

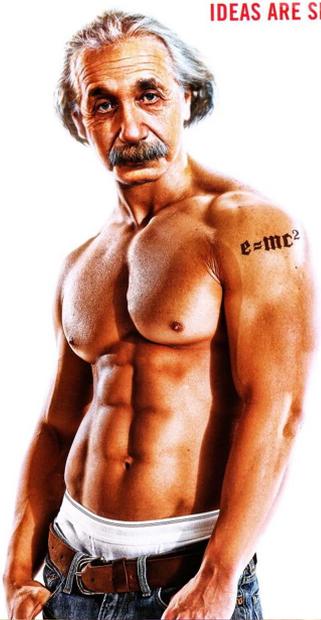
# La Révolution Einstein

par Denis Puy

Université des Sciences Montpellier II  
Laboratoire Univers et Particules de Montpellier

[Denis.Puy@univ-montp2.fr](mailto:Denis.Puy@univ-montp2.fr)

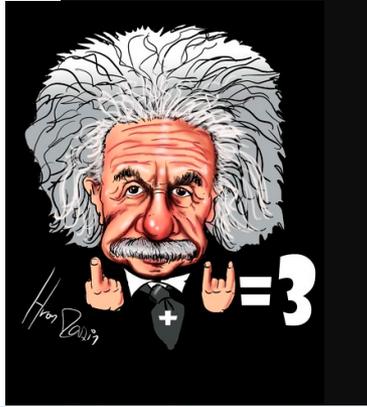
IDEAS ARE SEXY TOO.



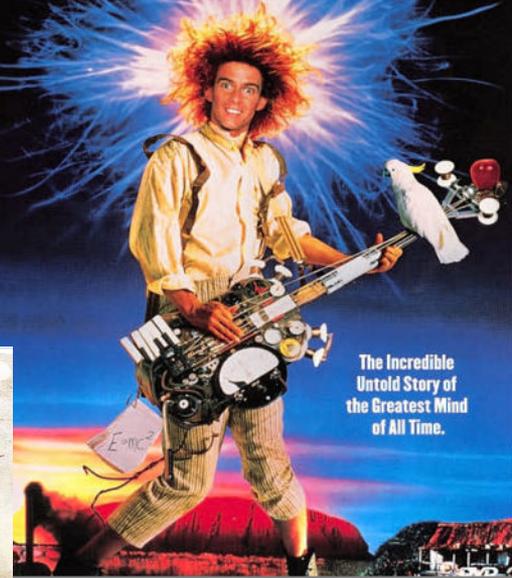
Le toutou qui parle beaucoup!

# EINSTEIN

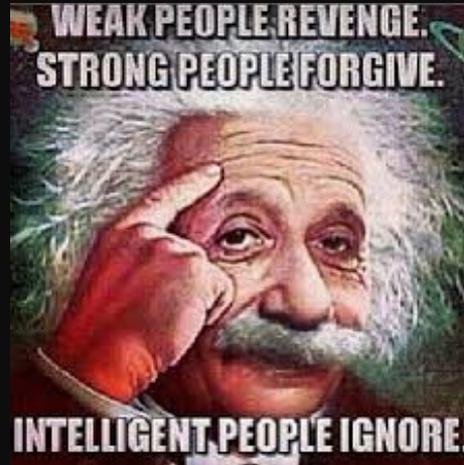
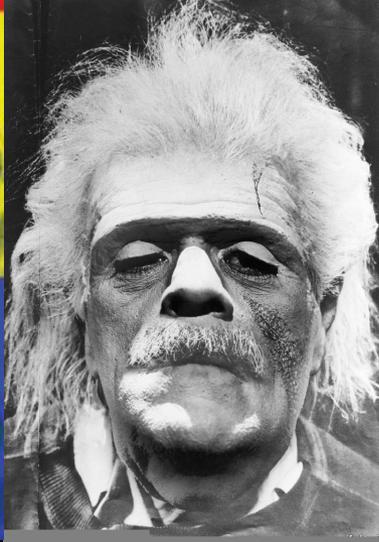
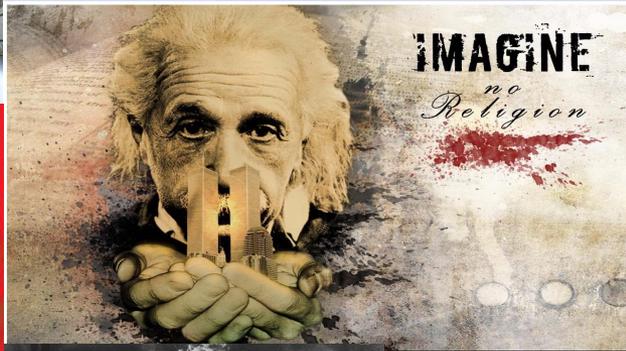
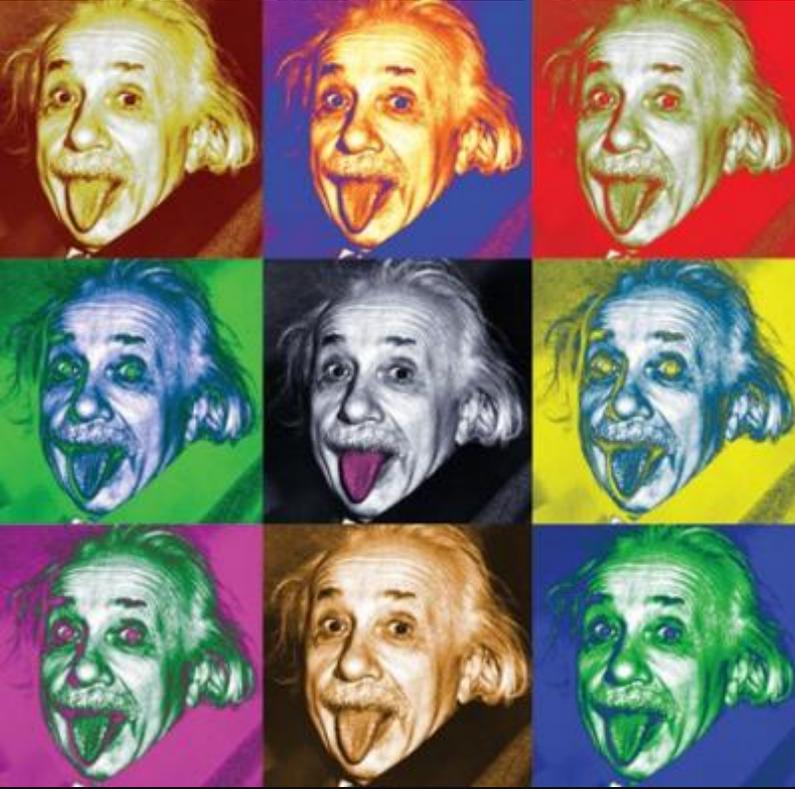
CHIEN SAVANT



# YAHOO SERIOUS is YOUNG EINSTEIN



The Incredible Untold Story of the Greatest Mind of All Time.



# ANNUS MIRABILIS : 1905

891

## 3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

639

## 13. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? von A. Einstein.

Die Resultate einer jüngst in diesen Annalen von mir publizierten elektrodynamischen Untersuchung<sup>1)</sup> führen zu einer sehr interessanten Folgerung, die hier abgeleitet werden soll.

Ich legte dort die Maxwell-Hertz'schen Gleichungen für den leeren Raum nebst dem Maxwellschen Ausdruck für die elektromagnetische Energie des Raumes zugrunde und außerdem das Prinzip:

Die Gesetze, nach denen sich die Zustände der physikalischen Systeme ändern, sind unabhängig davon, auf welches von zwei relativ zueinander in gleichförmiger Parallel-Translationsbewegung befindlichen Koordinatensystemen diese Zustandsänderungen bezogen werden (Relativitätsprinzip).

Gestützt auf diese Grundlagen<sup>2)</sup> leitete ich unter anderem das nachfolgende Resultat ab (l. c. § 8):

Ein System von ebenen Lichtwellen besitze, auf das Koordinatensystem  $(x, y, z)$  bezogen, die Energie  $l$ ; die Strahlrichtung (Wellennormale) bilde den Winkel  $\varphi$  mit der  $x$ -Achse des Systems. Führt man ein neues, gegen das System  $(x, y, z)$  in gleichförmiger Paralleltranslation begriffenes Koordinatensystem  $(\xi, \eta, \zeta)$  ein, dessen Ursprung sich mit der Geschwindigkeit  $v$  längs der  $x$ -Achse bewegt, so besitzt die genannte Lichtmenge — im System  $(\xi, \eta, \zeta)$  gemessen — die Energie:

$$l^* = l \frac{\text{Äquivalenz}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}},$$

wobei  $V$  die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. Von diesem Resultat machen wir im folgenden Gebrauch.

1) A. Einstein, Ann. d. Phys. 17. p. 891. 1905.

2) Das dort benutzte Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist natürlich in den Maxwellschen Gleichungen enthalten.

42\*

« *Electrodynamique des corps en mouvement* »

Article fondateur de la théorie de la relativité restreinte

A. Einstein (Septembre 1905)

« *Est ce que l'inertie d'un corps est fonction de son énergie* »

Article:  $E = m c^2$

A. Einstein (novembre 1905)

# ANNUS MIRABILIS : 1905

132

## 6. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt; von A. Einstein.

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwellschen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwellschen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen Erscheinungen, also auch beim Licht, die Energie als kontinuierliche Raumfunktion aufzufassen, während die Energie eines ponderablen Körpers nach der gegenwärtigen Auffassung der Physiker als eine über die Atome und Elektronen erstreckte Summe darzustellen ist. Die Energie eines ponderablen Körpers kann nicht in beliebig viele, beliebig kleine Teile zerfallen, während sich die Energie eines von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahles nach der Maxwell'schen Theorie (oder allgemeiner nach jeder Undulationstheorie) des Lichtes auf ein stets wachsendes Volumen sich kontinuierlich verteilt.

Die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Undulationstheorie des Lichtes hat sich zur Darstellung der rein optischen Phänomene vortrefflich bewährt und wird wohl nie durch eine andere Theorie ersetzt werden. Es ist jedoch im Auge zu behalten, daß sich die optischen Beobachtungen auf zeitliche Mittelwerte, nicht aber auf Momentanwerte beziehen, und es ist trotz der vollständigen Bestätigung der Theorie der Beugung, Reflexion, Brechung, Dispersion etc. durch das

« Sur la génération et la transformation  
heuristique de la lumière »

Article sur l'effet photo électrique- Prix Nobel de Physique  
A. Einstein (juin 1905)

## 5. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen; von A. Einstein.

In dieser Arbeit soll gezeigt werden, daß nach der molekularkinetischen Theorie der Wärme in Flüssigkeiten suspendierte Körper von mikroskopisch sichtbarer Größe infolge der Molekularbewegung der Wärme Bewegungen von solcher Größe ausführen müssen, daß diese Bewegungen leicht mit dem Mikroskop nachgewiesen werden können. Es ist möglich, daß die hier zu behandelnden Bewegungen mit der sogenannten „Brown'schen Molekularbewegung“ identisch sind; die mir erreichbaren Angaben über letztere sind jedoch so ungenau, daß ich mir hierüber kein Urteil bilden konnte.

Wenn sich die hier zu behandelnde Bewegung samt den für sie zu erwartenden Gesetzmäßigkeiten wirklich beobachten läßt, so ist die klassische Thermodynamik schon für mikroskopisch unterscheidbare Räume nicht mehr als genau gültig anzusehen und es ist dann eine exakte Bestimmung der wahren Atomgröße möglich. Erweise sich umgekehrt die Voraussage dieser Bewegung als unzutreffend, so wäre damit ein schwerwiegendes Argument gegen die molekularkinetische Auffassung der Wärme gegeben.

### § 1. Über den suspendierten Teilchen zuzuschreibenden osmotischen Druck.

Im Teilvolumen  $V^*$  einer Flüssigkeit vom Gesamtvolumen  $V$  seien  $z$ -Gramm-Moleküle eines Nichtelektrolyten gelöst. Ist das Volumen  $V^*$  durch eine für das Lösungsmittel, nicht aber für die gelöste Substanz durchlässige Wand vom reinen Lösungs-

« Sur la théorie cinétique de la chaleur des mouvements des  
particules en suspension dans un fluide au repos »  
Article sur le mouvement Brownien  
A. Einstein (juillet 1905)

17<sup>ème</sup> - 18<sup>ème</sup> siècle

# Le questionnement du mouvement



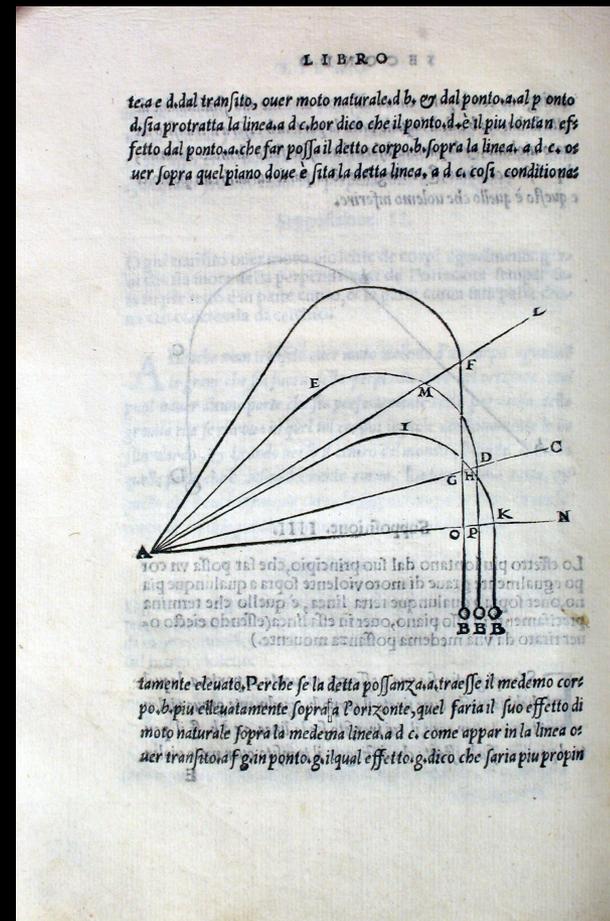
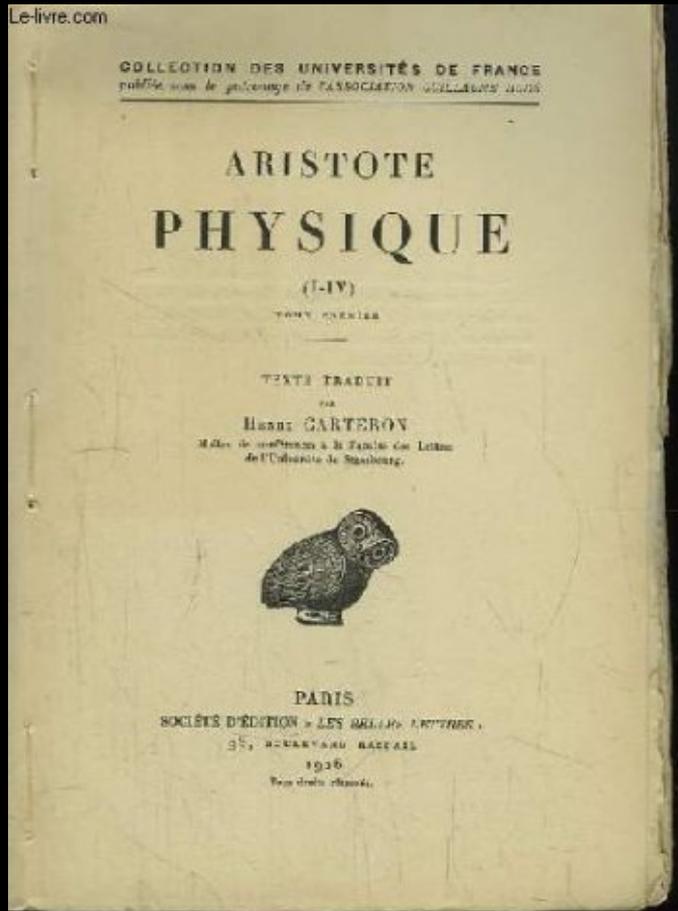
« Le sacre du Printemps » – Chorégraphie Pina Bausch – Tanz Theater Wuppertal

# ARISTOTE

(322 av J.C.)

« Physique »

Théorie de l'Impétus



# Galileo GALILEI

(1638)

« *Discorsi intorno a due nuove scienze* »

Etude des mouvements des corps

DISCORSI  
E  
DIMOSTRAZIONI  
MATEMATICHE,  
*intorno à due nuoue scienze*

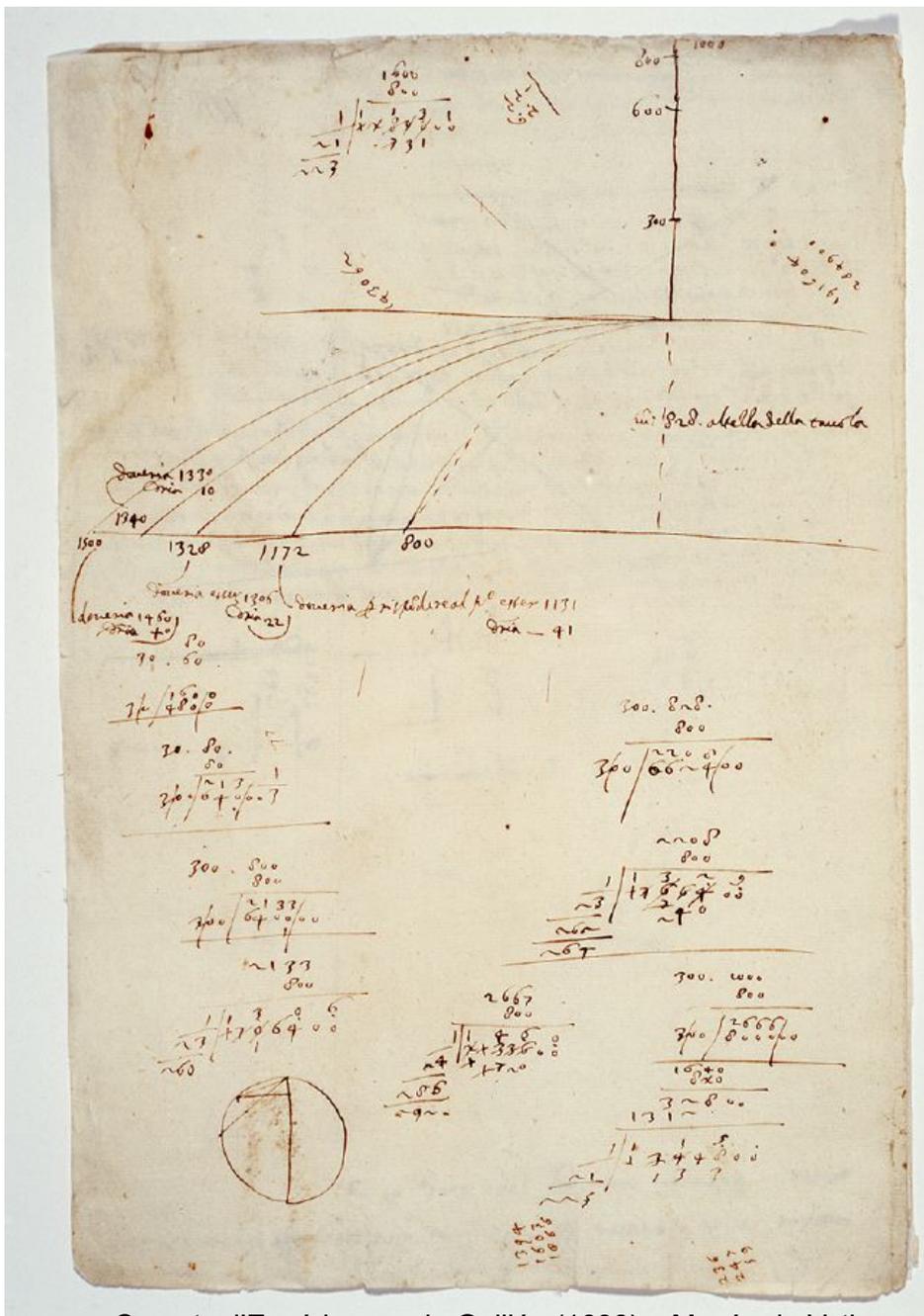
Attenenti alla  
MECANICA & I MOVIMENTI LOCALI,  
*del Signor*

GALILEO GALILEI LINCEO,  
Filosofo e Matematico primario del Serenissimo  
Grand Duca di Toscana.

