet.fr/podcast/cours-dintroduction-a-la-relativite-generale/>

Contact

taillet@lapth.cnrs.fr

Richard.Taillet@univ-savoie.fr

« Dictionnaire de physique »
sur Facebook

