

# Pendules et Espace-Temps



## Ch1. Le moment Galilée

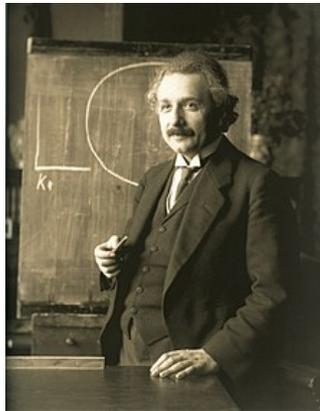
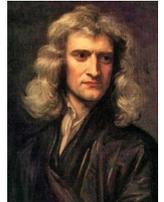
- “découverte” de l’isochronisme
- le temps “*absolu, mathématique et vrai*”

## Ch2. La Terre, pas si ronde mais bien agitée

- les arpenteurs du globe
- Foucault au Panthéon

## Ch3. Pendule de Newton et Hooke

- cinq boules diaboliques
- la flèche du temps: Loschmidt vs Boltzmann
- chaos dans les pendules (et ailleurs)



## Ch4. Et le tic-tac devint quantique

- du pendule de lumière au temps local
- horloges atomiques et radioactives

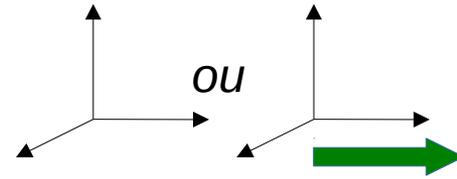
# Résumé des saisons précédentes:

1610



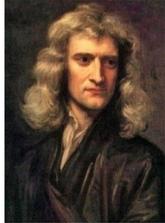
Isochronisme +

PRINCIPE de RELATIVITE



= même physique !

1680



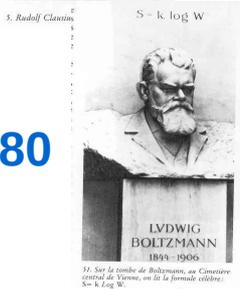
Espace absolu et TEMPS “*absolu, mathématique et vrai*”

1850



l'ENTROPIE ne peut QUE croître...(au cours du temps)

1880

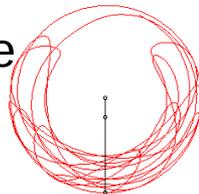


FLECHE du TEMPS = illusion probabiliste

1900



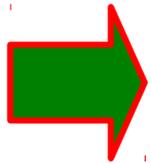
“Chaos déterministe” pour TOUT système dynamique  
→ le futur est **IMPREDICTIBLE** *par essence*



# Et la lumière dans tout ça ?



**1680** : Römer, jeune astronome (en post-doc à Paris) démontre que la lumière met 30 minutes à faire le trajet Jupiter → Terre



n'est ***pas infinie***

(pire: la lumière est même très *lente* à l'échelle du cosmos !)

Royale lenteur !!

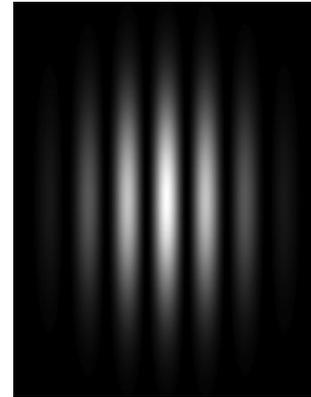


# Et la lumière dans tout ça ?

**1680** : Römer, jeune astronome (en post-doc à Paris) démontre que que la lumière prend tout son temps à faire Jupiter → Terre  
⇒ ⇒ **"c" est finie !** (et même pas si rapide...)



**1820** : Fresnel et Young démontrent, expériences à l'appui, que **lumière = ONDE**



**1873** : J.C.Maxwell unifie tous les phénomènes suivants {**électricité, magnétisme, lumière, ondes radio...**} dans un formalisme unique et très élégant.

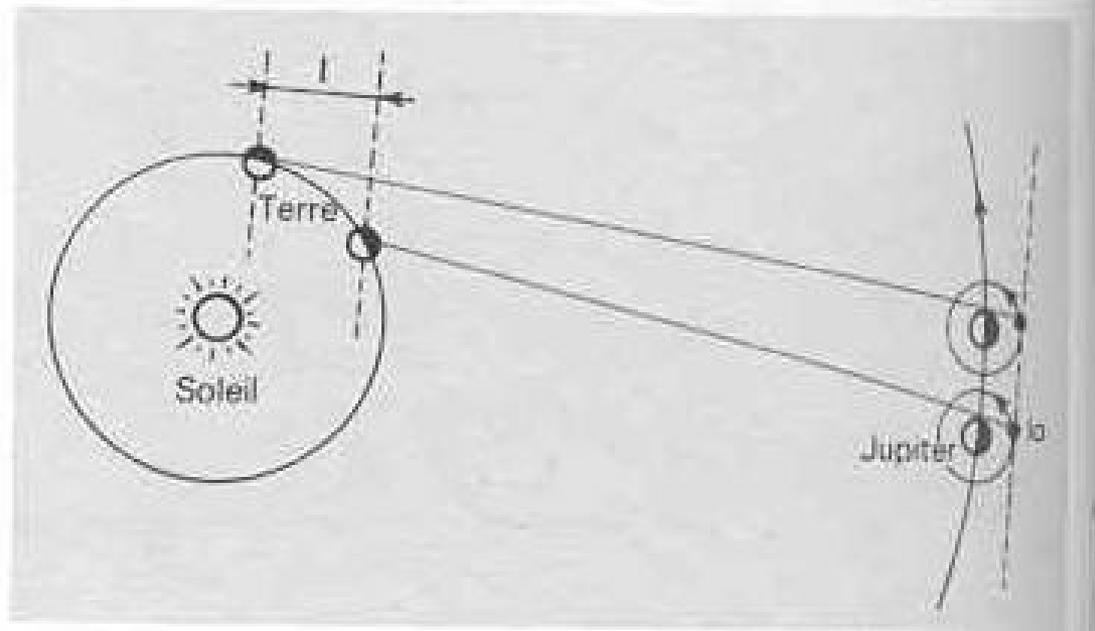
(+ efficacité technique ! Débuts de l'industrie électrique, bientôt la radio...)