*Con vna Appendice del centro di gravità d'alcuni Solidi.*



IN LEIDA,  
Appresso gli Elsevirii. M. D. C. XXXVIII.



# LE MOUVEMENT RECTILIGNE ET UNIFORME

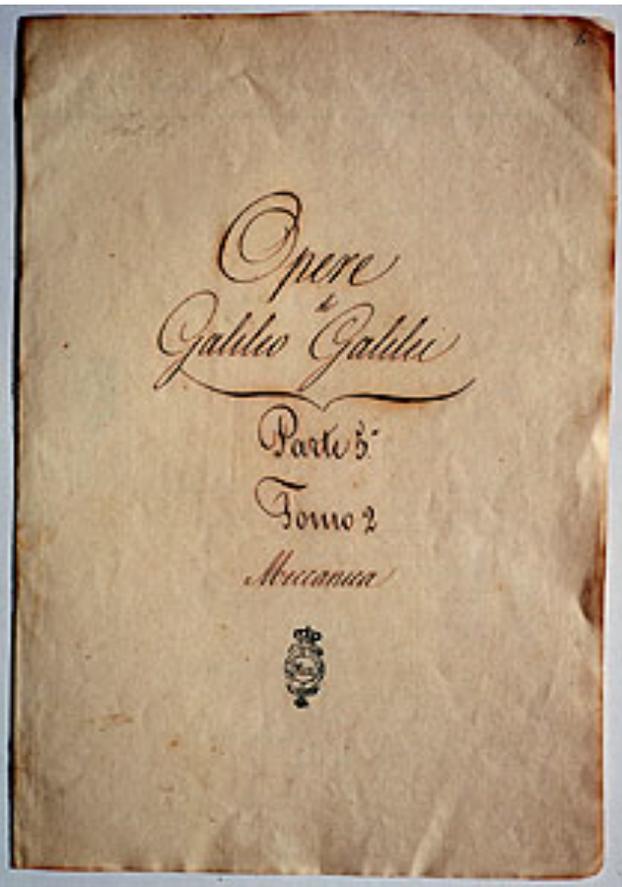


# MOUVEMENT NATUREL D'UN CORPS

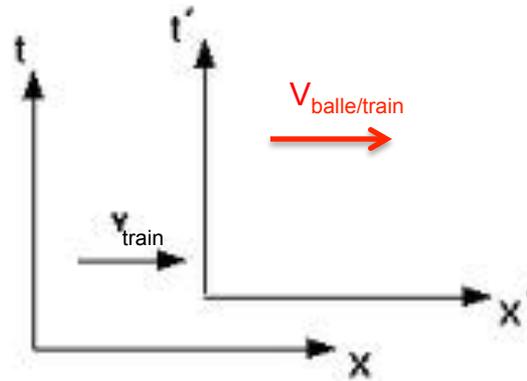
abandon de l'impétus  
aristotélicien

Carnets d'Expériences de Galilée (1638) – Musée du Vatican

# TRANSFORMATION DE GALILÉE



## LOI D'ADDITIVITÉ DES VITESSES



**La physique galiléenne  
est covariante**

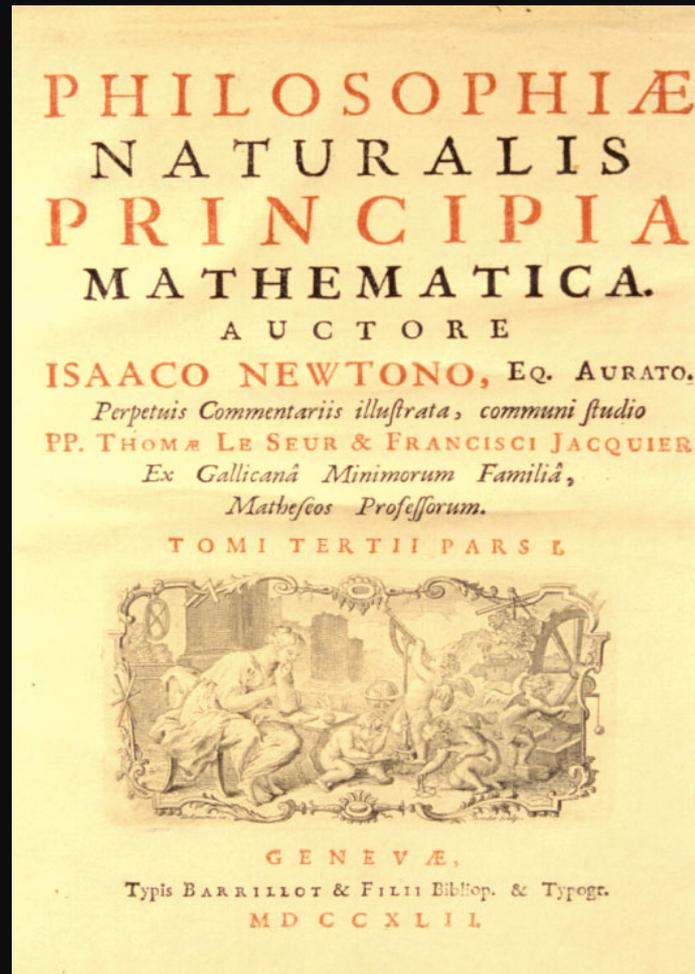
(passage d'un lieu à un autre)

# ISAAC NEWTON

(1687)

## « *Principia Mathematica* »

Etude des causes des mouvements des corps



# Principe fondamental de la dynamique

## définition de la masse

*Capacité d'un corps à résister au changement de mouvement*

**FORCE ET ACCÉLÉRATION (changement de mouvement)  
SONT LIÉES – EXISTENCE D'UNE CAUSE: FORCE**

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}$$



LE MOUVEMENT DE CHUTE LIBRE EST UN MOUVEMENT ACCÉLÉRÉ

LA TRAJECTOIRE DES PLANÈTES « AUTOUR » DU SOLEIL  
EST UNE TRAJECTOIRE ELLIPTIQUE



EXISTENCE D'UNE CAUSE, D'UNE FORCE



LES MASSES « S'ATTIRENT » ENTRE ELLES

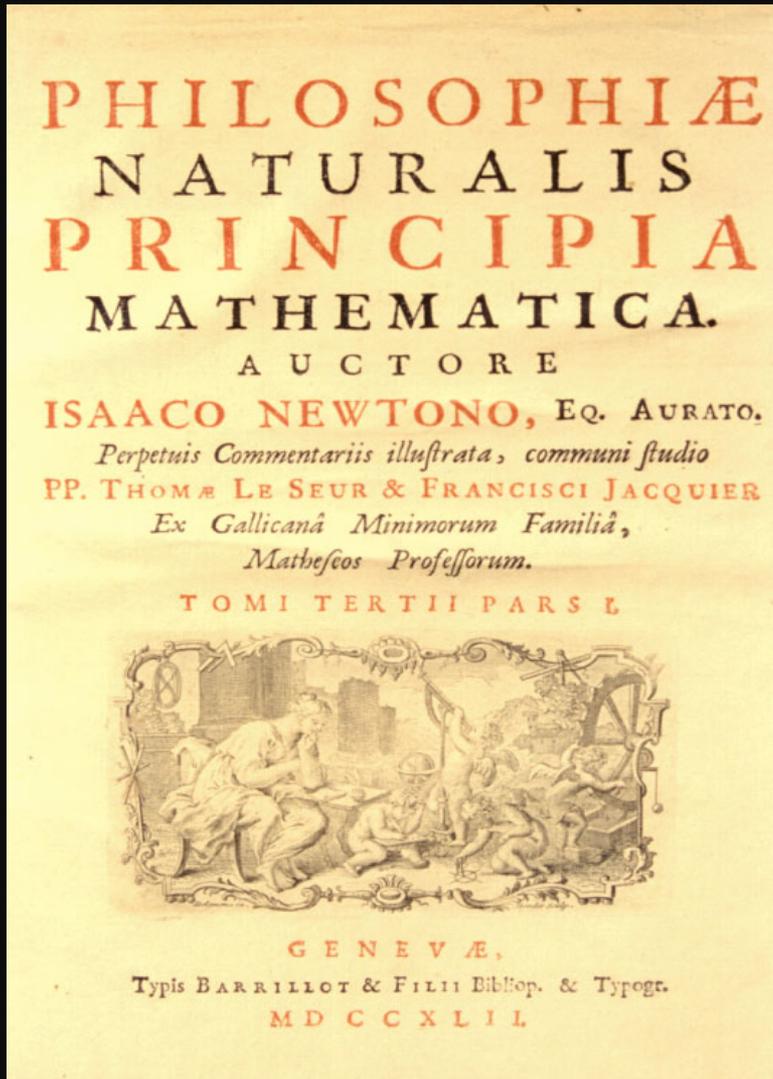


$$F = G \frac{mM}{r^2}$$

$G$  : constante de la gravitation

**Les lois de la mécanique sont invariantes par transformation de Galilée**

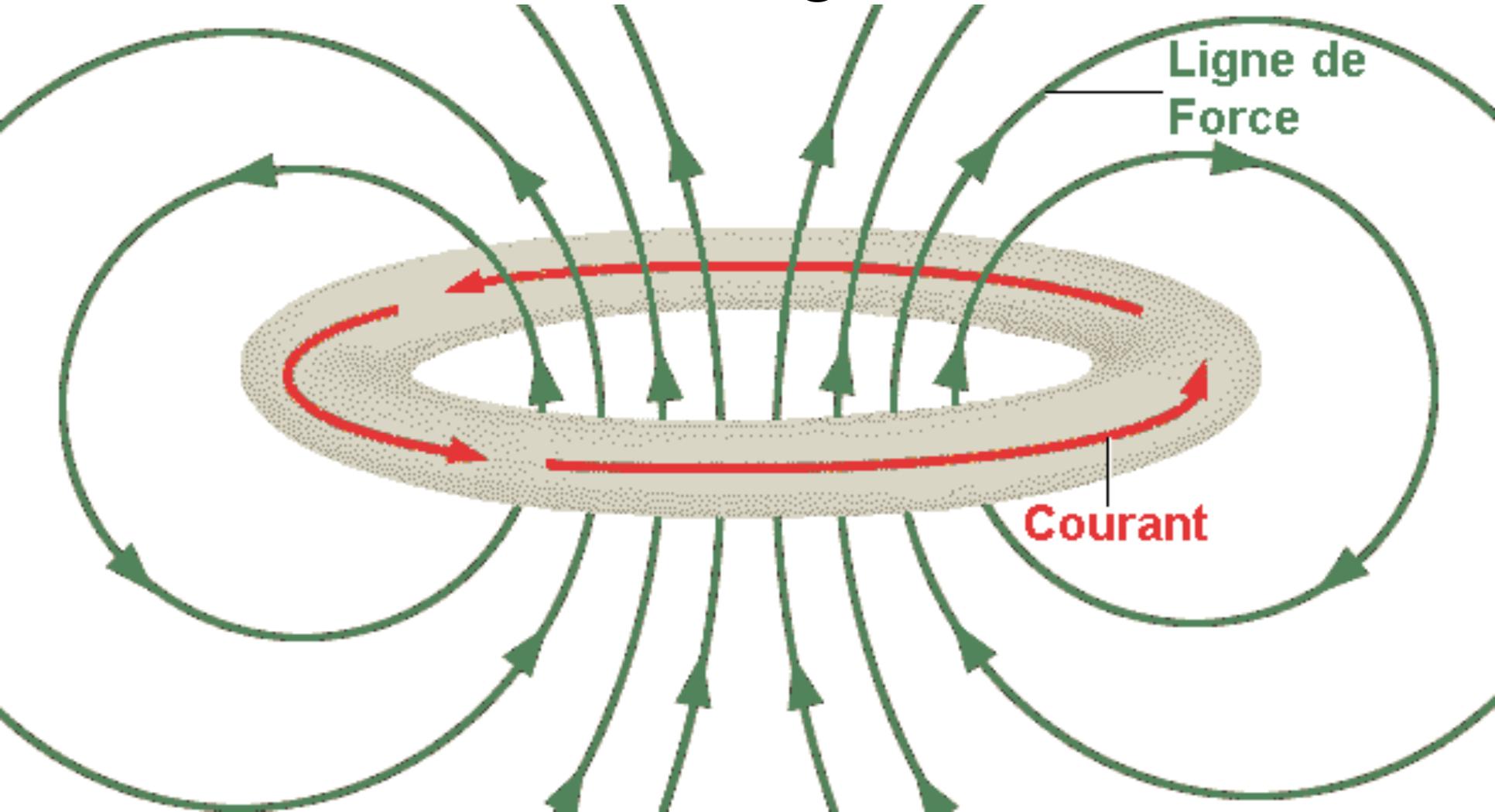
# « Loi universelle de la gravité »

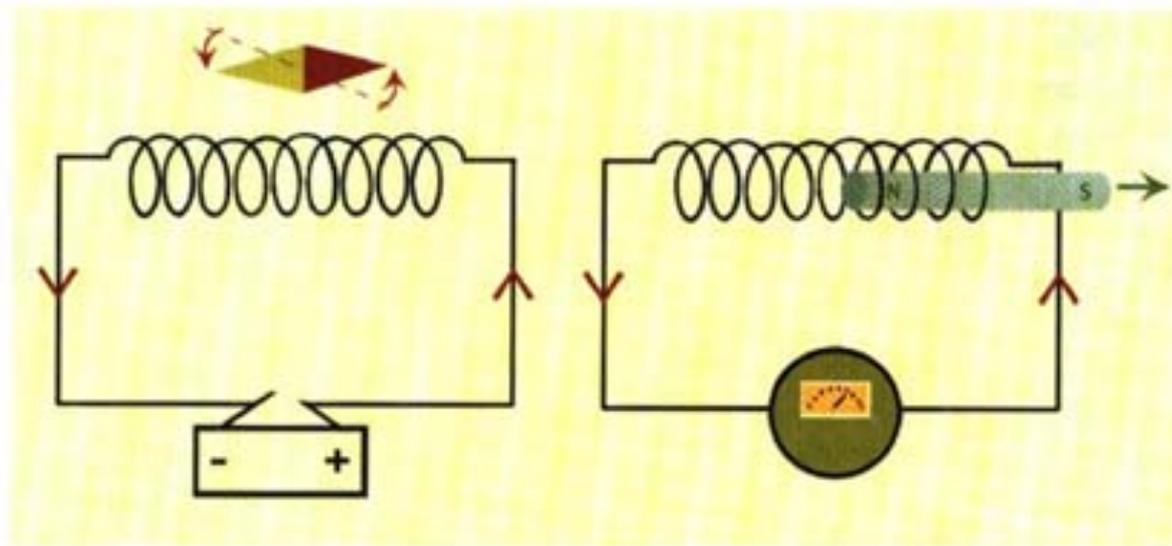
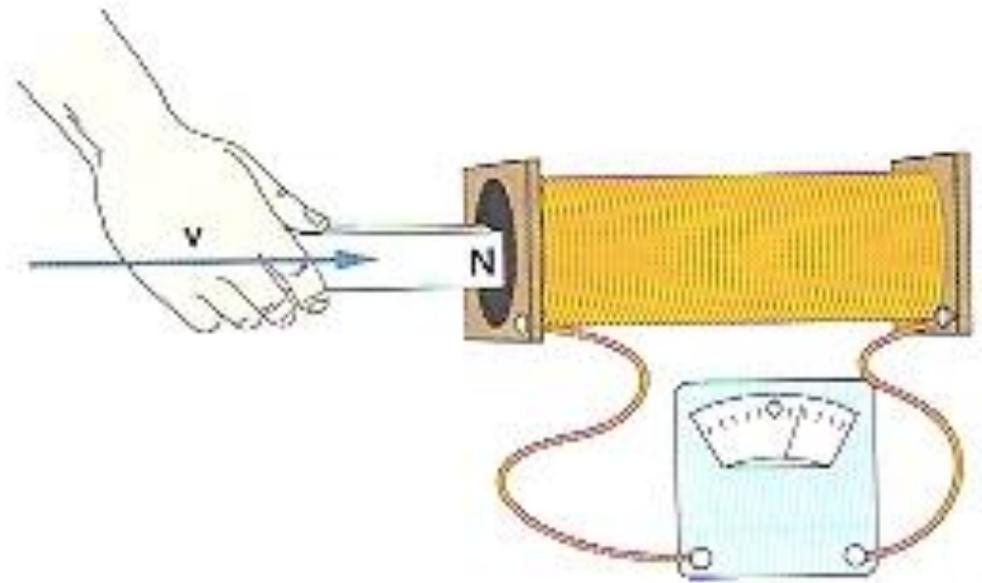
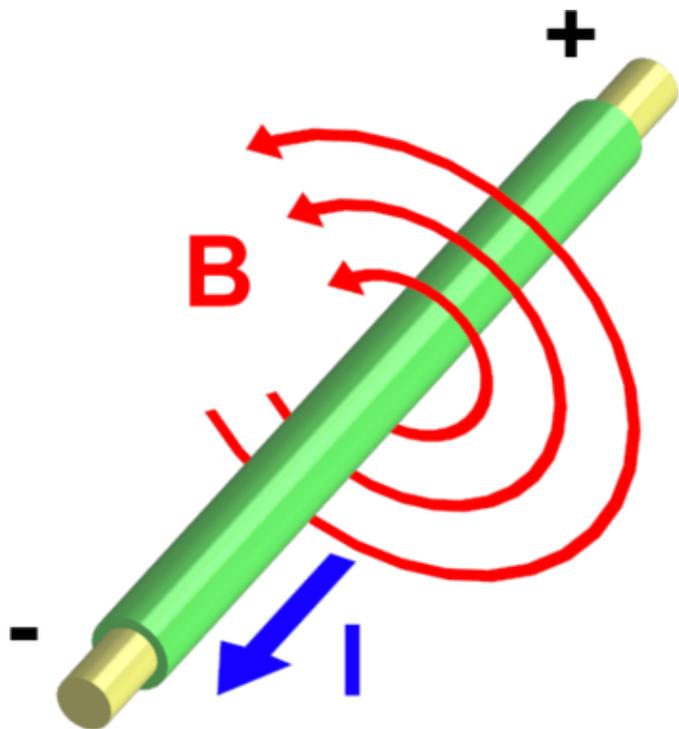


*Il a dépassé les capacités de la race humaine*

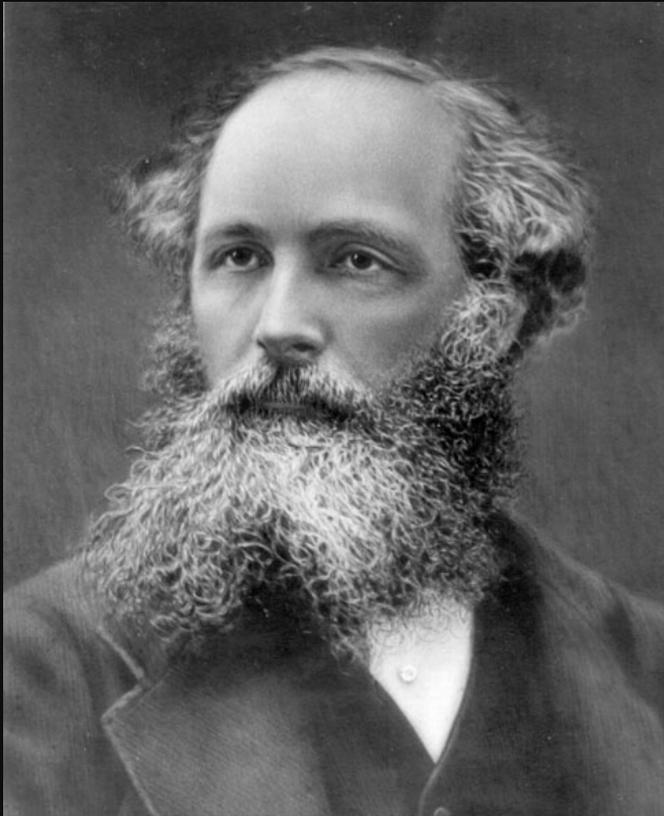
18<sup>ème</sup> - 19<sup>ème</sup> siècle

# Une nouvelle physique L'Électromagnétisme





Symétrie entre aimant et courant.



