Mai 2011
Cité de l'Espace, Toulouse

La Relativité Générale et ses Applications

Alexandre FAURE

M2R Cosmos, Champs et Particules - Montpellier
Commissariat à l'Energie Atomique CEA - Saclay

alexandre.faure@cea.fr

http://alx.faure.free.fr

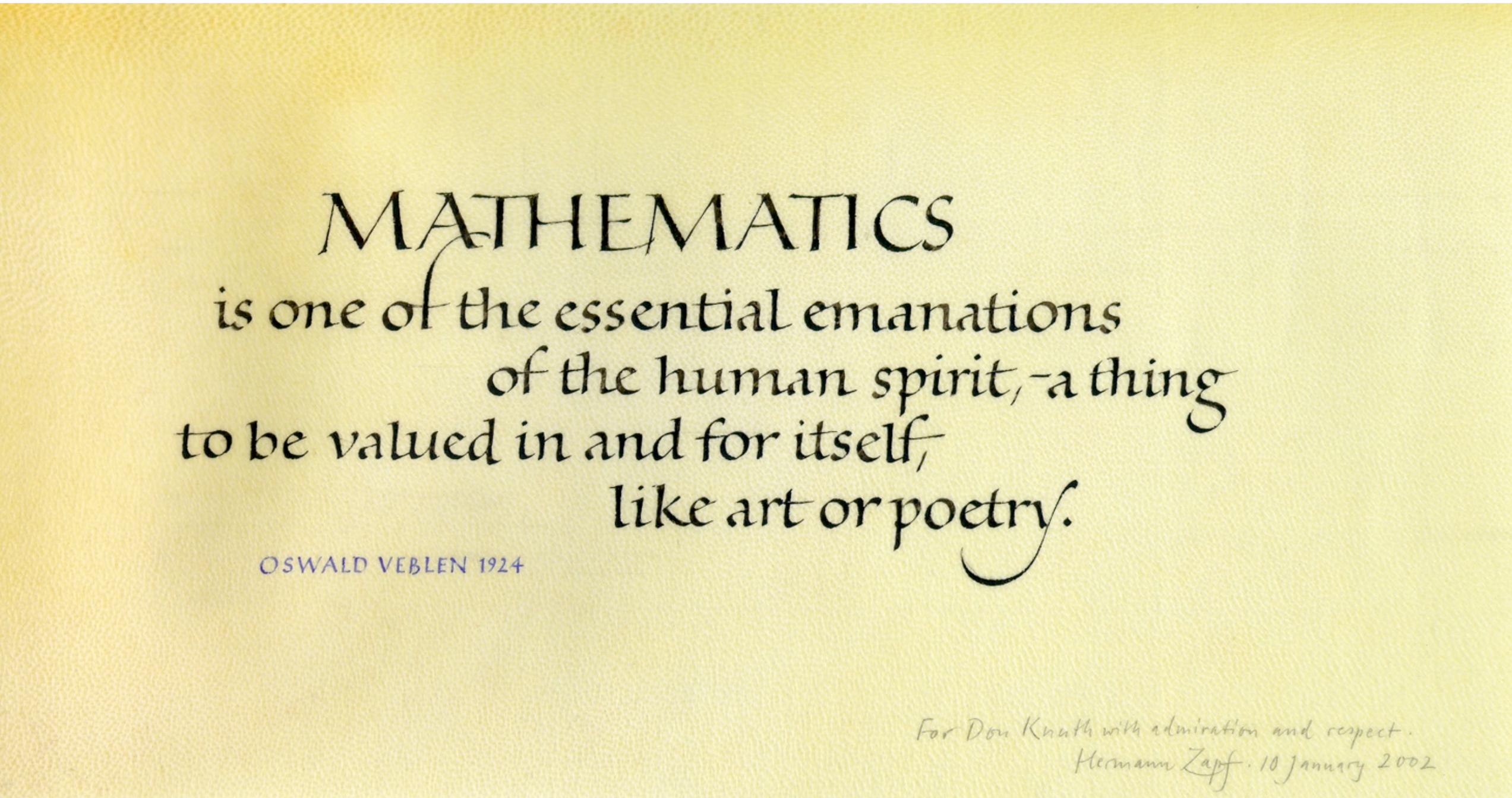
PLAN

I/ Historique

II/ La Théorie de la Relativité Générale

III/ Les applications la Relativité Générale

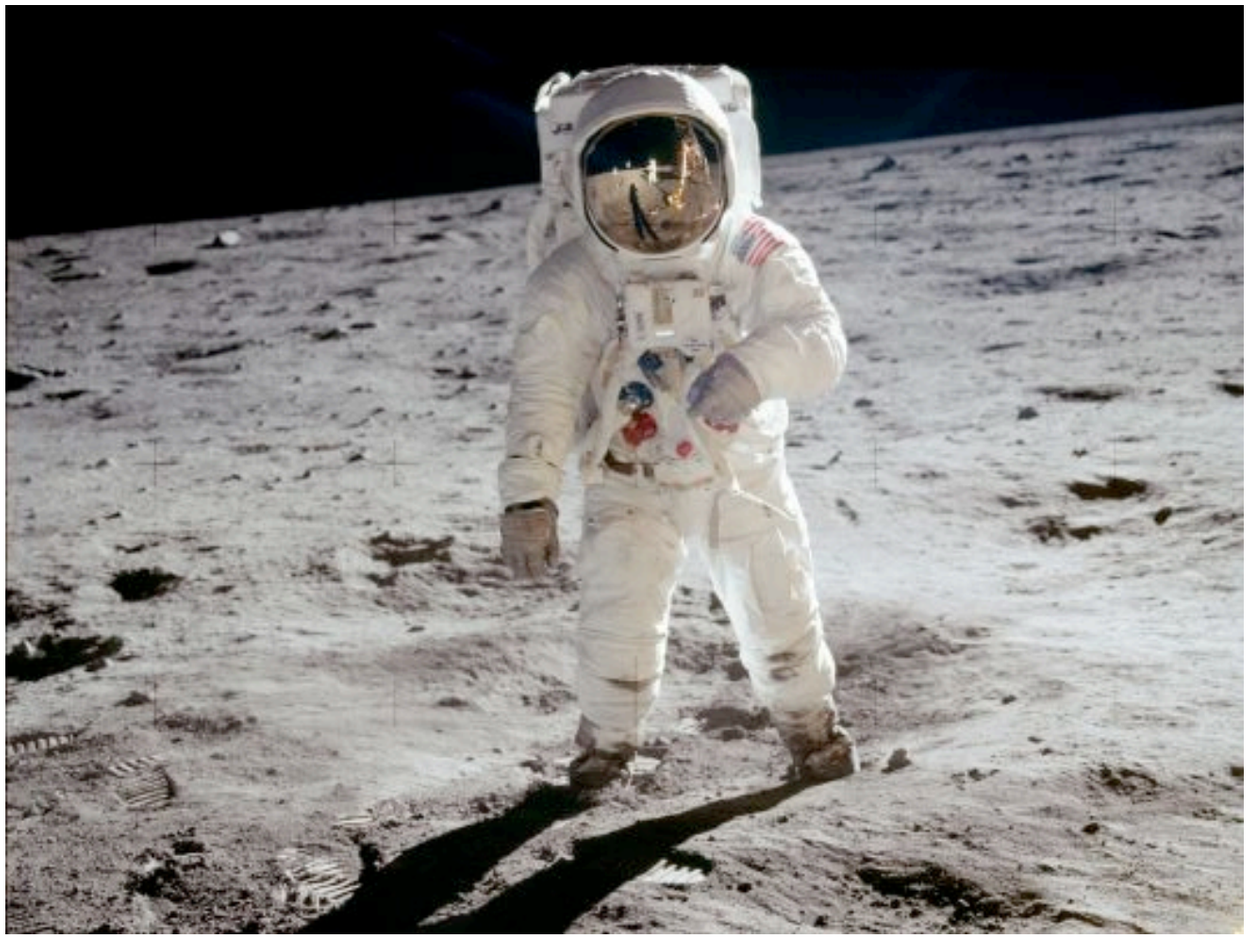
IV/ Résumé et Ouvertures


MATHEMATICS
is one of the essential emanations
of the human spirit, a thing
to be valued in and for itself,
like art or poetry.
OSWALD VEBLEN 1924
For Don Knuth with admiration and respect.
Hermann Zapf · 10 January 2002

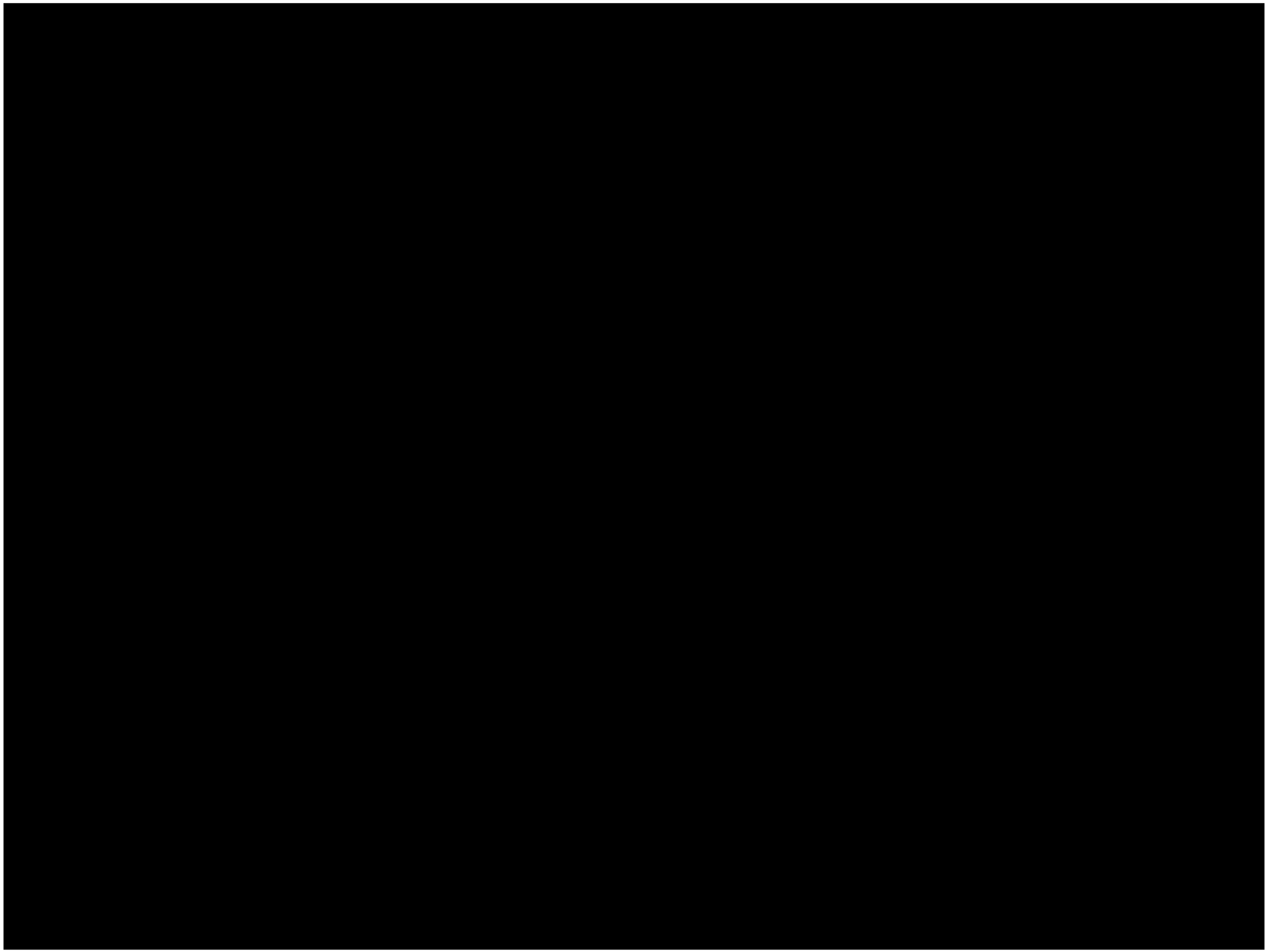
HISTORIQUE

"Les équations sont plus importantes pour moi que la politique, qui est pour le présent, mais une équation est quelque chose d'éternel." A. Einstein

QUEL EST LE LIEN ?



MISSIONS APOLLO : ACOMPLISSEMENT DE l'HUMANITE



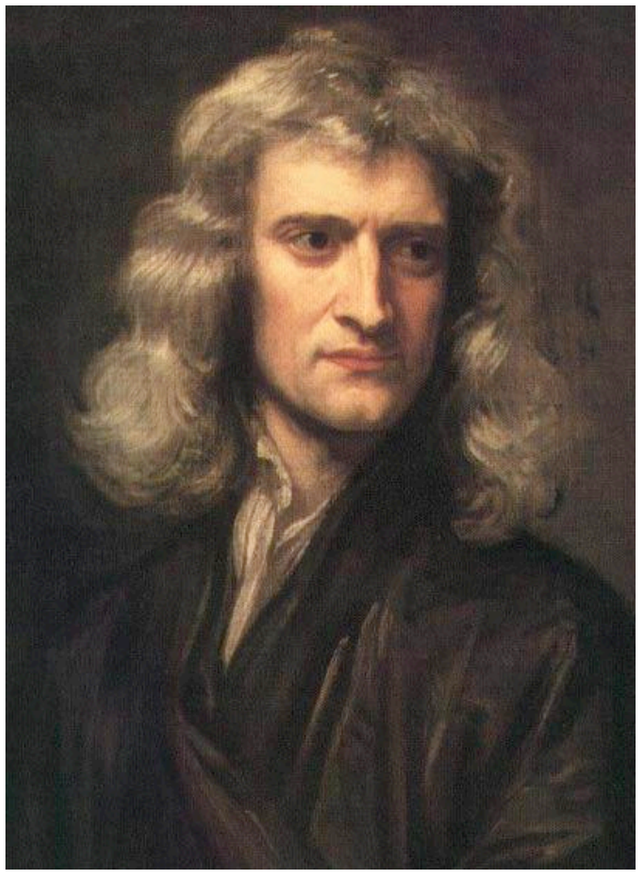
TOUT A COMMENCE AVEC UNE POMME !

Gravitation : La mécanique classique nous dit que le mouvement d'un corps est décrit par son mouvement propre et les variations de ce mouvement.

Peinture de Galileo Galilei.

Galileo Galilei (1564-1642) : Tous les corps tombent au sol avec la même vitesse quelque soit leur masse.

Relativité galiléenne : mouvements inertiels.



Peinture de Sir Isaac Newton.

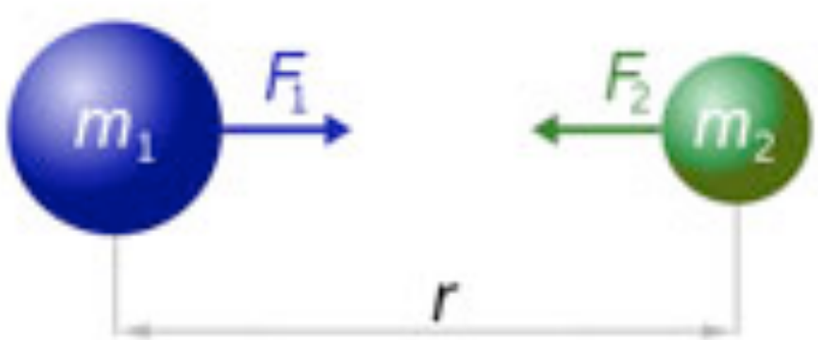
Sir Isaac Newton (1643-1727) : Loi fondamentale de la dynamique :

Masse x Accélération = Somme des Forces

LA FORCE DE GRAVITE

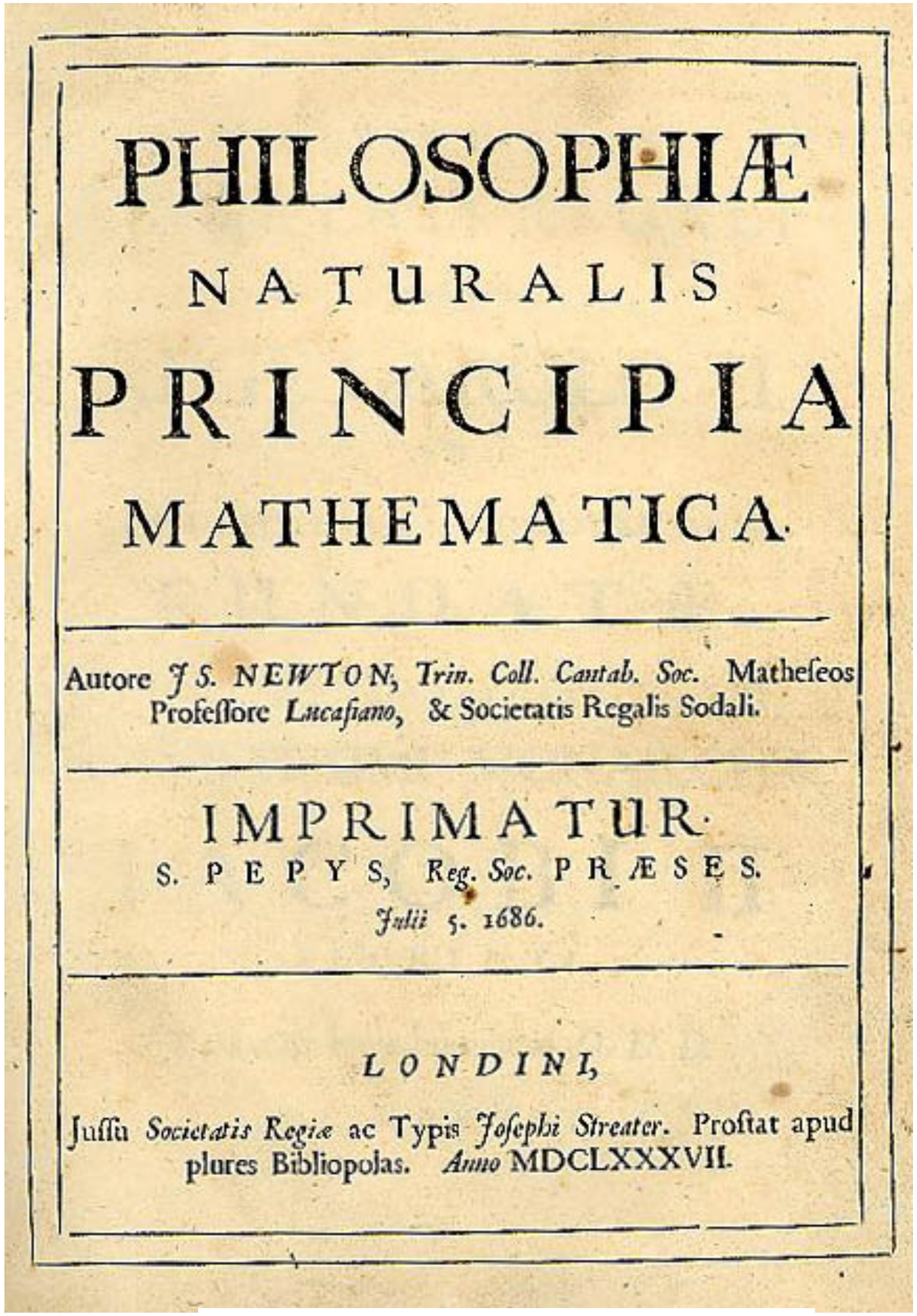
Caractéristiques :

- Force attractive
- Force sans contact
- Force qui agit dans le «vide»



$$F_1 = F_2 = G\frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

La force de gravité pour chacune des deux masses m1 et m2.



PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Le fameux ouvrage de Newton : Principia.

LA NAISSANCE D'UN GENIE

Albert Einstein : naissance à Ulm, Empire germanique, le 14 mars 1879.