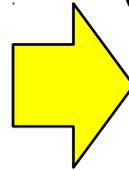


Ole Rømer (1644-1710).  
Astronome danois, il effectue la première détermination de la célérité de la lumière en 1676, et, par suite, il détruit l'idée, très répandue à son époque, que la lumière se propage instantanément.

« instantanément » ↔ vitesse infinie...



Ole Rømer (étudiant de J.Picard)  
Contre l'opinion de G.Cassini,  
directeur de l'Observatoire Royal,  
(et auteur des fameuses Tables):



**Retard** des éclipses d'Io? dû à  
la **lenteur** de la lumière!!

(**NB:** explication *introuvable*  
si la Terre est immobile au centre...)

# Et la lumière dans tout ça ?

1680 : “c” est finie



1820 : Fresnel et Young démontrent par l'expérience, que  
**lumière = ONDE**



1873 : J.C.Maxwell unifie {électro-magnétisme, lumière, RX..}  
dans un formalisme unique (et irrésistible par son élégance)

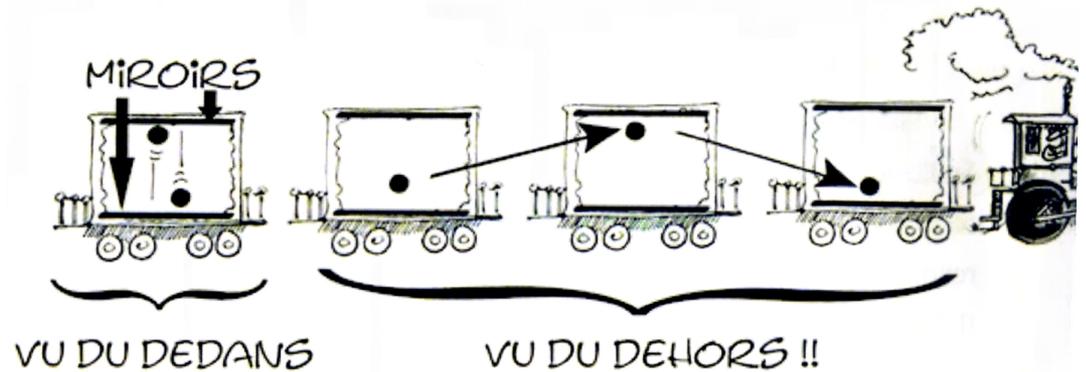


**PROBLEME:** les Equations de Maxwell  
(qui *recalculent* “c” à partir du magnétisme)  
sont **incompatibles** avec le sacro-saint  
Principe de **Relativité** (de **Galilée**)

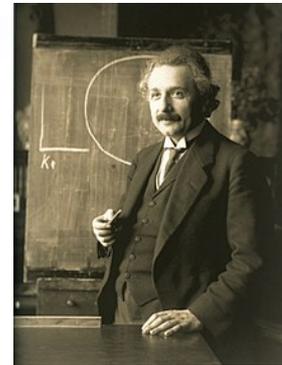


# Ensuite, l'Histoire s'accélère !

**1887** Le "pendule de lumière"



**1905** Albert Einstein lance la révolution :  
→ le *temps* devient **élastique**



*métronomie de lumière*

**1915** Relativité saison 2 !

Einstein généralise aux observateurs accélérés  
(c'est à dire à la Gravité)