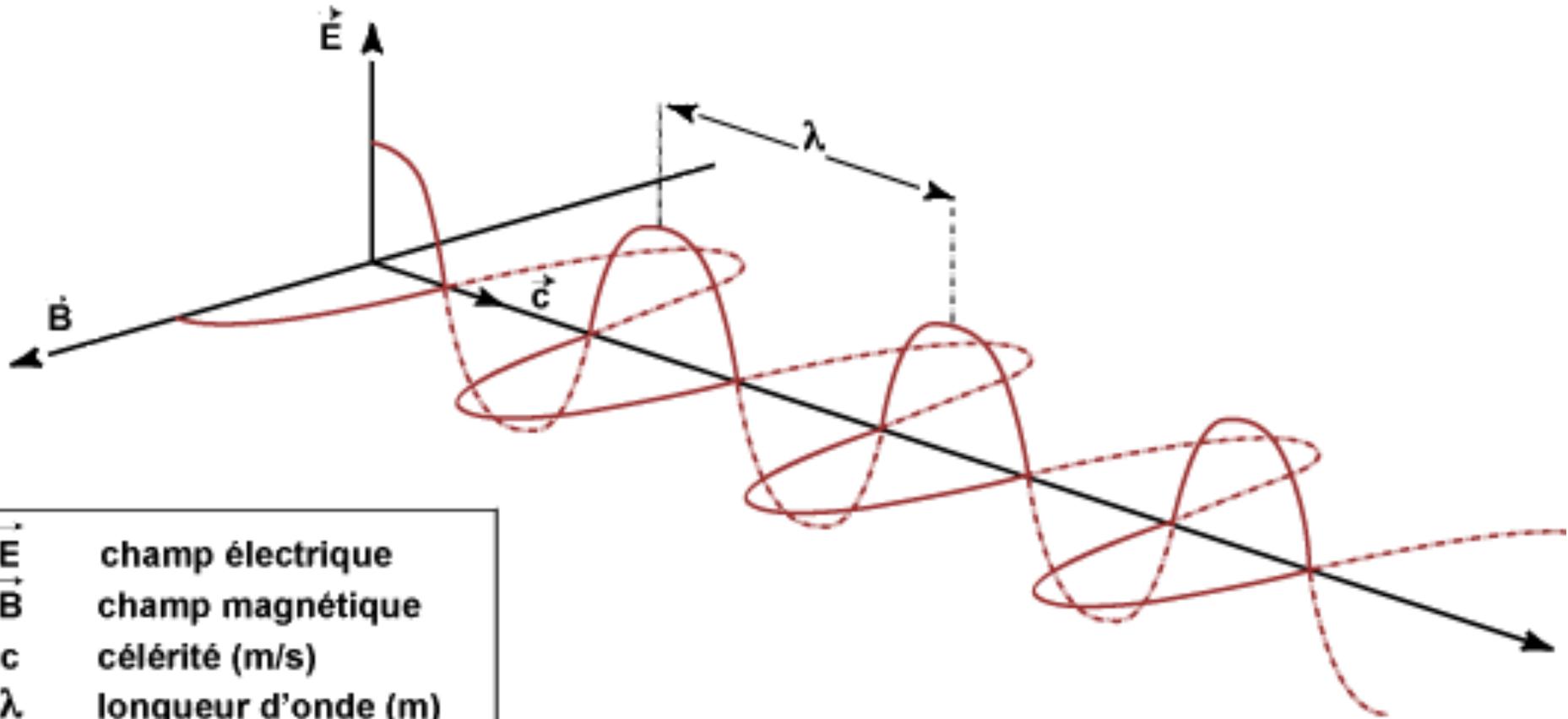
**JAMES MAXWELL (1864)**

Établit les équations qui unissent  
L'électricité et le magnétisme

**LOI DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME**  
Théorie des ondes électromagnétiques

*« La lumière et le magnétisme  
sont deux phénomènes de même nature »*

# ÉLECTROMAGNÉTISME ET PHYSIQUE ONDULATOIRE



$\vec{E}$	champ électrique
$\vec{B}$	champ magnétique
$c$	célérité (m/s)
$\lambda$	longueur d'onde (m)
$T$	période = $\lambda / c$ (s)
$f$	fréquence = $1 / T$ (Hz)

# ÉQUATIONS DE MAXWELL

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{Maxwell-Gauss})$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{Maxwell-flux})$$

$$\operatorname{rot}(\vec{E}) = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (\text{Maxwell-Faraday})$$

$$\operatorname{rot}(\vec{B}) = \mu_0 \vec{j}_v + \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{Maxwell-Ampère})$$

## **GROS PROBLÈME**

**LA LOI DE TRANSFORMATION DE GALILÉE NE S'APPLIQUE PAS AUX ÉQUATIONS DE MAXWELL**

19<sup>ème</sup> - début 20<sup>ème</sup> siècle

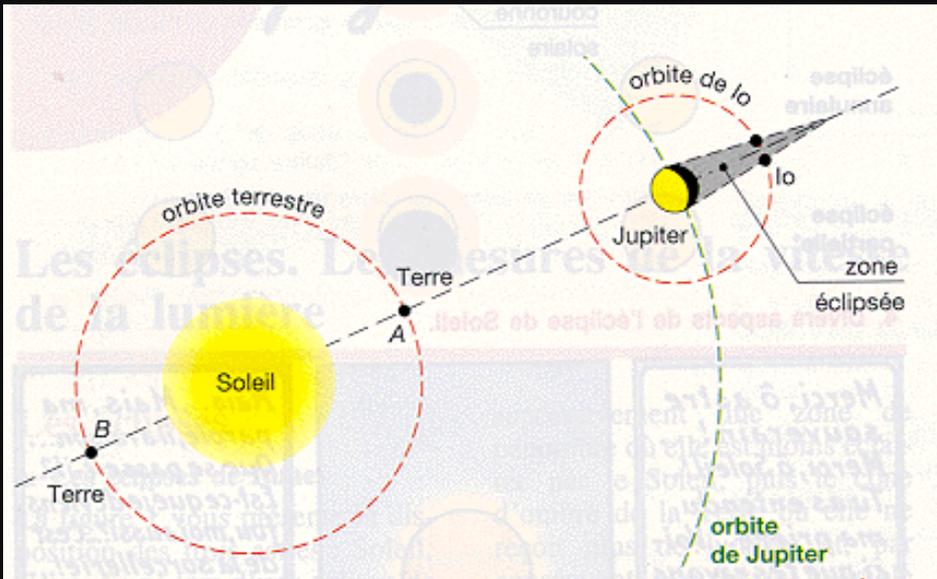
# Le questionnement de la lumière



# VITESSE DE LA LUMIÈRE: Expérience de RÖMER (1676)



Ole Rømer



Rømer trouve  
que la variation de la période  
de révolution du satellite Io  
autour de Jupiter  
variait en fonction  
de la position de la Terre  
quand on effectuait la mesure

(Résultat en contradiction avec les lois de Képler)

**Il faut prendre en compte  
le temps de parcours de la lumière  
pour aller de Io à la Terre**

**C=212 000 km/s**

234  
ne seconde de temps.

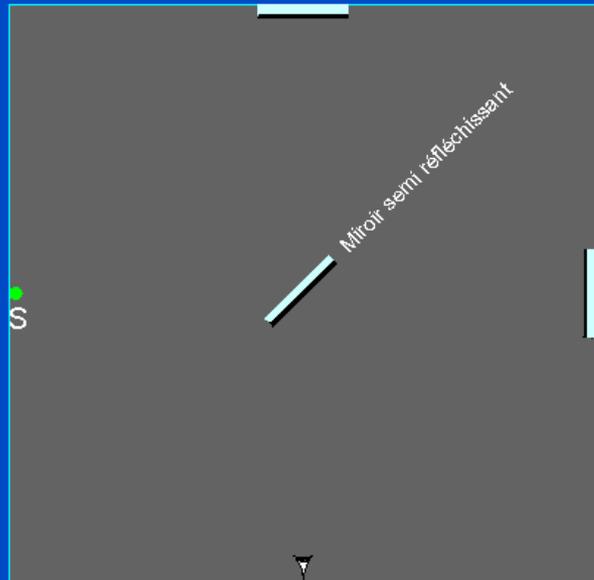
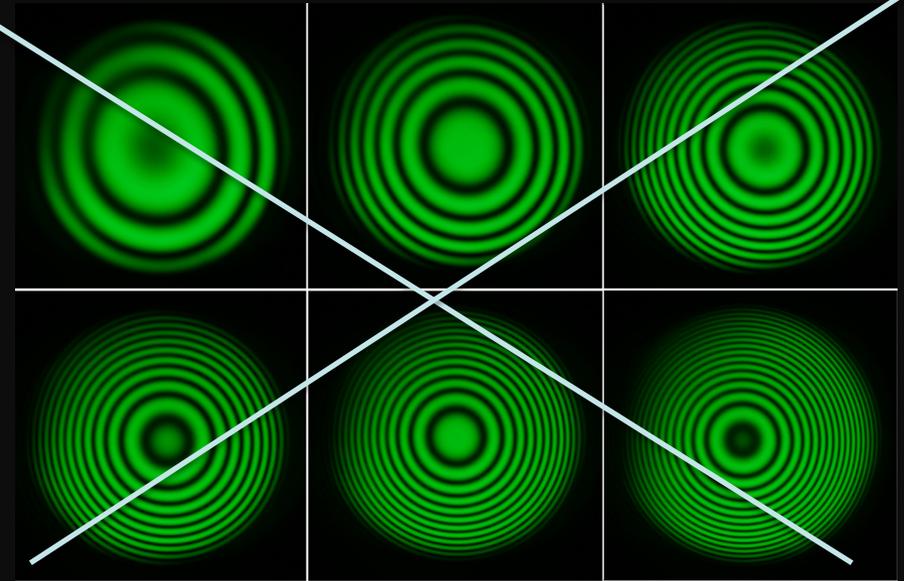
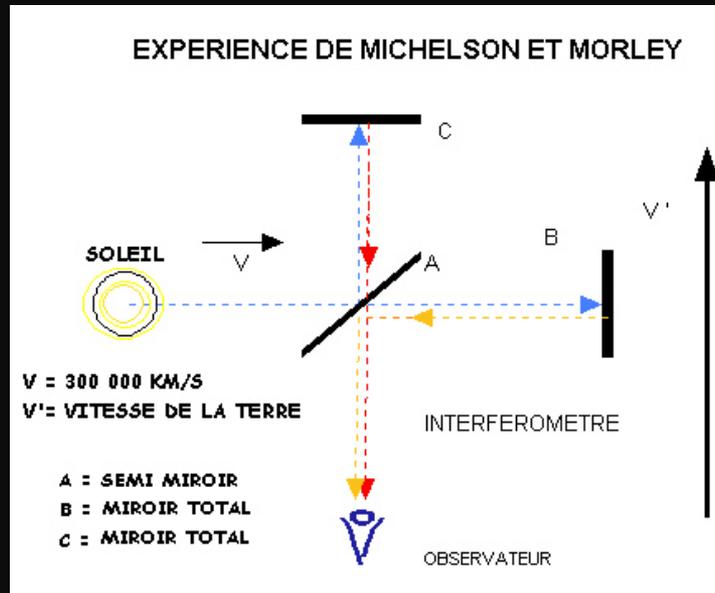
JOURNAL

Soit A le Soleil, B Jupiter, C le premier satellite qui entre dans l'ombre de Jupiter pour en sortir en D. et soit E, F, G, H, K, L, la Terre placée à diverses distances de Jupiter.

Or supposé que la Terre étant en L vers la seconde quadrature de Jupiter, ait vu le premier satellite, lors de son émergence ou sortie de l'ombre en D ; et qu'ensuite, environ 42 heures et demie après, savoir après une révolution de ce satellite, la Terre se trouvant en K, le voit de retour en D : il est manifeste que si la lumière demande du temps pour traverser l'intervalle LK, le satellite sera vu plus tard de retour en D, qu'il n'aurait été si la Terre était demeurée en L ; de sorte que la révolution de ce satellite, ainsi observé par les émersions, sera retardée d'autant de temps que la lumière en aura employé à passer de L en K, et qu'au contraire dans l'autre quadrature FG, où la Terre en s'approchant, va au devant de la lumière, les révolutions des immersions paraîtront autant raccourcies, que celles des émersions avaient parues allongées. »

Extrait du rapport de Rømer, dans le *Journal des sçavans* du Lundy 7 Décembre 1676 (page 234).

# EXPÉRIENCE DE MICHELSON-MORLEY (1881)

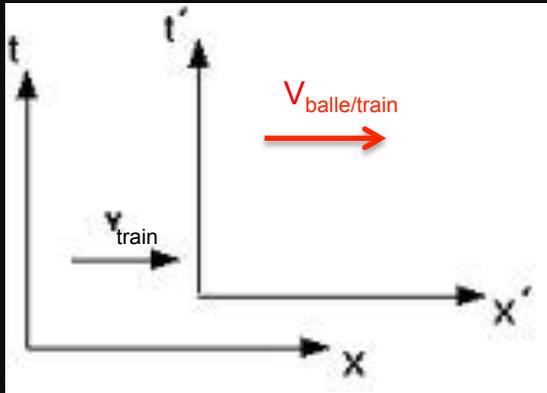


Interféromètre  
de  
Michelson

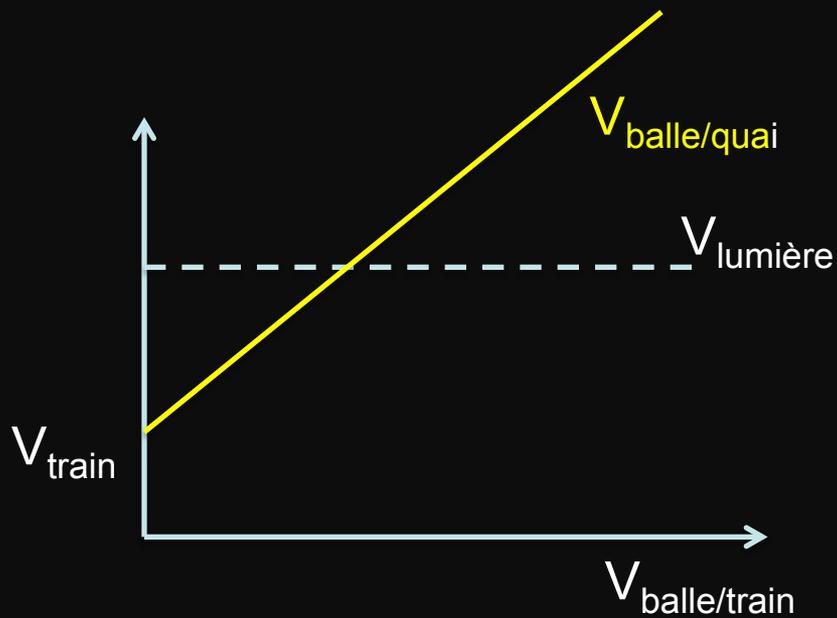
Pas d'anneaux d'interférences  
(anneaux de Newton)

**LA VITESSE DE LA LUMIÈRE  
EST UNE CONSTANTE  
INDÉPENDANTE DU LIEU !**

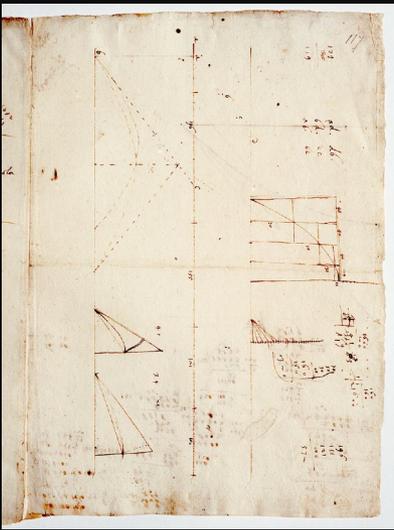
# TRANSFORMATION DE GALILÉE



$$V_{\text{balle/quai}} = V_{\text{Train}} + V_{\text{balle/train}}$$



Possibilité d'avoir une vitesse supérieure à celle de la lumière !

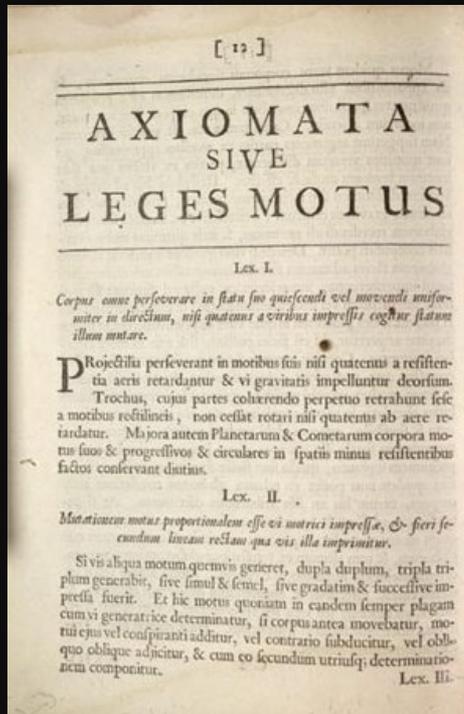


# La lumière est en contradiction avec la loi d'additivité des vitesses de Galilée

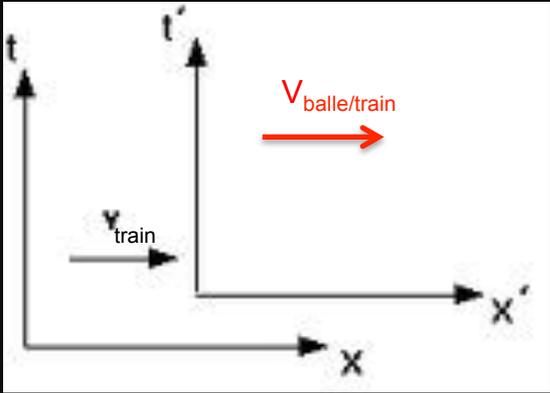
Or ...