1902 : Albert est employé au Bureau des brevets de Berne.

1903 : Albert & Mileva se marient.

1905 : Travaux sur l'effet photo-électrique et le mouvement brownien.

Albert Einstein at 4th year.

Mileva and Albert Einstein.

1916 : Premier ouvrage publié sur sa nouvelle théorie de la gravitation, la Relativité Générale.

1921 : Prix Nobel pour ses travaux sur l'effet photo-électrique.

1939 : Envoi de la lettre à Roosevelt : Projet Manhattan.

QU'EST-CE QUE LA RELATIVITE ?

Une plaque chauffante

VS

Romy Schneider.

«Posez votre main sur une plaque chauffante pendant une minute, cela vous semble durer une heure. Asseyez-vous près d'une jolie fille pendant une heure, et cela semble durer une minute. Voilà ce qu'est la relativité.»
Einstein, 1921

LA RELATIVITE RESTREINTE

Concepts :

- Définir un système *inertiel* pour analyser le mouvement d'un objet.

- Les *lois de la physique sont les mêmes* pour n'importe quel observateur.

- c est la vitesse de la lumière *invariante* dans le vide.

- Les notions de distance et de temps n'ont *pas la même signification physique* dans tous les référentiels (cf. transformations de Lorentz).

- **Conservation de la masse** : Avec l'équation la plus connue au monde ...

$$E = m.c^2$$

APPLICATIONS DE LA RELATIVITE RESTREINTE

Confirmations :

- L'expérience de Michelson-Morley.

- L'expérience de Fizeau.

- Par les horloges atomiques.

Conséquences principales :

- Notion de simultanéité.

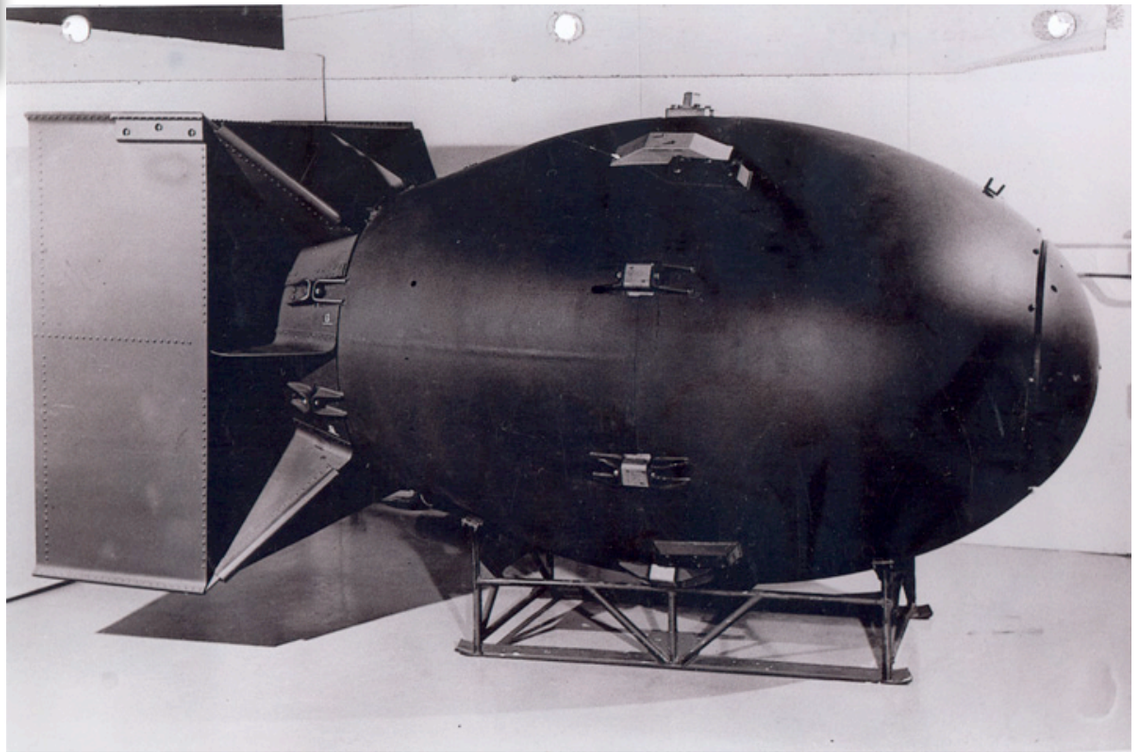
- Composition des vitesses.

- Dilatation du temps.

Applications :

- Le temps n'est plus statique => cf. mesures temporelles à grandes vitesses (e.g. ISS).

- Bombe atomique (cf. Hiroschima, Nagasaki, ...).



La bombe nucléaire «Fat Man» qui a été utilisée à Nagasaki.

Notre compréhension du temps est completement modifiée par cette théorie.

APPLICATION DE LA DILATATION DU TEMPS : PARADOXE DES JUMEAUX

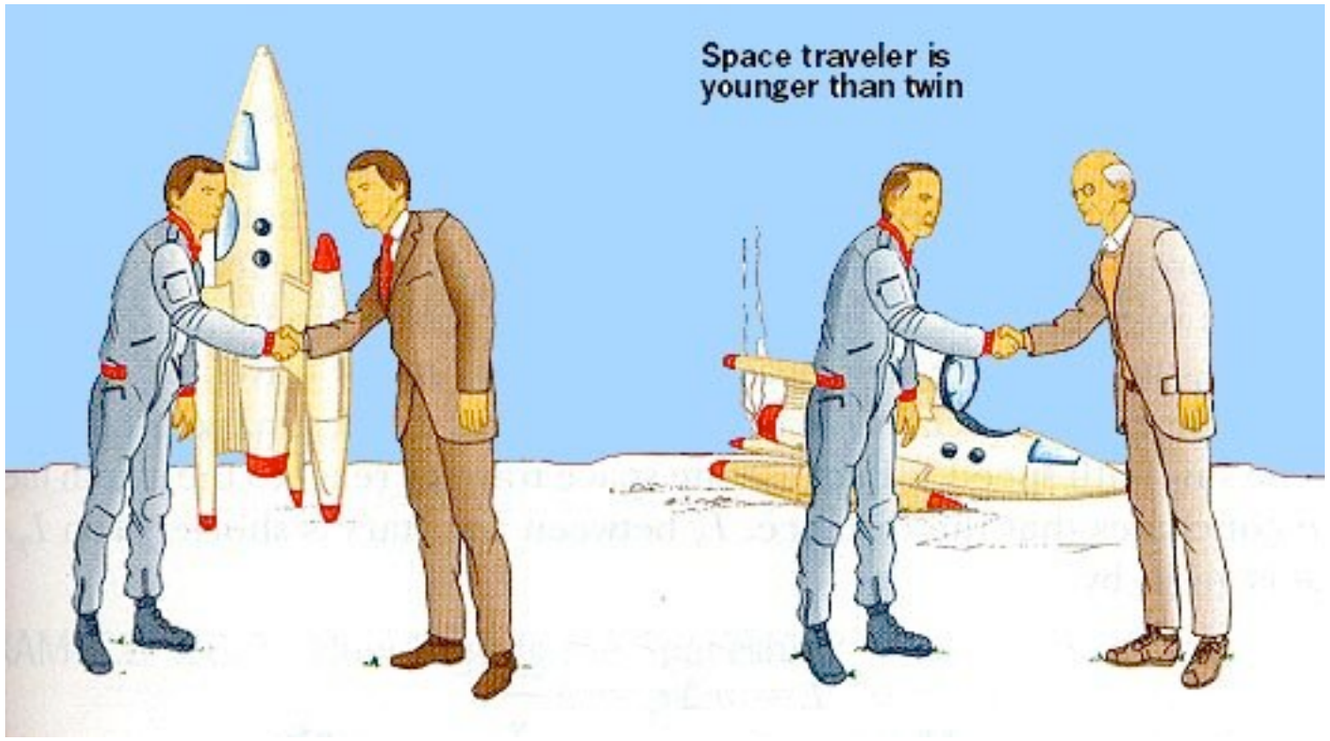
Le Paradoxe des Jumeaux : Jean-Pierre est sur Terre et Jacques dans un vaisseau spatial.

Jacques veut voyager a 4,25 année-lumière de distance de la Terre à 88,6 % de la vitesse de la lumière.

Pendant le temps du voyage, Jacques a vieilli de 5 ans environ dans son référentiel.

MAIS Jean-Pierre a vieilli de 10 ans environ, sur Terre !

Temps (Jean-Pierre) = 2 x Temps (Jacques) !

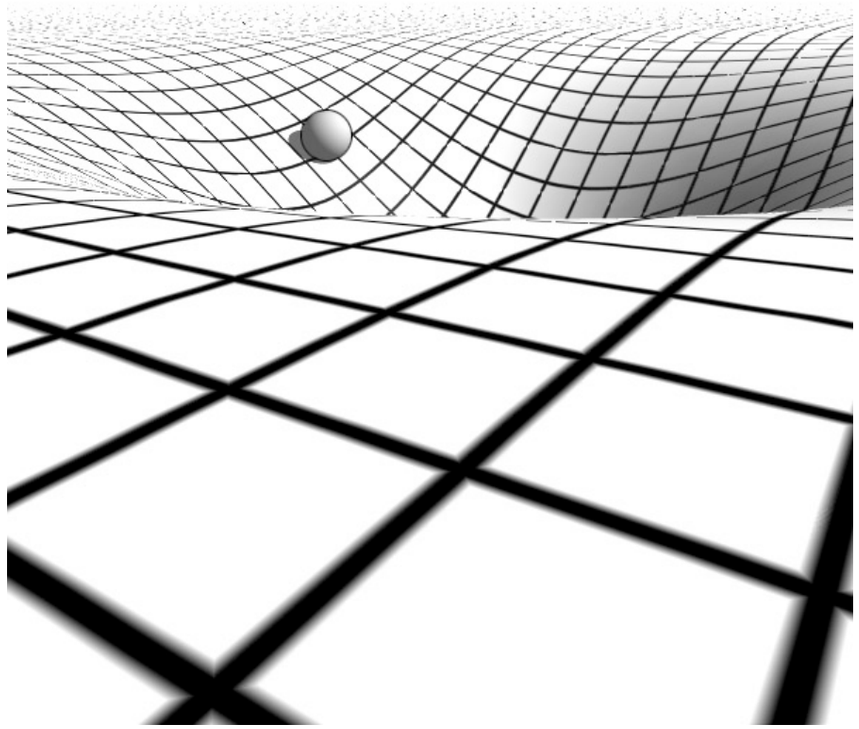


REFORMULER LA GRAVITATION ?

Le concept newtonien n'est plus valable pour une compréhension actuelle de la force de gravité. En effet, la force newtonienne est instantanée !

➡ Mais dans le cadre de la relativité restreinte, aucune information ne peut voyager plus vite que la vitesse de la lumière.

BESOIN D'UNE THEORIE PLUS GENERALE !



Une vision de la gravitation inédite.

LA THEORIE DE LA RELATIVITE GENERALE

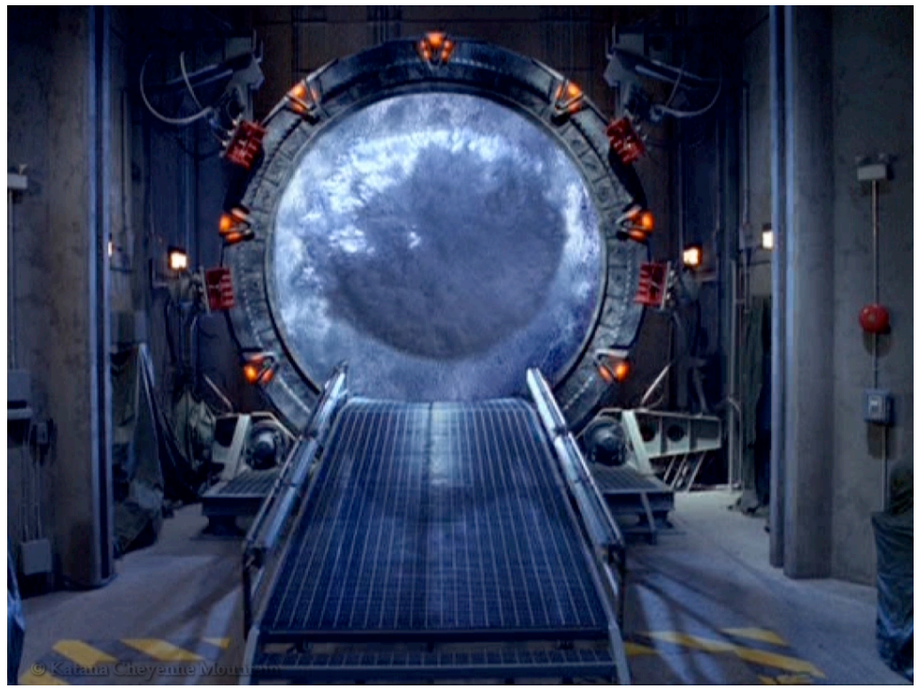
"Ne vous inquiétez pas de vos difficultés en mathématiques. Je peux vous assurer que les miennes sont bien plus importantes." A. Einstein

L'ESPACE-TEMPS ?

Star Wars - Saut en hyperspace (1977)

Star Trek - Le vaisseau Enterprise 1966

Sliders - Le vortex 1995

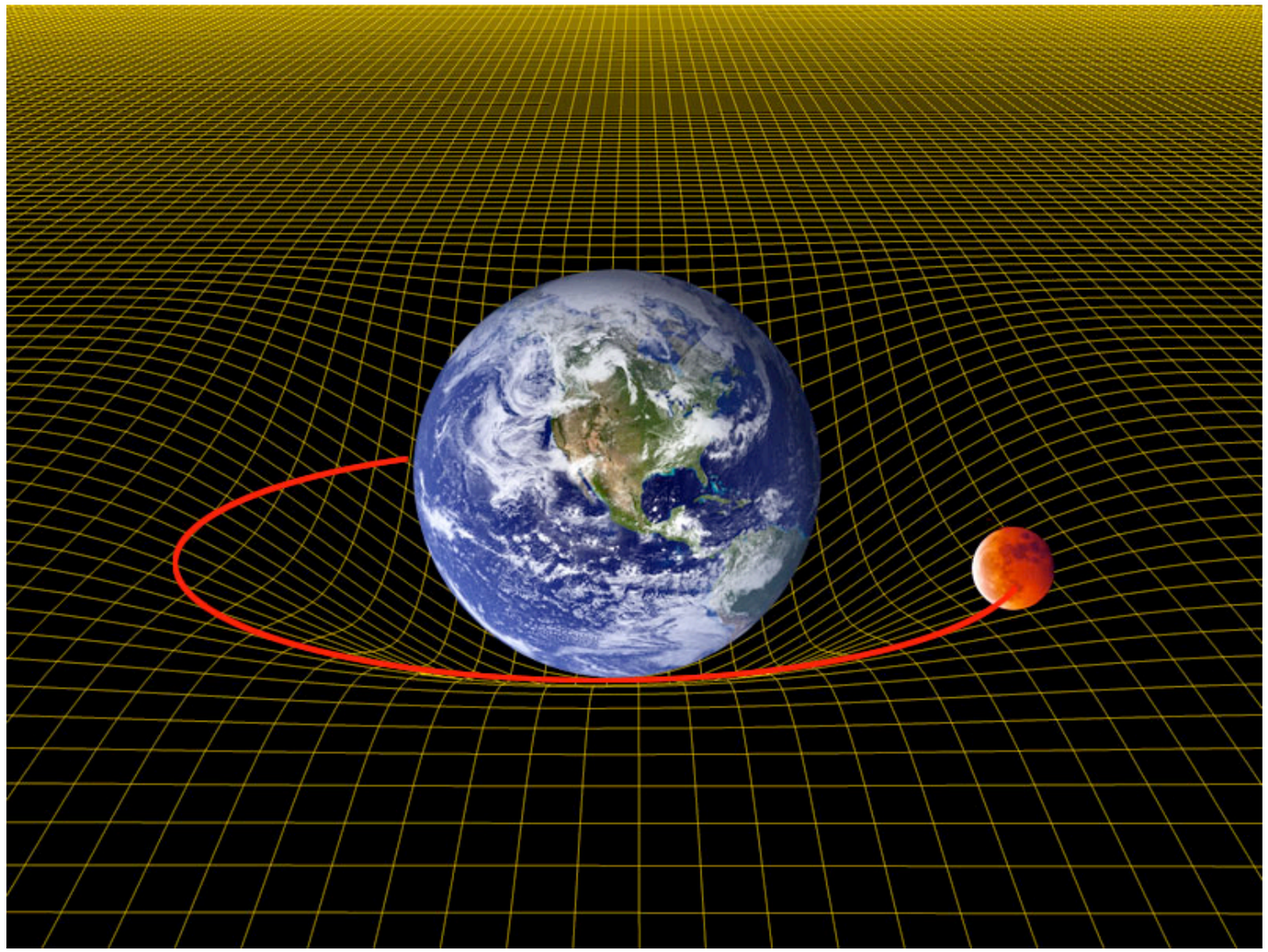


Stargate - La porte des étoiles 1994

QU'EST-CE QUE L'ESPACE-TEMPS ?

Espace-Temps : Tous les évènements à un endroit donné et à un temps donné = 4 dimensions.

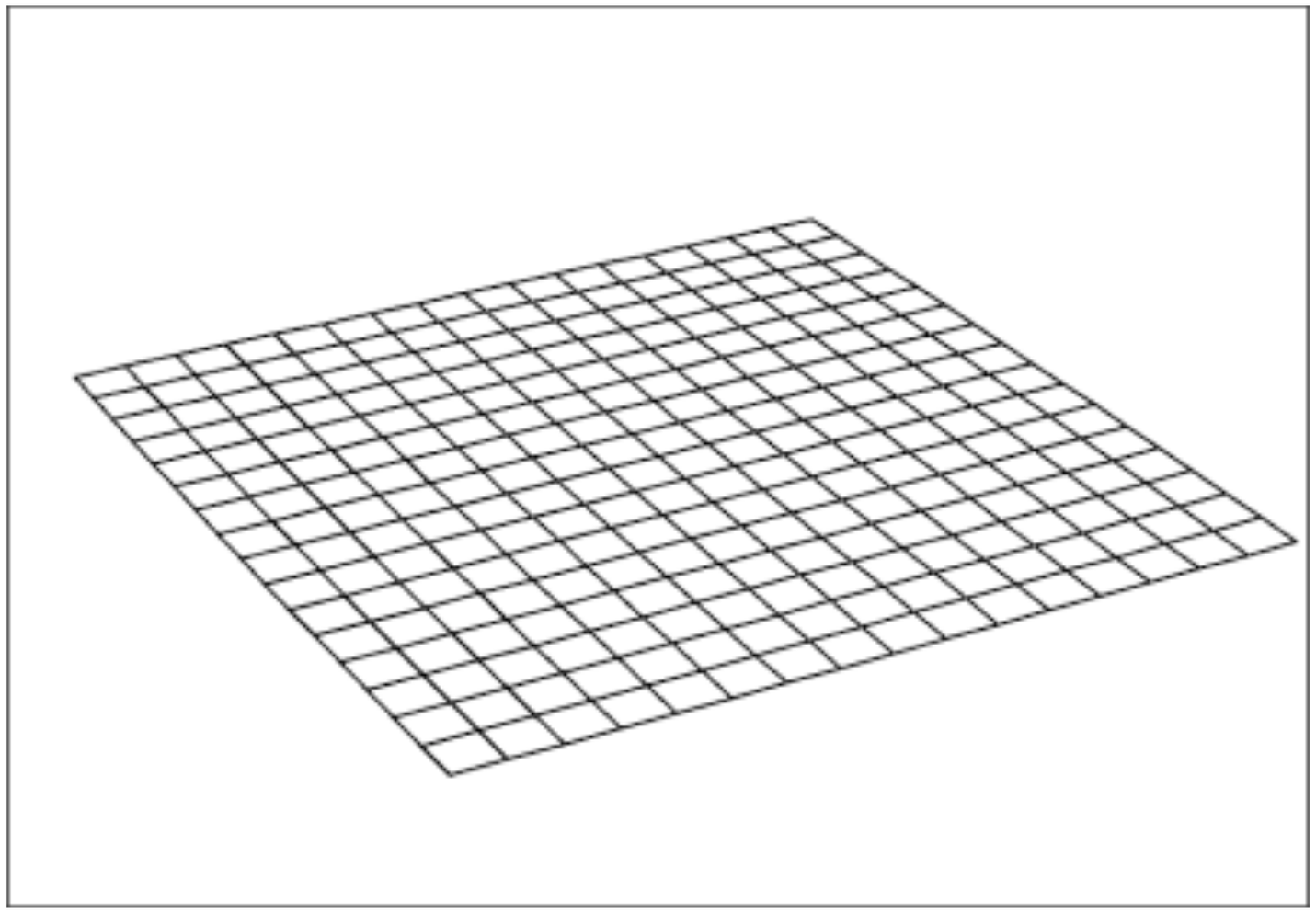
Espace = 3 dimensions. **Temps** = 1 dimension.



