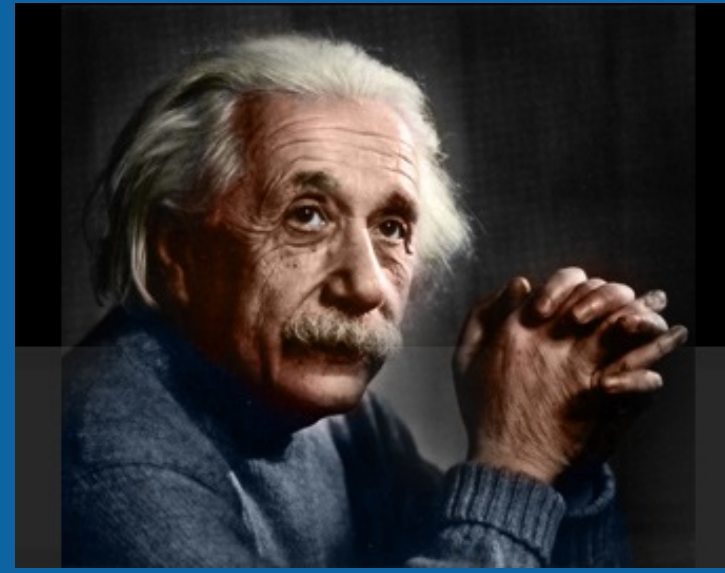
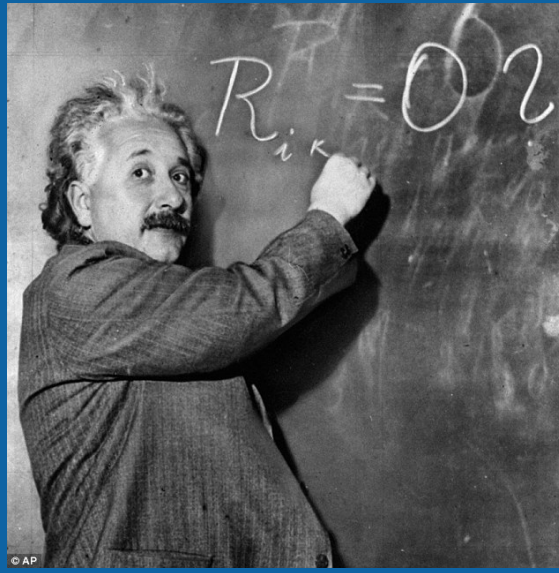


La Relativité Générale aujourd'hui, demain et après-demain

Thibault Damour
IHES

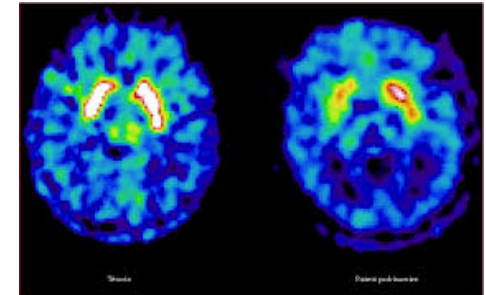


BNF, Cycle de conférences Einstein, 8 décembre 2015

EINSTEIN et LA VIE QUOTIDIENNE



- **LASER** (Einstein 1917 : « principe du laser ») :
CD, DVD, chirurgie, industrie, ...
- **EFFET PHOTOÉLECTRIQUE** (Einstein 1905, loi de l'effet photo électrique) :
Portes automatiques, ...
- **TOMOGRAPHIE PAR ÉMISSION DE POSITRONS** :
 $e^+ + e^- \rightarrow 2 \gamma$, $E = mc^2$ (Einstein 1905)
- **GPS** : Relativité Restreinte : - 5 ns/minute, cad - 1.5 m/mn
Relativité Générale : 32 ns/minute, cad + 10 m/mn
(Einstein 1915)



- **électrons dans les tubes cathodiques TV** :
 $v \sim 1/3 c$ (Relativité Restreinte - Einstein 1905)
- **TECHNOLOGIE QUANTIQUE OMNIPRÉSENTE** :



Contribution fondamentales d'Einstein à la physique quantique .

1905, 1906, 1909, 1911, 1917, 1935 (cf Max Born : « Même si Einstein ... »).

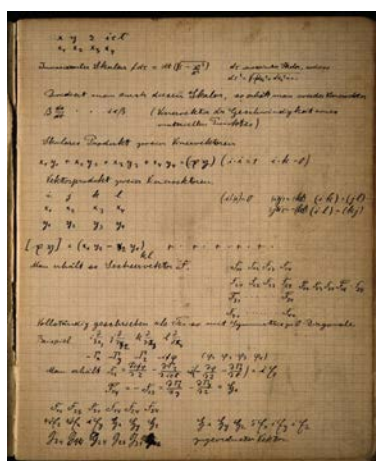
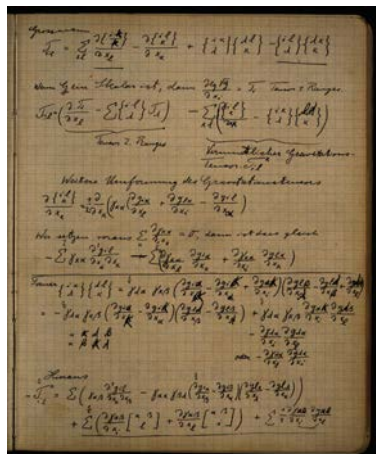
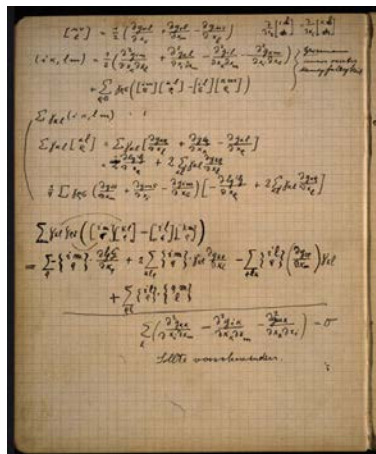
En particulier : Einstein Podolsky Rosen → **intrication quantique** → sera peut être à la base de nombreuses nouvelles applications de la physique quantique

.....

Fabrication du fromage : Mouvement Brownien de particules colloïdales
(Einstein 1905)

Impossible d'afficher l'image. Votre ordinateur manque peut-être de mémoire pour ouvrir l'image ou l'image est endommagée. Redémarrez l'ordinateur, puis ouvrez à nouveau le fichier. Si le message rouge est toujours affiché, vous devrez peut-être supprimer l'image avant de la réinsérer.

Novembre 1915



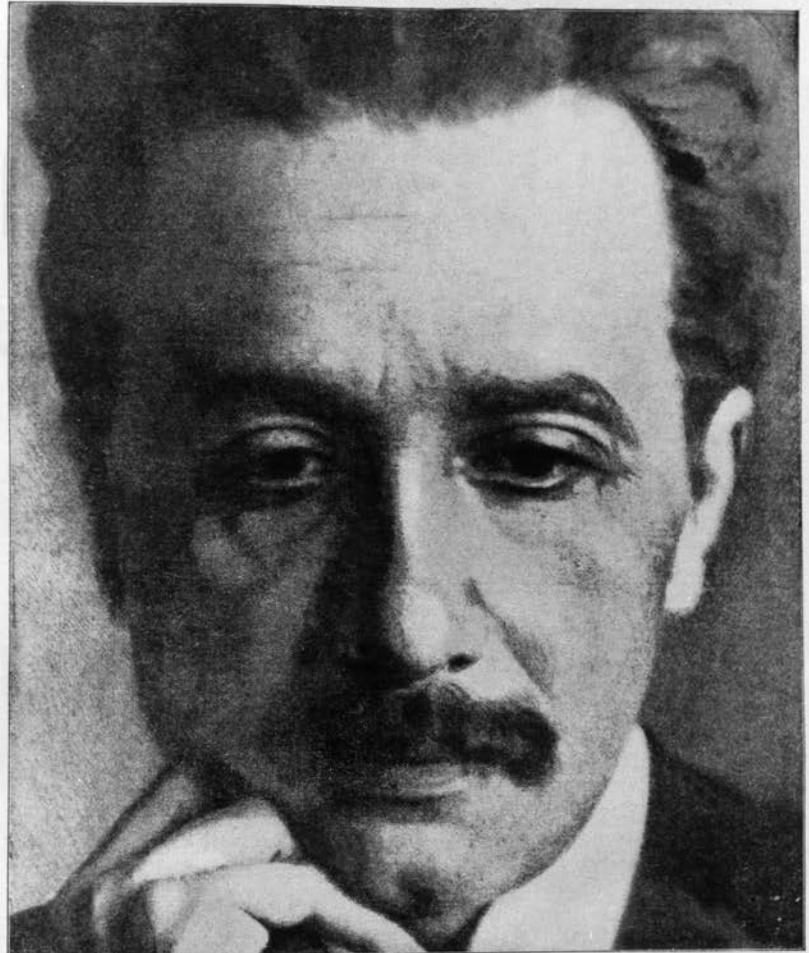
14. Dezember
1915
Nr. 50
28. Jahrgang

Berliner

Einzelpreis
des Heftes
25 Pfg.