## LES LOIS DE LA MÉCANIQUE SONT INVARIANTES PAR TRANSFORMATION DE GALILÉE

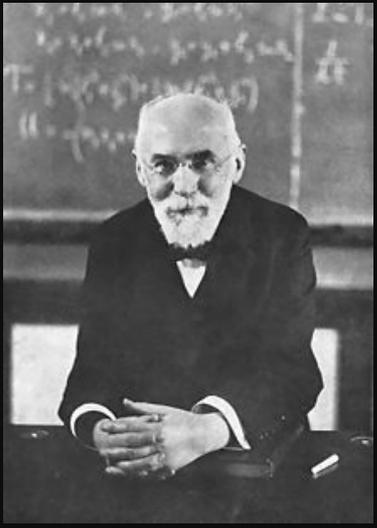
## Mais pas les équations de Maxwell régissant l'électromagnétisme



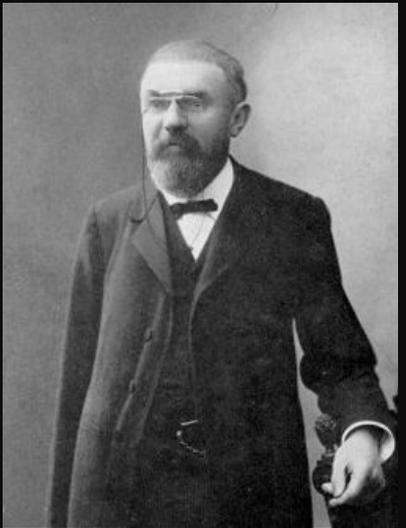
# TRANSFORMATION DE LORENTZ-POINCARÉ (1904)



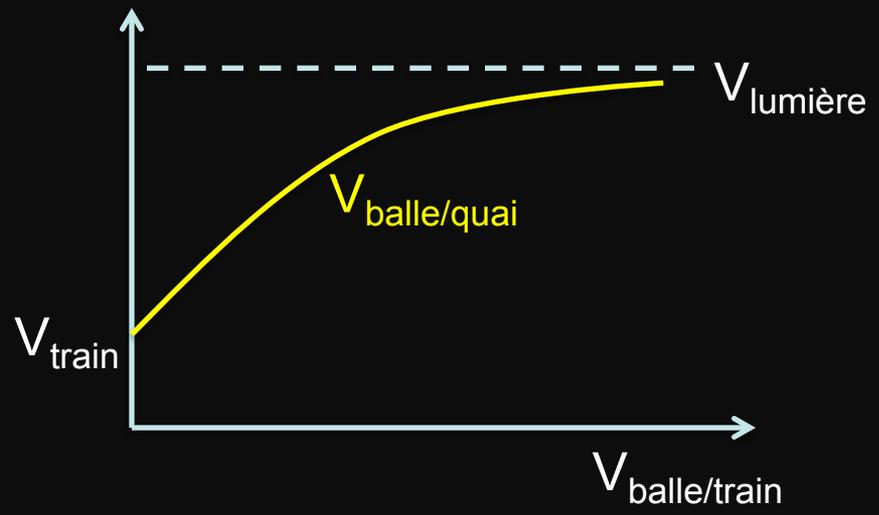
$$V_{\text{balle/quai}} = \frac{V_{\text{Train}} + V_{\text{balle/train}}}{1 + \frac{V_{\text{train}} V_{\text{balle/train}}}{V_{\text{lumière}}}}$$



Antoon Lorentz



Henri Poincaré



LA VITESSE DE LA LUMIÈRE DEVIENT UN INVARIANT LIMITE À TOUTES VITESSES

# TRANSFORMATION DE LORENTZ-POINCARÉ (1904)

LES LOIS DE LA MÉCANIQUE  
ET  
LES LOIS DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME  
SONT INVARIANTES  
PAR TRANSFORMATION  
DE LORENTZ-POINCARÉ

## EQUATIONS DE MAXWELL

$$\text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{Maxwell-Gauss})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{Maxwell-flux})$$

$$\text{rot}(\vec{E}) = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (\text{Maxwell-Faraday})$$

$$\text{rot}(\vec{B}) = \mu_0 \vec{j}_v + \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{Maxwell-Ampère})$$

**Les équations de Maxwell  
de l'électromagnétisme engendrent  
par transformation de Lorentz-Poincaré,  
Un invariant de propagation  
pour les ondes électromagnétiques**

## EQUATIONS DE PROPAGATION DES ONDES ELECTROMAGNÉTIQUES

$$\text{rot} \epsilon\mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\Delta \vec{B} \text{ soit } \epsilon\mu_0 \frac{\partial \text{rot} \vec{E}}{\partial t} = -\Delta \vec{B} \text{ soit } -\epsilon\mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = -\Delta \vec{B}$$

$$\Delta \vec{B} - \epsilon\mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

Vitesse de propagation



ALBERT EINSTEIN (1905)

## EINSTEIN (1905) RETOURNE LE PROBLÈME !

- Il n'y a pas d'espace et de temps absolu  
(on change de référentiel  
par transformation de Lorentz-Poincaré)
- La simultanéité des événements n'existe pas



La vitesse de la lumière est liée  
à la question de la causalité



Distance et temps sont liés



La vitesse de la lumière devient une constante  
théorique de structure de l'espace et du temps

Masse d'un corps = énergie au repos  $E=mc^2$



Il ne faut pas se conformer  
à notre perception HUMAINE

Ne plus parler d'espace et de temps séparément !

L'espace-temps plus conforme à la réalité physique

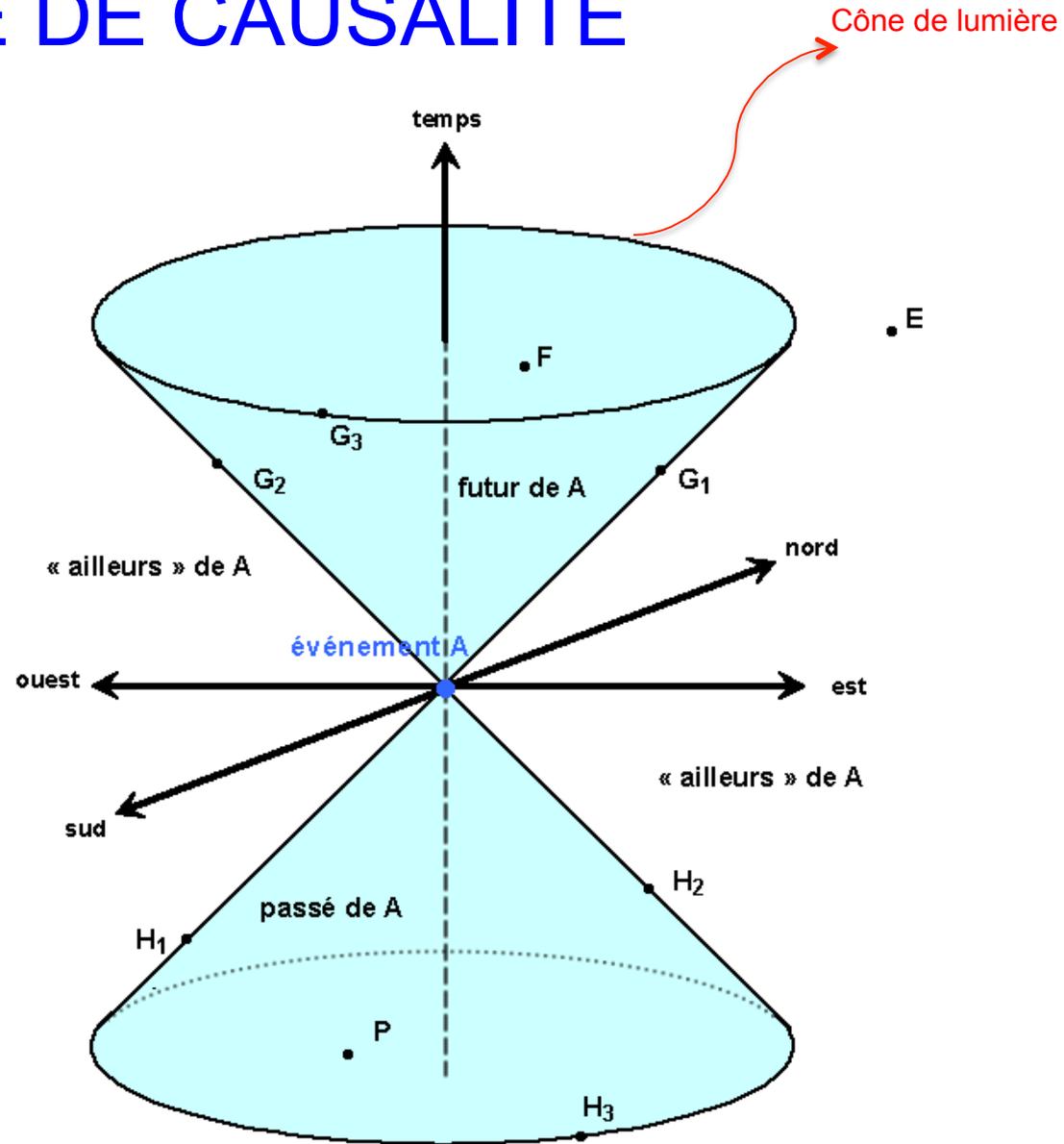
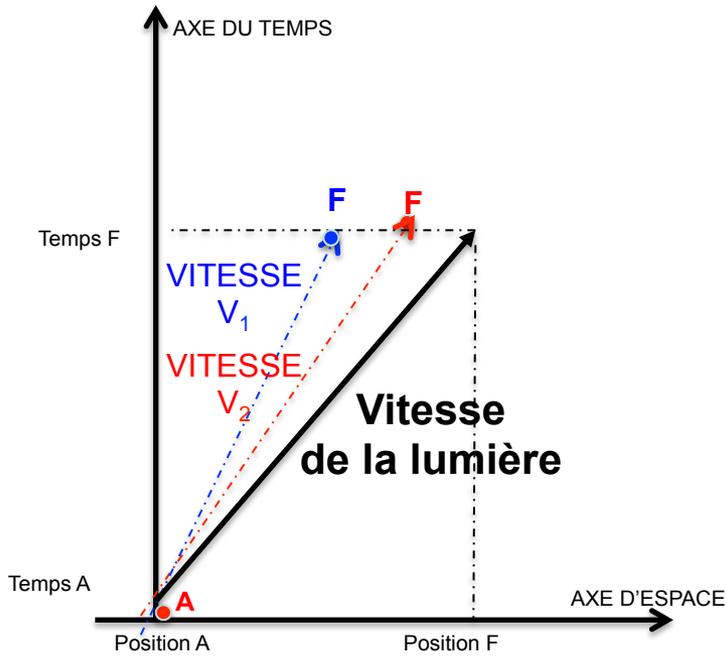


UN SIGNAL OU UNE INFORMATION (ONDES ELECTROMAGNÉTIQUES)  
SE DÉPLACE À LA VITESSE DE LA LUMIÈRE

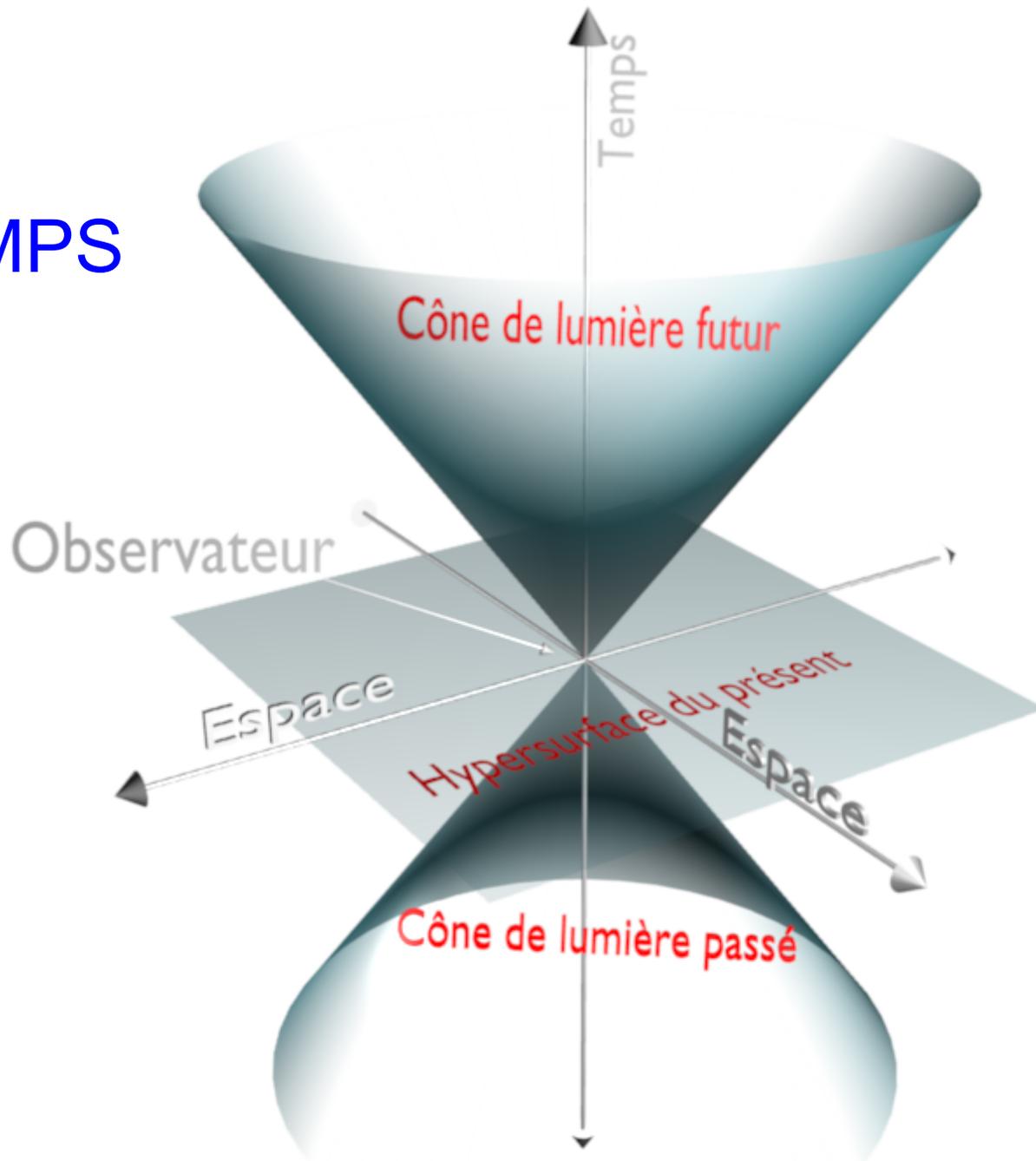
LE DON D'UBIQUITÉ EST IMPOSSIBLE ...

ON VOIT LES AUTRES DANS LE PASSÉ !

# CONE DE LUMIÈRE ESPACE DE CAUSALITÉ

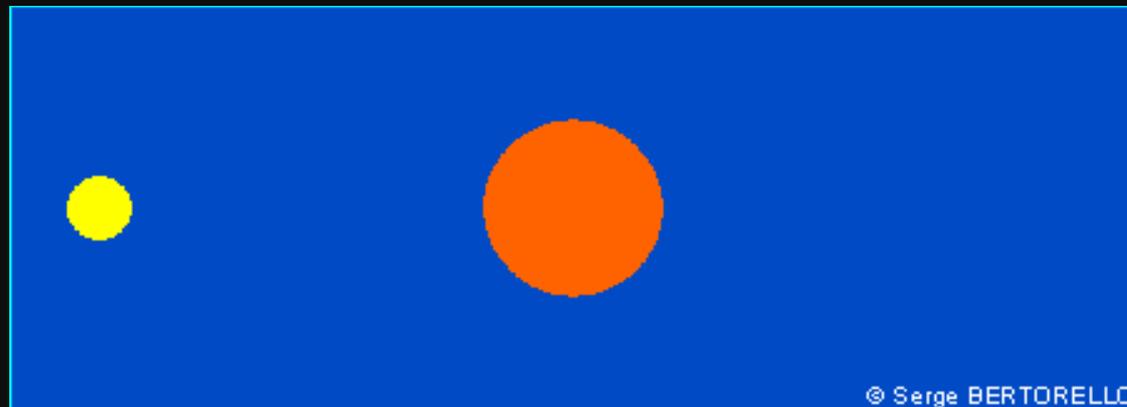
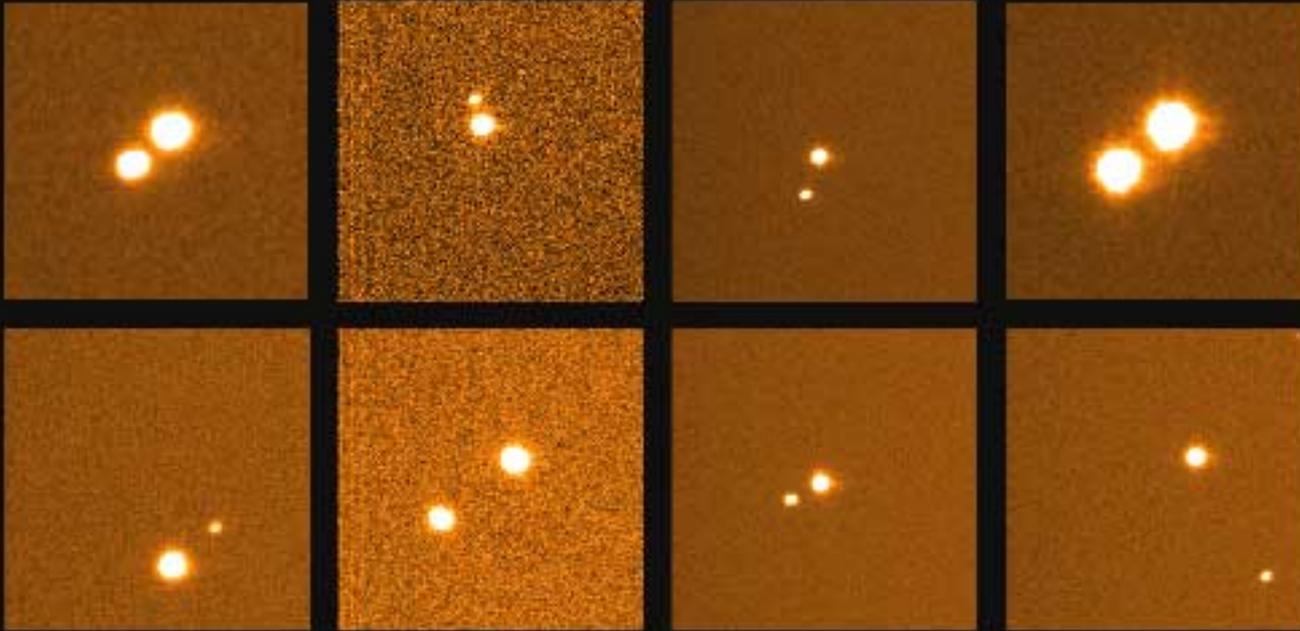


# ESPACE-TEMPS





# Observation d'un Système d'étoiles doubles



Observation d'une étoile double

Voilà ce qui pourrait se passer si la vitesse de la lumière dépendait de la vitesse de l'objet observé