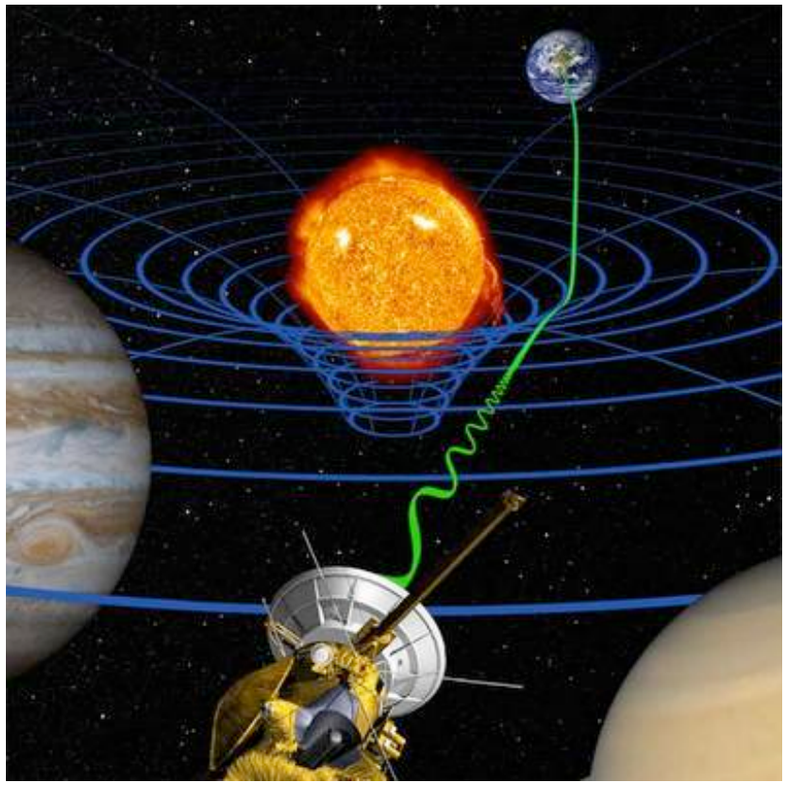
VOTRE OUTIL = LA METRIQUE

Définition : L'espace-temps regroupe tous les évènements possibles de l'Univers. Il est définit par une métrique.

- **Espace-temps plat = métrique de Minkowski.**



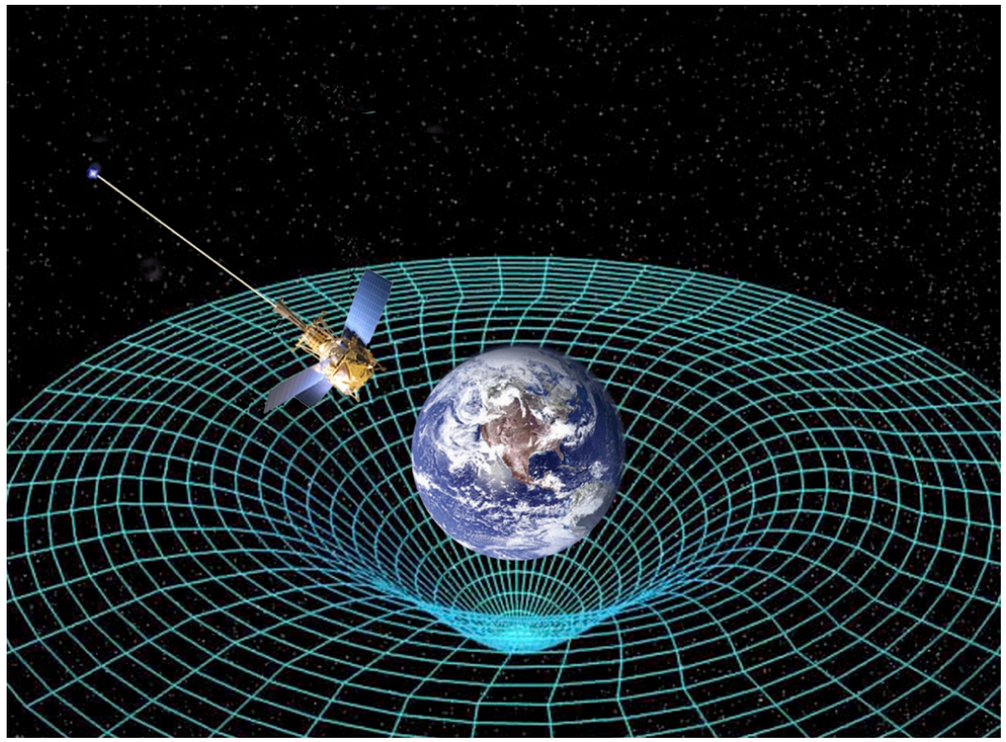
VOTRE OUTIL = LA METRIQUE



Vue d'artiste de la sonde Cassini envoyant des signaux vers la Terre. Ces trajectoires sont courbées par la masse du Soleil.

- **Espace-temps courbé = Métrique de Schwarschild.**

Décrit le continuum d'espace-temps courbé par une énergie.



Vue d'artiste d'un satellite suivant la courbure de l'espace-temps engendré par la présence de la Terre.

CONCEPTS DE LA RELATIVITE GENERALE

Relativité Générale = relativité restreinte + application aux référentiels non-inertiels.

0) Principes de relativité restreinte.

1) Chaque mouvement est considéré dans un référentiel donné (inertiel ou non-inertiel) : les vitesses et les accélérations ne peuvent pas être évaluées sans.

2) Principe d'équivalence : masse inertielle (avec a, sans G) = masse pesante (sans a, avec G).

3) Dynamique de l'espace et du temps : Le temps peut-être contracté ou dilaté → idem pour l'espace.

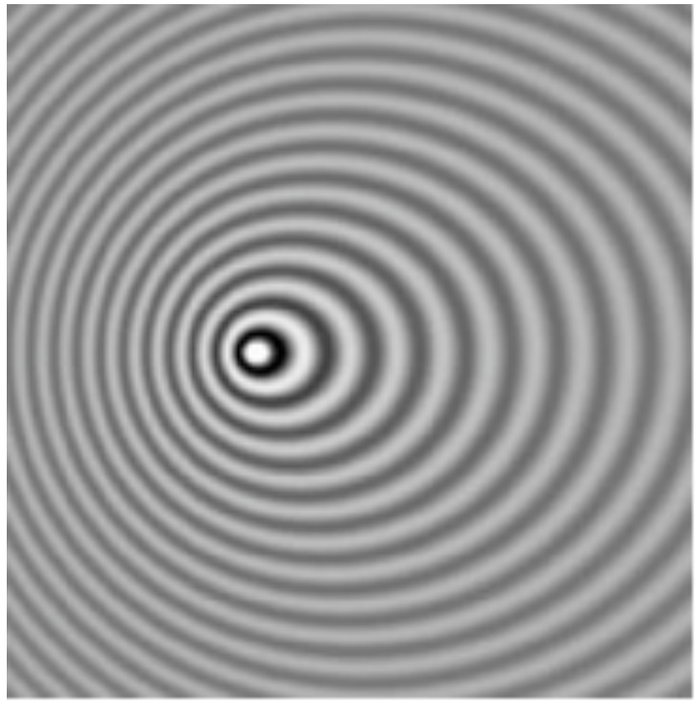
PRINCIPALES CONSEQUENCES

- Contraction ou dilatation gravitationnelle du temps et décalages en fréquences.

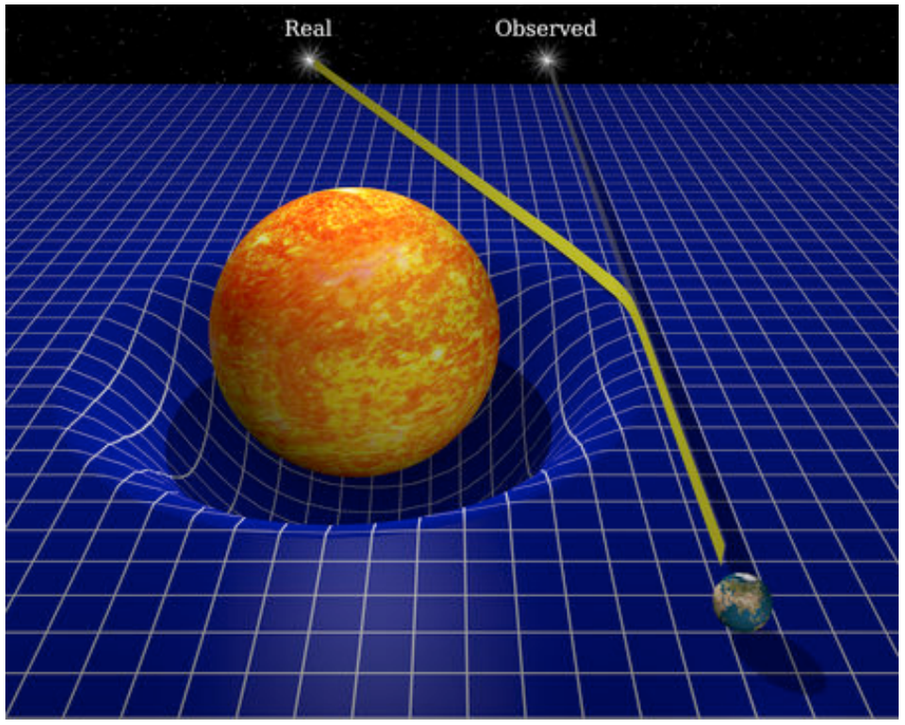
- Déviation gravitationnelle des chemins lumineux.

- Effets d'orbites et relativité de direction.

- Correction du temps à prendre en compte.



Effet Doppler «visible»..



Déviation de la lumière par un objet massif.

Première horloge atomique en 1949 au Bureau National des Brevets.

LE MODELE DU BIG BANG

Big Bang = «Commencement» de l'Univers : âgé de **13,7 milliard d'années** !

Edwin Hubble : les galaxies lointaines s'éloignent plus vite de nous que les galaxies plus proches (1929) !

Phase initiale très chaude et dense. Dans l'Univers embryonnaire, matière et lumière étaient couplées avant d'être séparées.

La théorie du Big Bang ...

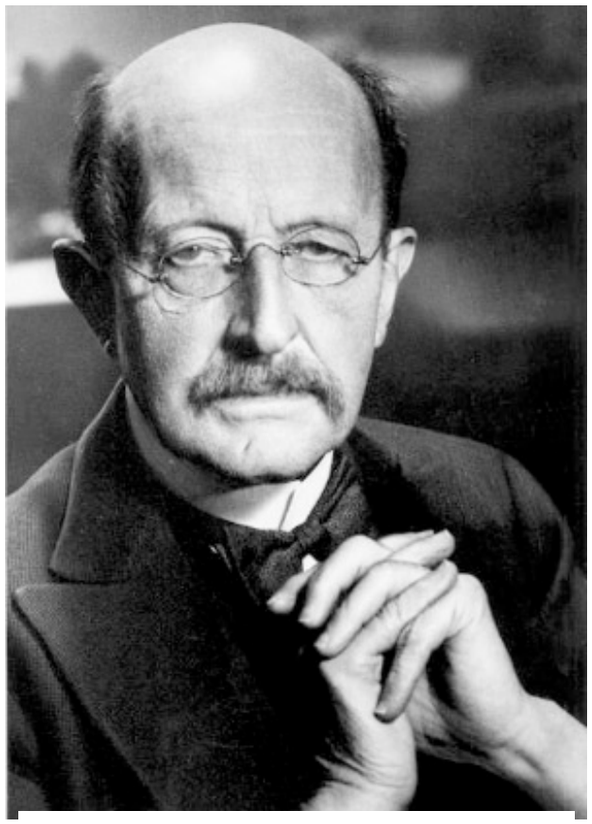
DES QUESTIONS SUR LE BIG BANG ?

AVANT LE BIG BANG ?

Une frontière infranchissable, «l'ère de Planck» :

- Temps de *Planck* : $10^{-43} s$

- Longueur de *Planck* : $10^{-35} m$

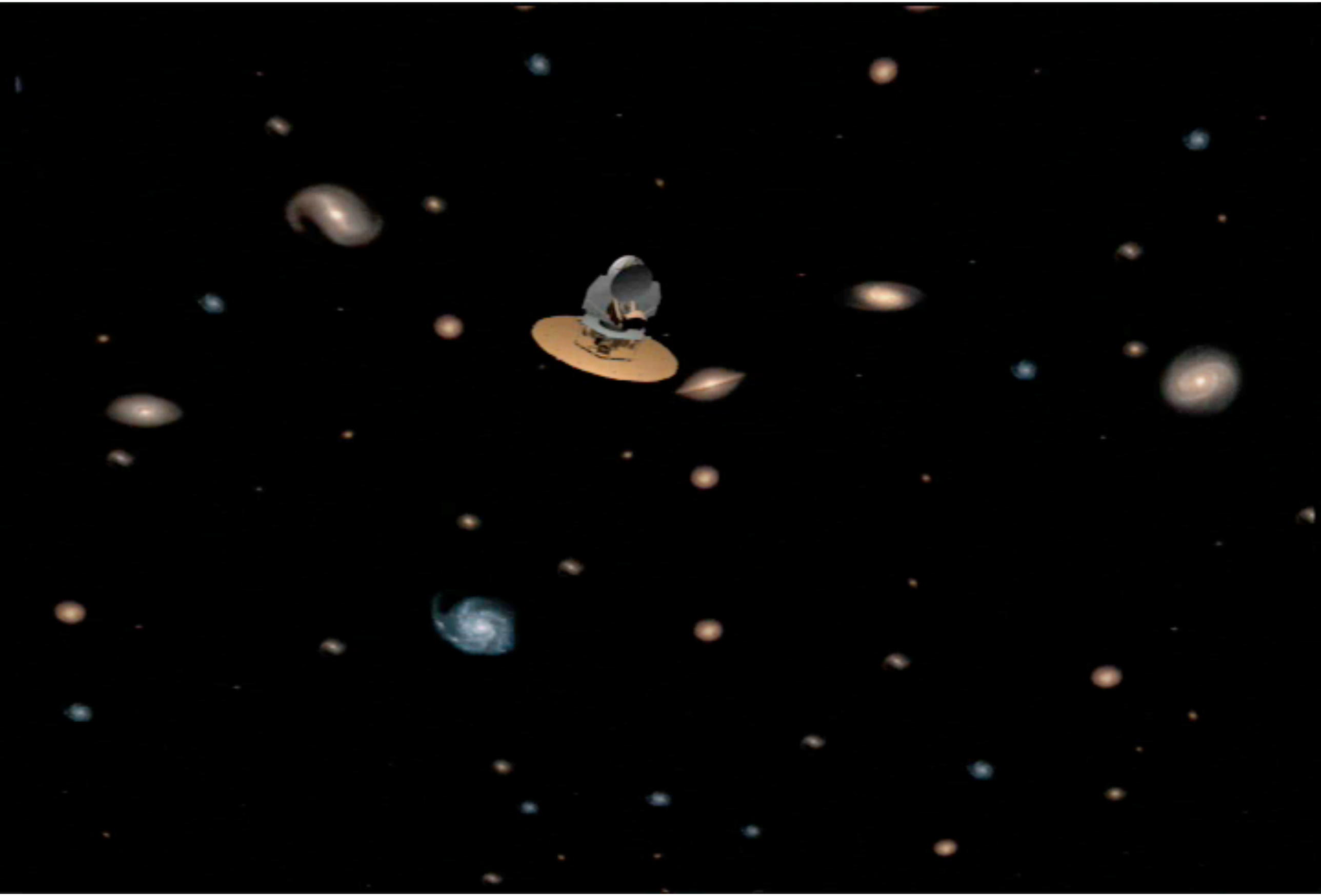


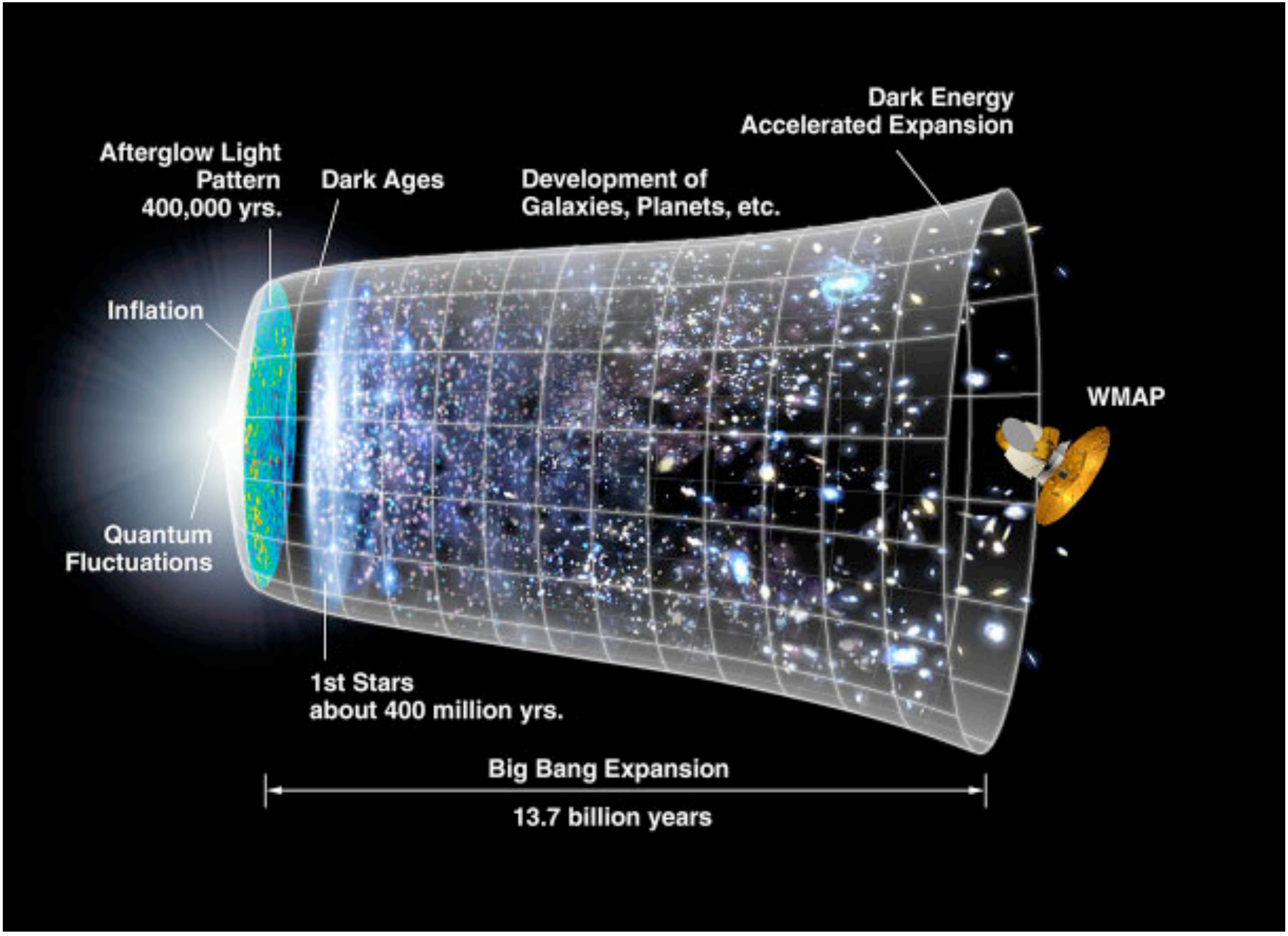
Le physicien allemand Max Planck en 1900.