Illustrierte Zeitung

Verlag Ullstein & Co, Berlin SW 68



Eine neue Größe der Weltgeschichte: Albert Einstein, dessen Forschungen eine völlige Umwälzung unserer Naturbetrachtung bedeuten und den Erkenntnissen eines Kopernikus, Kepler und Newton gleichwertig sind.

844 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 25. November 1915

Die Feldgleichungen der Gravitation.

VON A. EINSTEIN.

In zwei vor kurzem erschienenen Mitteilungen¹ habe ich gezeigt, wie man zu Feldgleichungen der Gravitation gelangen kann, die dem Postulat allgemeiner Relativität entsprechen, d. h. die in ihrer allgemeinen Fassung beliebigen Substitutionen der Raumzeitvariablen gegenüber kovariant sind.

Der Entwicklungsgang war dabei folgender. Zunächst fand ich Gleichungen, welche die NEWTONSCHE Theorie als Näherung enthalten und beliebigen Substitutionen von der Determinante 1 gegenüber kovariant waren. Hierauf fand ich, daß diesen Gleichungen allgemein kovariante entsprechen, falls der Skalar des Energietensors der Materie verschwindet. Das Koordinatensystem war dann nach der einfachen Regel zu spezialisieren, daß $\sqrt{-g}$ zu 1 gemacht wird, wodurch die Gleichungen der Theorie eine eminente Vereinfachung erfahren. Dabei mußte aber, wie erwähnt, die Hypothese eingeführt werden, daß der Skalar des Energietensors der Materie verschwinde.

Neuerdings finde ich nun, daß man ohne Hypothese über den Energietensor der Materie auskommen kann, wenn man den Energietensor der Materie in etwas anderer Weise in die Feldgleichungen einsetzt, als dies in meinen beiden früheren Mitteilungen geschehen ist. Die Feldgleichungen für das Vakuum, auf welche ich die Erklärung der Perihelbewegung des Merkur gegründet habe, bleiben von dieser Modifikation unberührt. Ich gebe hier nochmals die ganze Betrachtung, damit der Leser nicht genötigt ist, die früheren Mitteilungen unausgesetzt heranzuziehen.

Aus der bekannten RIEMANNSCHEM Kovariante vierten Ranges leitet man folgende Kovariante zweiten Ranges ab:

$$G_{im} = R_{im} + S_{im} \quad (1)$$

$$R_{im} = -\sum_l \frac{\partial \{im\}}{\partial x_l} + \sum_l \{il\} \{mp\} \quad (1a)$$

$$S_{im} = \sum_l \frac{\partial \{il\}}{\partial x_m} - \sum_l \{im\} \{pl\} \quad (1b)$$

¹ Sitzungsber. XLIV, S. 778 und XLV, S. 790, 1915.

ESPACE

TEMPS

MATIÈRE

FORCE

- DONNÉ A PRIORI

- GÉOMÉTRIE EUCLIDIENNE

- 3 DIMENSIONS

- REPOS ABSOLU

- DONNÉ A PRIORI

- CHRONOMÉTRIE EUCLIDIENNE

- 1 DIMENSION

- PASSÉ/PRESENT/FUTUR

- MASSE

- PERMANENCE

- 'ATOMES'

- PARTICULES ÉLÉMENTAIRES
l, q

- GRAVITATION

- ÉLECTROMAGNÉTISME

CHAMP

- INTERACTION 'FORTE'

- INTERACTION 'FAIBLE'

ESPACE

TEMPS

MATIÈRE

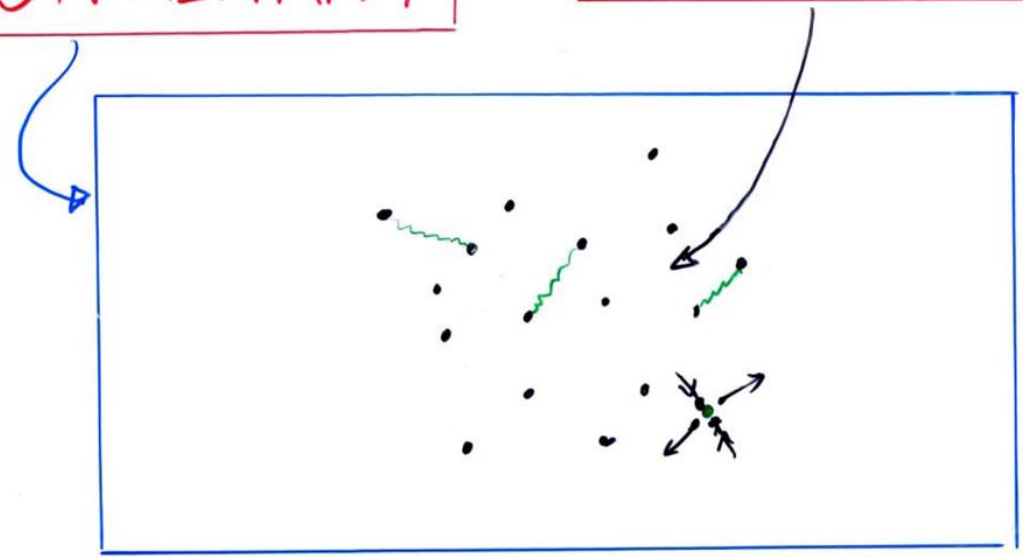
FORCE

CADRES D'EXISTENCE
DE LA RÉALITÉ :

'ACTEURS' DE LA RÉALITÉ

CONTENANT

CONTENU



ESPACE

TEMPS

MATIÈRE

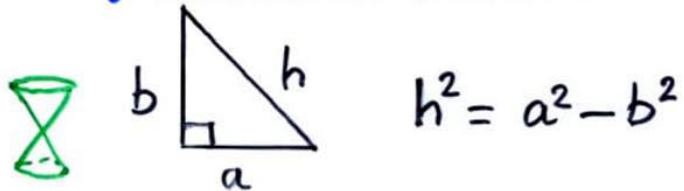
FORCE

ESPACE-TEMPS

$$E = M c^2$$

- DONNÉ A PRIORI
(RELATIVITÉ RESTREINTE)

- GÉOMÉTRIE PSEUDO-EUCLIDIENNE



- QUATRE DIMENSIONS

RELATIVITÉ RESTREINTE

1905



$$E = M c^2$$

ENERGIE

~

TRAVAIL

~

FORCE

MASSE

~

QUANTITE' DE MATIERE

~

SUBSTANCE PERENNE
(LA VOISIER)

EINSTEIN :