© Serge BERTORELLO

**LA VITESSE  
DE LA LUMIÈRE  
SEMBLE ETRE UN ...  
INVARIANT**

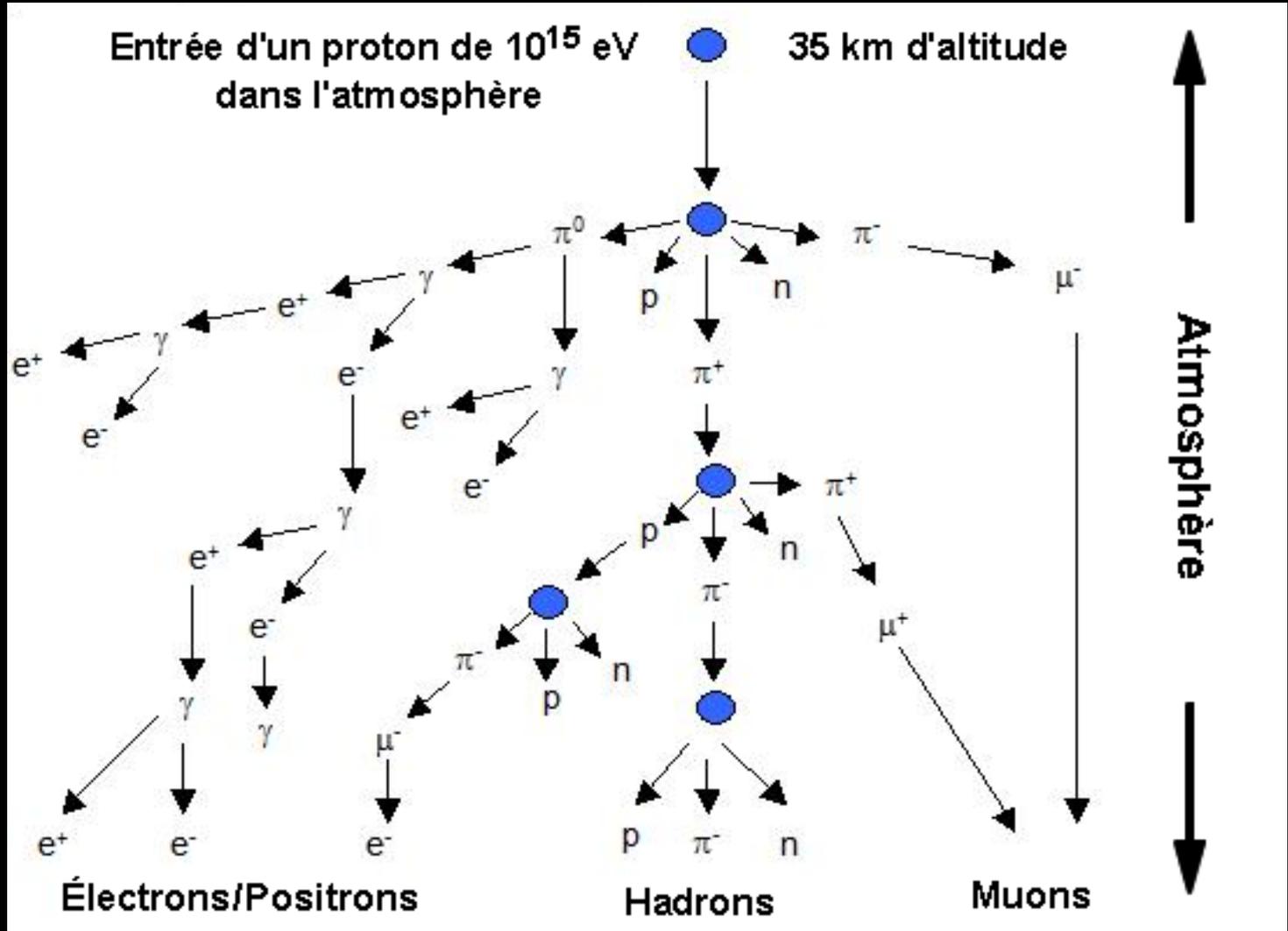
Observation d'une étoile double

La vitesse de la lumière ne dépend pas de la vitesse de l'objet observé



© Serge BERTORELLO

Temps de traversée  
100  $\mu\text{s}$

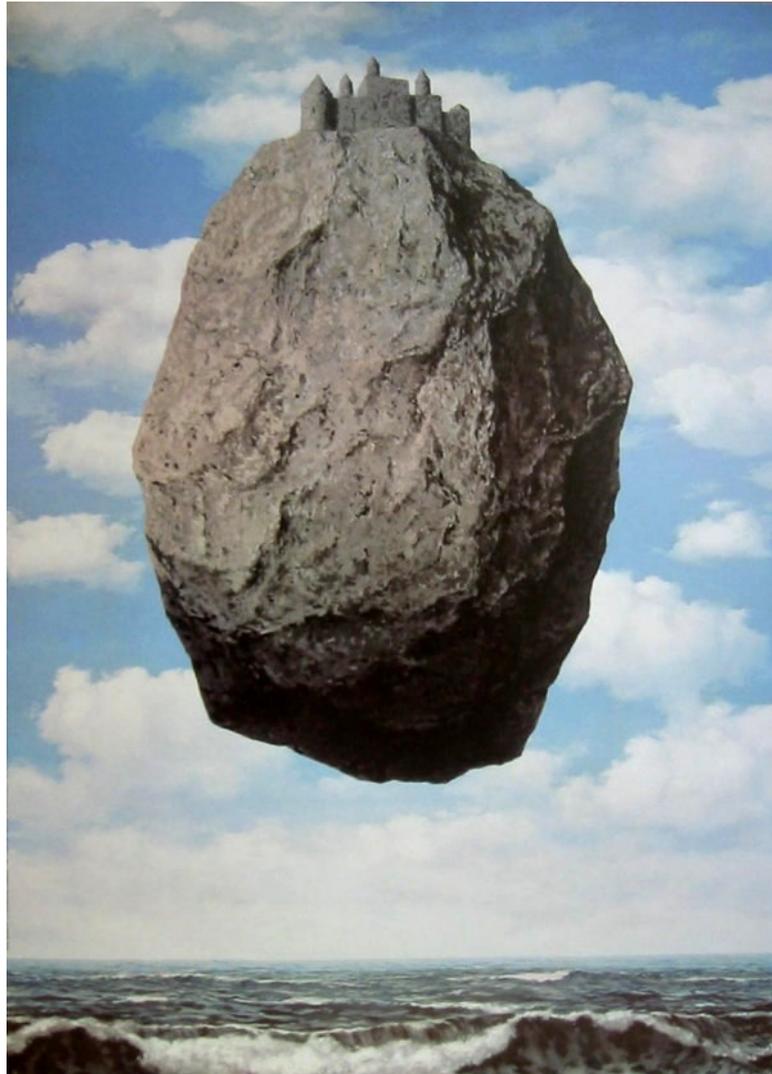


Temps de demi-vie d'un Muon =  $2 \mu\text{s}$   $\Rightarrow$  pas de muons au sol  
Or ...on observe des muons au sol (1/8 des muons initiaux)

En fait ... (conséquence de la relativité restreinte)  
Le temps de traversée dans le référentiel propre est de 3 demi-vie ( $6 \mu\text{s}$ )

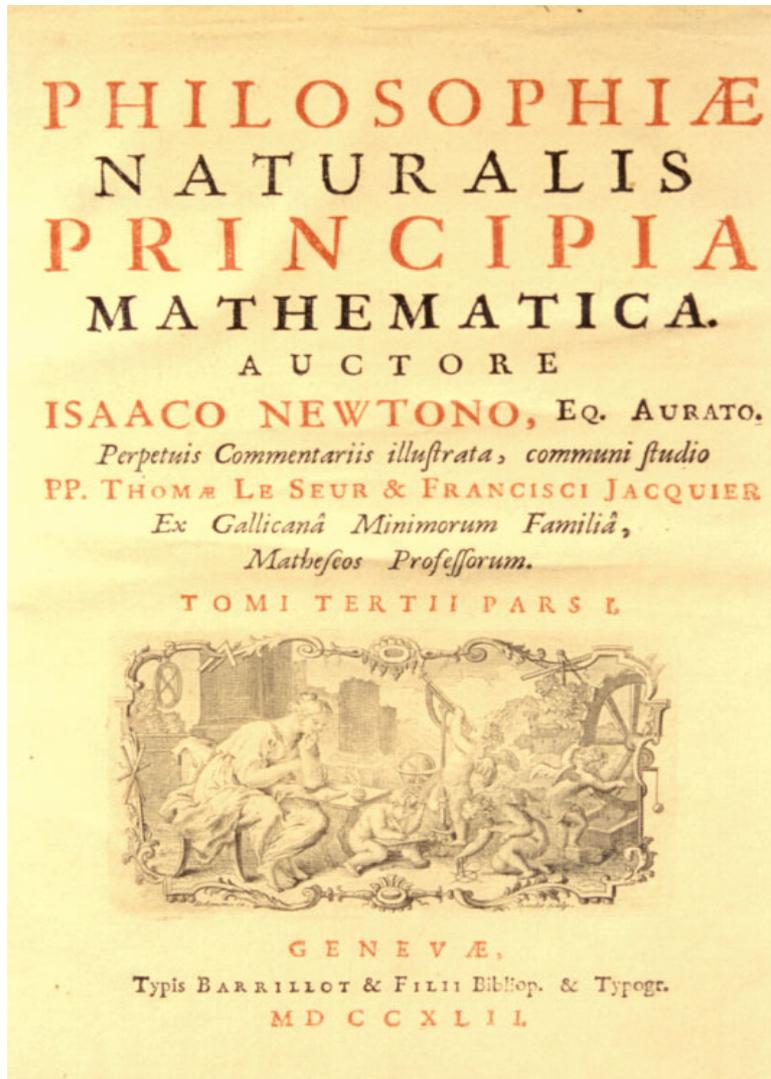
20<sup>ème</sup> siècle

# Le questionnement de l'espace



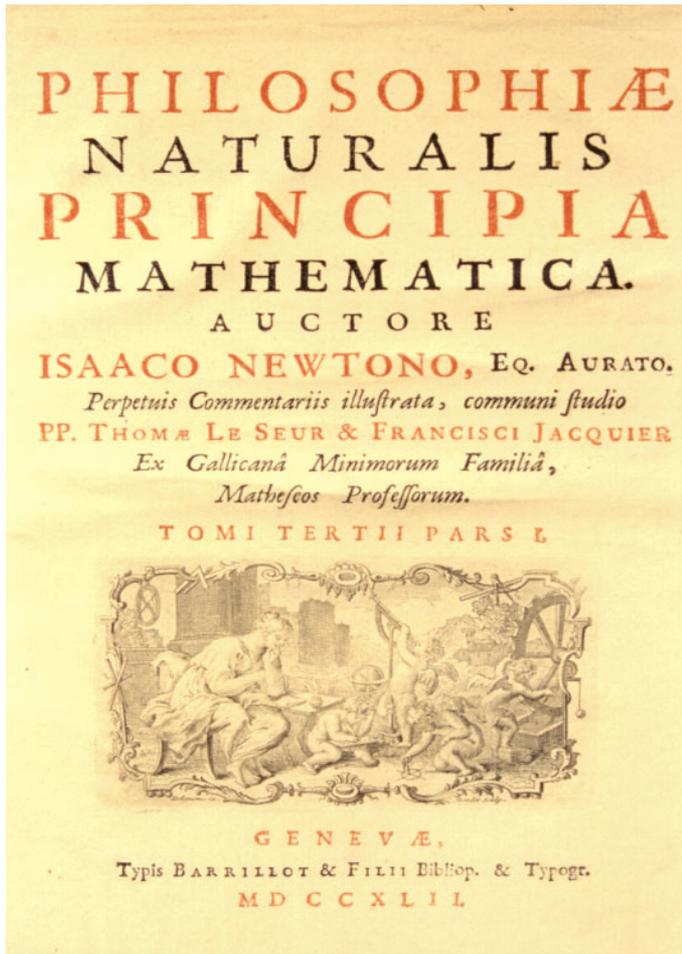
*Le château des Pyrénées – René Magritte (1959)*

# Loi Universelle de la Gravité ...



$$F = G \frac{mM}{r^2}$$

# 1<sup>er</sup> problème

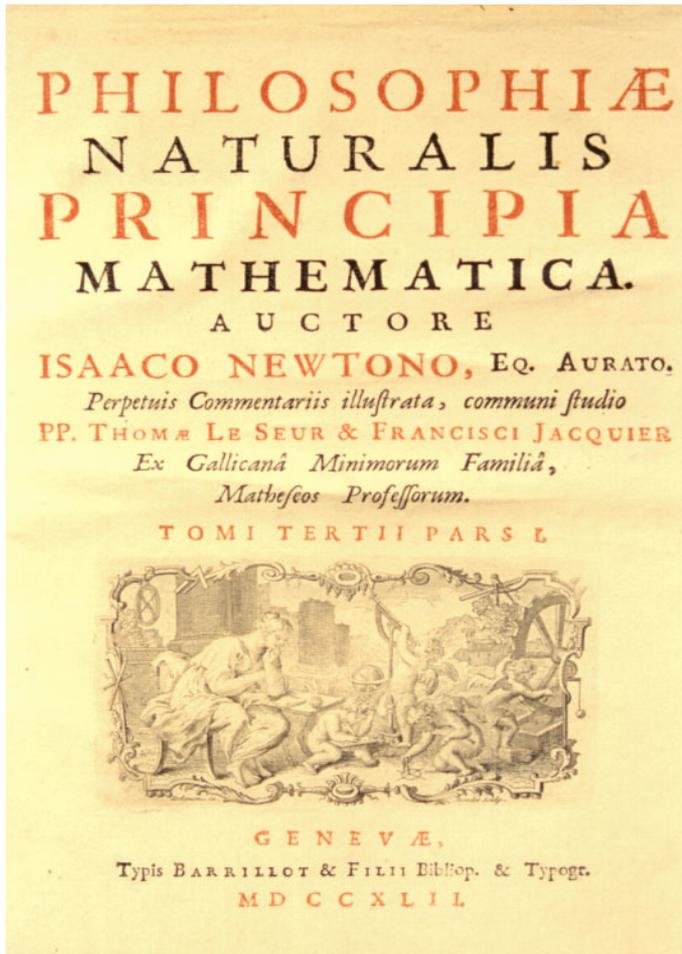


$$F = G \frac{mM}{r^2}$$

Origine de la force ?

Pourquoi cette forme  
mathématique ?

# 2<sup>ème</sup> problème



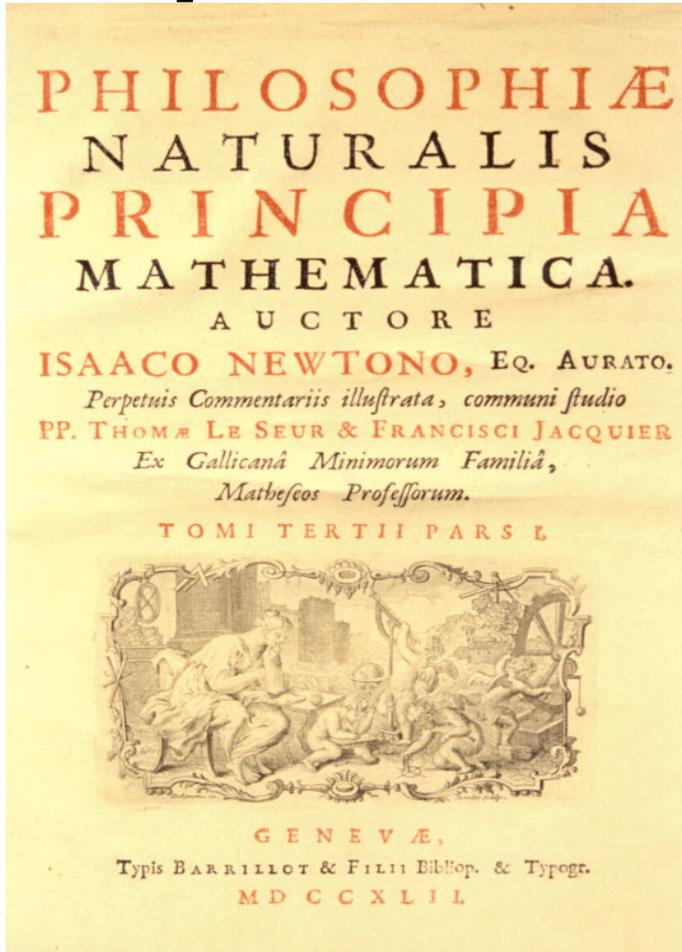
$$F = G \frac{mM}{r^2}$$

F=0 pour ...  
r tendant vers l'infini !

La force gravitationnelle  
est une force partout  
présente dans l'Univers !