AUTOUR DU BIG BANG ?

Aucun sens : analogie du gâteau en cuisson !

QUELLE EST LA FORME DE NOTRE UNIVERS ?




Dark Energy
Accelerated Expansion
Afterglow Light
Pattern
400,000 yrs.
Dark Ages
Development of
Galaxies, Planets, etc.
Inflation
WMAP
Quantum
Fluctuations
1st Stars
about 400 million yrs.
Big Bang Expansion
13.7 billion years

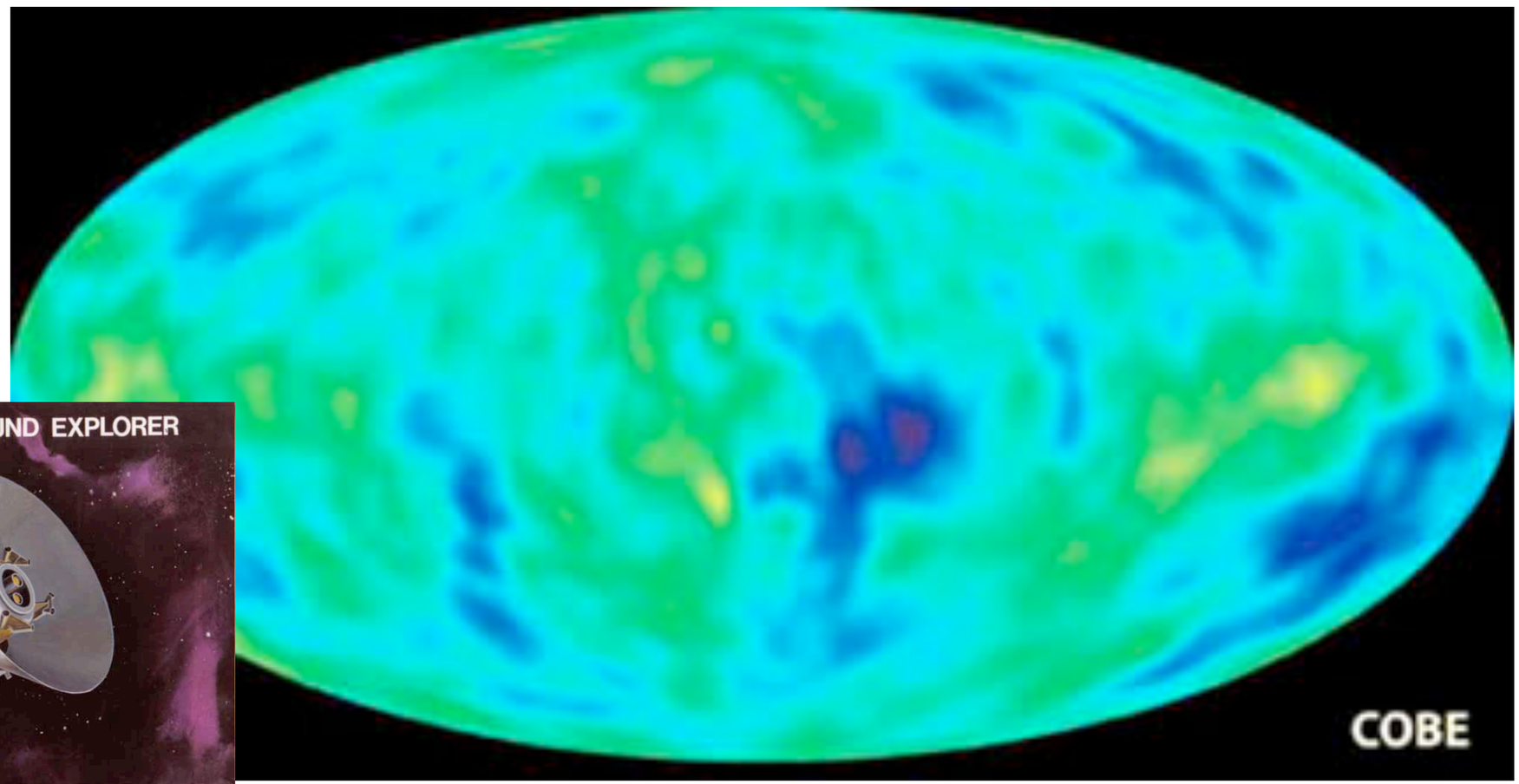
APPLICATION DE LA METRIQUE FLRW : LE FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE

- Première découverte par **Penzias & Wilson** a la Bell Laboratory en 1964.

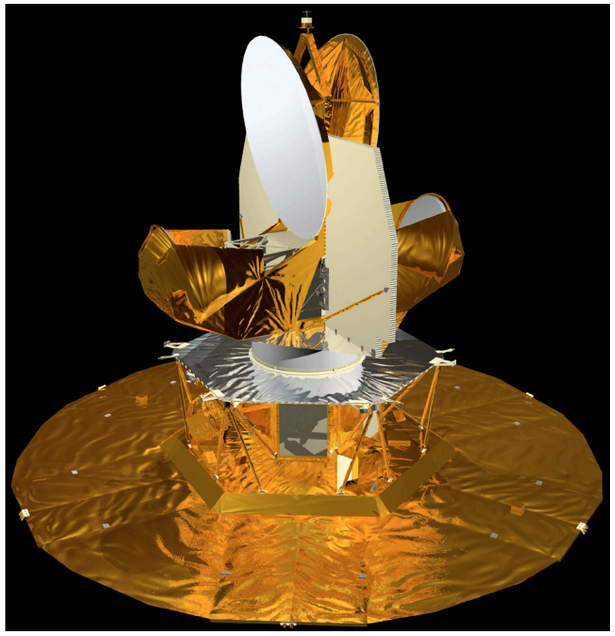
Des photons reliques âgés de 13,7 milliards d'années sont détectés

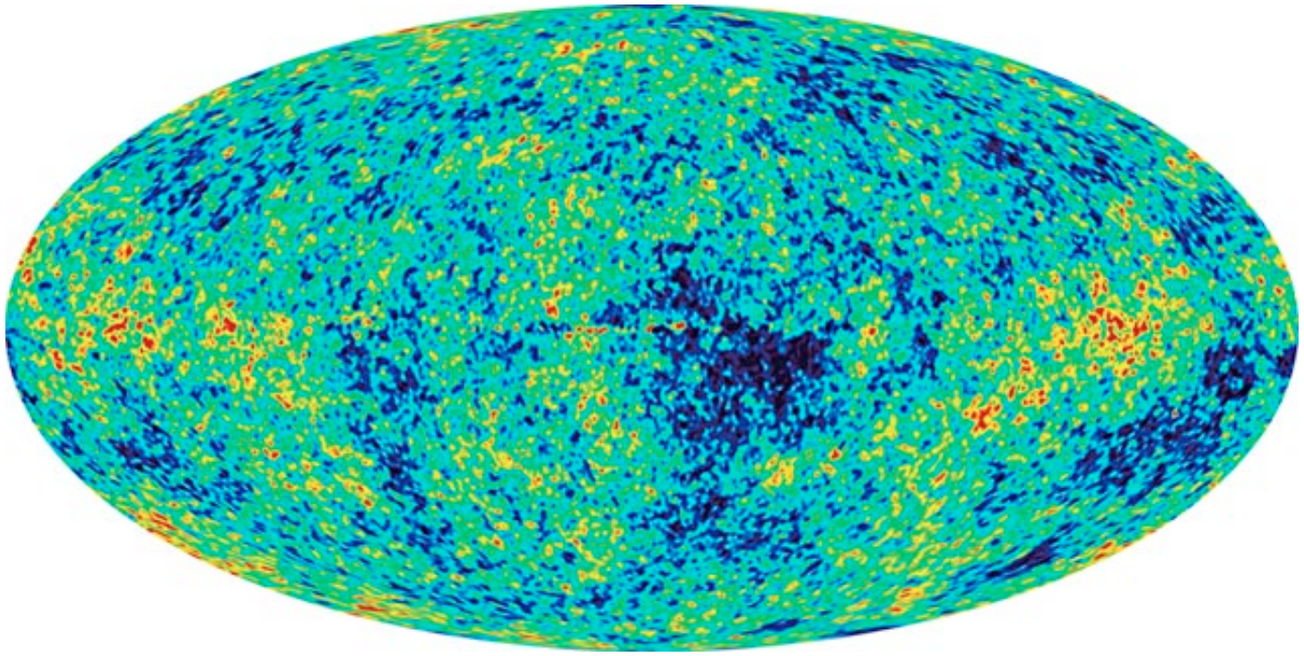
= <u>preuve cruciale</u> du modèle de Big-Bang.

i.e. température extrême = 2,726 K (= - 270,424°C).

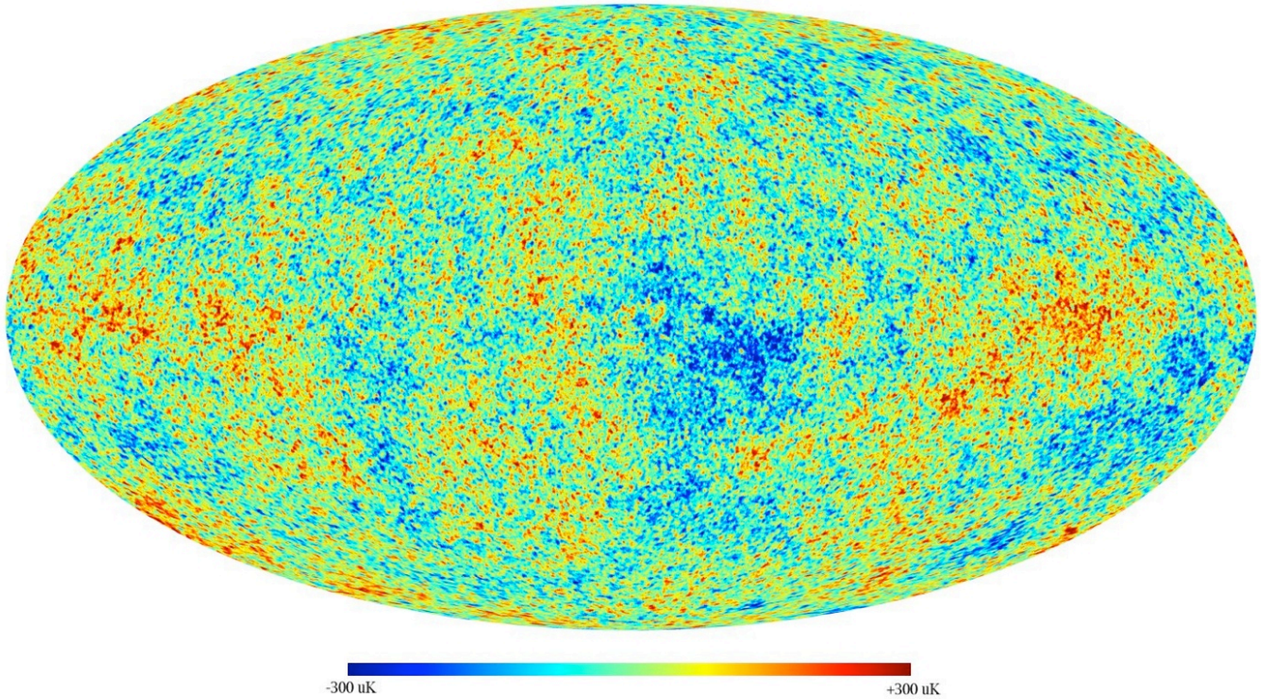


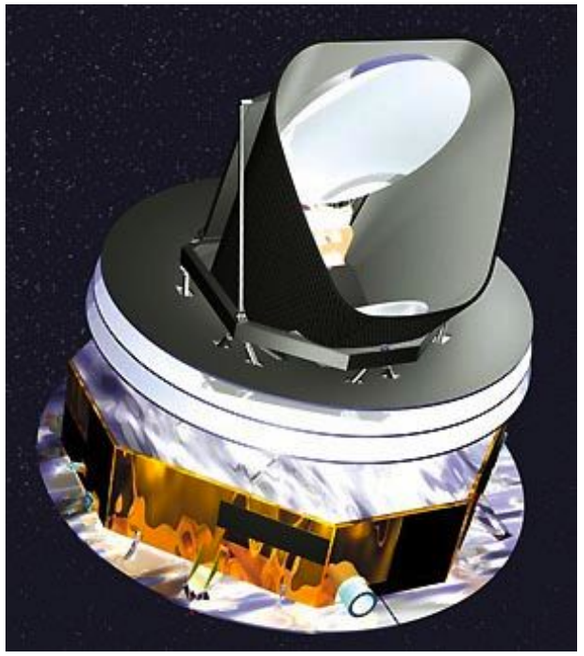
Mesures de COBE (1992)





Mesures du CMB avec WMAP (2003).

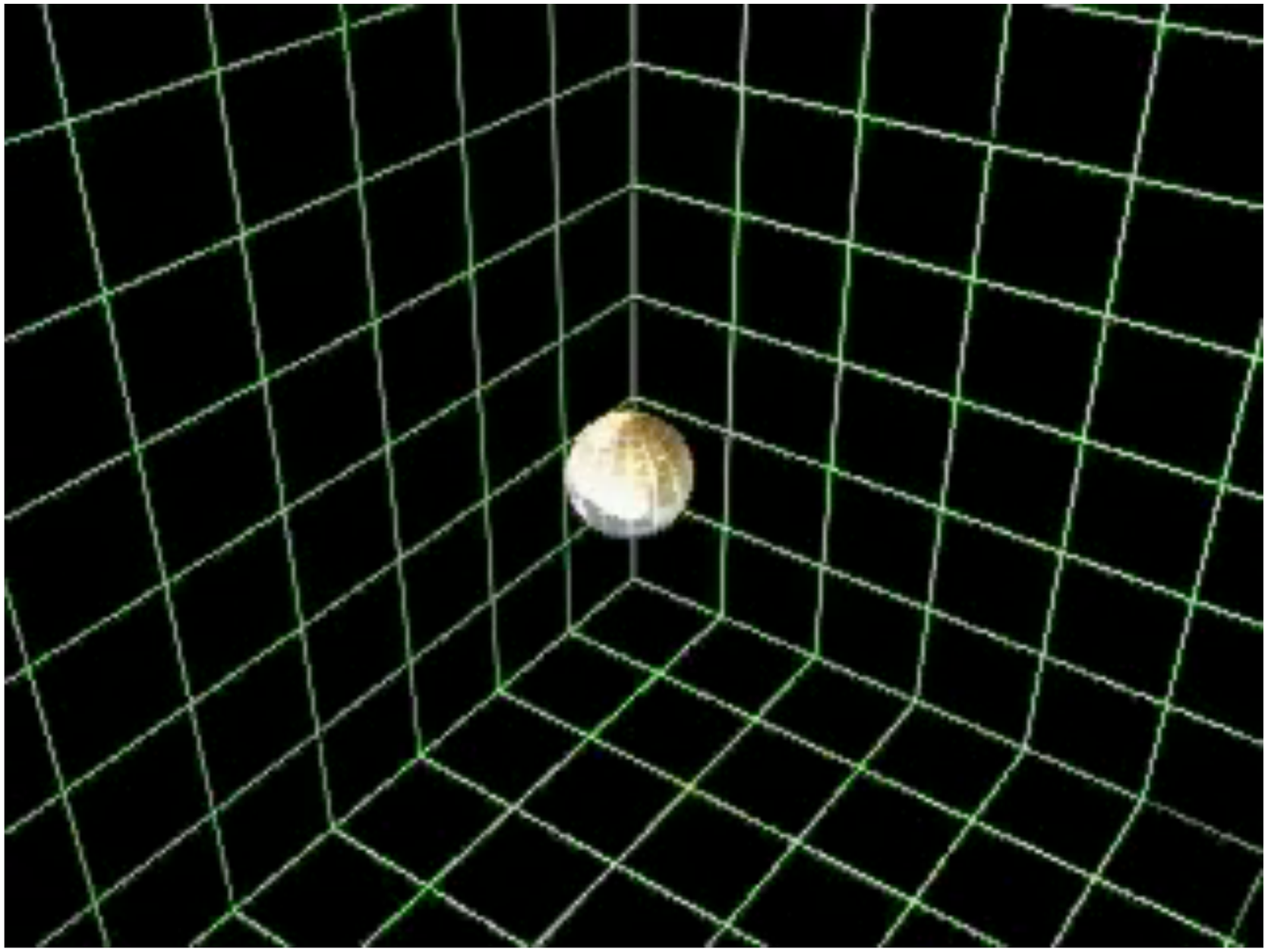




Mesures du CMB attendues avec PLANCK (2010).

QUEL EST L'AVENIR DE NOTRE UNIVERS ?

BIG RIP ?



BIG CRUNCH ?

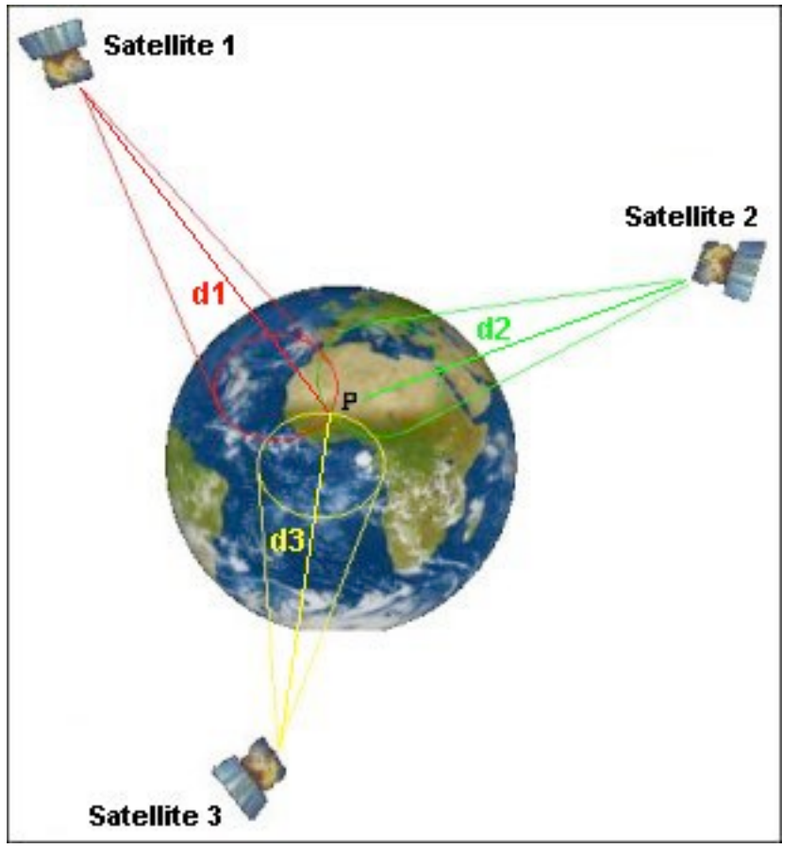
APPLICATIONS DE LA RG

"La chose la plus incompréhensible dans le monde c'est que cela soit compréhensible" A. Einstein

APPLICATIONS DIRECTES

Global Positionnement System (GPS) : à l'aide de **3 satellites** pour la «triangulation». Corrections apportées pour avoir une meilleure précision.