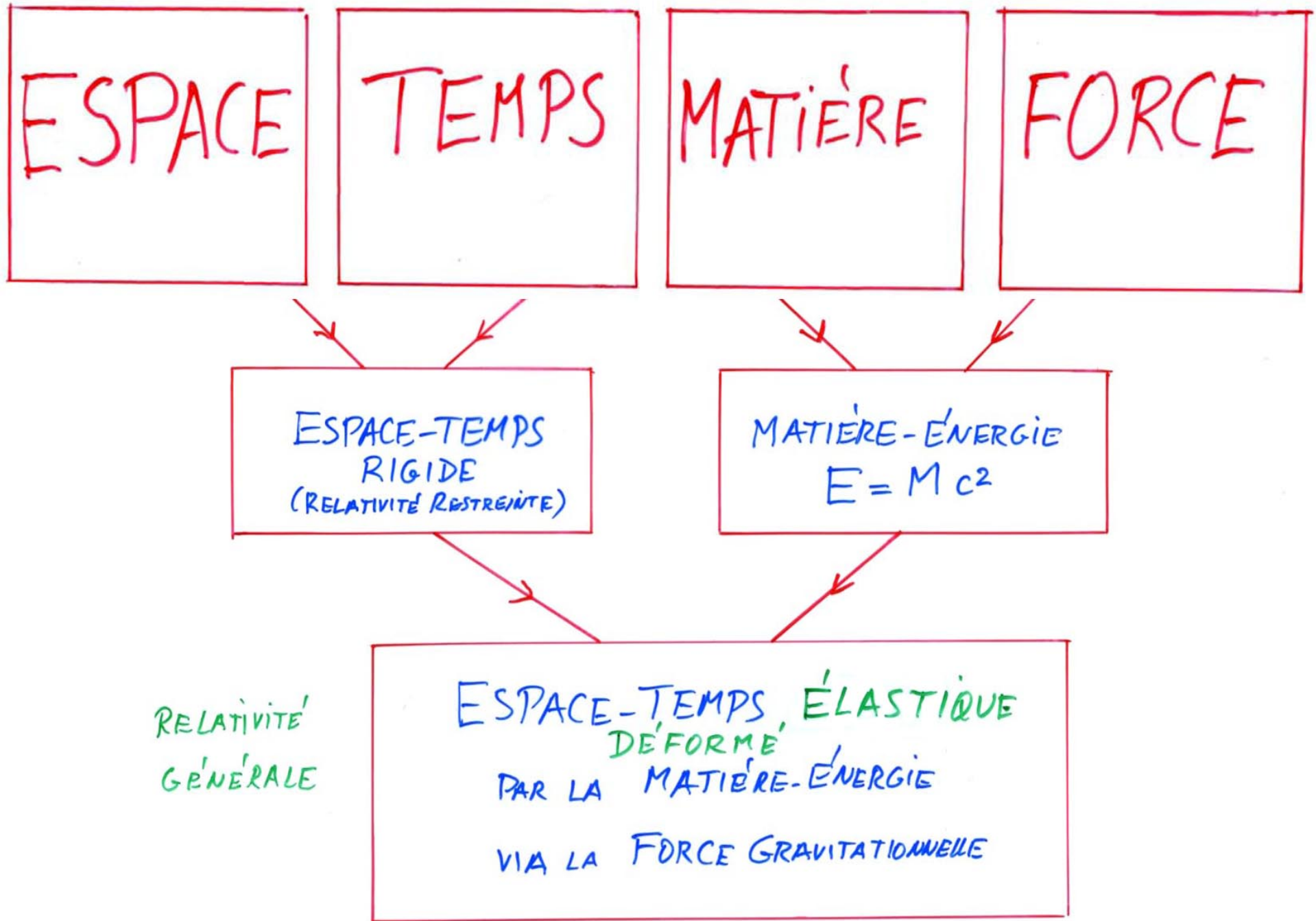
LA MATIERE EST EPHEMERE

MATIERE



RAYONNEMENT





ESPACE

TEMPS

MATIERE

FORCE

ESPACE-TEMPS
RIGIDE
(RELATIVITE RESTREINTE)

MATIERE-ENERGIE
 $E = M C^2$

RELATIVITE
GENERALE

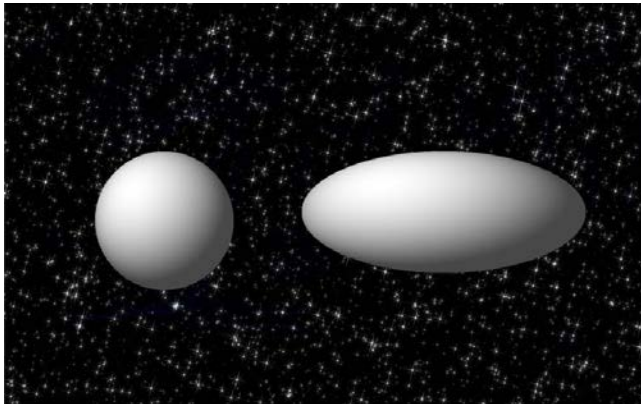
ESPACE-TEMPS ELASTIQUE
DEFORME
PAR LA MATIERE-ENERGIE
VIA LA FORCE GRAVITATIONNELLE

Concepts Fondateurs de la Relativité Générale

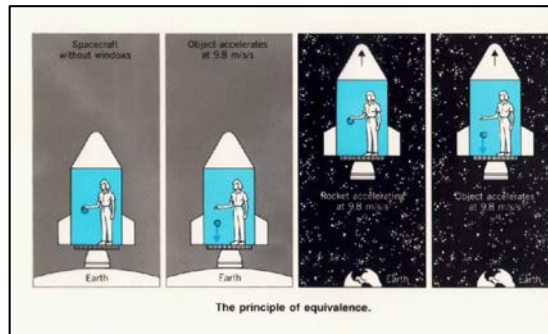
? Origine physique
des propriétés inertielles
de l'espace

Principe d'Equivalence
1907

Equivalences
Masse-Energie-Inertie



$$E = mc^2$$

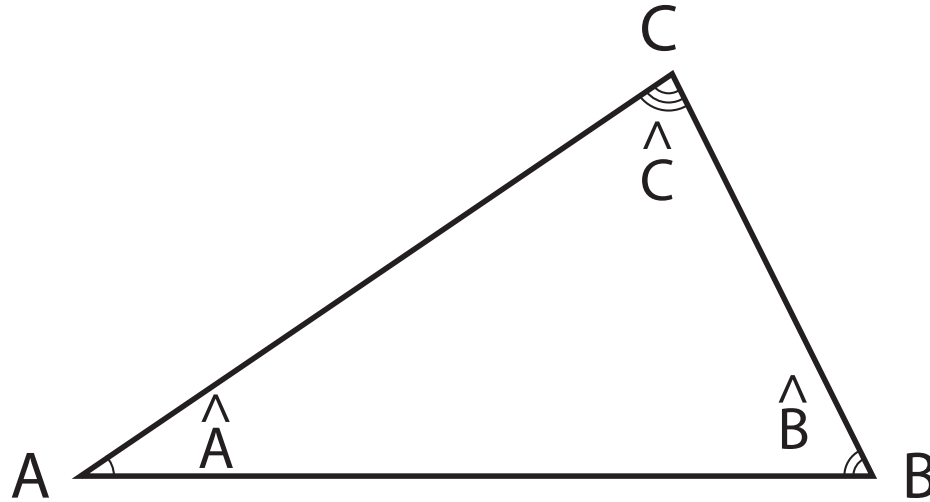


$$m = m_i = m_g$$

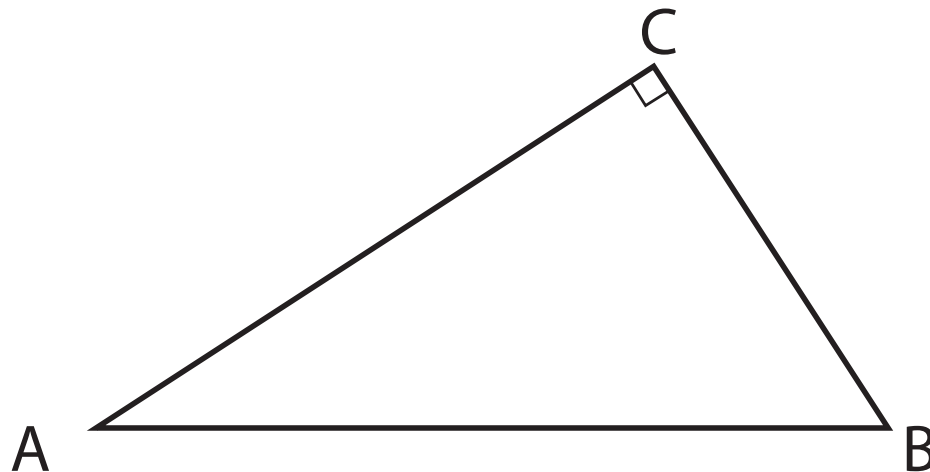
Isaac Newton

Ernest Mach

Espace « plat » (Euclide)



$$\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} = 2 \text{ droits} = \pi$$

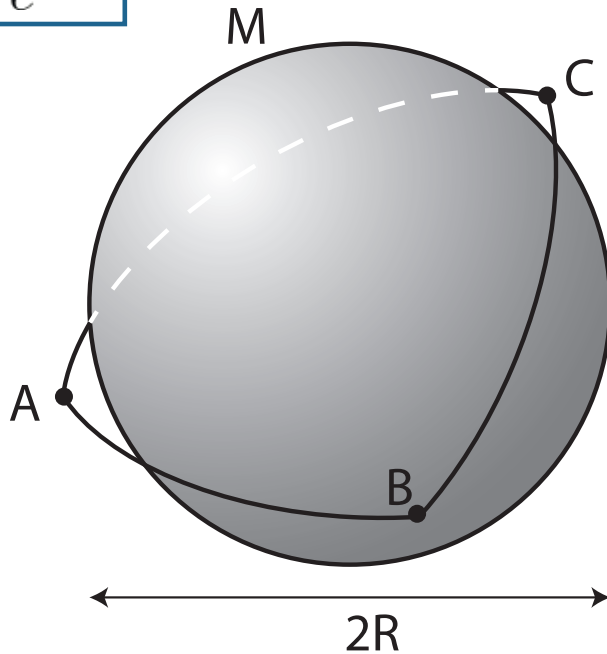


$$AB^2 = AC^2 + CB^2$$

Einstein : espace élastique, déformé par la matière-énergie

Planète, étoile, étoile morte...