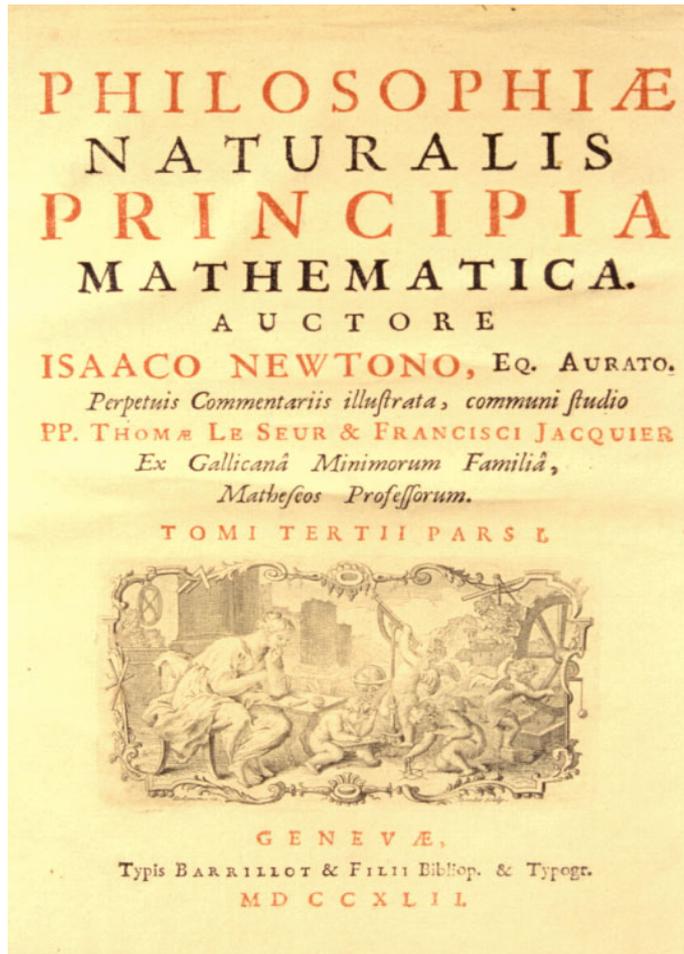
# 3<sup>ème</sup> problème

$$F = G \frac{mM}{r^2}$$



La force gravitationnelle  
est une force instantanée

# Loi universelle de la gravité ?



$$F = G \frac{mM}{r^2}$$

# L'ÉMERGENCE DE LA GÉOMÉTRIE NON-EUCLIDIENNE



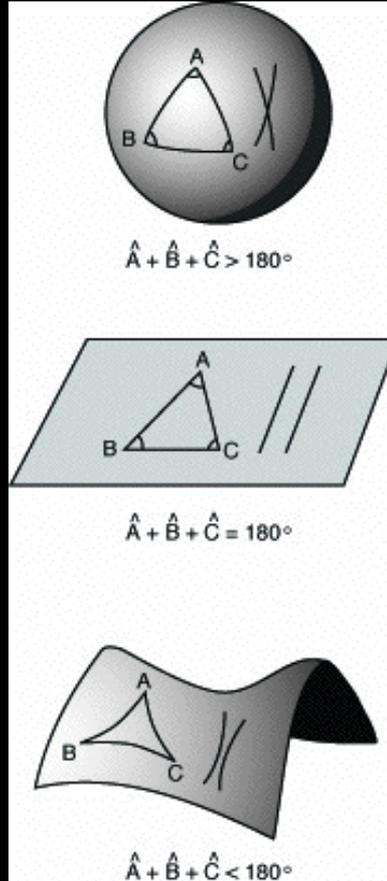
Carl Friedrich Gauss  
1777-1855



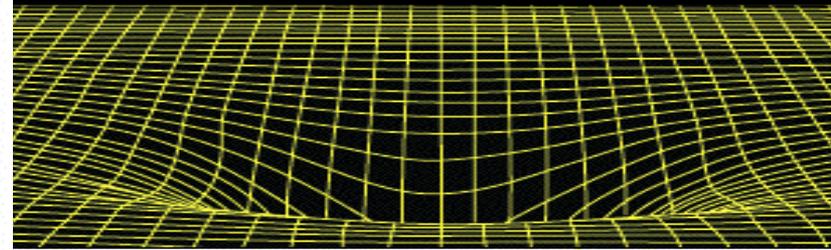
Nicolaï Lobatchevski  
1792-1856



Bernhard Riemann  
1826-1866

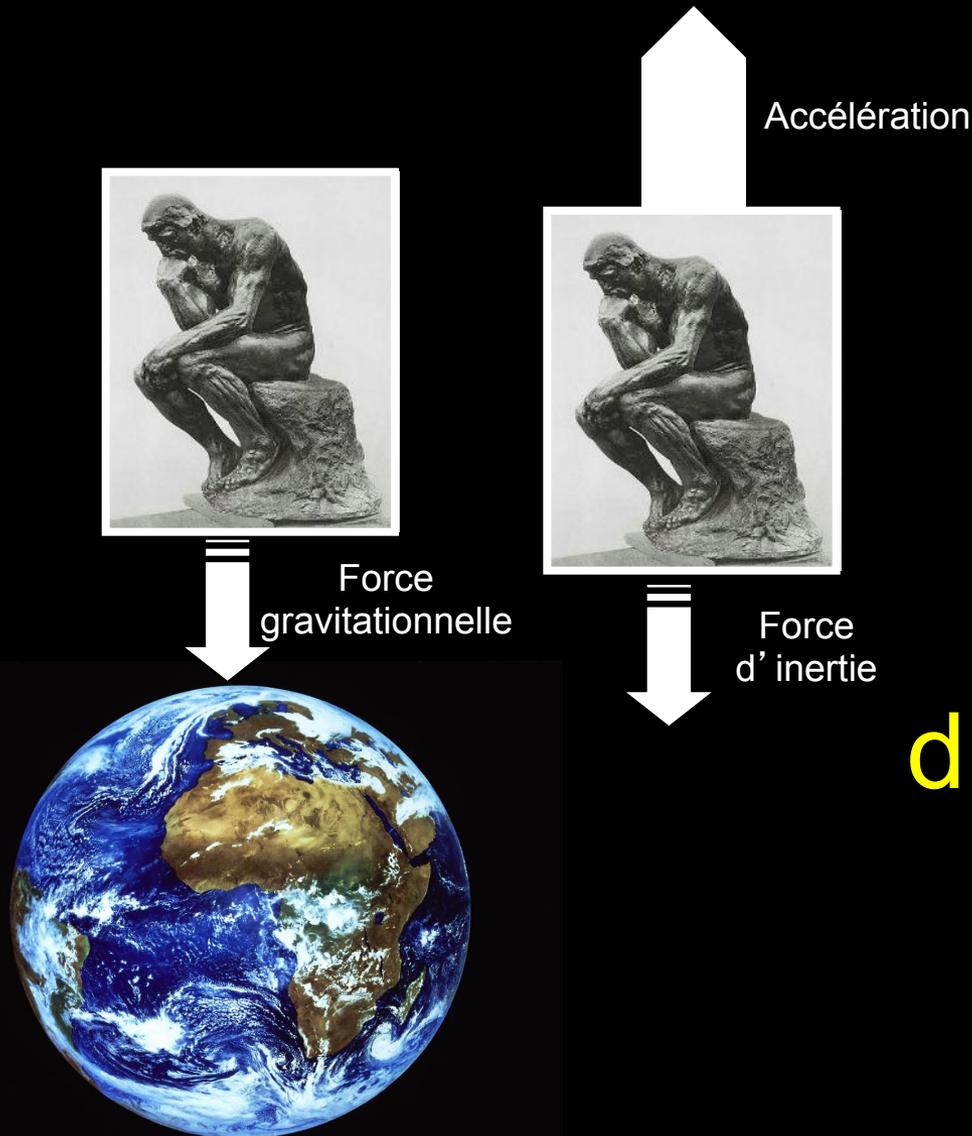


Espace courbe  $R_{\mu\nu}$   
Les droites « deviennent »  
des géodésiques

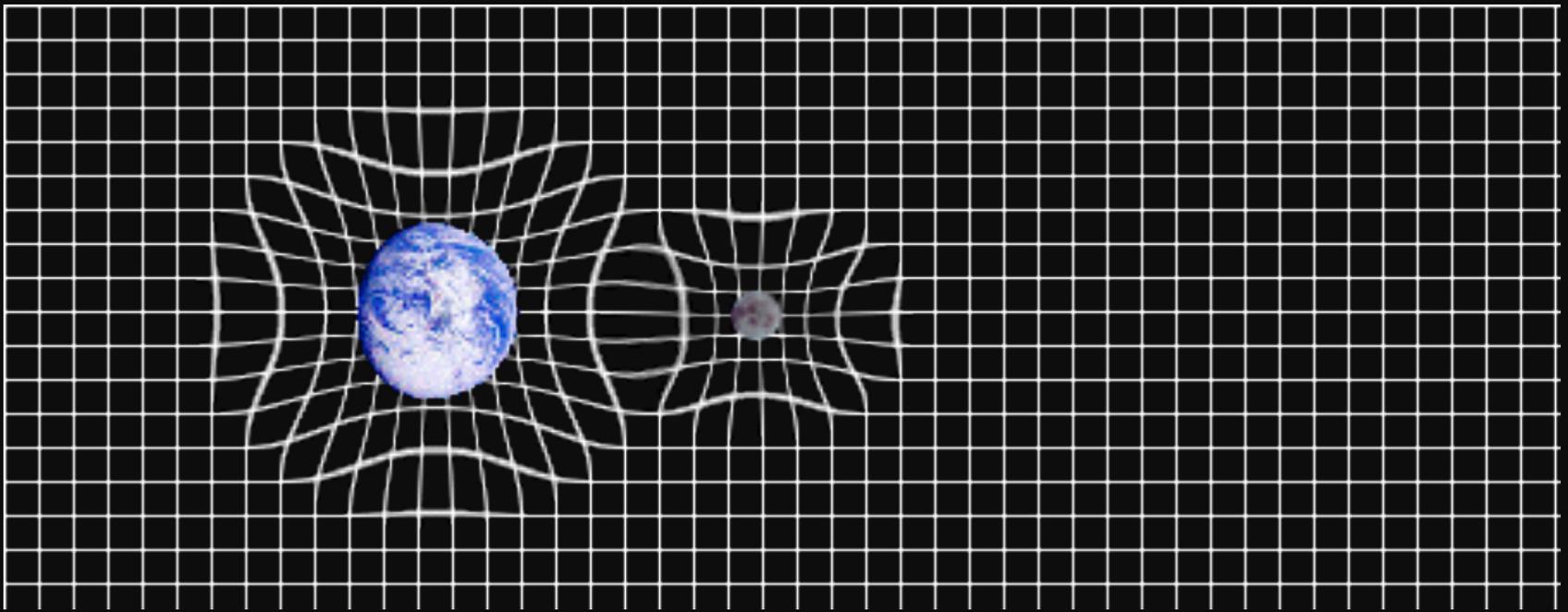


# Principe d'équivalence

(*Gedanken experiment* - Einstein 1915)



Aucun moyen  
de distinguer  
la gravitation  
d'une accélération !



EINSTEIN REJÈTE L'IDÉE DE FORCE GRAVITATIONNELLE



DESCRIPTION GÉOMÉTRIQUE DE LA GRAVITATION



LA MASSE EST PRISE COMME UNE DÉFORMATION GÉOMÉTRIQUE  
UNE COURBURE DE L'ESPACE-TEMPS

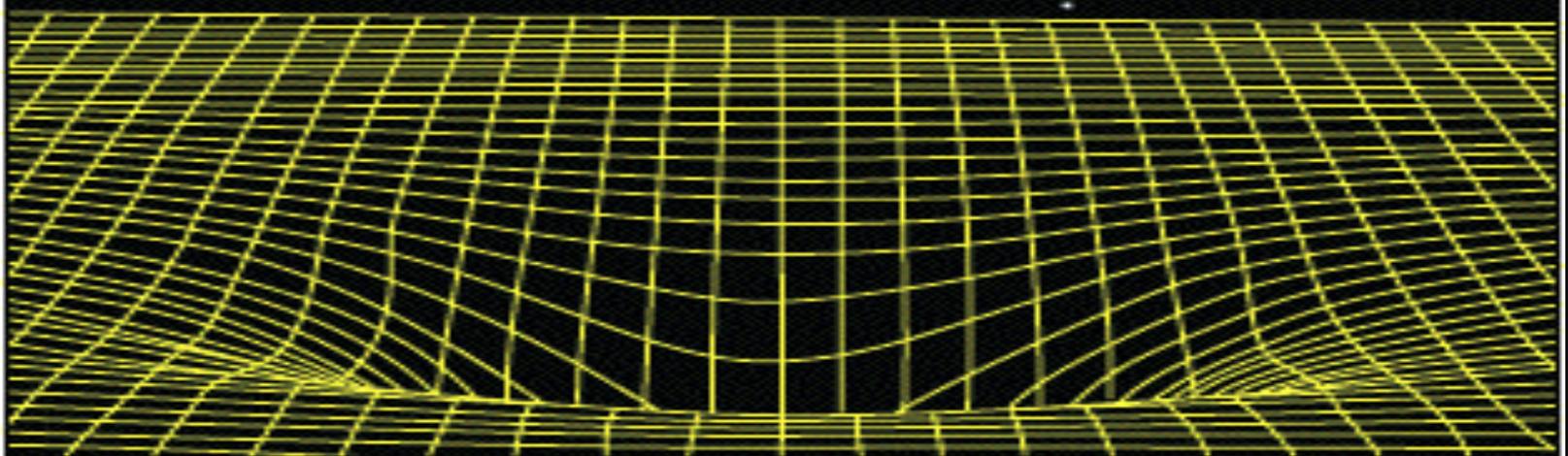
CHAQUE MASSE A UN RAYON DE COURBURE



Dans la théorie Newtonienne  
Les masses sont des objets ponctuels  
qui s'attirent en eux

Dans la théorie d'Einstein

Les masses sont  
des courbures  
de l'espace



# Équations d'Einstein (1916)

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

Contenant  
géométrique

Contenu  
énergétique

L'énergie structure l'espace physique

**CONTENANT ET CONTENU SONT INTRINSÈQUEMENT LIÉS**

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

$$T^{\mu\nu} = \left(\rho + \frac{p}{c^2}\right)\frac{dx^\mu}{ds}\frac{dx^\nu}{ds} - \frac{p}{c^2}g^{\mu\nu}$$

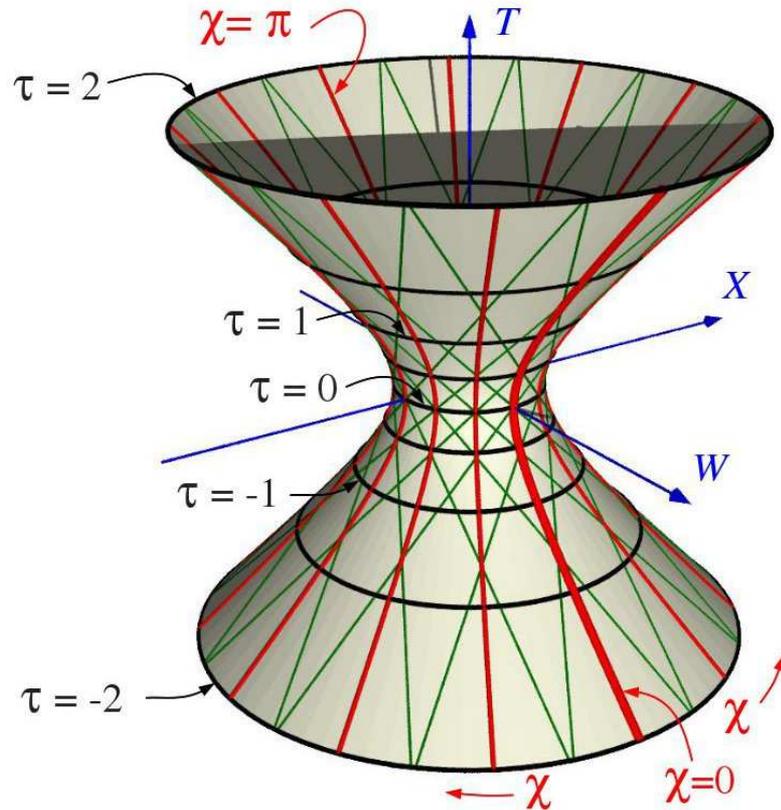
$$ds^2 = -e^{\lambda(r)}dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) + e^{\nu(r)}c^2dt^2$$

$$(1) \quad e^{-\lambda}\left(\frac{\nu'}{r} + \frac{1}{r^2}\right) - \frac{1}{r^2} + \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4}p$$

$$(2, 3) \quad e^{-\lambda}\left(\frac{\nu''}{2} + \frac{\nu'^2}{4} - \frac{\lambda'\nu'}{4} + \frac{\nu' - \lambda'}{2r}\right) + \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4}p$$

$$(4) \quad -e^{-\lambda}\left(\frac{\lambda'}{r} - \frac{1}{r^2}\right) - \frac{1}{r^2} + \Lambda = -\frac{8\pi G}{c^2}\rho$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W = \frac{1}{\cosh(b\tau_0)} \{ [\cos \chi_0 \sinh(b\tau_0) \mp \sin \chi_0] T + b^{-1} [\cos \chi_0 \pm \sin \chi_0 \sinh(b\tau_0)] \} \\ X = \frac{\sin \theta \cos \varphi}{\cosh(b\tau_0)} \{ [\sin \chi_0 \sinh(b\tau_0) \pm \cos \chi_0] T + b^{-1} [\sin \chi_0 \mp \cos \chi_0 \sinh(b\tau_0)] \} \\ Y = \frac{\sin \theta \sin \varphi}{\cosh(b\tau_0)} \{ [\sin \chi_0 \sinh(b\tau_0) \pm \cos \chi_0] T + b^{-1} [\sin \chi_0 \mp \cos \chi_0 \sinh(b\tau_0)] \} \\ Z = \frac{\cos \theta}{\cosh(b\tau_0)} \{ [\sin \chi_0 \sinh(b\tau_0) \pm \cos \chi_0] T + b^{-1} [\sin \chi_0 \mp \cos \chi_0 \sinh(b\tau_0)] \} \end{array} \right.$$



Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie.

A. Prinzipielle Erwägungen zum Postulat der Relativität.

§1. Die spezielle Relativitätstheorie.

Die von Nachfolgenden dargelegte Theorie bildet die denkbar weitgehendste Verallgemeinerung der heute allgemein als Relativitätstheorie "begrifflichen Theorie, die sich im folgenden, "speziell Relativitätstheorie" und setze sie als bekannt voraus. Diese Verallgemeinerung wurde sehr erleichtert durch die Gestalt, welche der speziellen Relativitätstheorie durch Minkowski gegeben wurde, welcher Mathematiker zuerst die formale Gleichwertigkeit der räumlichen und der Zeitkoordinate klar erkannte und für den Aufbau der Theorie nutzbar machte. Die für die allgemeine Relativitätstheorie nötigen mathematischen Hilfsmittel legen fastig bereit in dem "absoluten Differentialkalkül", welcher auf den Forschungen von Gauss, Riemann und Christoffel über nicht-euklidische Mannigfaltigkeiten ruht und von Ricci und Levi-Civita in ein System gebracht und bereits für auf Probleme der theoretischen Physik angewandt wurde. Ich habe im Abschnitt B der vorliegenden Abhandlung alle für uns nötigen, bei dem Physiker nicht als bekannt vorausgesetzten mathematischen Hilfsmittel entwickelt, sodass ein Studierender einfacher und durchsichtiger Weise entzwickelt, sodass ein Studierender mathematische Literatur für das Verständnis der vorliegenden Abhandlung nicht erforderlich ist. Einmal sei an dieser Stelle dankbar meinem Freunde, des Mathematikers Grossmann gedacht, der mir nicht nur durch seine Hilfe nicht nur das Studium der einschlägigen mathematischen Literatur ersparte, sondern mich auch beim Durchlesen nach den Feldgleichungen der Gravitation unterstützte.

A. Prinzipielle Erwägungen zum Postulat der Relativität.

§1. Die spezielle Relativitätstheorie.