Une interface récepteur GPS classique.



Concept du positionnement global par satellite.

Confirmations :

- Eddington en 1919 : déviations de la lumière d'étoiles.

- Modification de la longueur d'onde du Cobalt (Harvard 1959).

- Ondes gravitationnelles (voir prochaines diapositives).

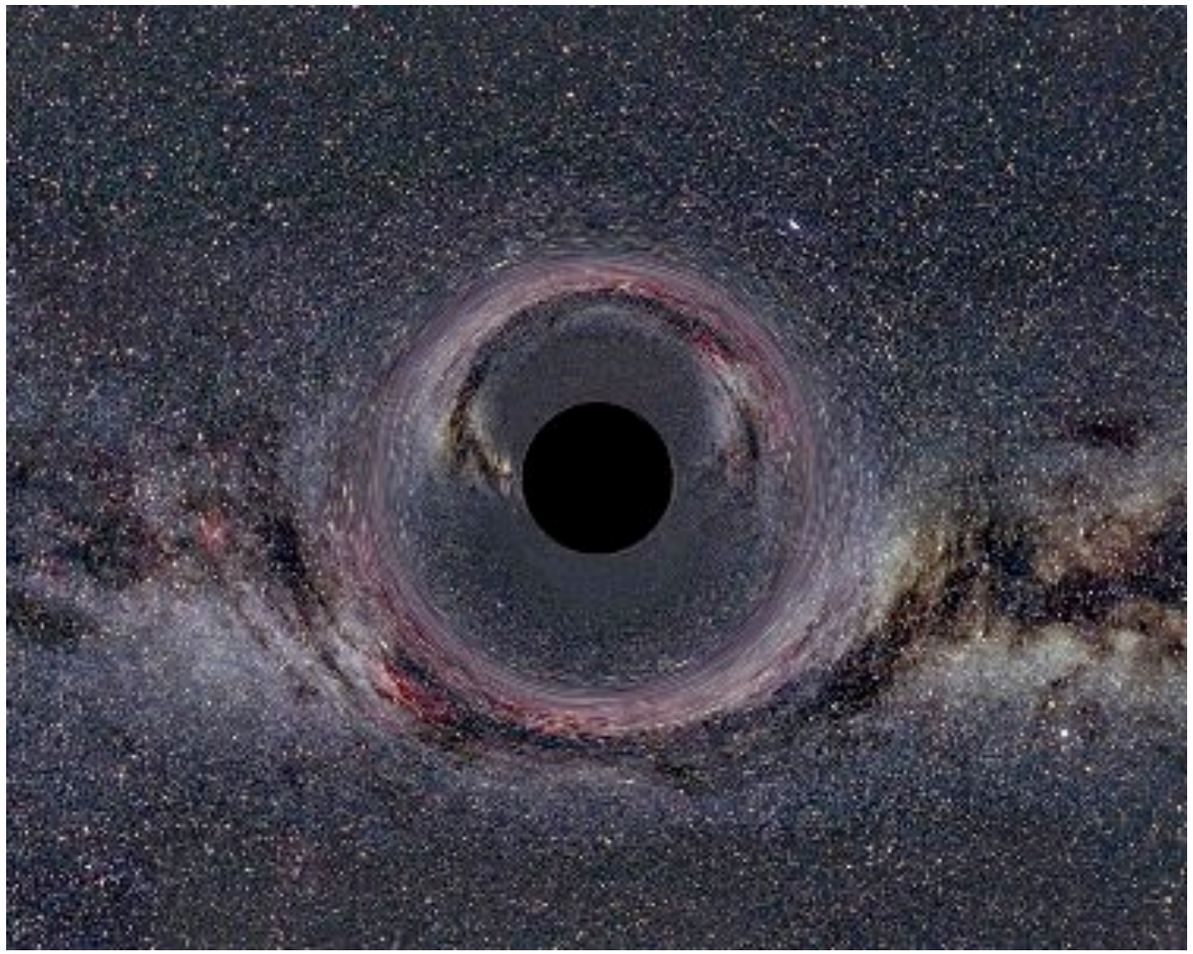
LES TROUS NOIRS

- **Découverte théorique** par Schwarzschild (1916).

- Singularité topologique de la Relativité Générale !

- Des étoiles en fin de vie avec une masse suffisante peuvent créer un trou noir.

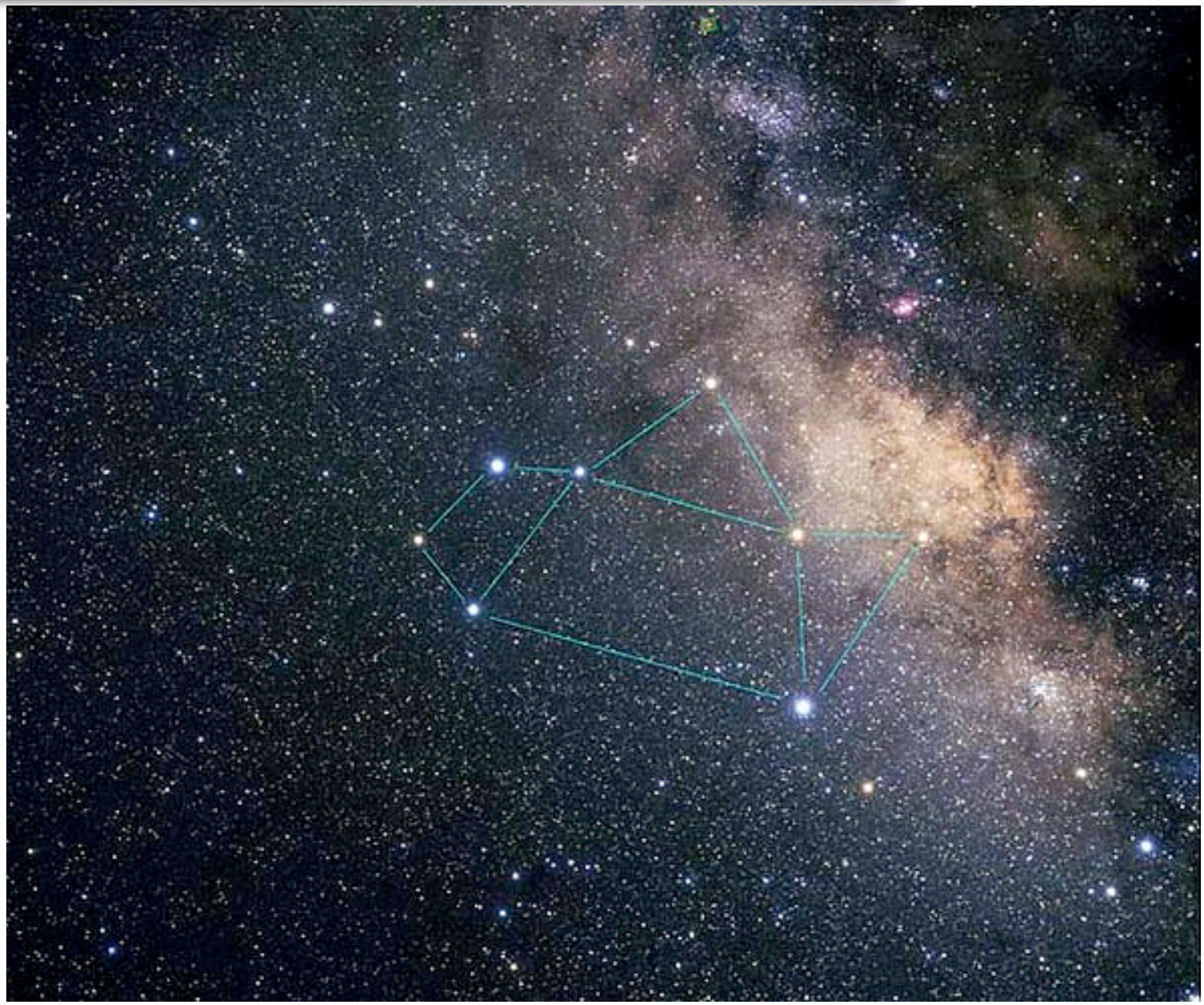
Stephen Hawking a travaillé sur les rayonnements issus des trous noirs.



Simulation numérique d'un trou noir (A. Riazuelo - IAP-Paris).

Le satellite XMM-Newton à la Cité de l'Espace-Toulouse (Vanessa Porchet).

PRENEZ GARDE LORS DE VOS VOYAGES INTERSTELLAIRES !



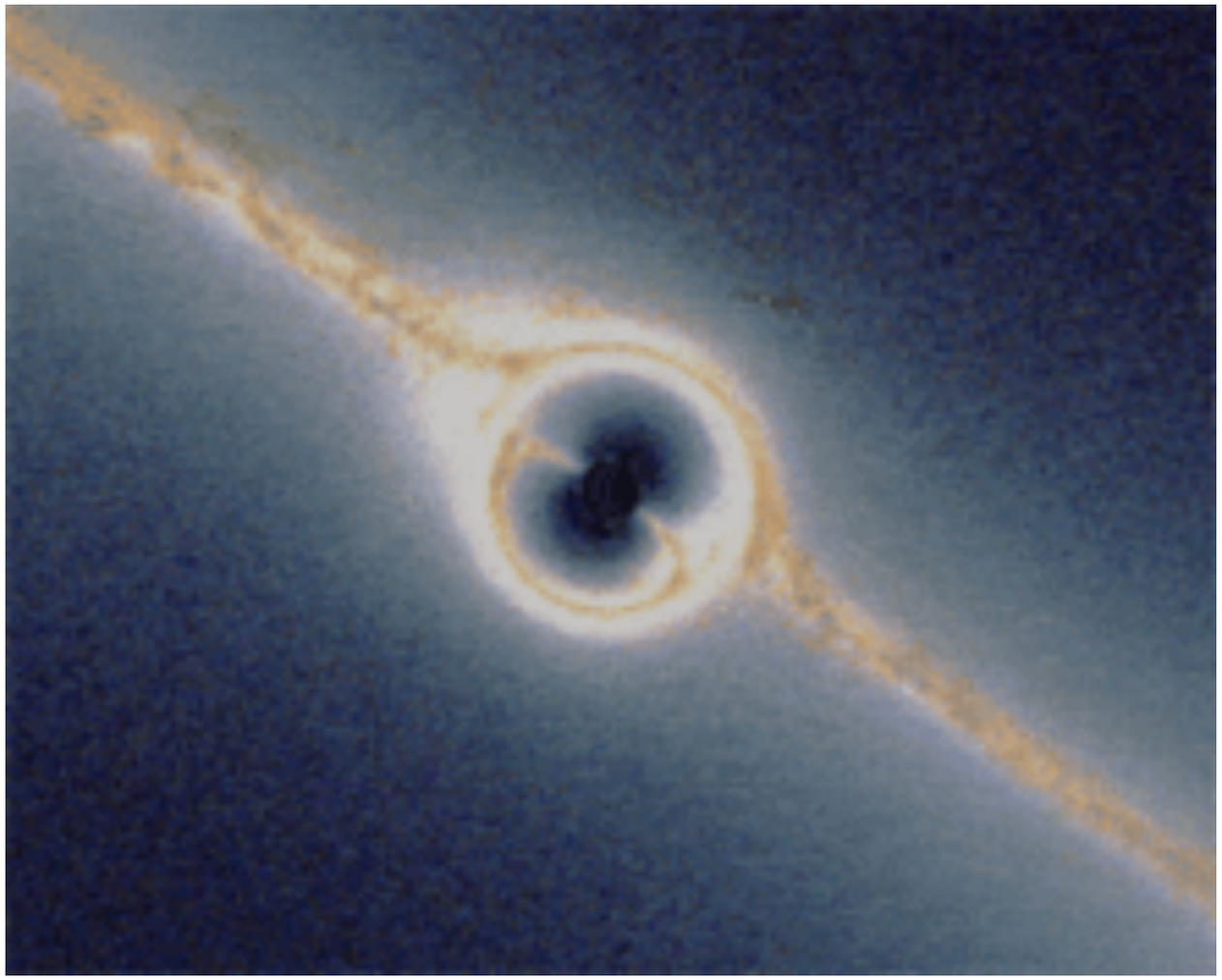
Au centre de notre propre galaxie : Sagittarius A.*

LENTILLES GRAVITATIONNELLES

- La **déviation de la lumière** par la gravité.

- Découvertes dès 1979.

- Utilisées pour la **détection de masse**.



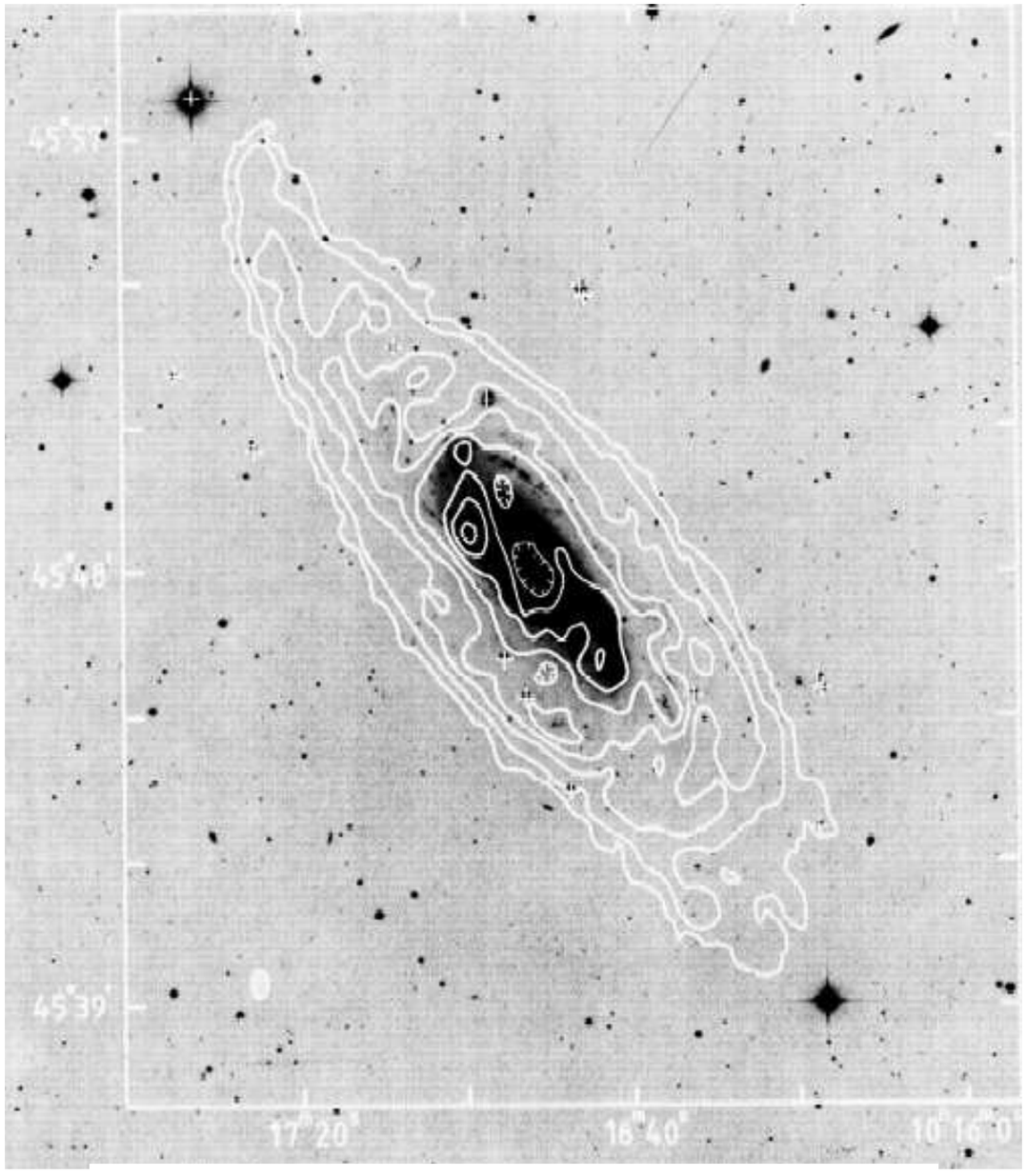
Exemple d'un trou noir en mouvement devant notre galaxie.

Application directe : utiliser pour la détection de masse invisible e.g. **Matière Noire** dans l'Univers !

LENTILLES GRAVITATIONNELLES

E.g. NGC 3198

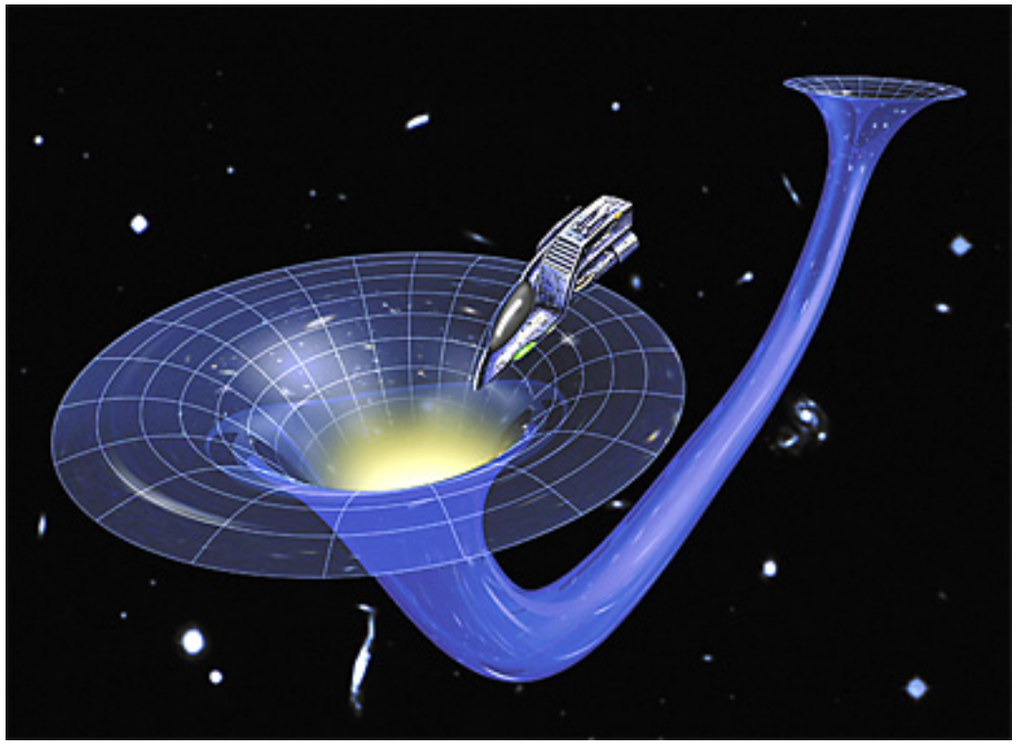
NGC 3198 dans le domaine visible.



Détection de matière noire dans NGC 3198 avec l'émission de raie HI.

Voir les travaux de **Alain Blanchard** (LATT/OMP)

LES TROUS DE VERS



Vue d'artiste d'un trou de vers.