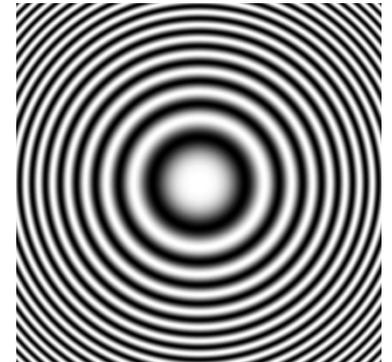
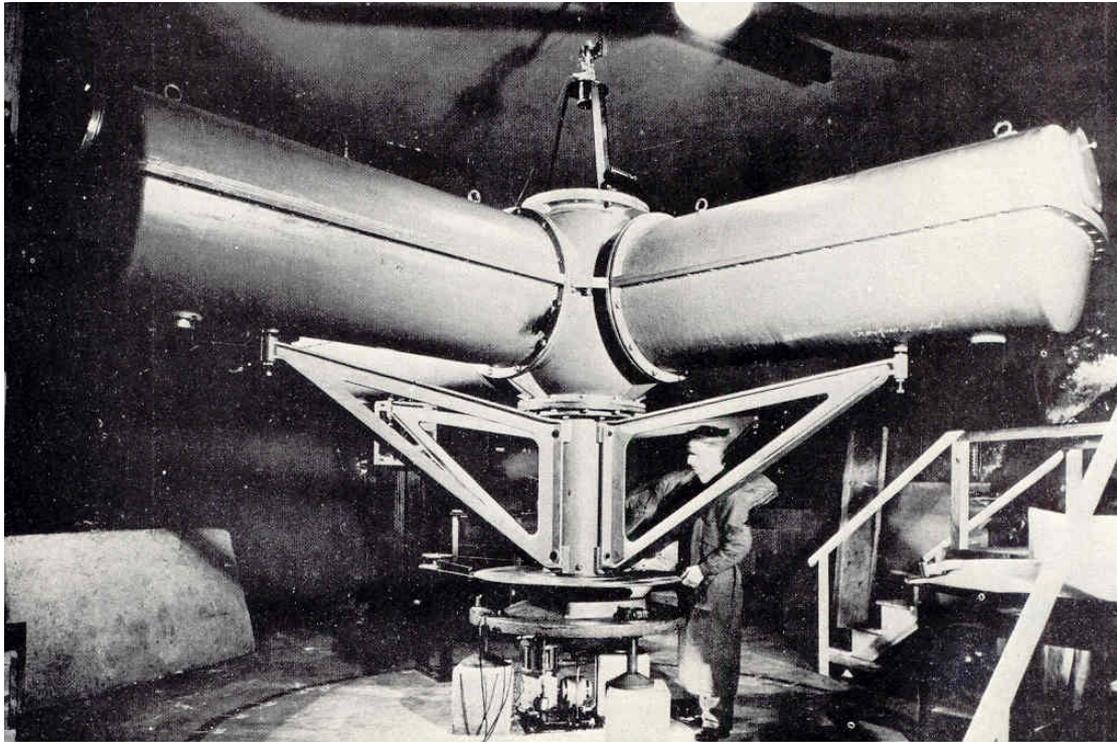
→ Conséq ravageuse: toute indication de temps  
est forcément **locale**



1887

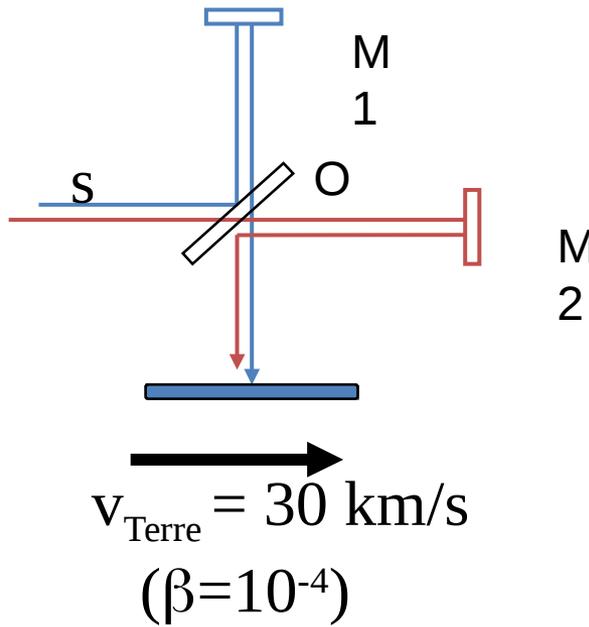
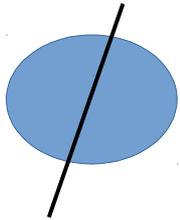
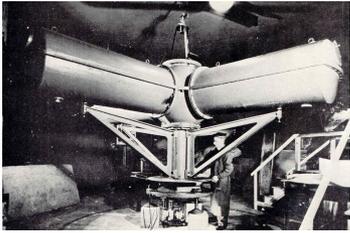
# Le “pendule de lumière”

*(une précision de dingue)*



Ce petit bijou de technologie est capable de mesurer la **vitesse de la Terre** sur son orbite (en la comparant à la vitesse de la lumière)

# Principe de la mesure:



Deux bras OM1 OM2  
de même longueur  $L=10\text{m}$   
( $t_1=t_2=33 \text{ ns}$ )

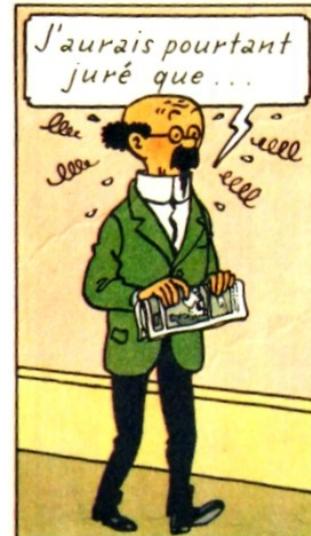
Mais sur OM2, la lumière  
progresses à "c" / cosmos !  
donc **M2 est en fuite**

$$\rightarrow t_{\text{aller}} = 2L/(c-v)$$
$$\text{et } t_{\text{retour}} = 2L/(c+v)$$

L'interféromètre géant de Michelson *compare les temps* dans les 2 bras.  
Il est **largement** capable de détecter cette différence de **0,01 %**.

→ Observation (et *consternation*) :

**Aucune différence !!**



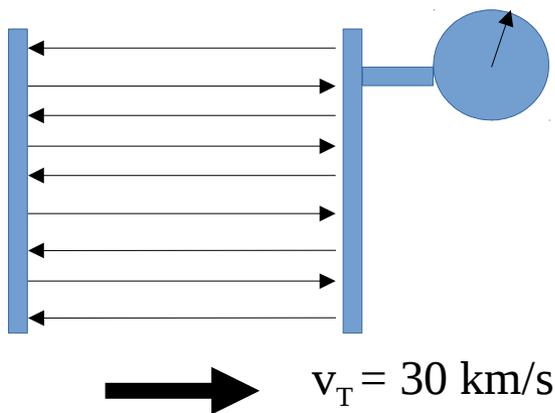
# Critique du principe-même de la manip !