$$R_g \equiv \frac{2GM}{c^2}$$



Facteur d'agrandissement des angles

$$\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} \simeq \pi \left(1 + \frac{R_g}{R} \right)$$

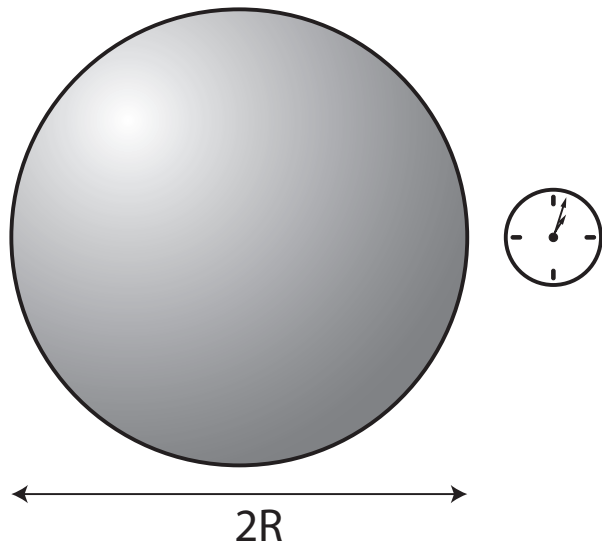
Terre : $1 + \frac{1 \text{ cm}}{6\,400 \text{ km}} \simeq 1.000\,000\,001 \simeq 1 + 10^{-9}$

Soleil : $1 + \frac{3 \text{ km}}{700\,000 \text{ km}} \simeq 1 + 10^{-6}$

Etoile à neutrons : $1 + \frac{4 \text{ km}}{10 \text{ km}} \simeq 1.4$ 40 %

Trou noir : $\simeq 1 + 1$ 100 %

Einstein : temps élastique, déformé par la matière-énergie



Facteur de ralentissement du temps

$$T_{\text{surface}} = \sqrt{1 - \frac{R_g}{R}} \quad T_{\text{loin}} \quad \text{clock icon}$$

Terre : $\simeq 1 - 10^{-9}$

Soleil: $\simeq 1 - 10^{-6}$

Etoile à neutrons: $\simeq \sqrt{1 - 0.4} = 0.77$ - 23 %

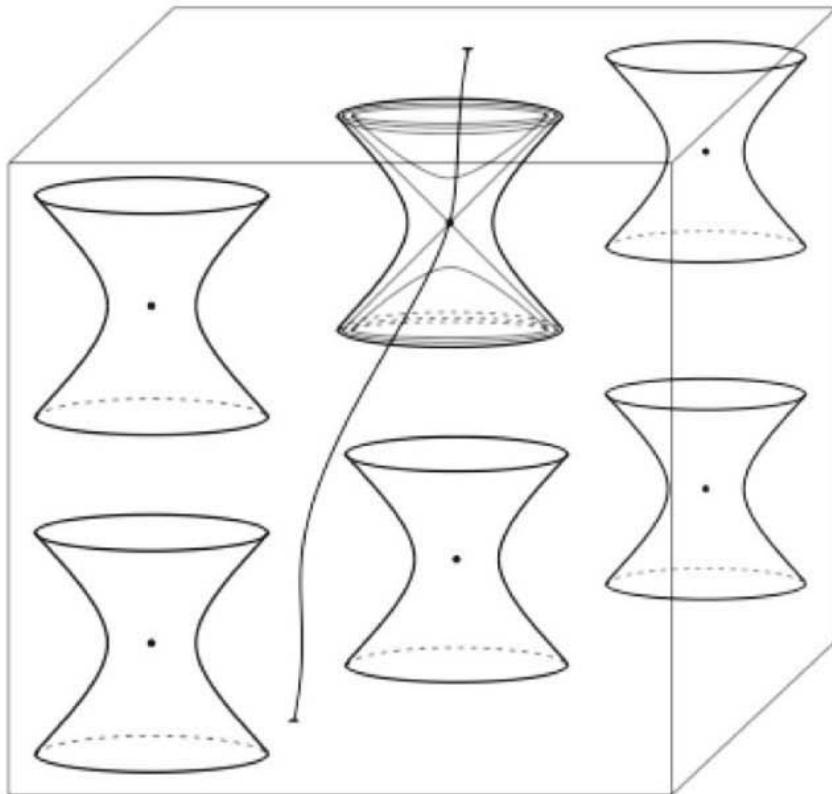
Trou noir : $= \sqrt{1 - 1} = 0$ - 100 %

Le camembert du temps et de l'espace (Dali)