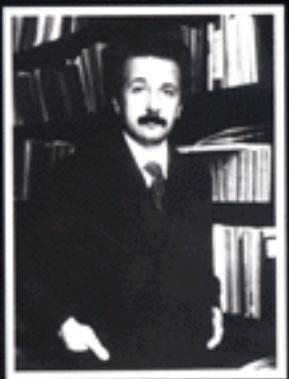
Das spezielle Relativitätstheorie Postulat liegt ~~unter~~ folgendes Postulat zugrunde, welches auch durch die Galilei-Newton'sche Mechanik George geleistet wird: Wird ein Koordinatensystem K so gewählt, dass in bezug auf dasselbe die physikalischen Gesetze in ihrer einfachsten Form gelten, so gelten dieselben Gesetze auch in bezug auf jedes andere Koordinatensystem K', das relativ zu K in gleichförmiger Translationsbewegung begriffen ist. Das Postulat nennen wir R<sub>0</sub>, spezielles Relativitätsprinzip. Durch das Wort "speziell" soll angedeutet werden, dass das Prinzip auf dem

THE COLLECTED PAPERS OF  
GESAMMELTE SCHRIFTEN

Albert Einstein

VOLUME/BAND 6

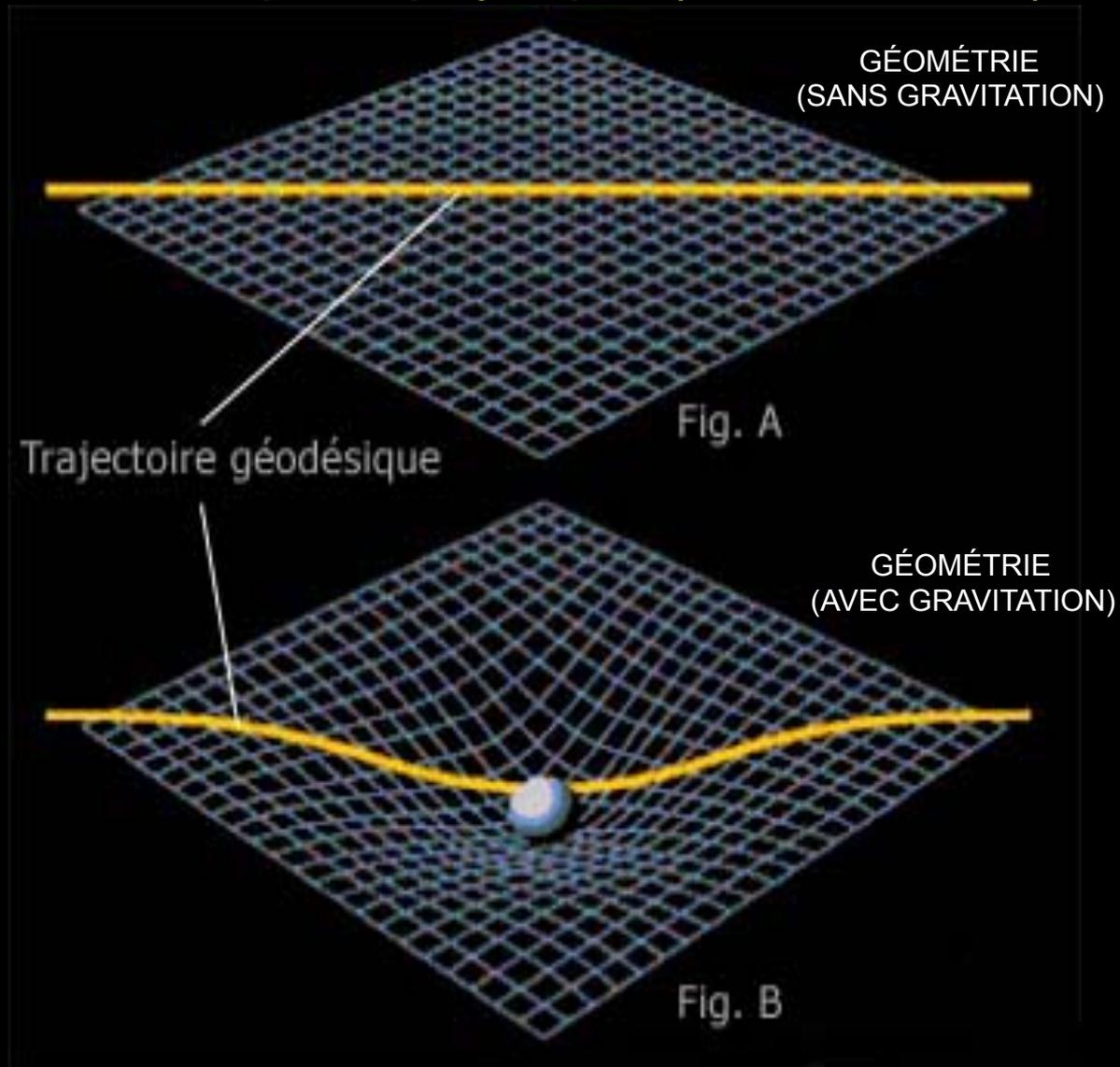
THE BERLIN YEARS / DIE BERLINER JAHRE:  
WRITINGS / SCHRIFTEN,  
1914-1917



A. J. Cox, Martin J. Klein, AND Robert Schulmann,  
EDITORS

Article fondateur de la relativité générale (1916)

# La gravitation est prise comme une déformation de l'espace physique (i.e. l'Univers)



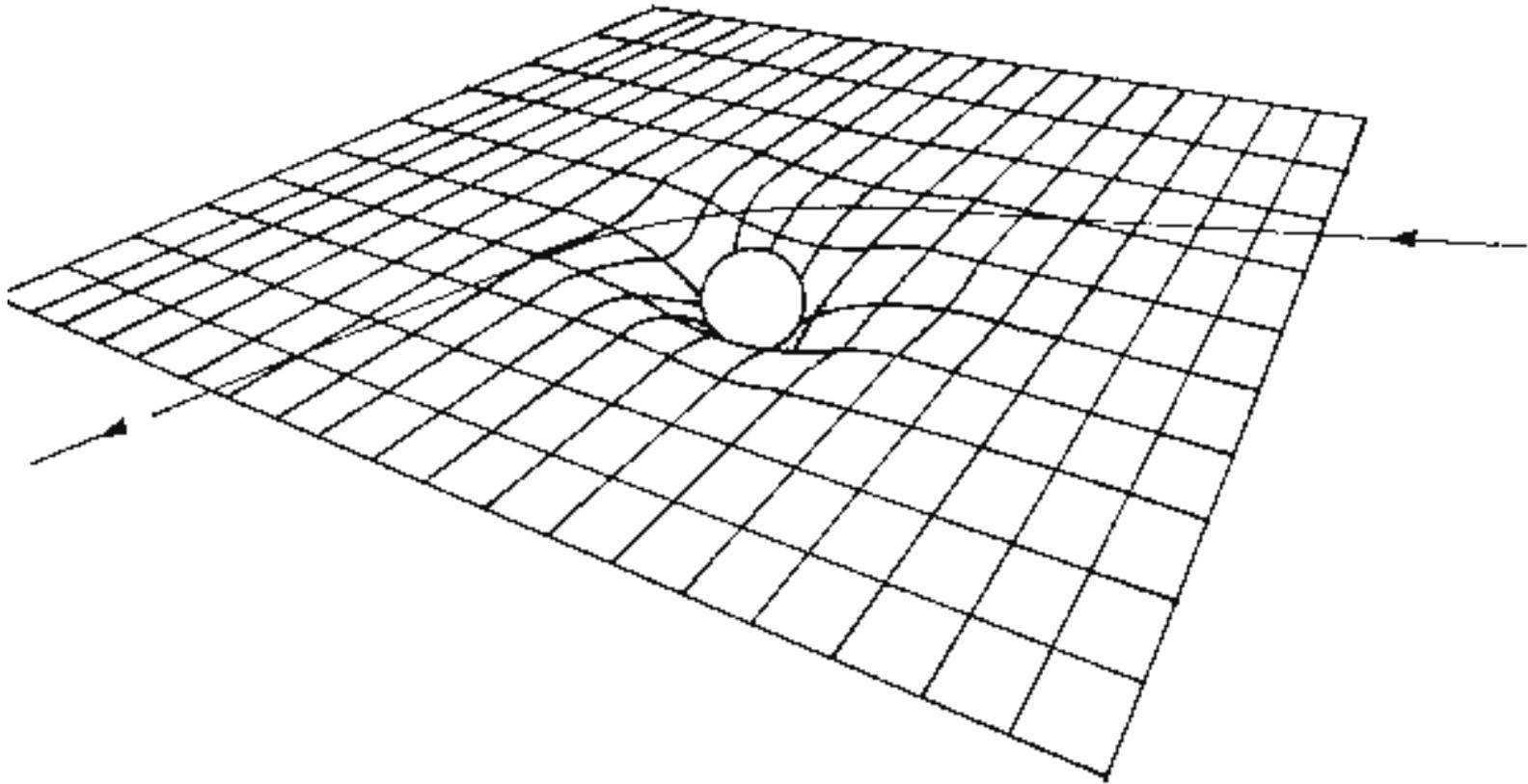


La Lune va...  
« en ligne droite autour de la Terre »

Comme les autres planètes  
autour du Soleil



# Conséquence: courbure de la lumière



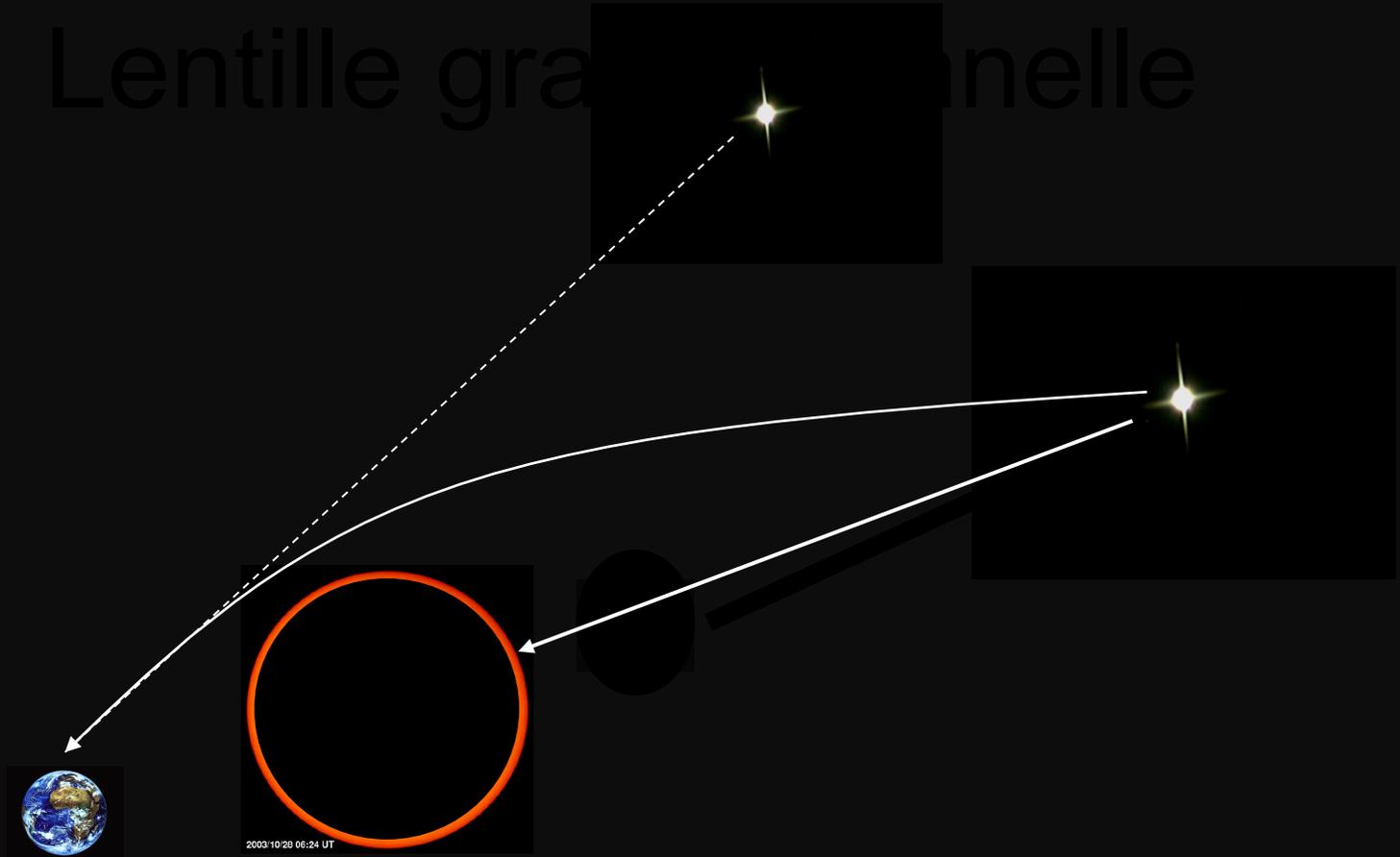
Une masse  
courbe  
l'espace environnant



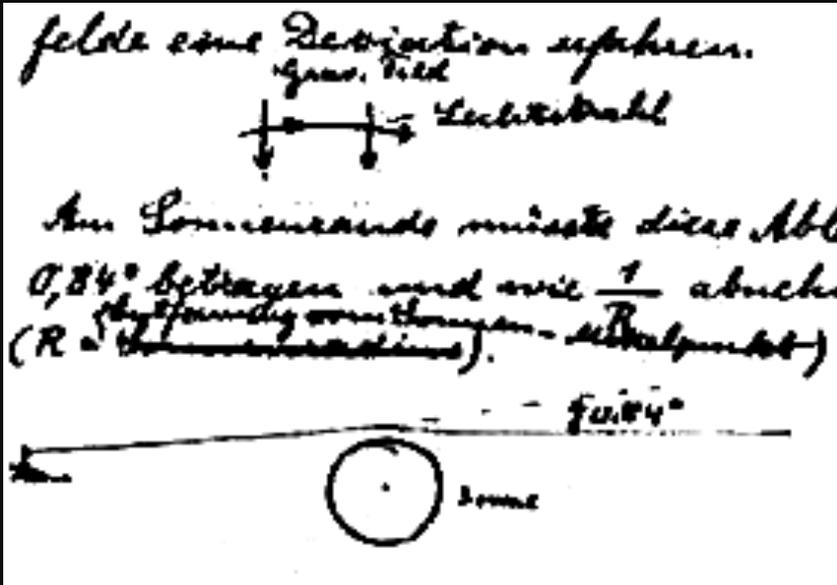
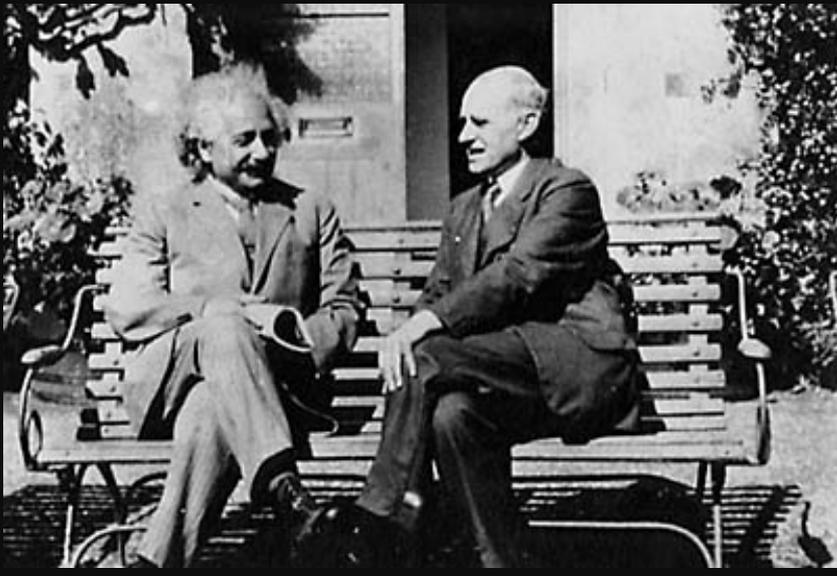
Courbure de la trajectoire  
d'un rayon lumineux

# DEVIATION DES RAYONS LUMINEUX

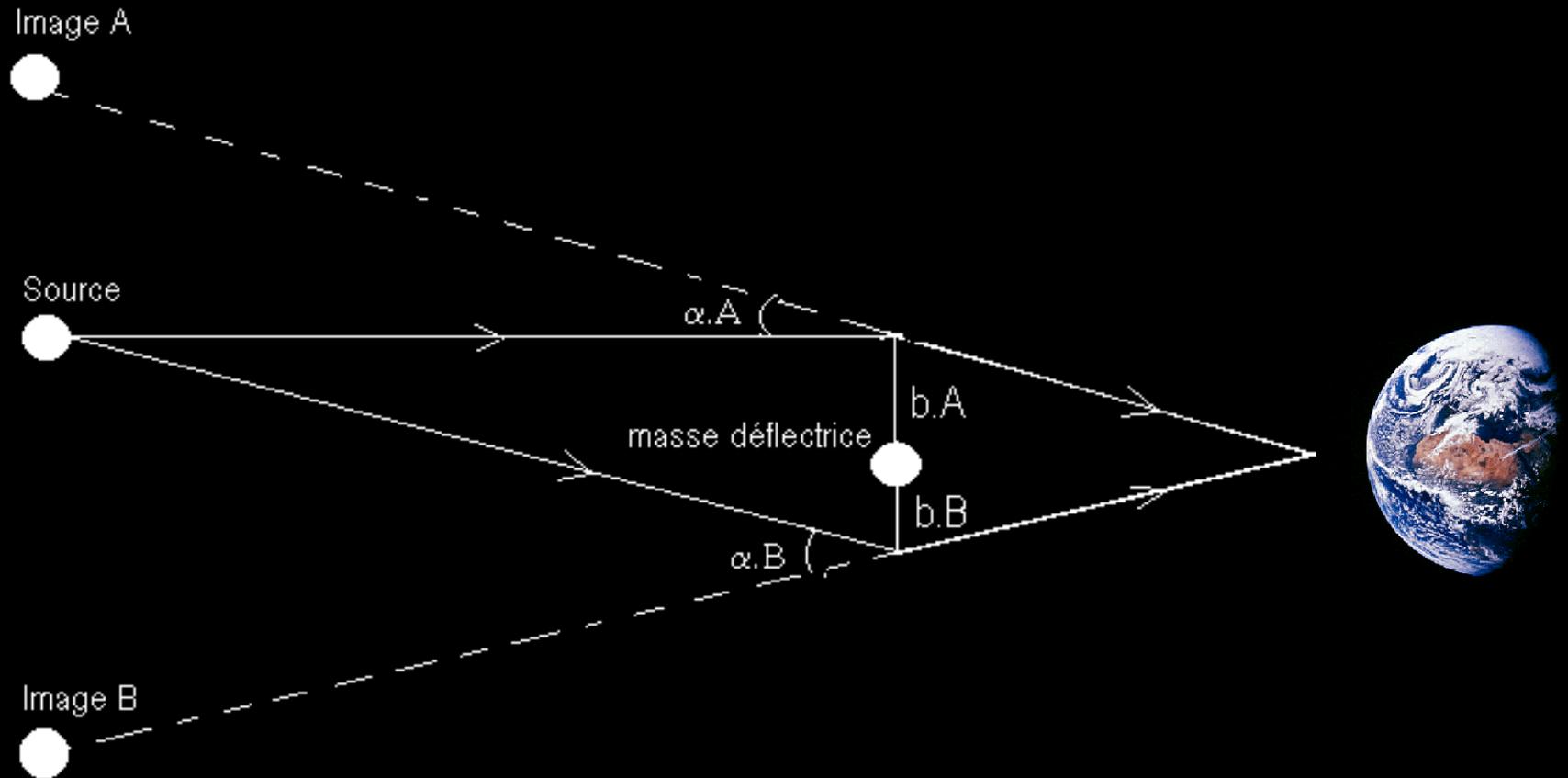
Lentille gravitationnelle



L' éclipse de 1919  
 observé par Arthur Eddington  
 va confirmer  
 la théorie d' Einstein