“Le mouvement (uniforme) est comme rien”  
*Galileo*

A. Michelson cherche à détecter un mouvement de l'intérieur !  
→ formellement *interdit* par Galilée (Principe de Relativité)



Montage équivalent (et plus simple):



## L'horloge de lumière

= deux miroirs qui piègent la lumière,  
on détecte le tic-tac à chaque aller-retour

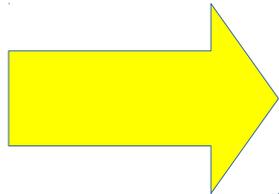
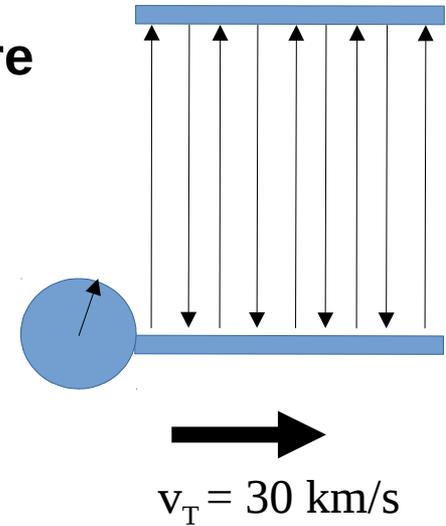
**Principe Relat. Gal:** l'horloge doit continuer à fonctionner à l'identique même si on la met en mouvement !

# Critique du principe-même de la manip (II)



Pivotons l'horloge de lumière  
d'un quart de tour: 

**Pr.Relativité:** l'horloge doit continuer de  
fonctionner à l'identique !



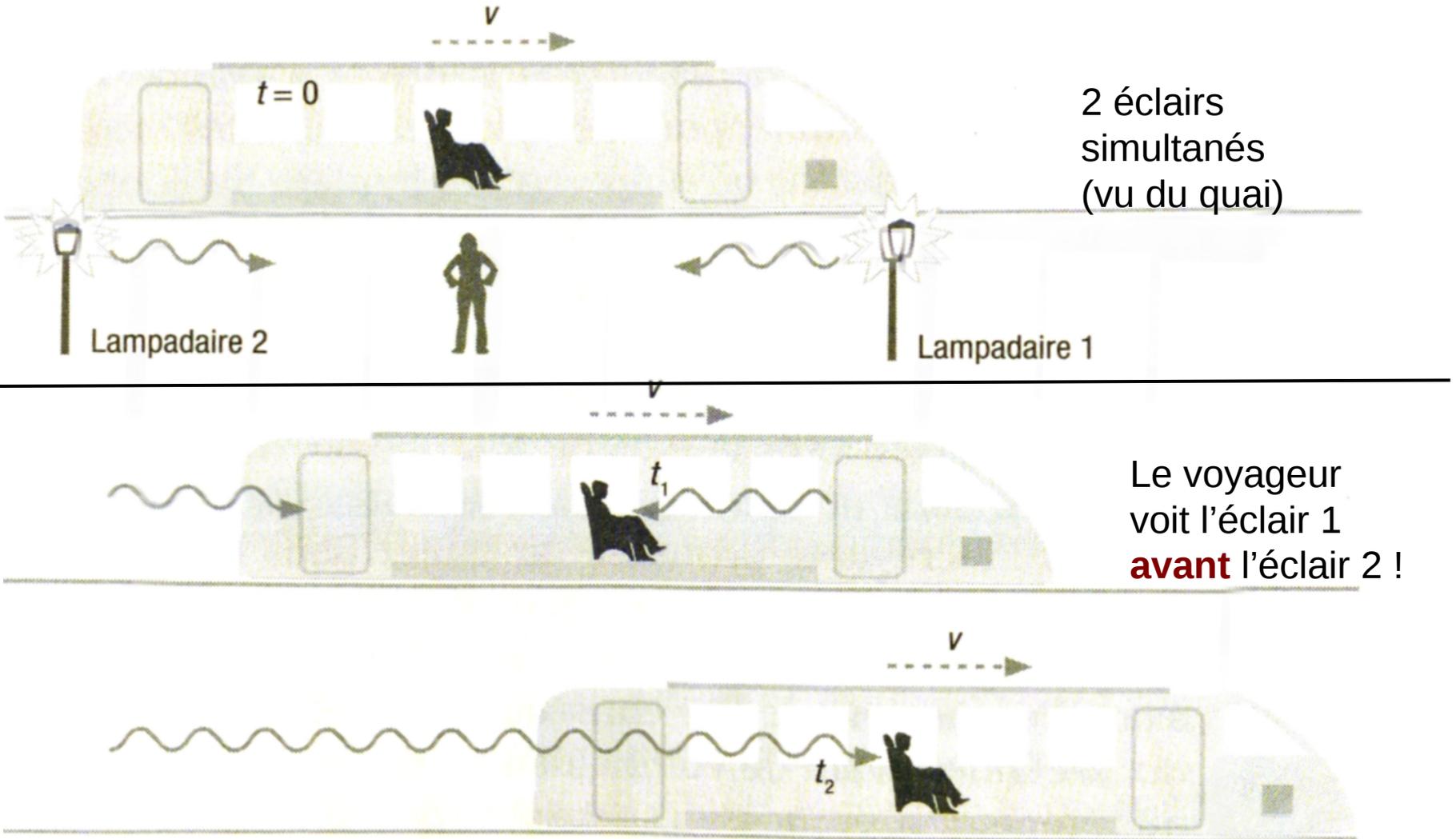
**AUCUNE** différence à attendre  
entre  $t_{OM1}$  et  $t_{OM2}$  !!!!!