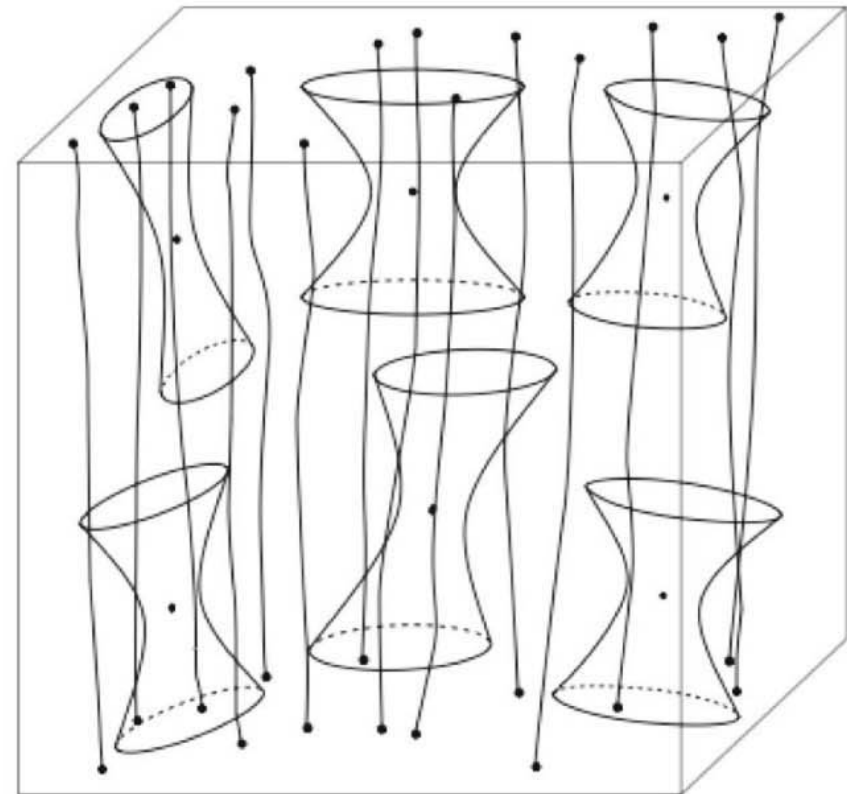


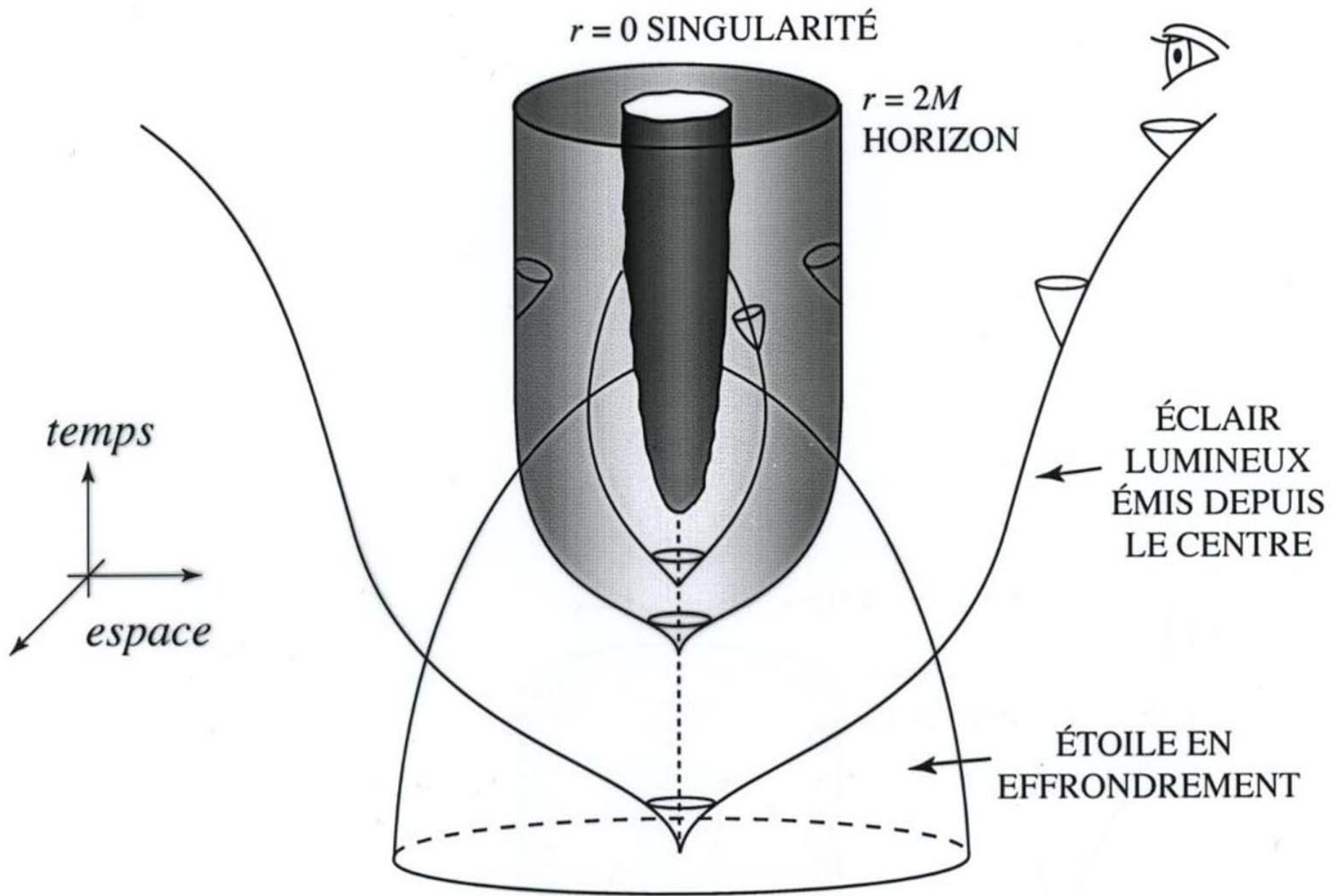
Espace-Temps élastique de la Relativité Générale

Relativité restreinte



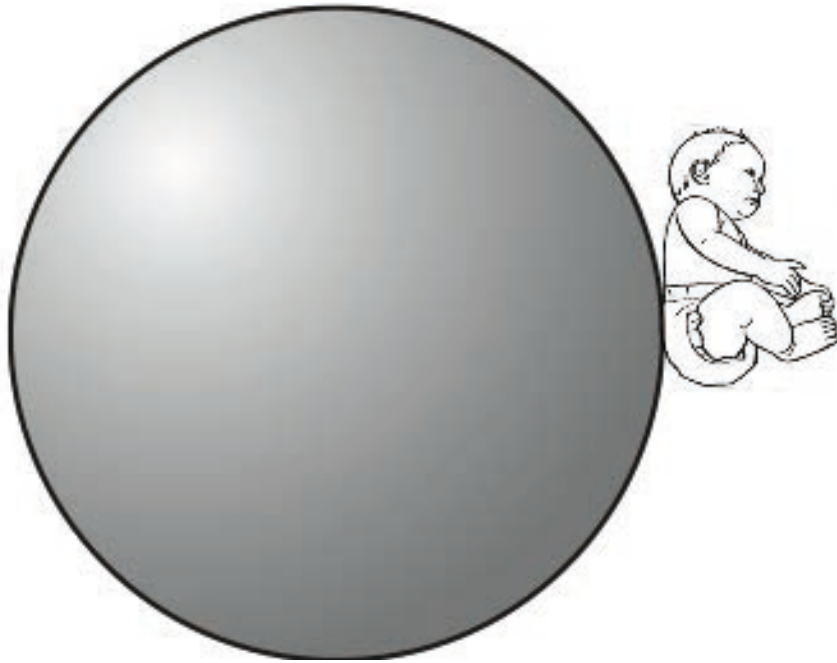
Relativité générale





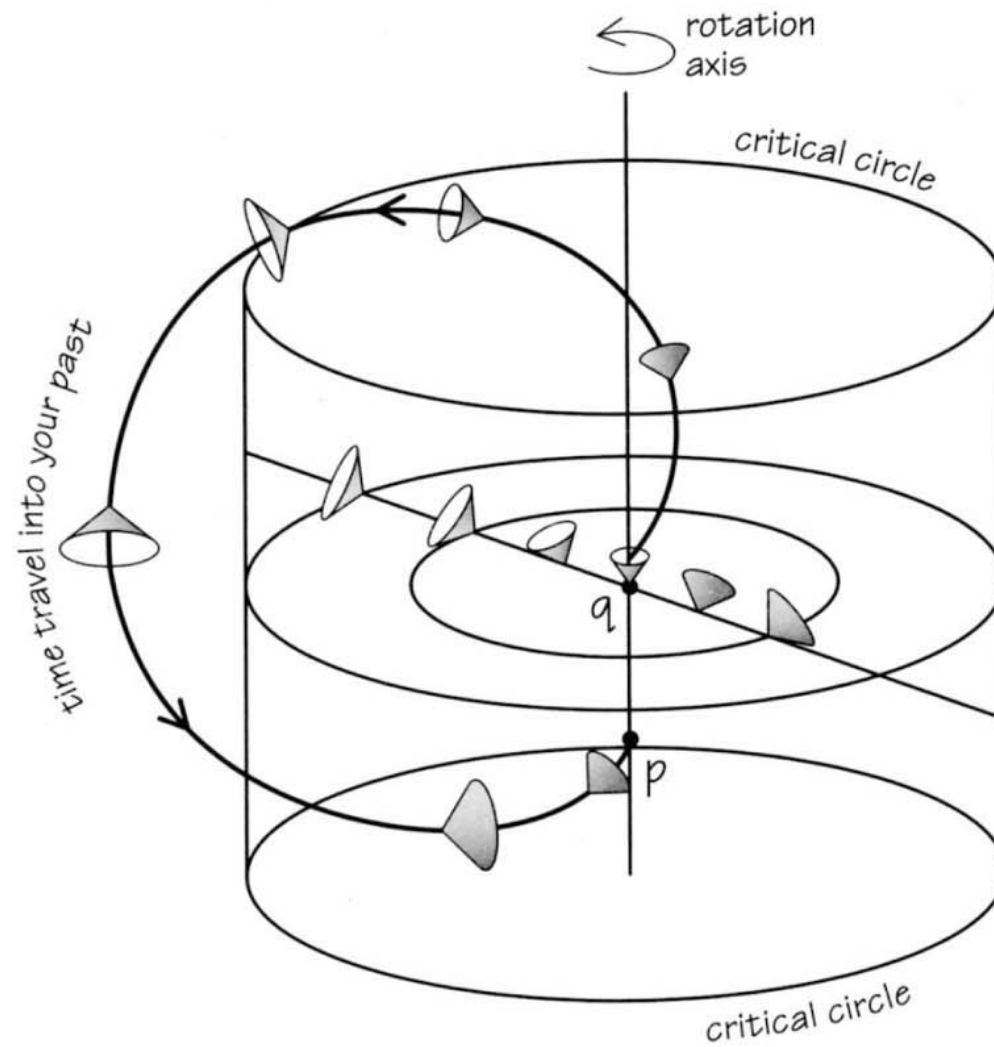
Jumeaux et trou noir

Temps gelé à la surface du trou noir



Temps et Relativité Générale

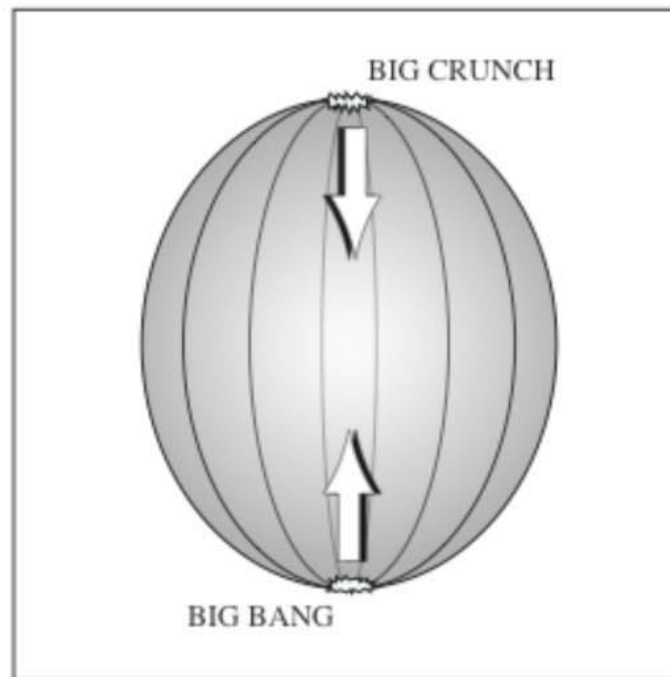
Univers de Gödel (1949)