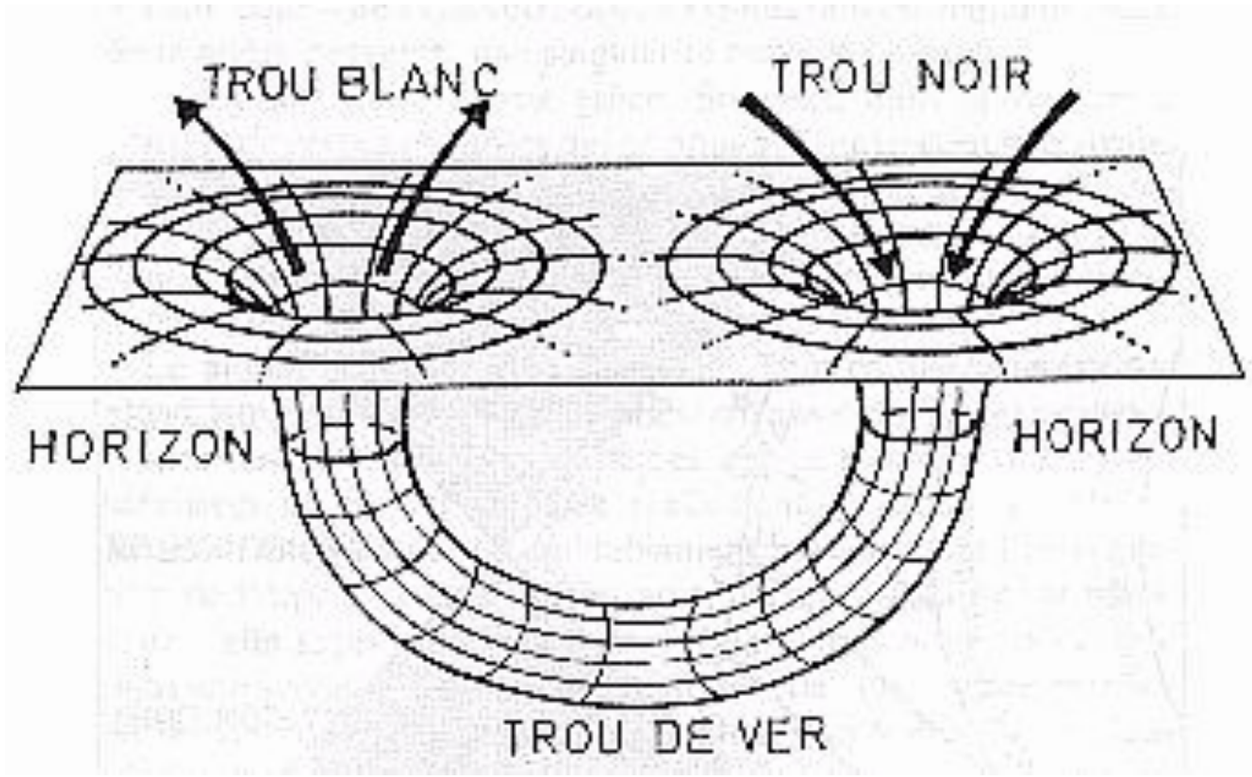


Schéma explicatif de la théorie des trous de vers.

Un voyage dans un trou de vers par la Porte des Etoiles.

ONDES GRAVITATIONNELLES

Ondes Gravitationnelles = perturbations de l'espace-temps.

- Première découverte INDIRECTE en 1974 par Hulse & Taylor (obervation d'une étoile binaire).

→ A chaque moment, vos distances et vos temps sont modifiés par des ondes d'amplitude négligeable.

- Peuvent-être émises par des étoiles en fin de vie créant un trou noir !

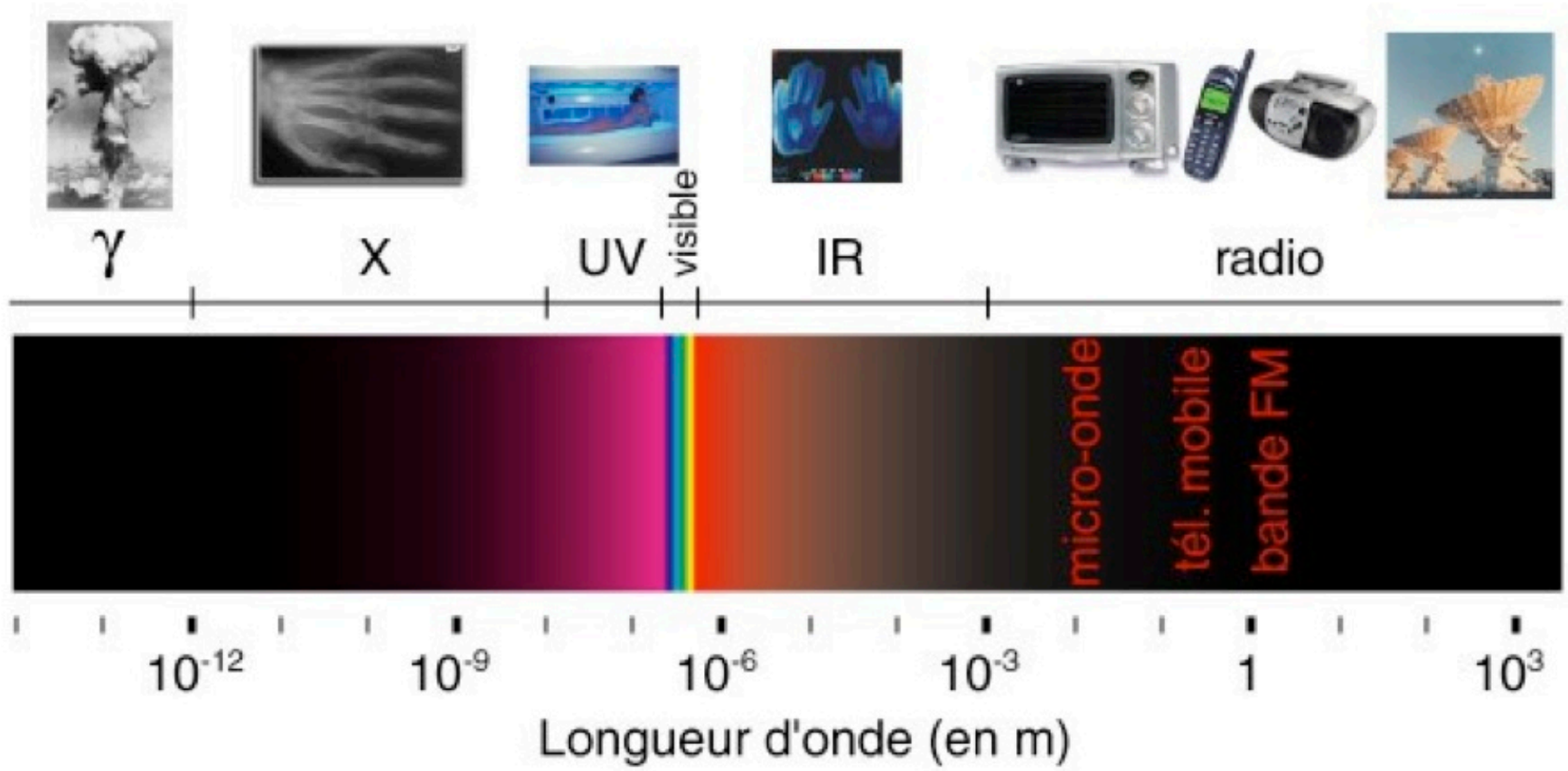
- Nécessité de faire des mesures très précises à l'aide de puissants intérféromètres (e.g. projet VIRGO, Italie).

Interféromètre italien VIRGO.

PREMIERE APPLICATION : OBSERVATION DES GALAXIES

Travaux de 2009 avec
Fabrice Lamareille (LATT/OMP).

La Spectroscopie ? : ou comment analyser la lumière émise par les astres pour étudier leurs propriétés.



Loi de Wien (modèle du corps noir) :

$$\lambda.T = 2898 \times 10^{-6} m.K$$

Quantum d'énergie (Einstein 1905) :

$$E = h \cdot \nu$$

UTILISATION DU VERY LARGE TELESCOPE (VLT)

But de ces études : calculer le décalage spectral en provenance de ces objets lointains.

DONNEES UTILISEES POUR L'ETUDE

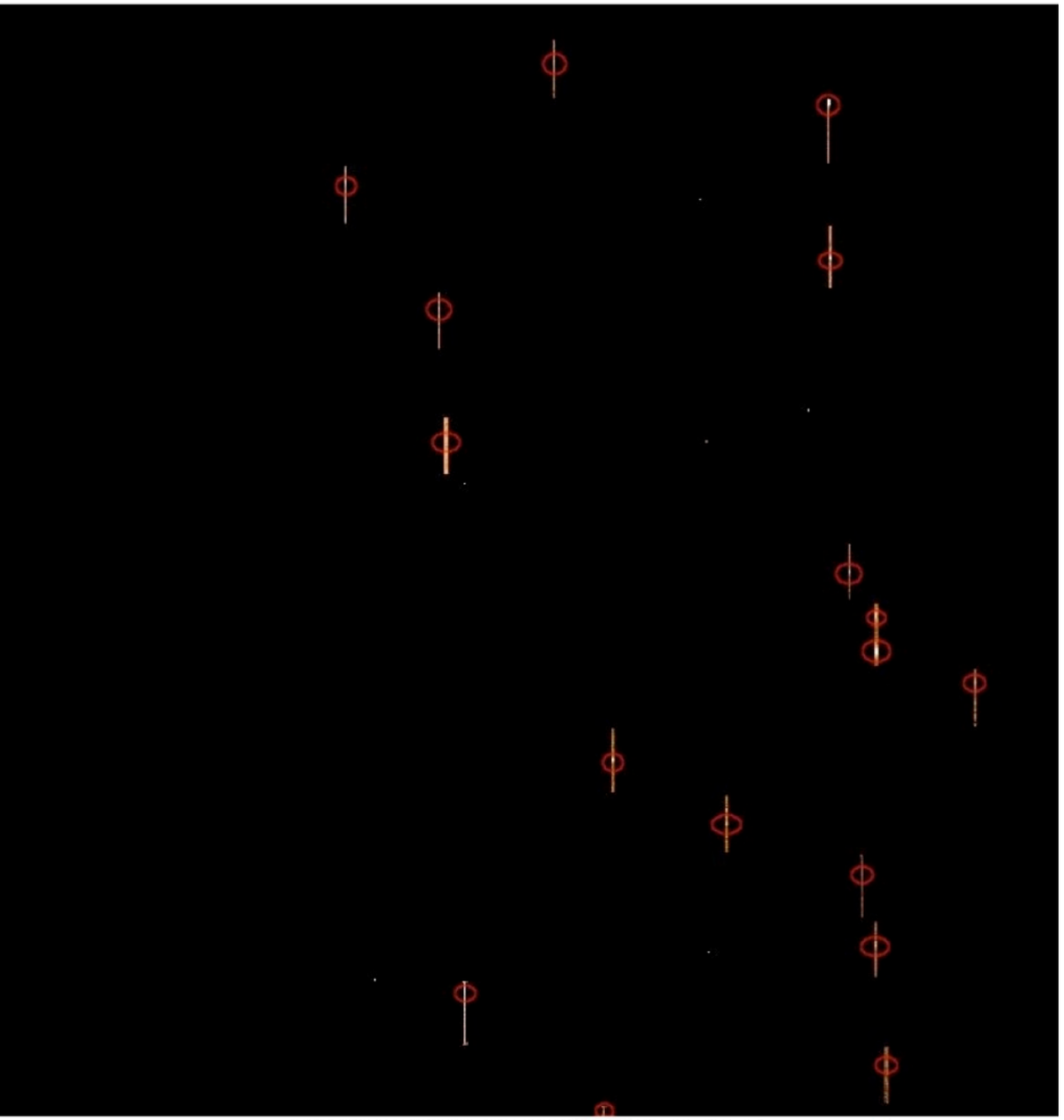


Image des fentes du masque (masque F22g)

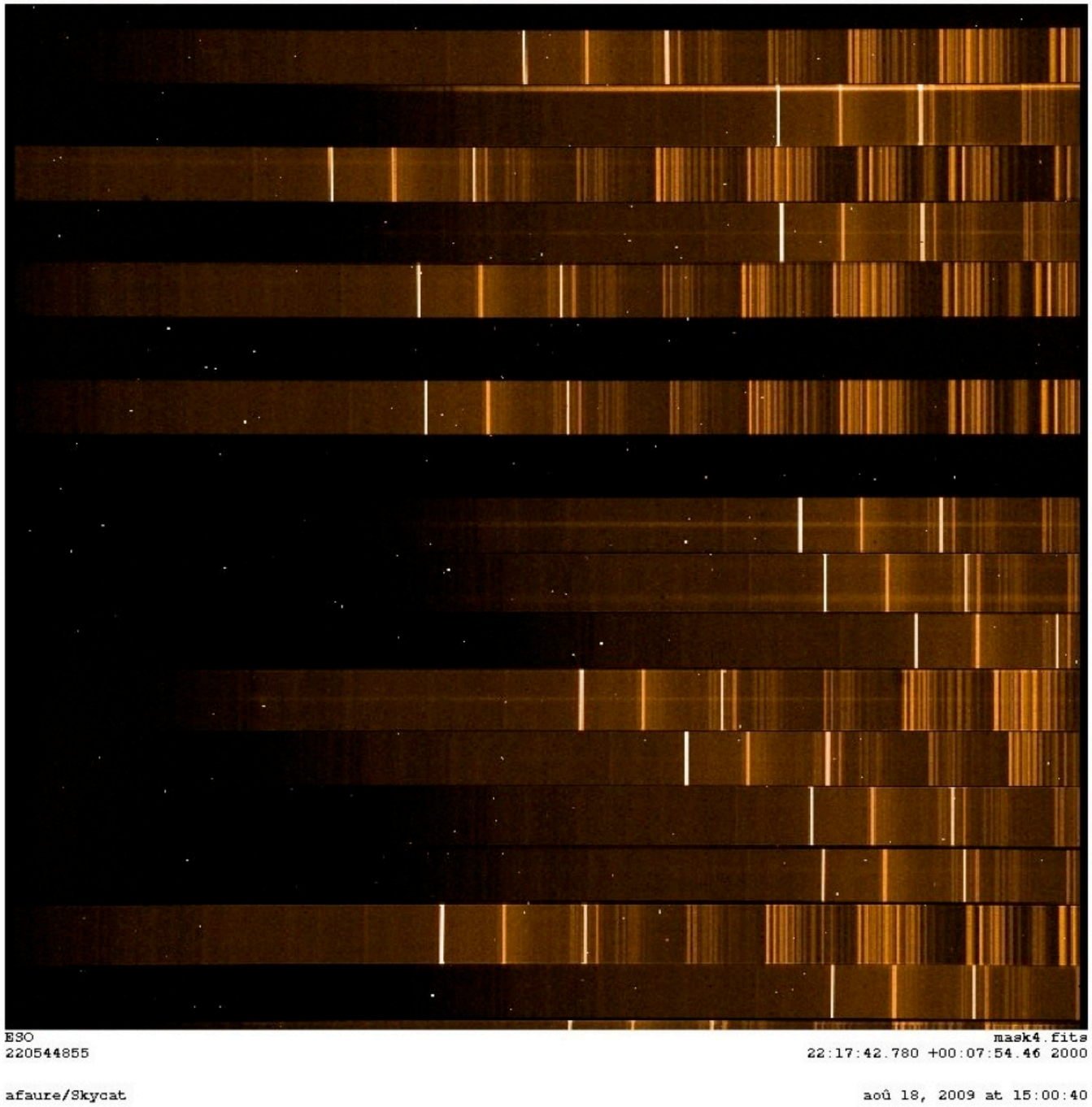
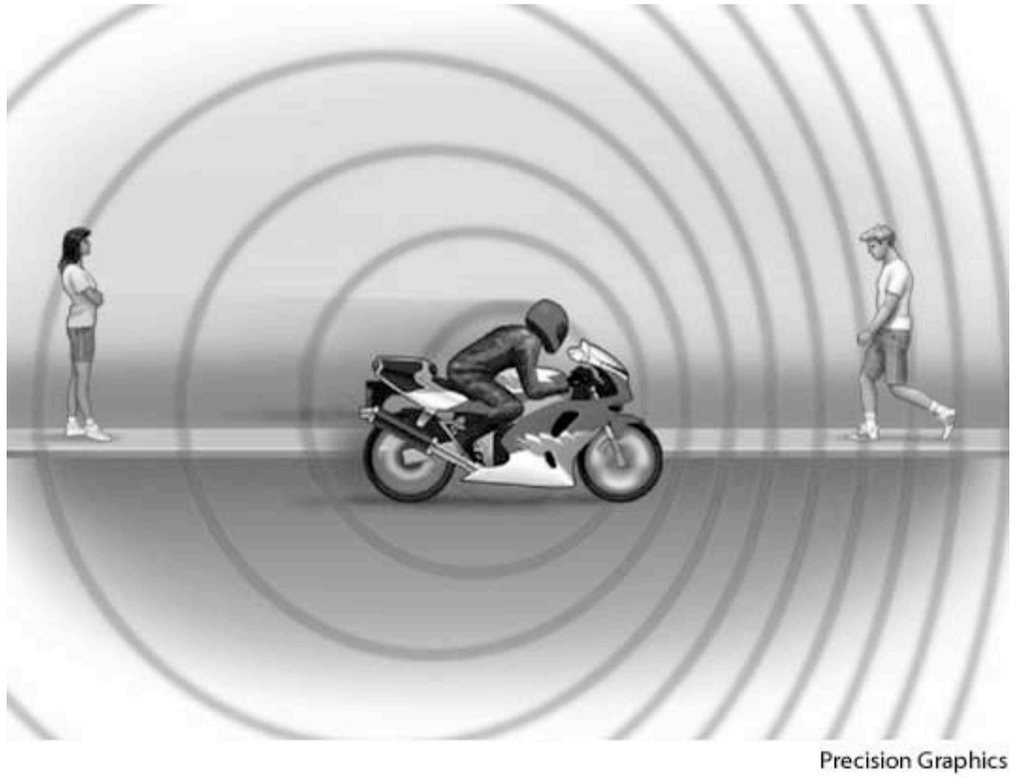


Image du masque à la sortie du grisme

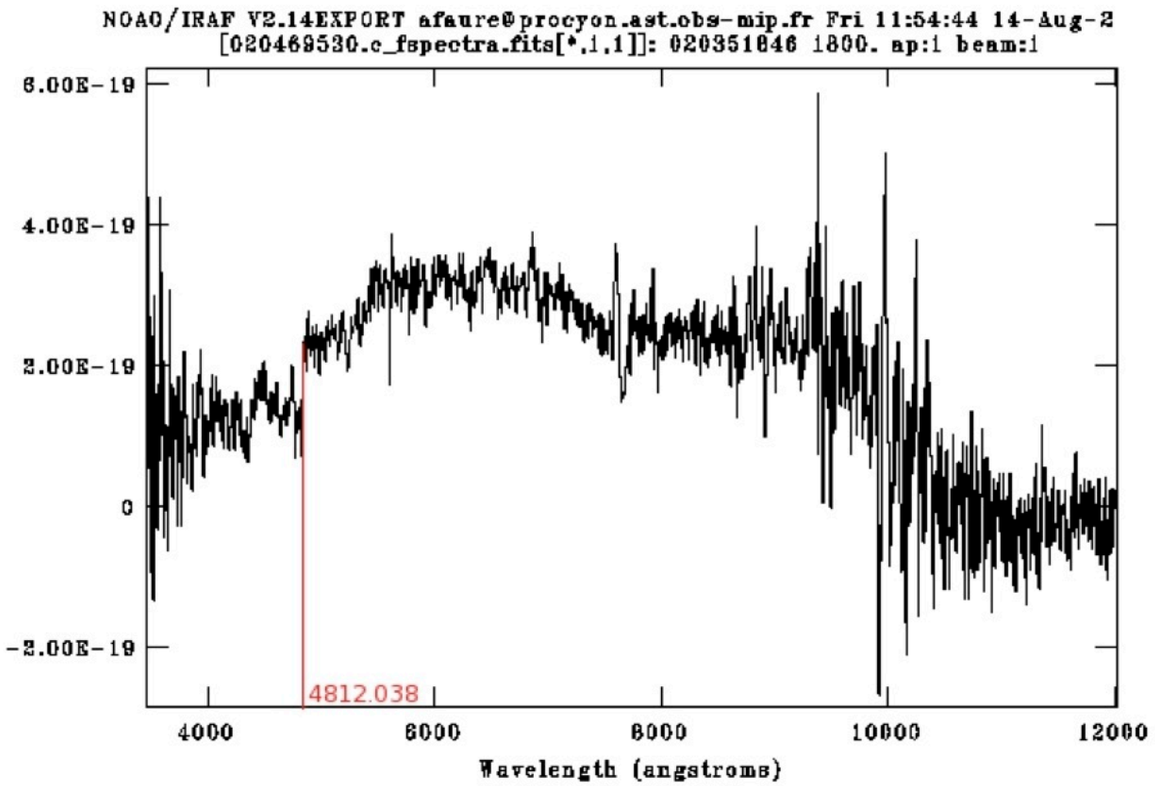
QU'EST-CE QUE LE DECALAGE DOPPLER ?