Conclusion 1. Albert Michelson n'avait aucune chance de  
réussir à détecter un mouvement *de l'intérieur* !

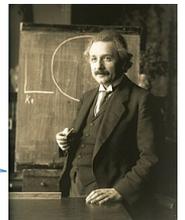
Conclusion 2. Une **révolution** s'impose.....



# Première étape: Einstein interroge la notion de SIMULTANÉITÉ



Généralisons! Le "simultané" n'est qu'un cas particulier...  
C'est tout le concept de temps qui cloche !



## 1905 La Révolution selon Einstein:

- 1) le Principe de Relativité de Galilée est vrai
- 2) donc: "**c**" *identique pour tout observateur !!*

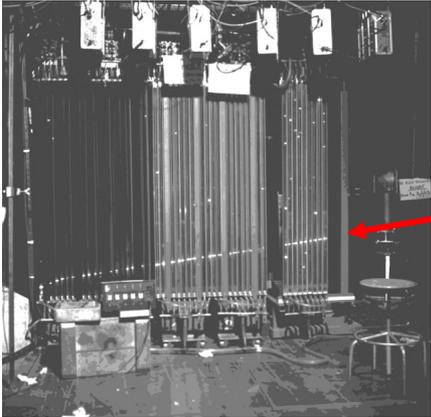
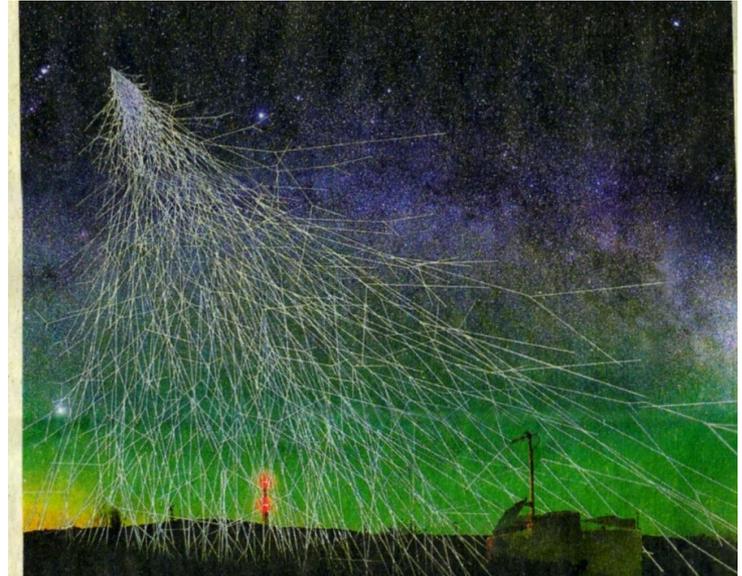
→ 1ere conséq inconfortable:  
le temps devient **élastique !!**