Temps et Relativité Générale

Univers de Gold (1962)

Un cosmos possible où le temps ne « s'écoule » pas partout dans le même sens



Cosmologie primordiale et la deuxième loi

Paradigme de l'inflation chaotique (et éternelle)

Paradigme de l'inflation chaotique (et éternelle)

Linde (1983, 1986); Vilenkin (1983); ...

$$\mathcal{L} = \mathcal{R} - \frac{1}{2} (\partial\varphi)^2 - \frac{1}{2} m^2 \varphi^2$$

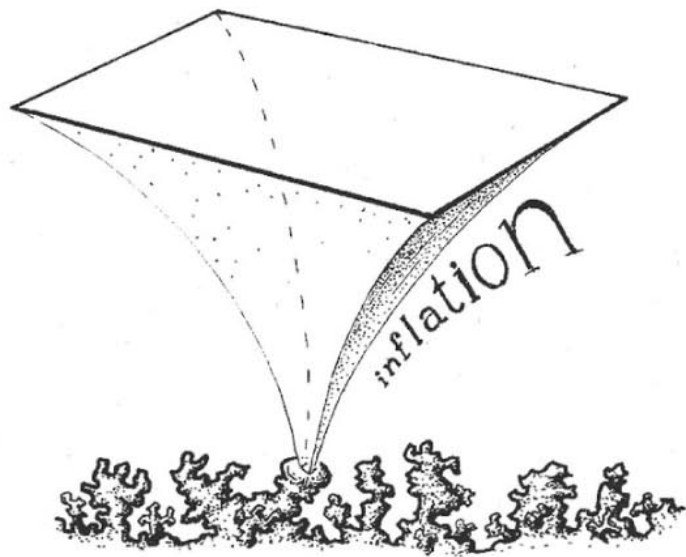
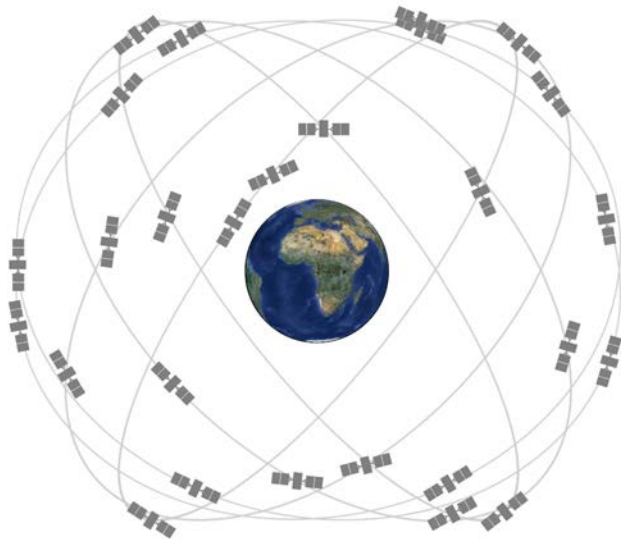


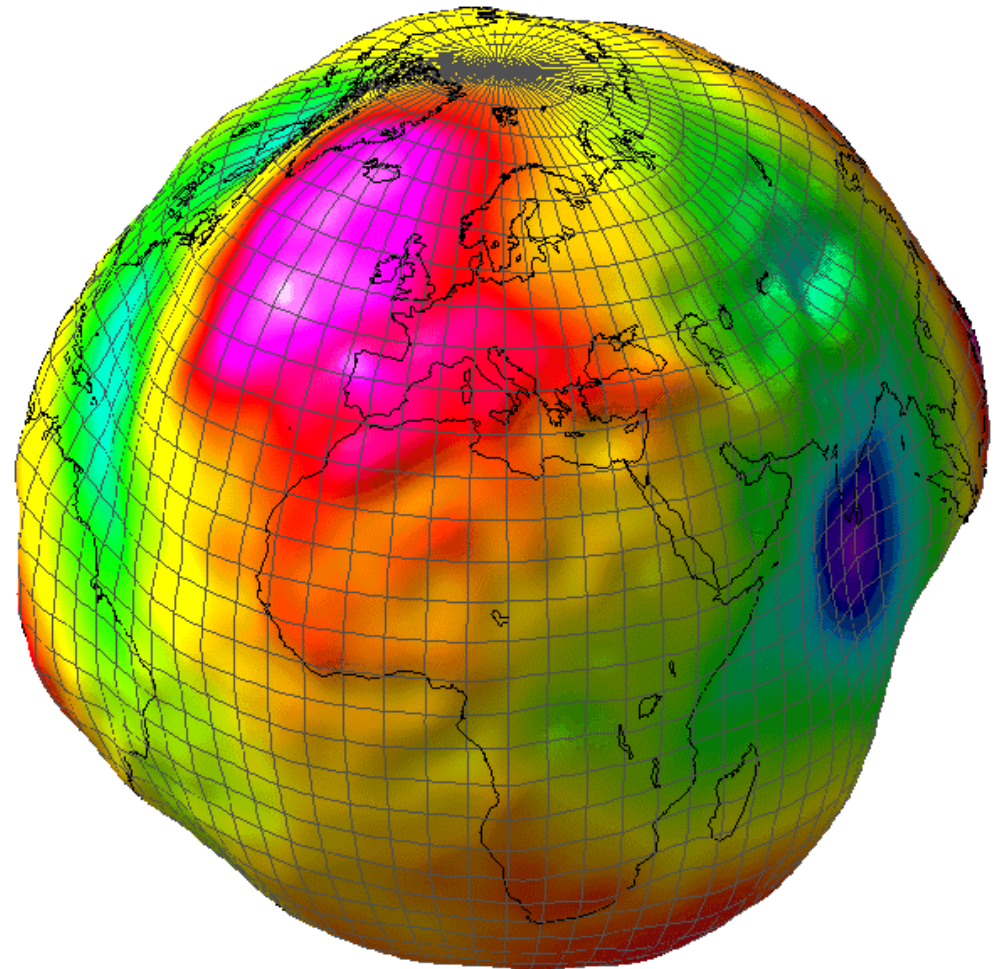
Fig. 28.6 One of the underlying motivations of inflation is that an exponential expansion scale of perhaps 10^{50} (say between times 10^{-35} s and 10^{-32} s) might serve to 'iron out' a generic initial state, so as to provide an essentially uniform, spatially flat, post-inflation universe.