Effet Doppler sonore

Effet Doppler «visuel»

CALCUL DU REDSHIFT



020469530 galaxy spectrum with the shifted break.

Calcul d'une grandeur appelée «redshift», notée Z :

$$z = \frac{4812{,}038 - 3969}{3969} = 0{,}2124$$

(1ères mesures VIMOS : z =1,3941)

Z + formalisme de Relativité Générale :

$$D = \frac{2 \times 299\,792\,458}{2{,}4 \times 10^{-18}} \times \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+0{,}2124}}\right) = 2{,}2936 \times 10^{25}\, m = 2{,}4244 \times 10^{9}\, al$$

→ Vitesse de la galaxie obtenue grâce à la constante de Hubble.

CONCLUSION

- Expérience VLT + prisme = spectre des objets galactiques.
- Processus de traitement et correction des spectres.
- Calcul du redshift à partir du spectre obtenu par rapport au spectre théoriqe $\longrightarrow Z$

Andromeda galaxy M31 (NASA).

DEUXIEME APPLICATION : L'ANOMALIE PIONEER

Travaux de 2010 avec
Dominique Toublanc (CESR/OMP).

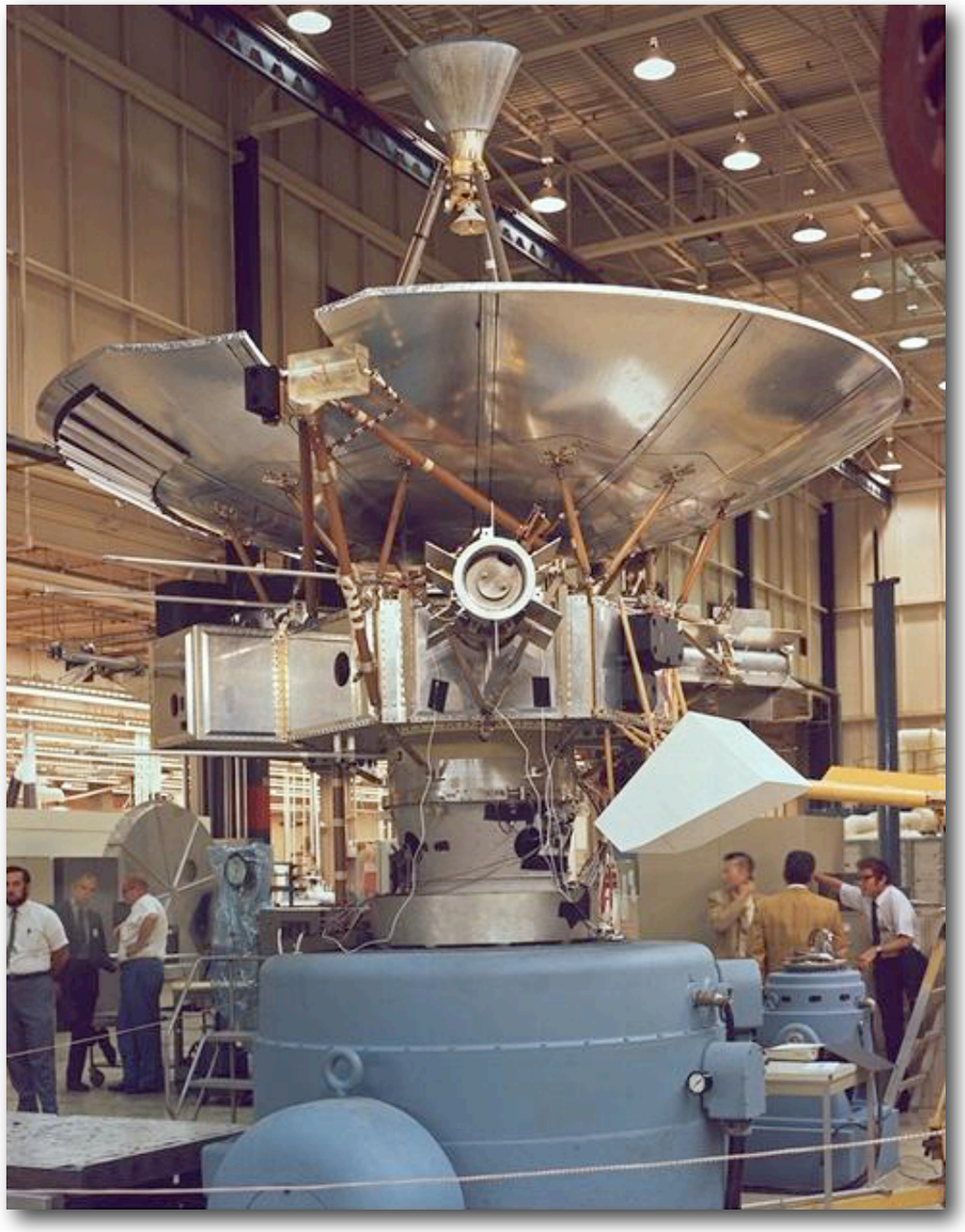
- Pionnières de l'exploration spatiale, envoyées par la NASA en 1972 (P10) et 1973 (P11). Ce sont les sondes les plus lointaines jamais envoyées (15 milliards de km en 2010).

- But commun : études de Jupiter et Saturne.

Anomalie détectée : très faible accélération inexplicable !

$$a_p = (8.74 \pm 1.33) \times 10^{-10}\ m.s^{-2}$$

Source : (Anderson et al., 1998, 2002a)

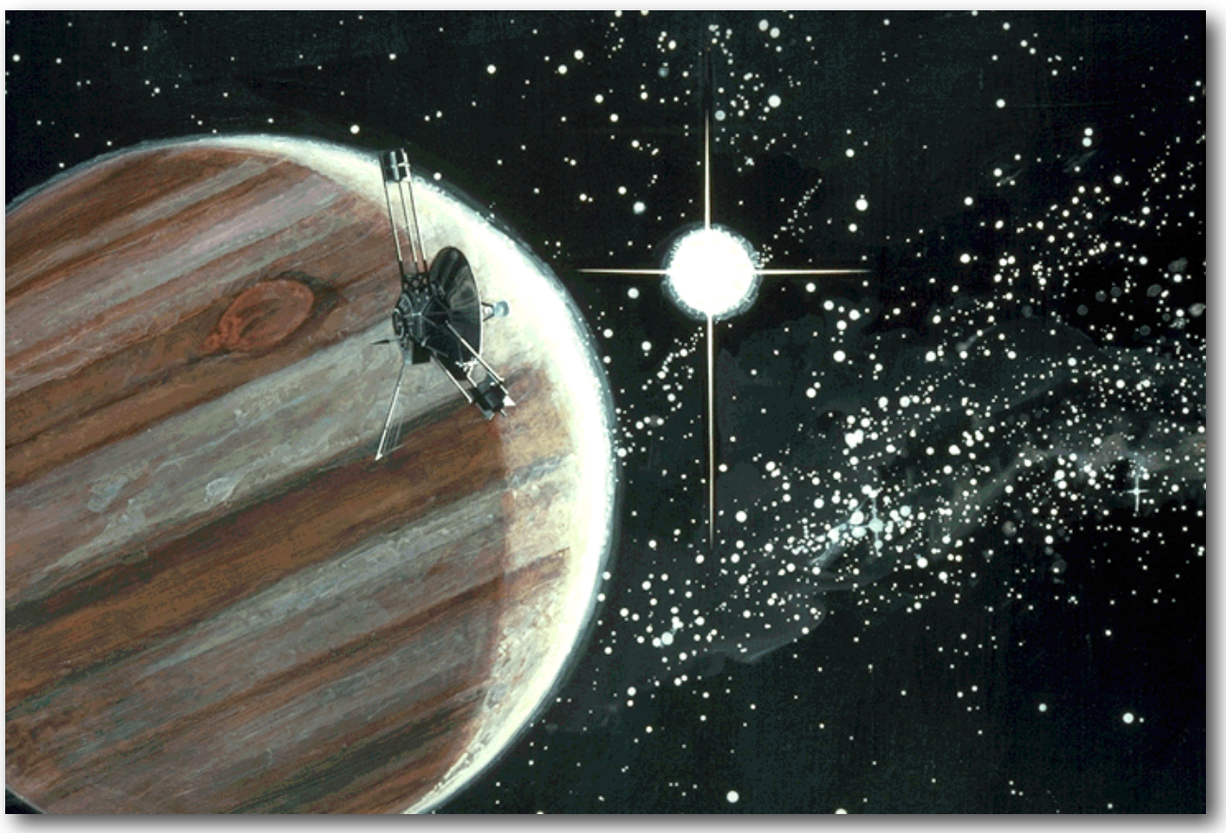


Construction de la sonde P10 en 1971.

ET SI EINSTEIN AVAIT TORD ?

Toutes les causes d'ingénierie évoquées n'ont pas réussi à expliquer cette accélération anormale.
Pourquoi ?

→ Quel est le rôle de la **constante cosmologique** Λ ?



Vue d'artiste d'une sonde Pioneer approchant Jupiter.

Lancement des sondes et programme spatial.

AUTRES PISTES DE RECHERCHE ?

- Ré-évaluation de la constante cosmologique ?
- Prise en compte de l'érosion des matériaux ? (Turyshev, juin 2010, Toulouse)
- Revoir totalement la gravitation ?
- Influence de la matière noire ou l'énergie noire ?
- Nouvelles analyses de données (cf. données en provenance de la NASA, juin 2010) ?

NOUVELLES AVRIL 2011

- Explication plausible : la TRP ou Pression de Radiation Thermique qui expliquerait les anomalies d'accélérations et d'orbites observées ...

Dommage !

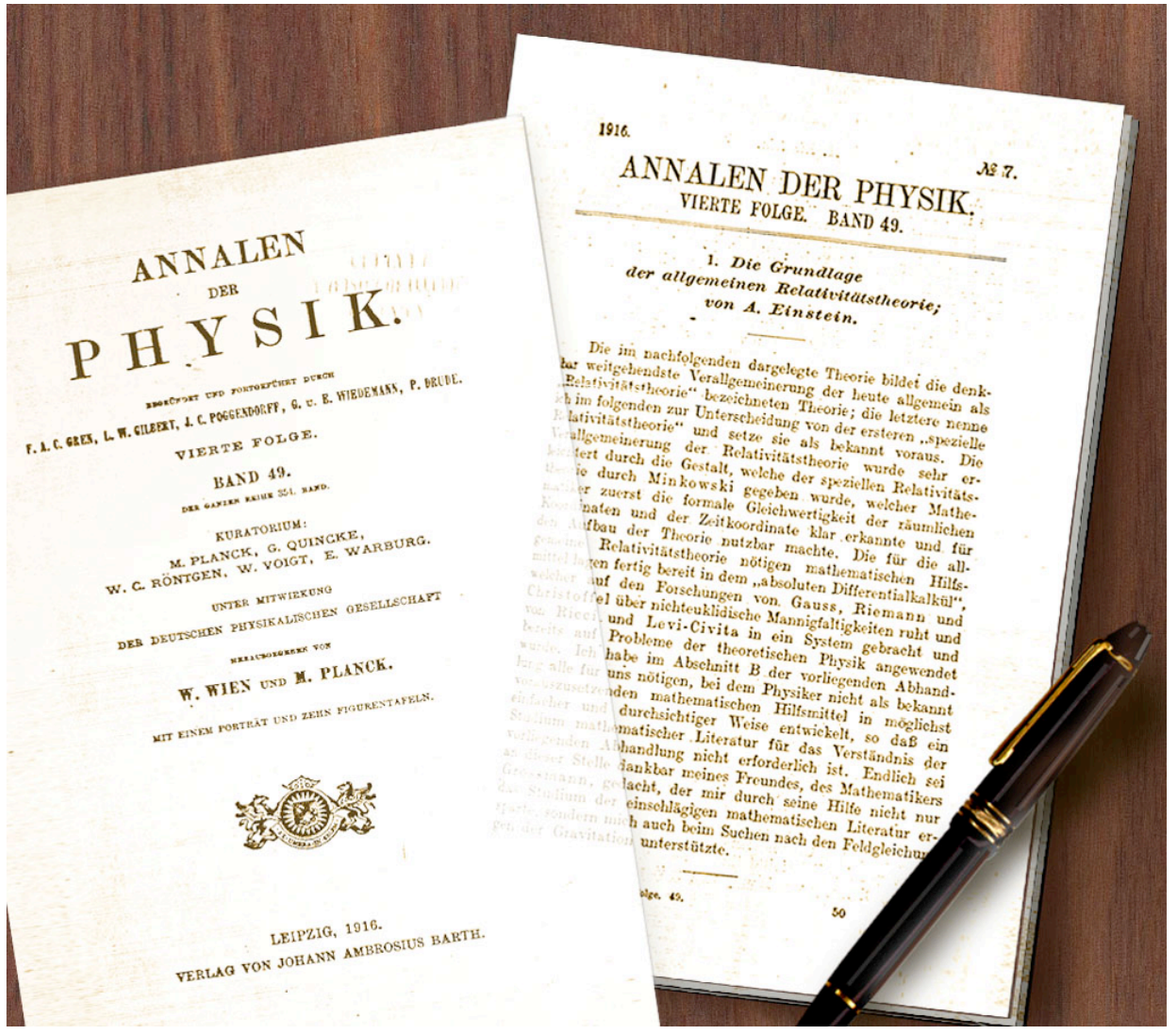
RESUME ET OUVERTURES

"L'imagination est bien plus importante que la connaissance." A. Einstein

CE QU'IL FAUT RETENIR

- **L'Espace et le Temps sont courbés par l'énergie** = explication directe de la mécanique planétaire & galactique.

- **c est la vitesse de la lumière invariante** dans le vide **quelque soit le mouvement de l'observateur**.



Papier original de la relativité générale publié dans la prestigieuse revue Annalen der Physik, 1915.

ET LA PHYSIQUE QUANTIQUE ?

- La Théorie Quantique des Champs (i.e. théorie des particules élémentaires) utilise un espace plat, de Minkowski. Que dire alors pour un espace-temps courbé ?

- Problème persistant : **comment traiter les singularités ?**

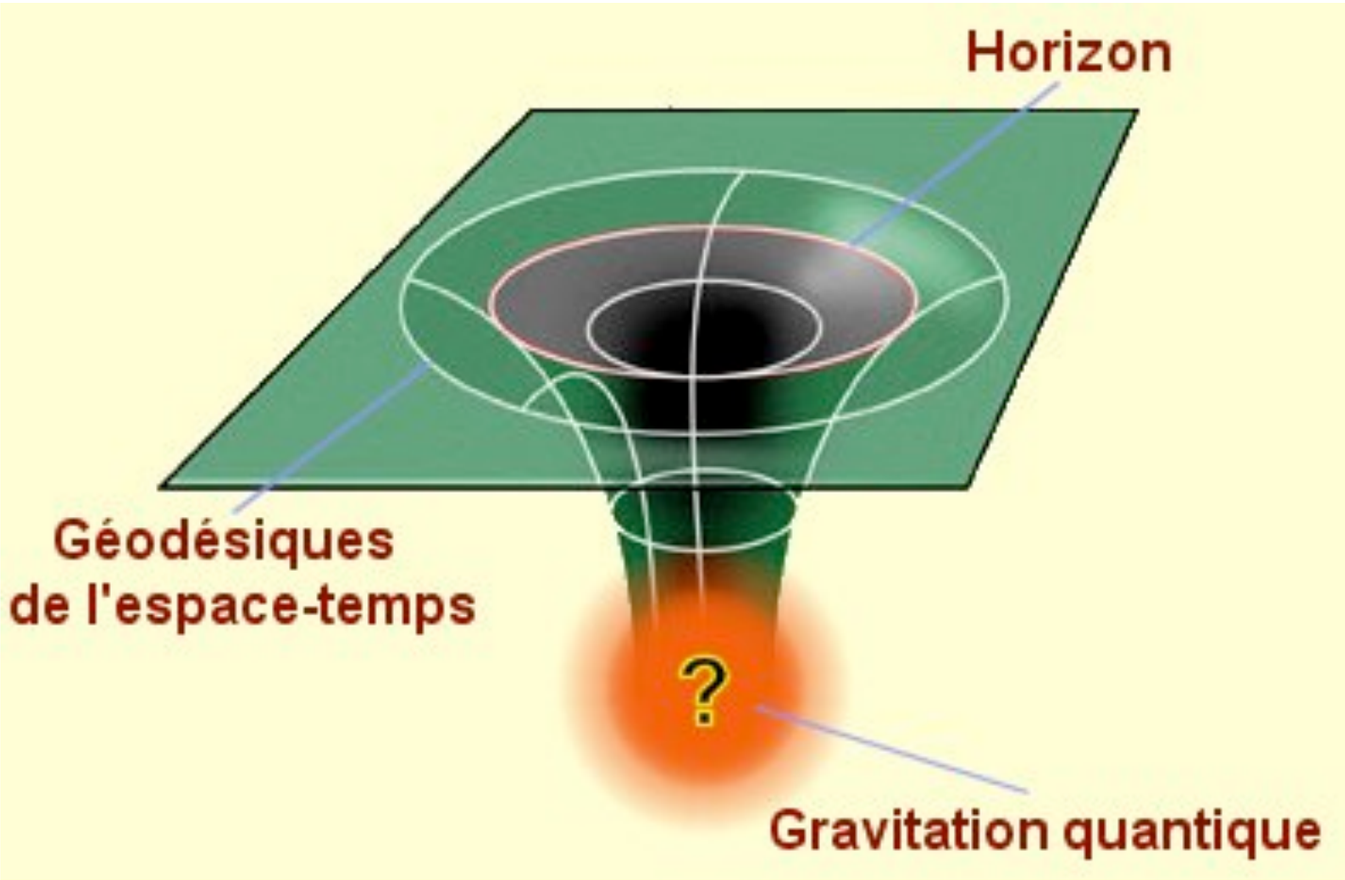
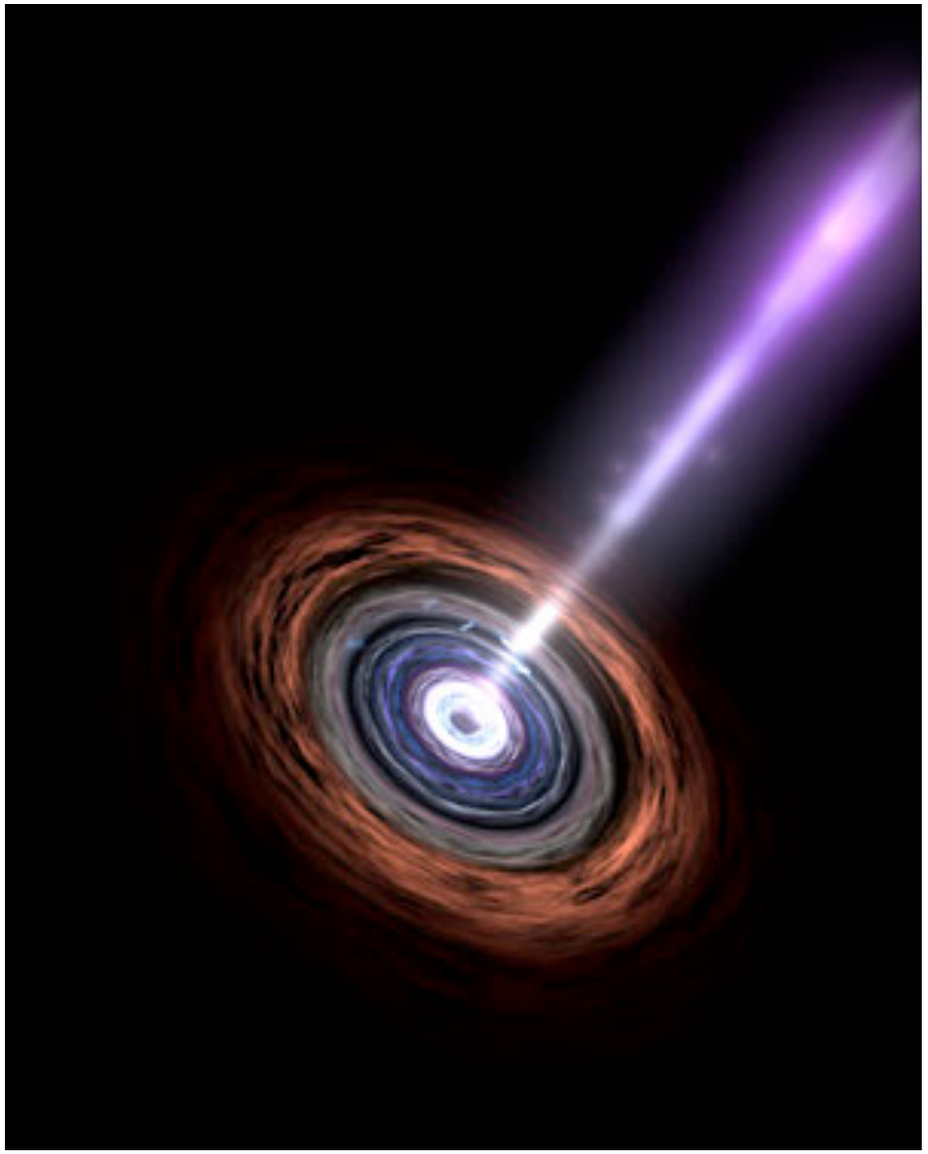


Schéma d'un trou noir et les différentes zones associées, dont celle de la singularité.