$$t_{\text{impr}} = \gamma \cdot t_{\text{propre}}$$

ce nombre est  
toujours  $> 1$

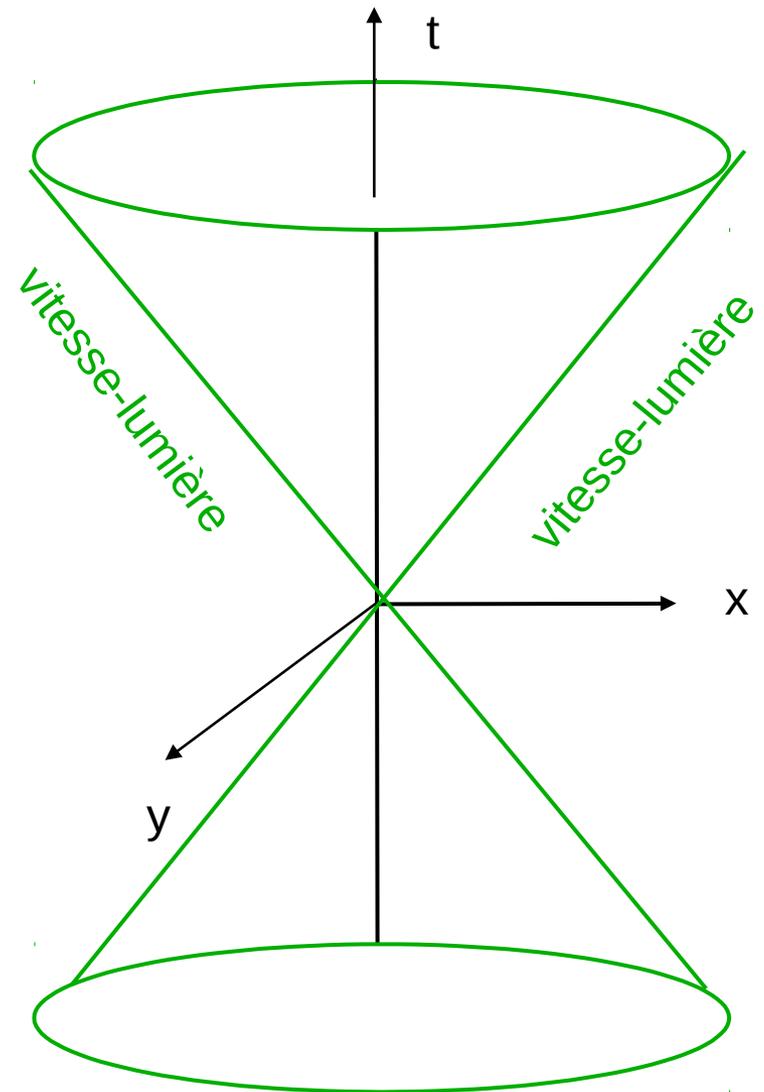
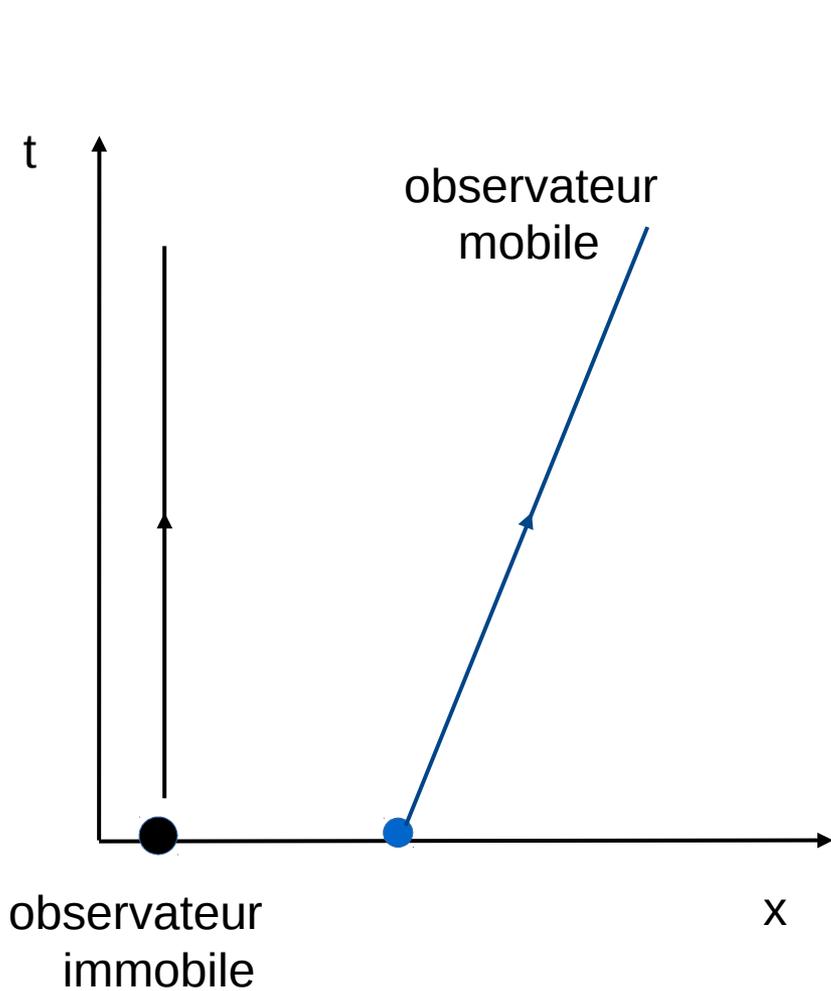
a) la preuve  
par les muons  
(2 microsecondes...)

b) la preuve  
par les supernovae



# Espace de Minkowski

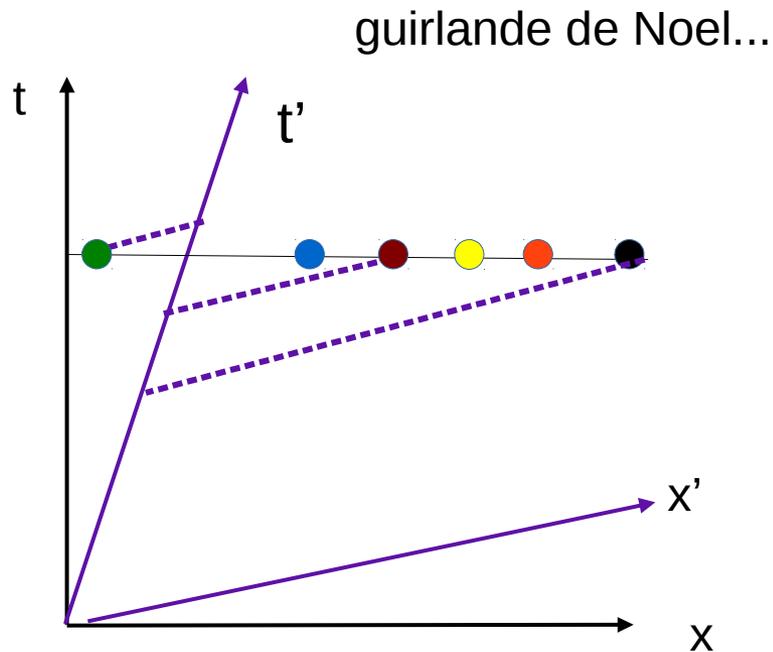
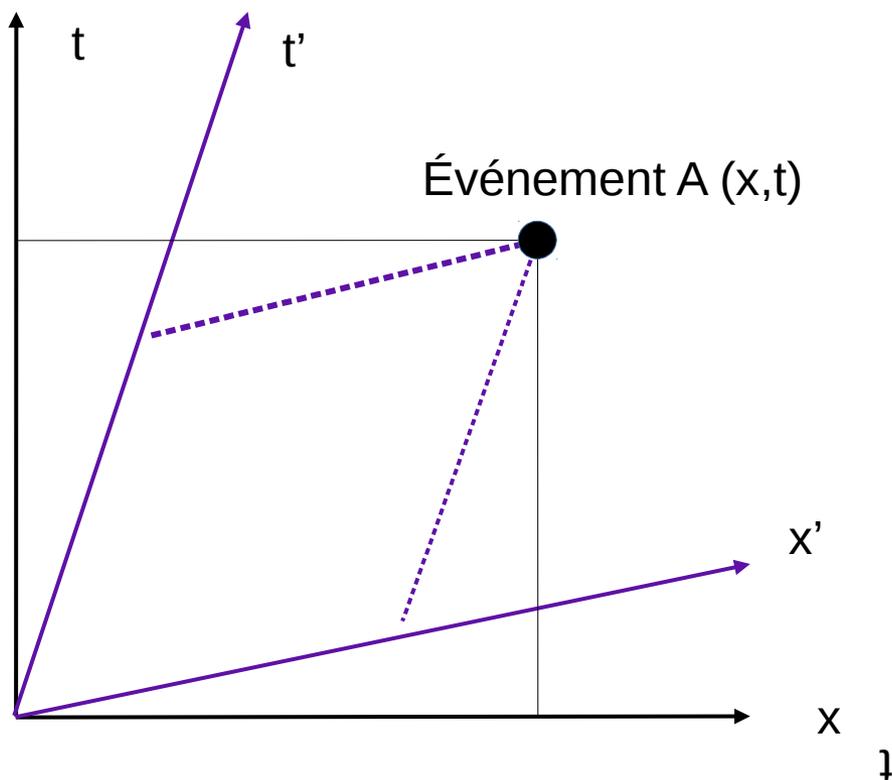
Tout le passé et le futur d'un événement sont contenus dans le **cône de lumière**