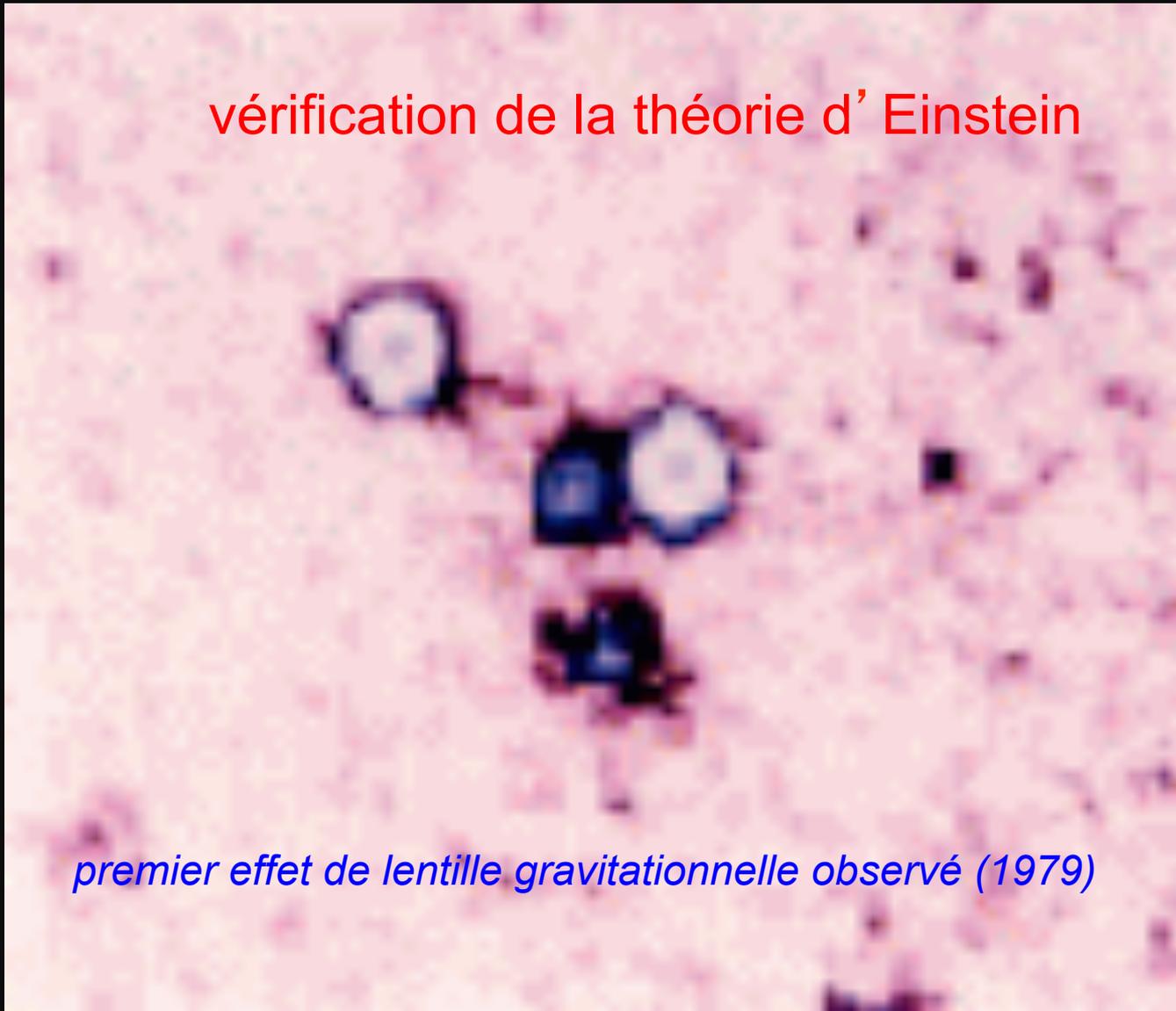


# Lentille gravitationnelle

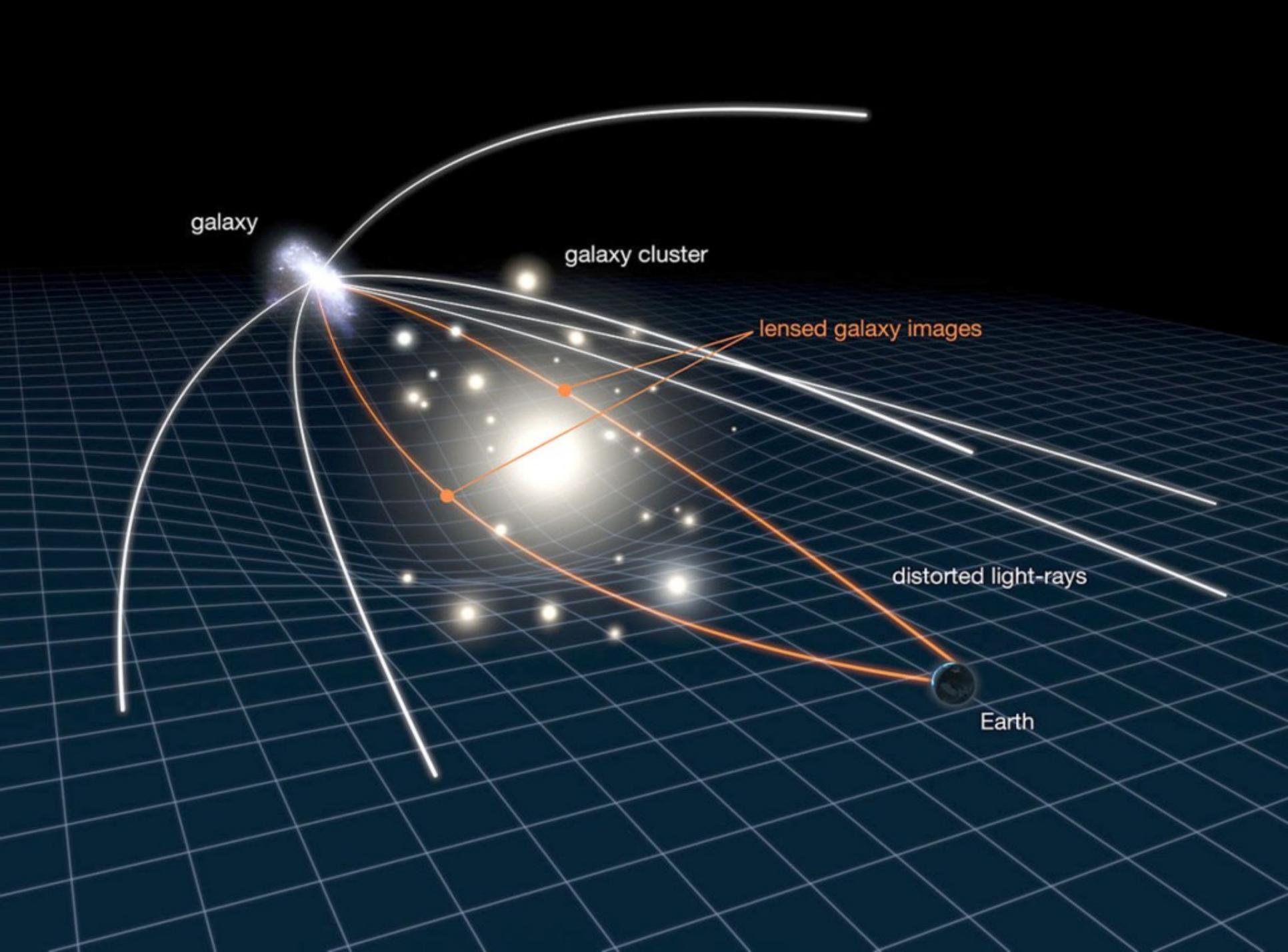


# Quasar 0957+561

vérification de la théorie d' Einstein



*premier effet de lentille gravitationnelle observé (1979)*



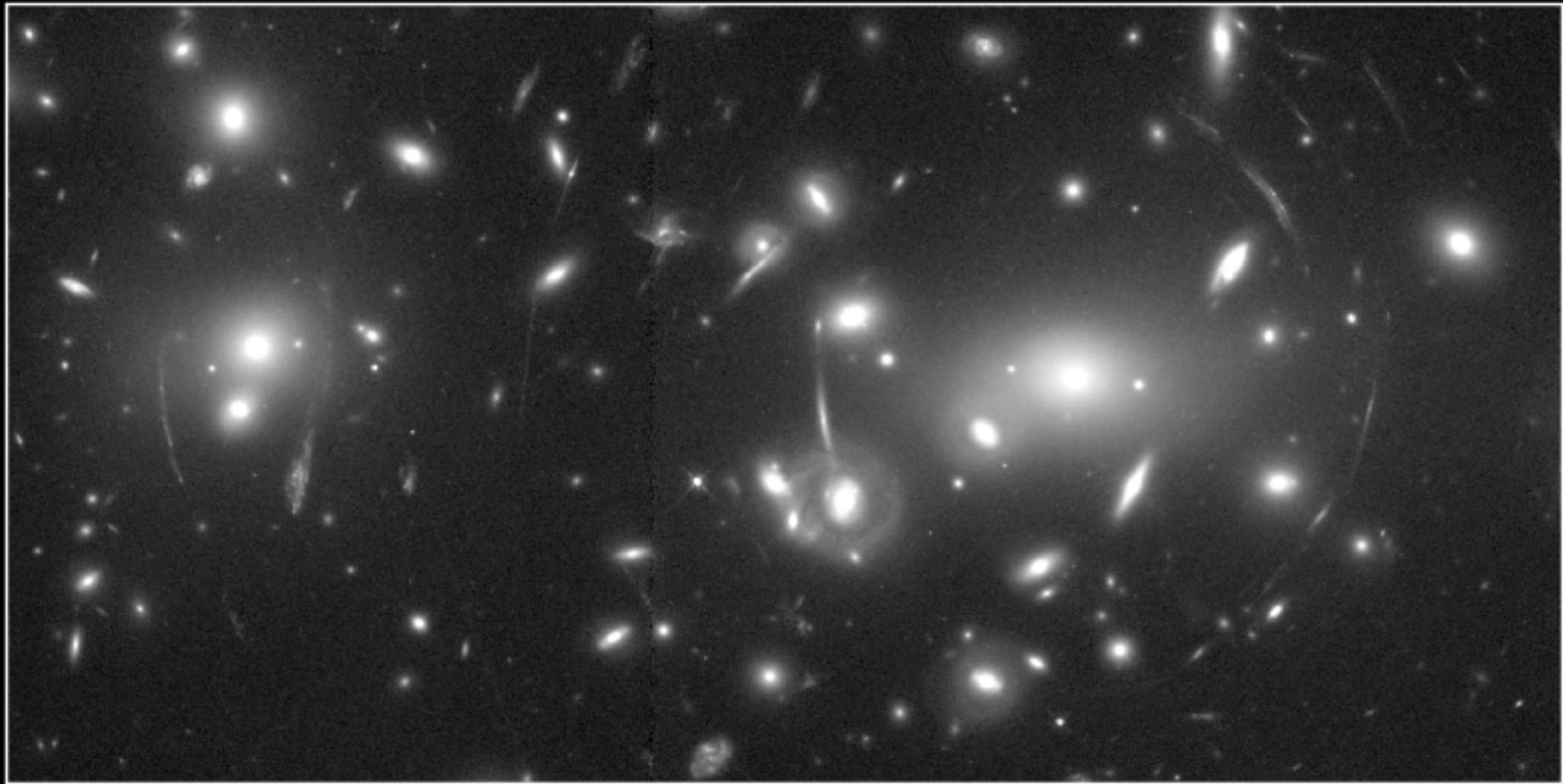
galaxy

galaxy cluster

lensed galaxy images

distorted light-rays

Earth

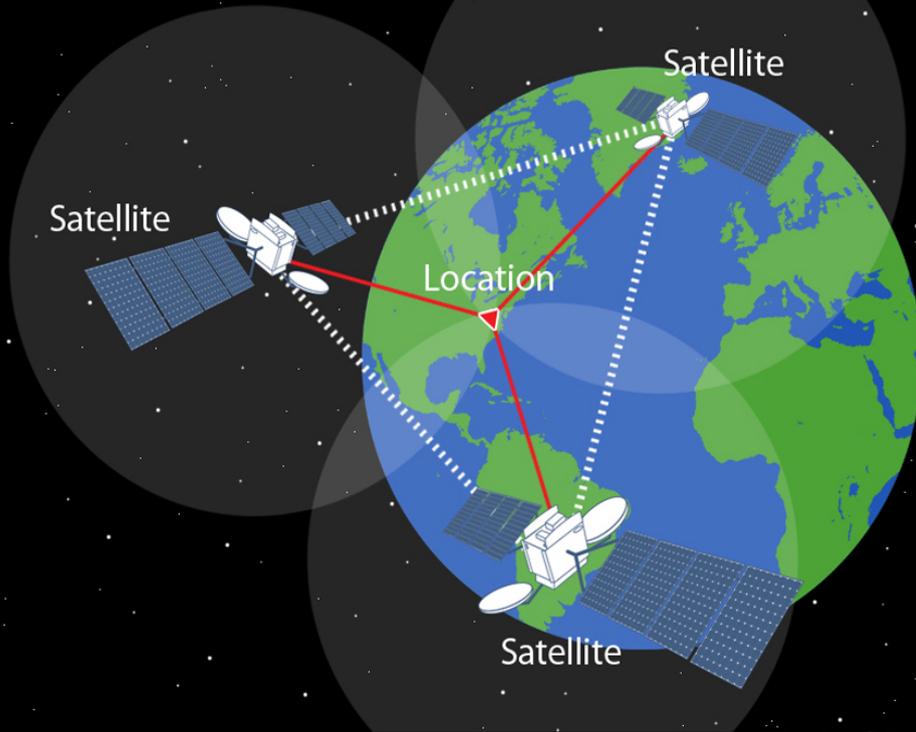


## Gravitational Lens in Abell 2218

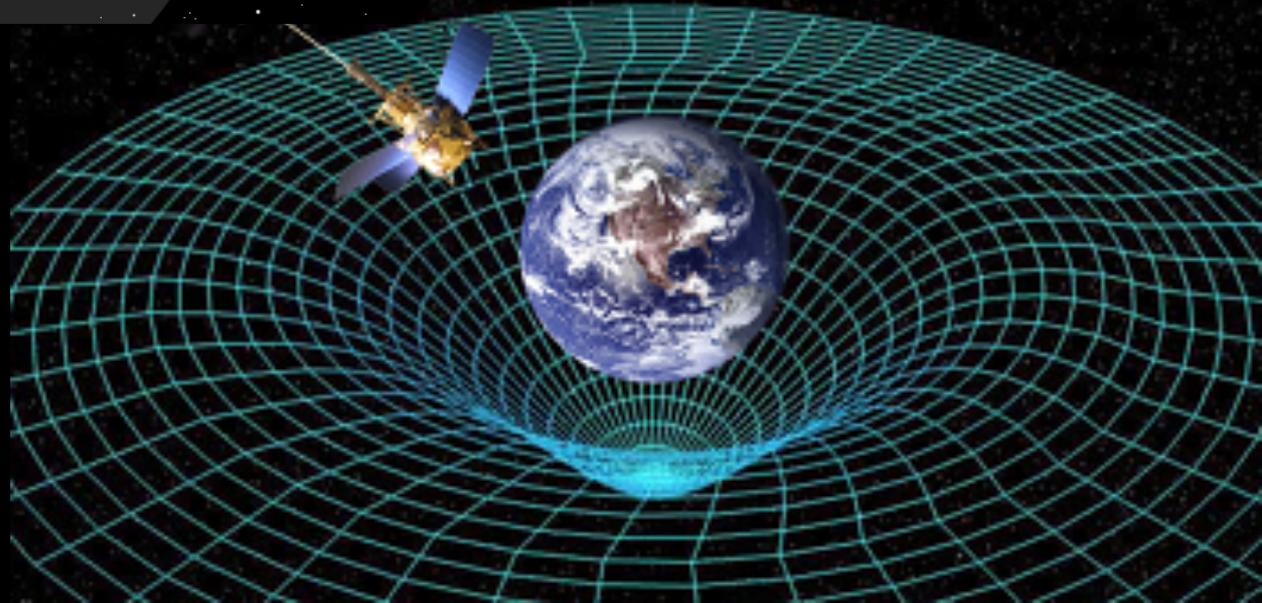
HST • WFPC2

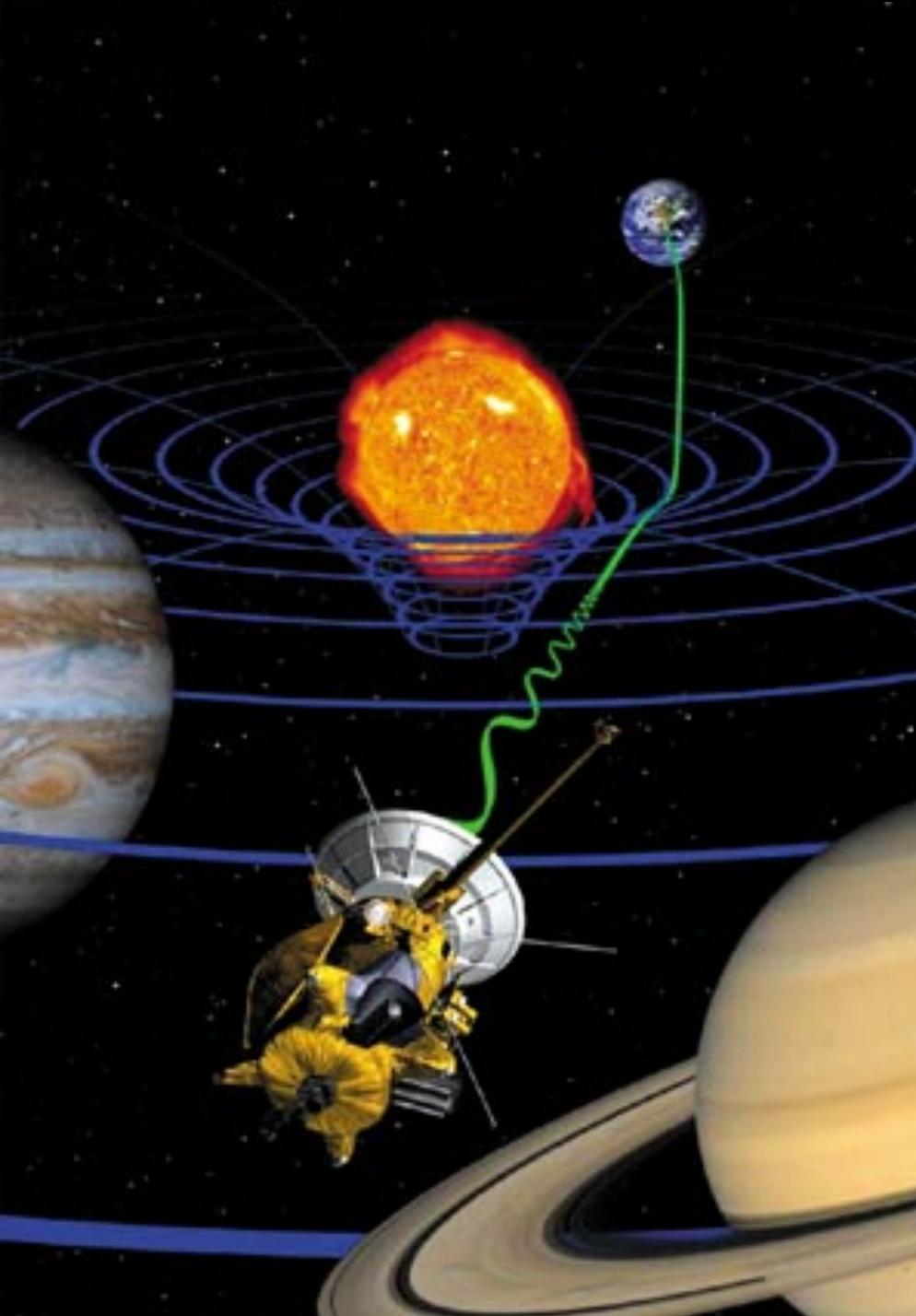
PF95-14 • ST ScI OPO • April 5, 1995 • W. Couch (UNSW), NASA

# Triangulation



Importance de  
prendre en compte  
les effets de courbure  
locale dans les  
localisations GPS





La mission Cassini  
(autour de Saturne)  
a bien mesuré  
les retards de communication  
entre la Terre et la sonde

Distorsions d'espace  
causé par le Soleil

# La théorie de la relativité restreinte et de la relativité générale sont les théories les mieux (et les plus) vérifiées de la Physique



Albert Einstein dans son bureau  
à l'Université de Princeton (Etats-Unis)

Mais ...

# Quelques questions bien sombres émergent ...



La matière sombre ...

L'énergie sombre ...

Les trous noirs ...

L'Histoire ... future de l'Univers

L'Unification de la Physique ....

À une prochaine fois ... « We'll be back .. »

# Quelques réclames



INTERNATIONAL  
YEAR OF LIGHT  
2015

*A. Einstein*

2016 Centenaire de la Relativité Générale