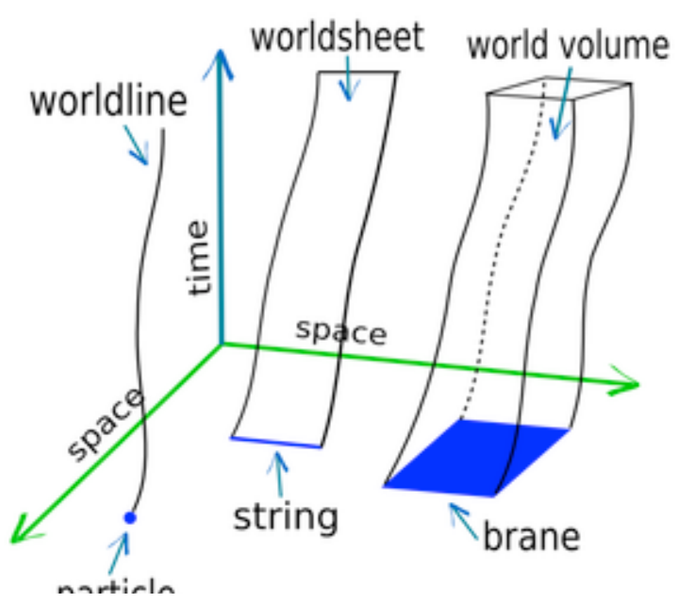
Vue d'artiste de la radiation émise par un trou noir (i.e. processus de création de paire e+ e-).

NOUVELLES THEORIES DE LA GRAVITE QUANTIQUE

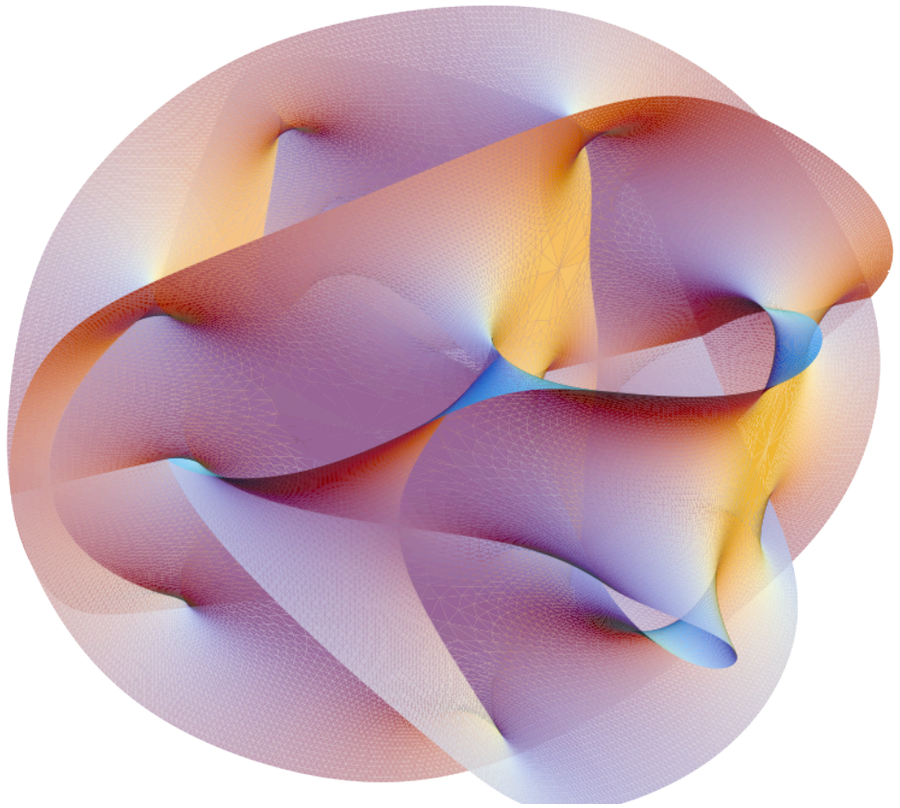
- **Théorie des Cordes** : l'une des théories les plus élégantes du siècle. Chaque particule peut-être décrite par une corde a une dimension.

- **Gravité Quantique à Boucle** : théorie quantique de l'espace-temps en décrivant l'espace-temps comme un réseau de boucles quantiques de champ gravitationnel excité.

- **M-Theory (i.e. la Théorie du Tout)** : une extension de la théorie des cordes qui prévoit jusqu'à 12 dimensions.



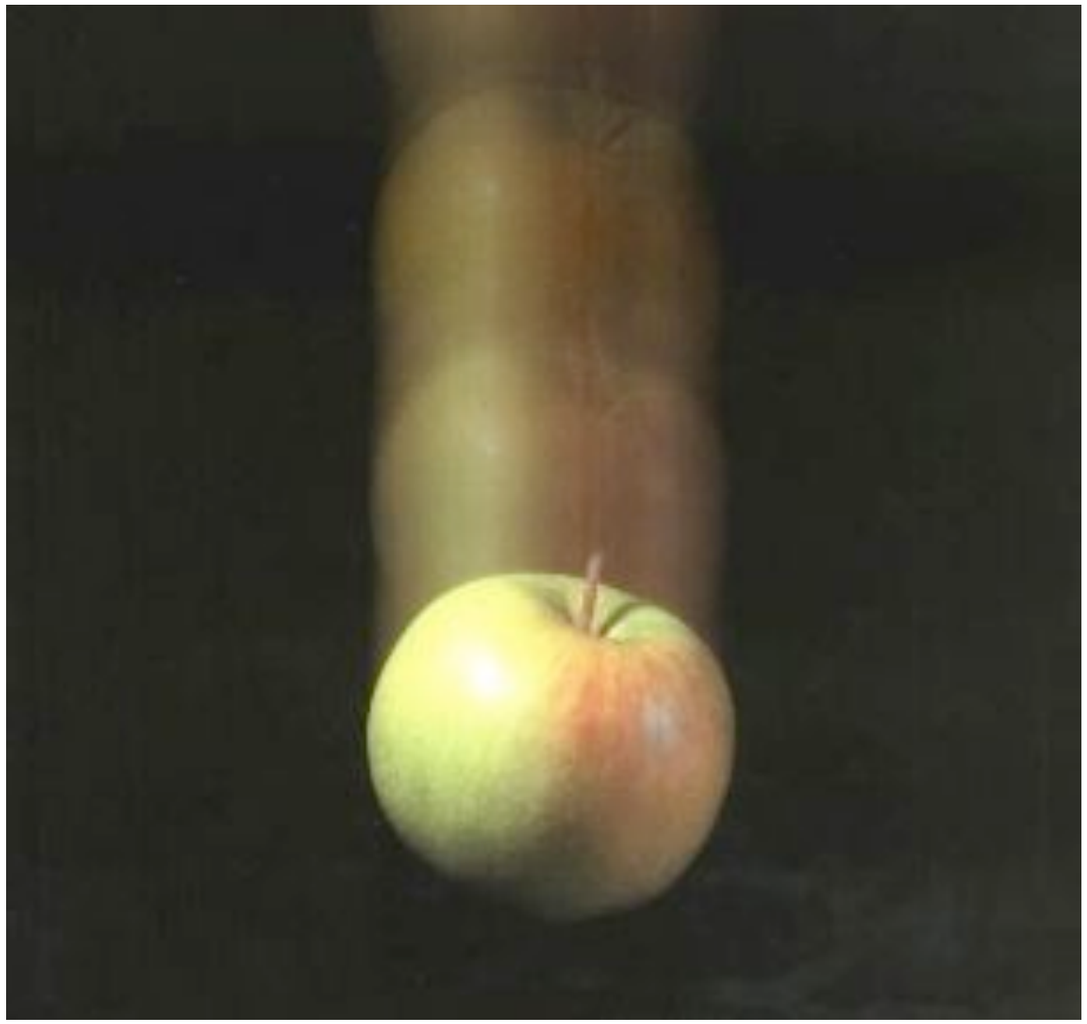
Représentations d'une ligne d'Univers, corde et brane.



La variété topologique de Calabi-Yau. Représentation possible pour nos théories multi-dimensionnelles.

MAIS UN PROBLEME MAJEUR SUBSISTE ...

⟶ Aucun test expérimental pour ces théories en 2011 !

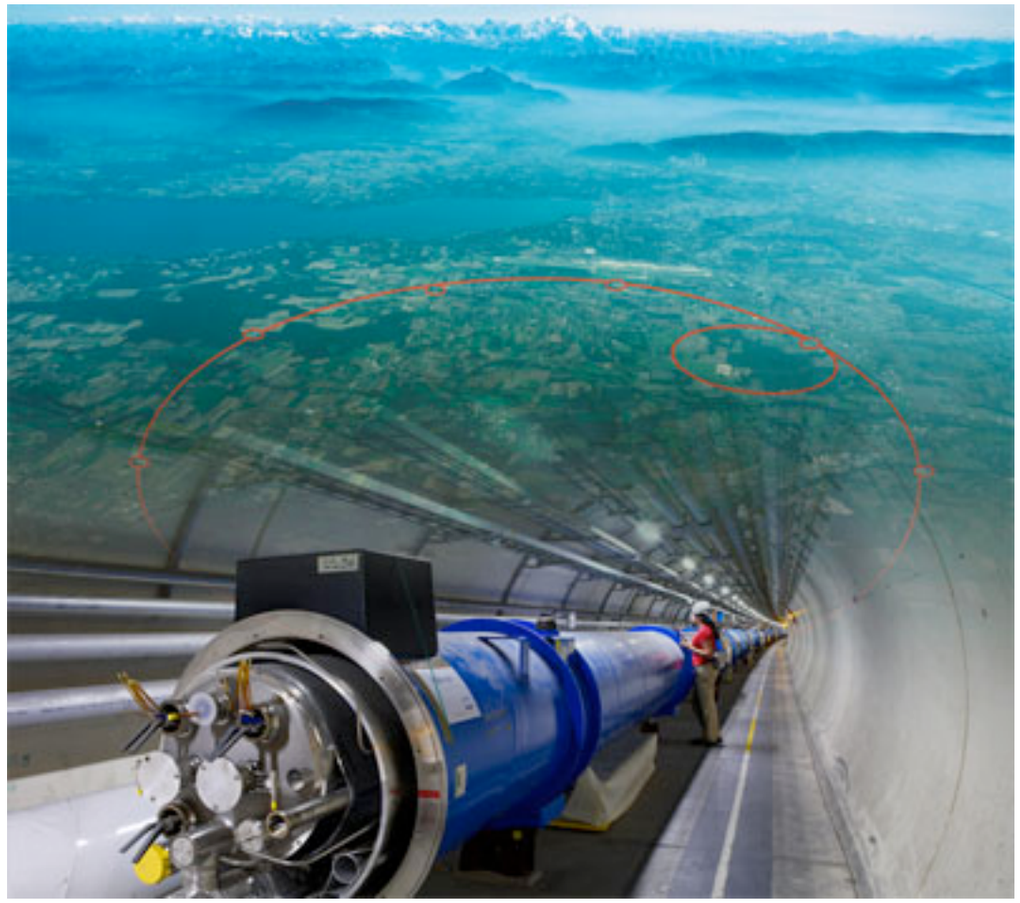


Aucun test physiques n'a apporté la moindre preuve à ces théories exotiques de la physique ...

L'AVENIR DE CES NOUVELLES THEORIES

La création de l'état physique lors du Big Bang !

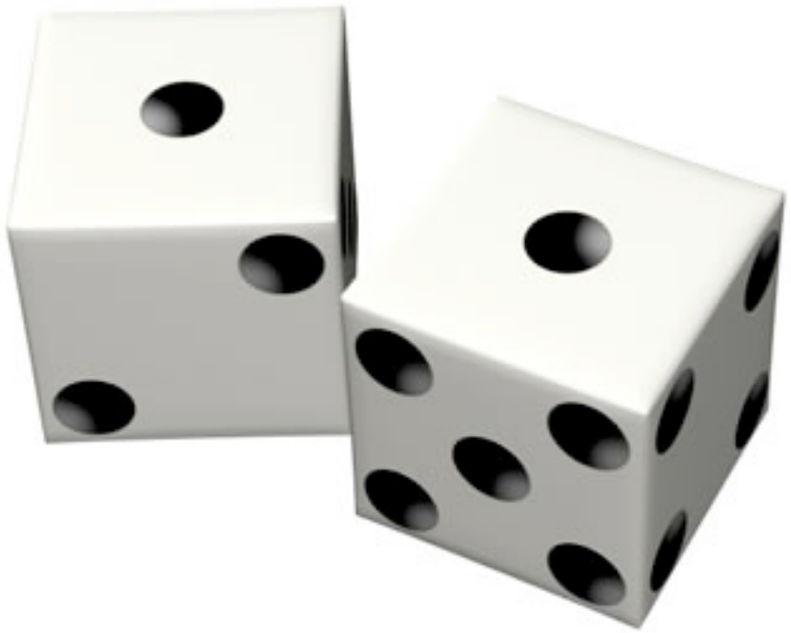
L'accélérateur TeVatron (Fermilab) d'une circonférence de 6 km situé près de Chicago, USA.

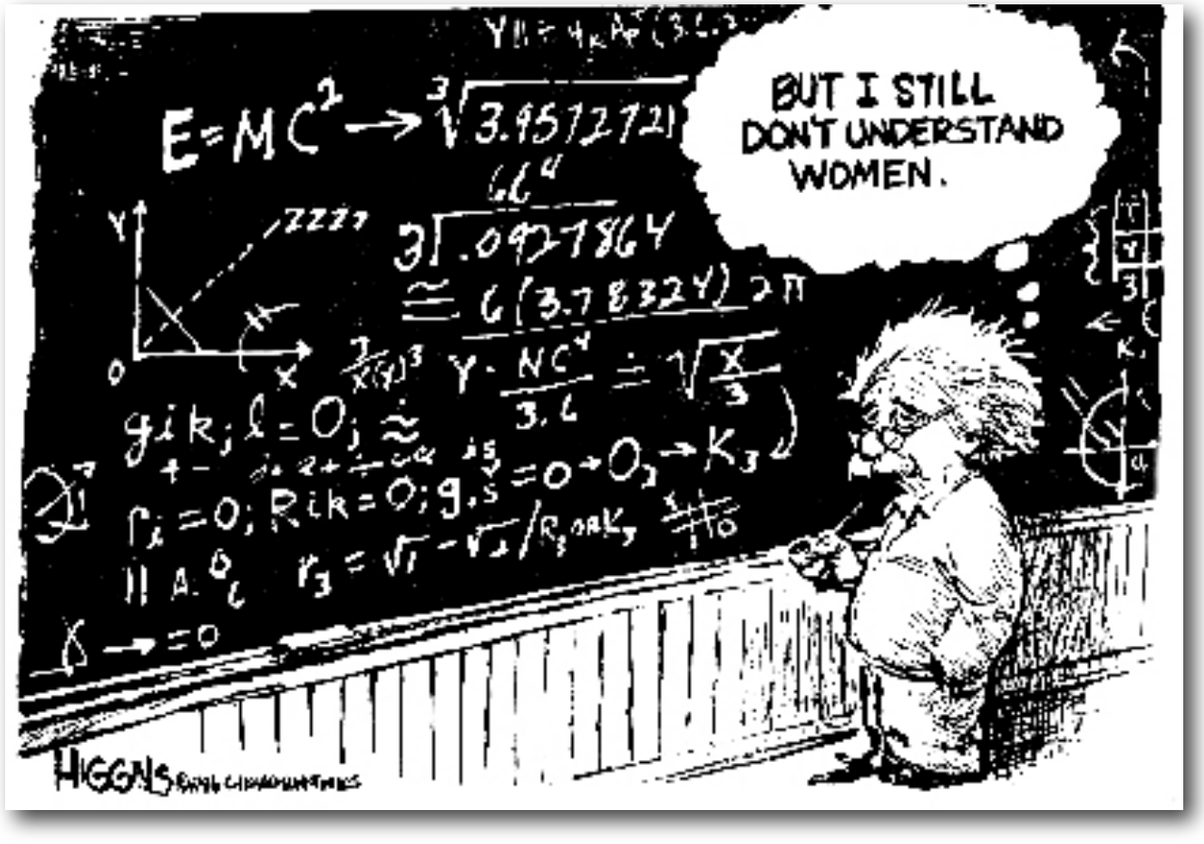


L'accélérateur LHC (CERN) d'une circonférence de 27km, à cheval entre la France et la Suisse.

Dieu ne joue pas seulement aux dès, il lance aussi parfois les dès là où on ne peut les voir.

Stephen Hawking





Merci pour votre attention

et plus particulièrement à Sandra Henry-Baudot (CDE), Sébastien Vauclair (Cosmodiff), D&M Rieugnié (Pixel&Cassoulet), Jean-Marc Faure et Olivier Marty (3AF) + comité scientifique : Simon Bonnefoy et Michael Ughetto (Montpellier II).

Alexandre FAURE

M2 Cosmos, Champs et Particules

Commissariat à l'Energie Atomique CEA Saclay

alexandre.faure@cea.fr