## Attention Maths!!

Transformation de Lorentz  $(x',y',z',t')$   $\leftrightarrow$   $(x,y,z,t)$

- Le temps des autres se **dilate**
- Les longueurs se contractent
- Espace et Temps sont **interchangeables**  
(pour un photon, axe "x" et axe "t" confondus!)



NB: Compter une distance en "années-lumière" rend tangible le fait que **l'Espace C'EST DU TEMPS**

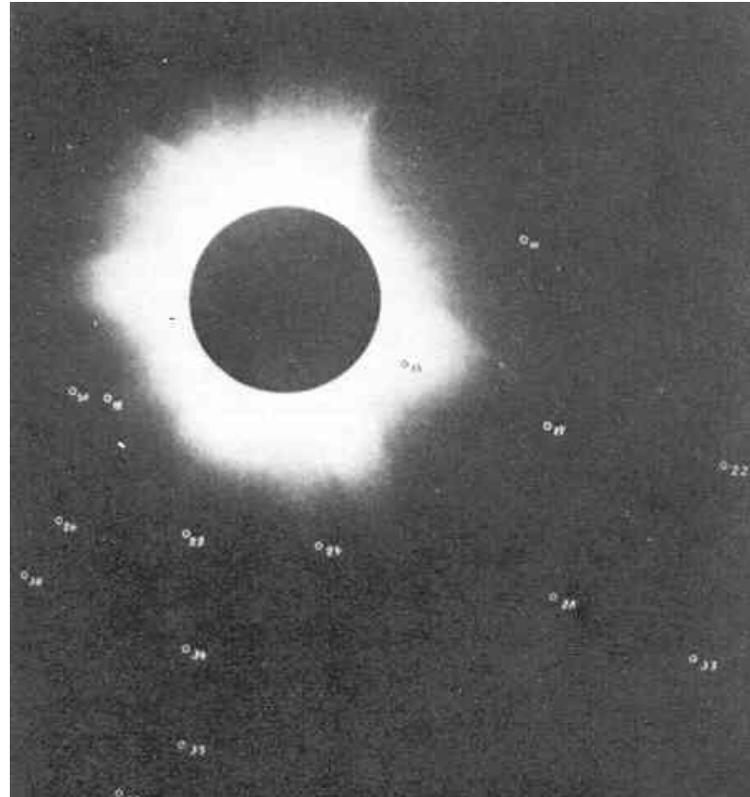
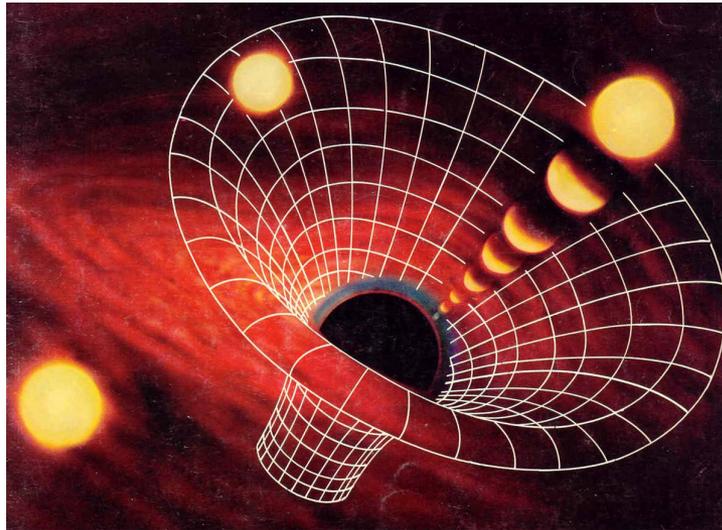
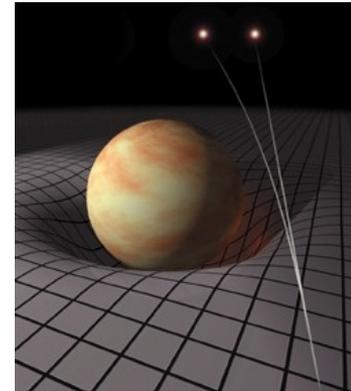
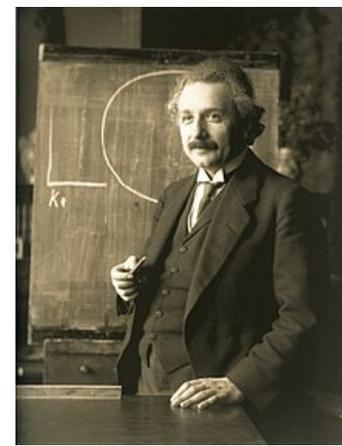