Applications pratiques de la Relativité Générale

GPS

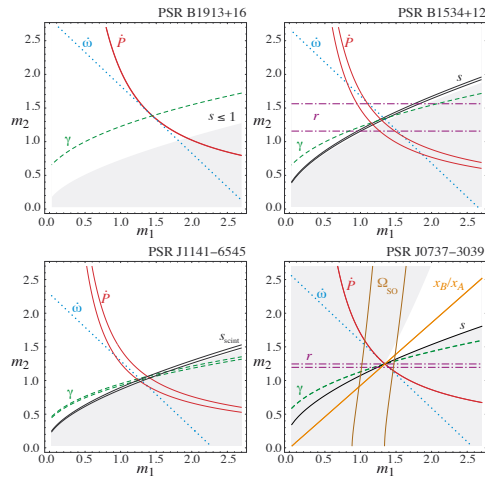


Géodésie et Gravimétrie relativiste et quantique
Horloges stables à 10^{-18}

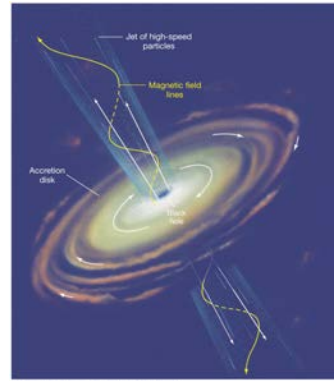


Applications astrophysiques de la Relativité Générale

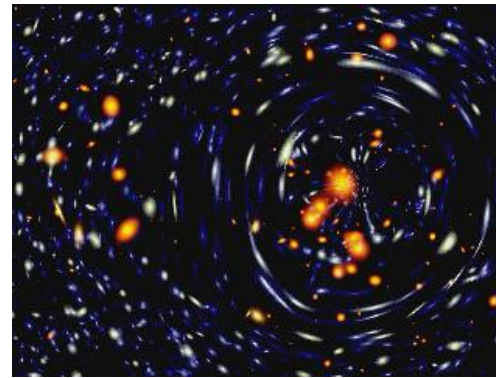
Pulsars binaires



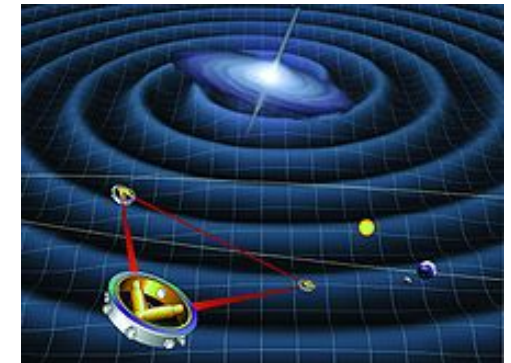
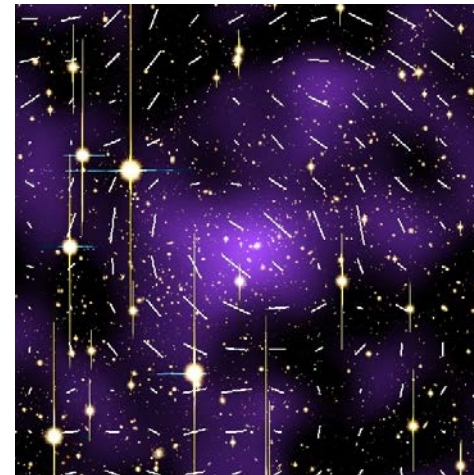
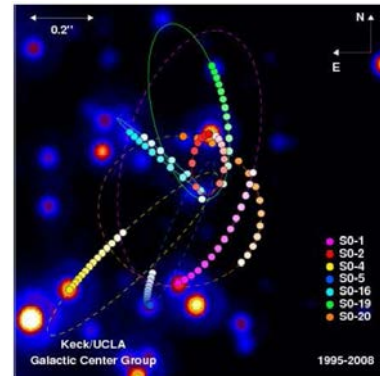
Trous noirs



Lentilles gravitationnelles



Ondes Gravitationnelles



Mesures de masse

Précession spin-orbite

Accélération galactique

ESPACE

TEMPS

MATIÈRE

FORCE

MATIÈRE \approx LUMIÈRE: PHOTON (EINSTEIN 1905)

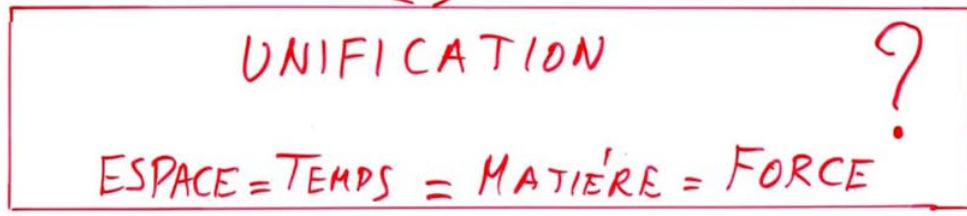
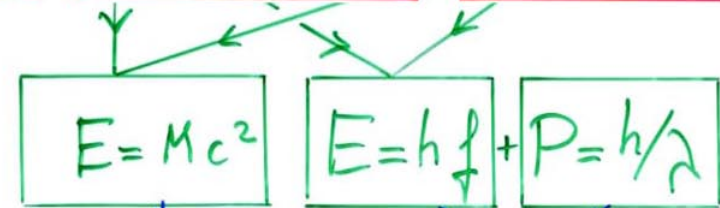
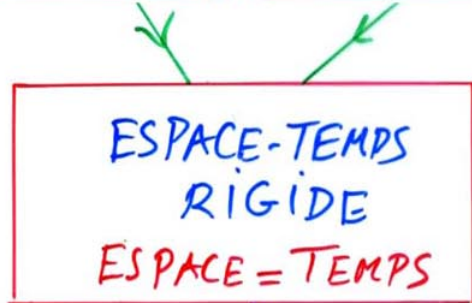
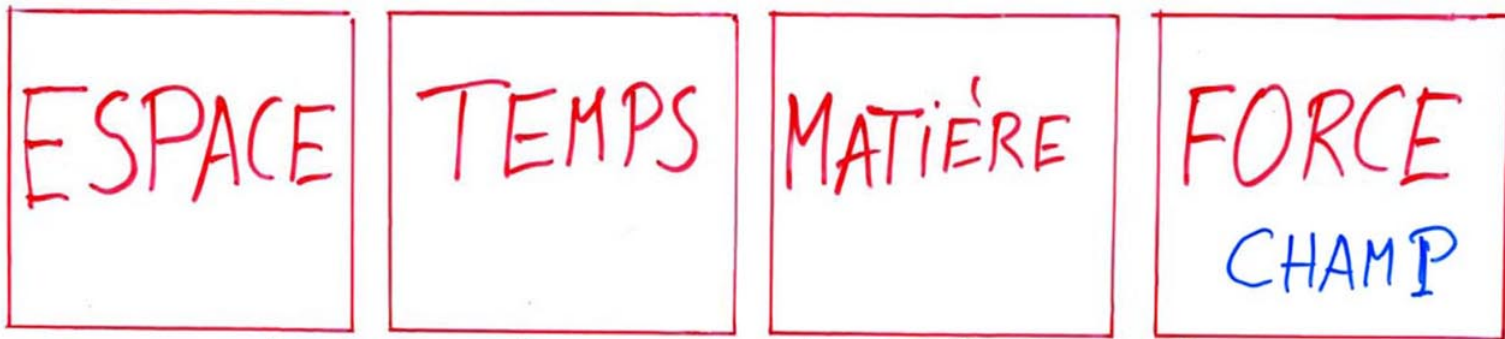
DE BROGLIE
1923

$$P = \frac{h}{\lambda}$$

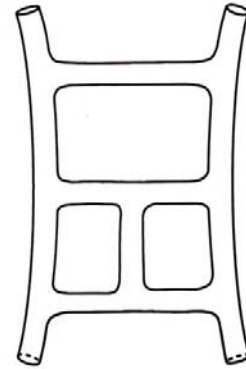
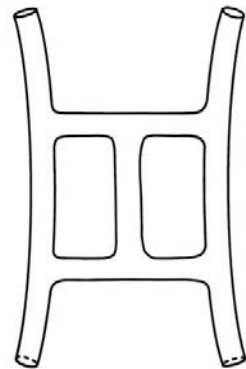
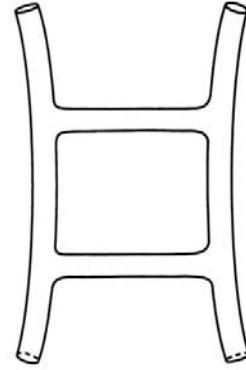
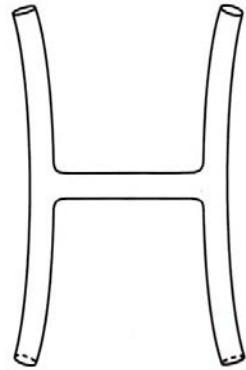
$$E = hf$$

$$\text{PHASE} = \varphi^{\text{HISTOIRE}} = 2\pi \int_H dt f = \frac{2\pi}{h} \int_H dt (E_{\text{CINÉTIQUE}} - E_{\text{POTENTIÉLLE}})$$

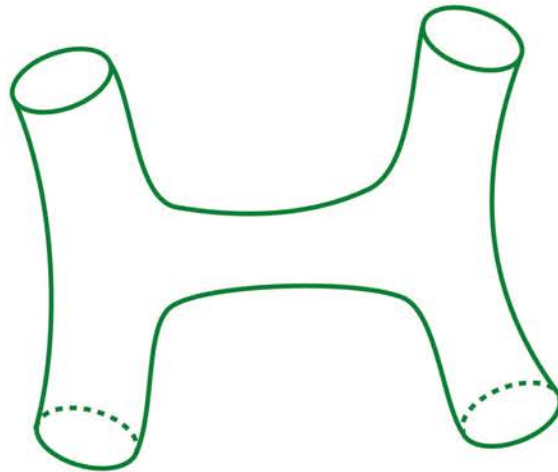
PHASE DE L'OSCILLATION DE 'L'AMPLITUDE D'EXISTENCE'



Théorie des cordes



THÉORIE DES CORDES



CORDES = MATIÈRE = FORCES \ni GRAVITATION \approx ESPACE-TEMPS

CONTENANT = CONTENU

Défis actuels

- La théorie des cordes est une théorie quantique qui contient (entre autres) la théorie einsteinienne de la gravitation.
- Mais, il reste le défi d'affranchir les formulations actuelles de la théorie des cordes de toute référence à un contenant espace-temps donné à priori.
- On pense que la théorie des cordes réalise le souhait exprimé par Einstein lors de son dernier séminaire (14 avril 1954) :
« Il y a beaucoup de raisons pour être attiré vers une théorie qui ne contient ni espace, ni temps. Mais personne ne sait comment construire une telle théorie »
- Malgré divers travaux en cours sur l' « émergence » de l'espace à partir d'un substratum non spatio-temporel on n'a pas encore trouvé la bonne solution. Par exemple on ne sait pas décrire la physique « avant le big bang » ou « près de la singularité à l'intérieur d'un trou noir ».

Science et humanisme

E. SCHRÖDINGER, Dublin, IAS, 1950

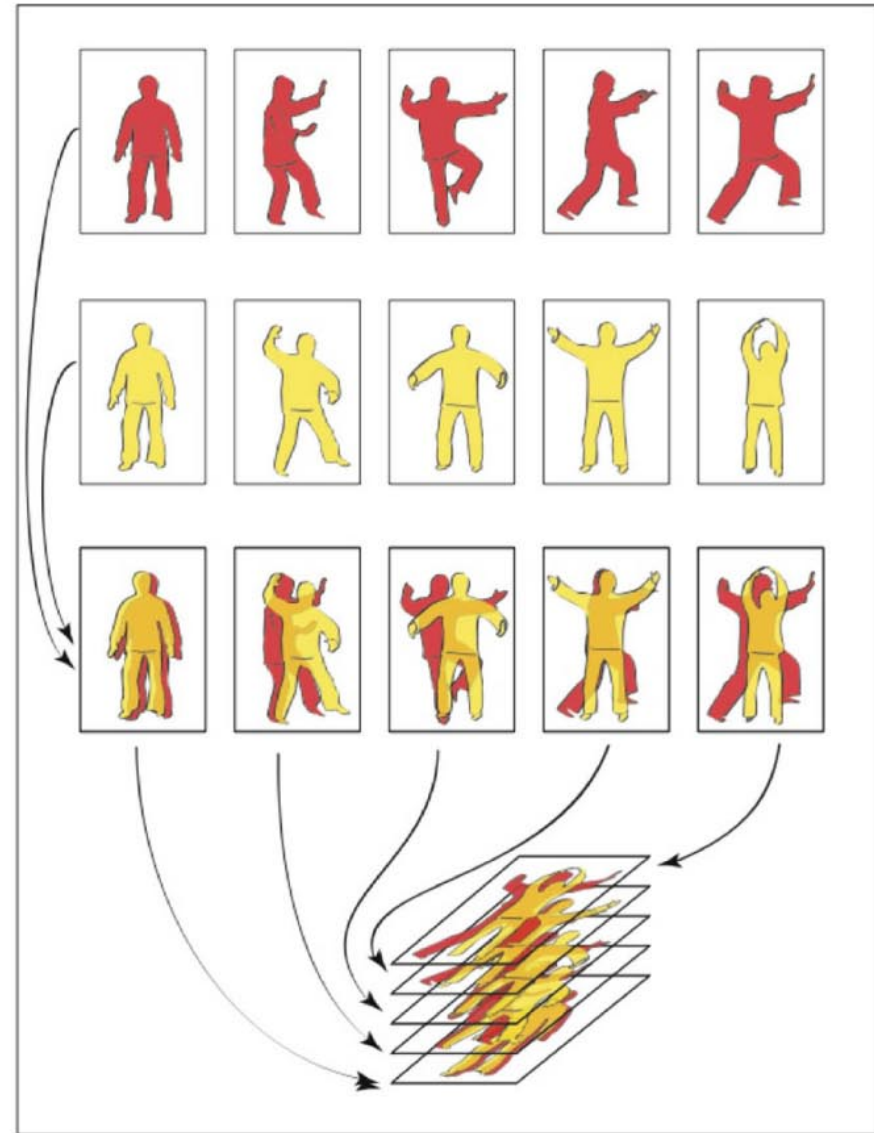
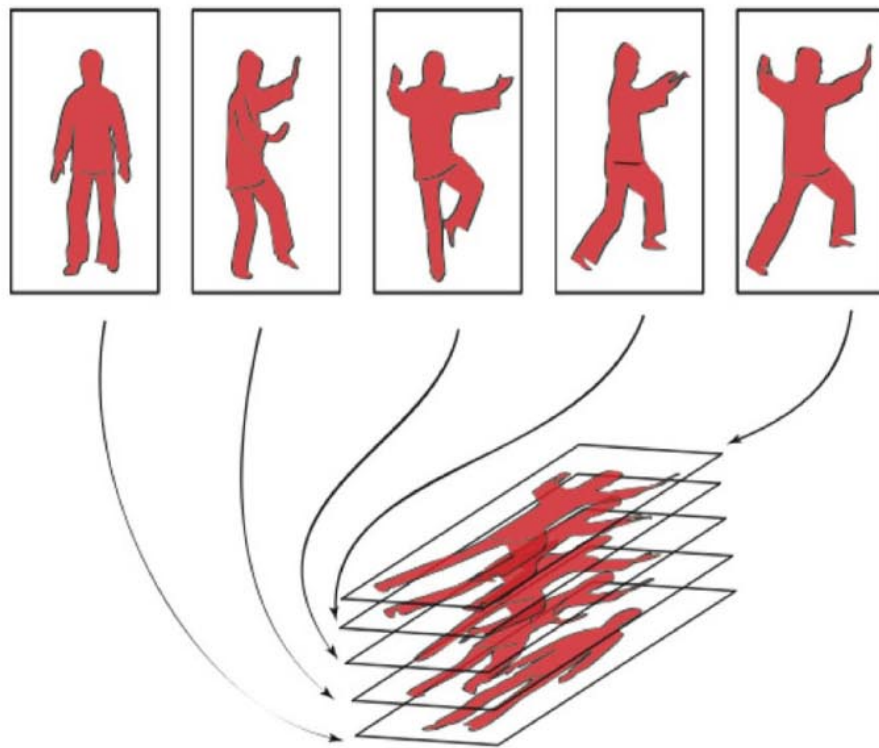
- « La science comme élément constitutif de l'humanisme »
- « Quelle est la valeur de la recherche scientifique ? [...] ses conséquences pratiques dans la technologie, l'industrie, [...] non plutôt contribuer à répondre à la question de Plotin :
« Et nous, qui sommes nous en définitive ? » »

Impact philosophique de la physique moderne ?

Comment penser le temps après les théories de la relativité restreinte (qui enlève tout sens au “maintenant”), et générale (qui permet de concevoir l’“émergence” de l’espace et du temps en un Big-Bang cosmique) ?

Comment penser la réalité après la théorie quantique (qui la décrit comme une superposition de mondes multiples) ?

Espace-Temps : Classique versus Quantique



Physique et Réalité

Kant : “On a admis jusqu’ici que toutes nos connaissances doivent se régler sur les objets, ... Que l’on cherche donc une fois si nous ne serions pas plus heureux dans les problèmes de la métaphysique, en supposant que les objets se règlent sur notre connaissance.”

Einstein : “La véritable difficulté tient à ce que la physique est une sorte de métaphysique : la physique décrit la “réalité”. Or, nous ne savons pas ce qu’est la réalité, nous ne la connaissons qu’à travers la description qu’en donne la physique !”

“prendre au sérieux” ce que nous suggère la physique ; cf. Einstein à Besso : “tu ne prends pas au sérieux la quadridimensionalité de la relativité ...”

“Pour nous, physiciens dans l’âme, la séparation entre passé, présent et avenir, ne garde que la valeur d’une illusion, si tenace soit-elle.”

Everett : prendre au sérieux la physique quantique

le Mystère du
MONDE
QUANTIQUE

*Par Thibault Damour
& Mathieu Burniat*