# 1915 Relativité saison II

Einstein est lancé...

Saison I: mouvements uniformes...

En 1915, il généralise aux observateurs **accélérés**  
(et donc à la Gravité)



L'éclipse  
de 1919

Zürich, 14. I. 13.

Aus

Hoch geehrter Herr Kollege!

Eine einfache theoretische Überlegung macht die Annahme plausibel, dass Lichtstrahlen in einem Gravitationsfeld eine Deviation erfahren.

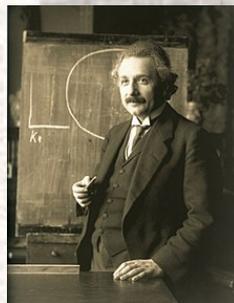


Am Sonnenrande müsste diese Ablenkung  $0,84''$  betragen und wie  $\frac{1}{R}$  abnehmen (für  $R$  Abstand vom Sonnenmittelpunkt).

$50,84''$



Es wäre deshalb von grösstem Interesse, bis zu wie grosser Sonnenhöhe grösste Fixsterne bei Anwendung der stärksten Vergrösserungen bei Tage (ohne Sonnenfinsternis) gesehen werden können.



Auf den Rat meines Kollegen, d. Herrn Prof. Maurer bitte ich Sie deshalb, mir mitzuteilen, was Sie nach Ihrer reichen Erfahrung in diesen Dingen für mit den heutigen Mitteln erreichbar halten.

Mit aller Hochachtung  
Ihr ganz ergebener

A. Einstein

Technische Hochschule  
Zürich.

Dear Sir,

Many thanks for a friendly reply to Mr Professor Dr Einstein, my honorable Colleague of the Polytechnical School.

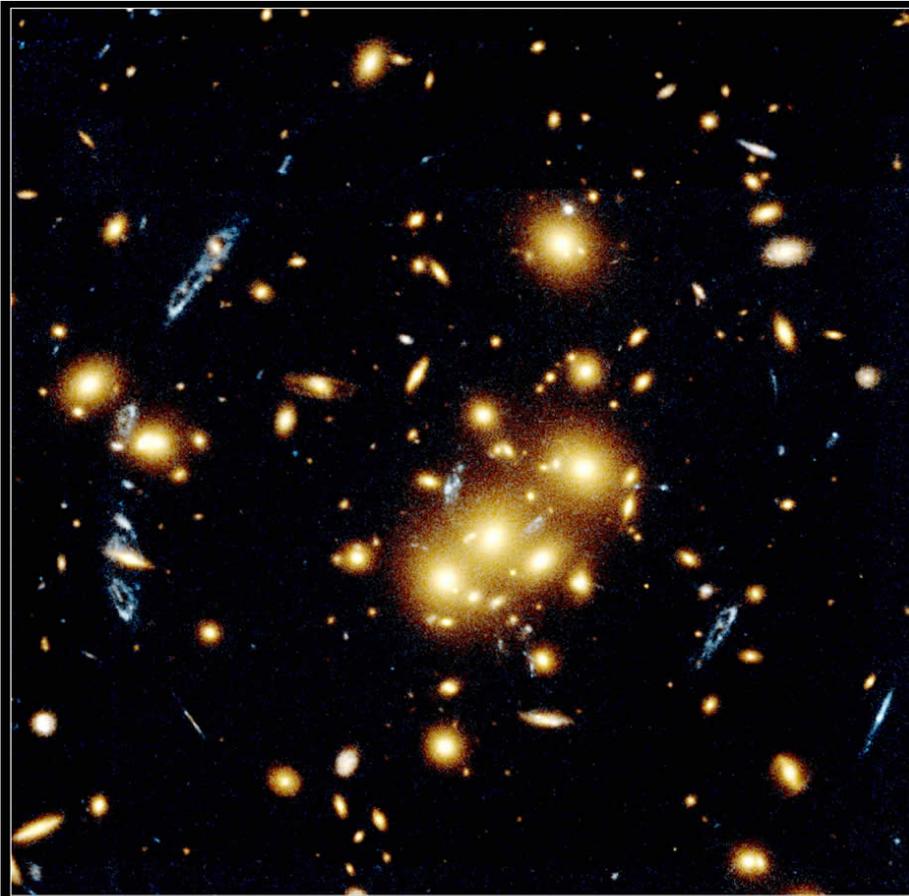
14. X. 13

Yours truly  
Maurer

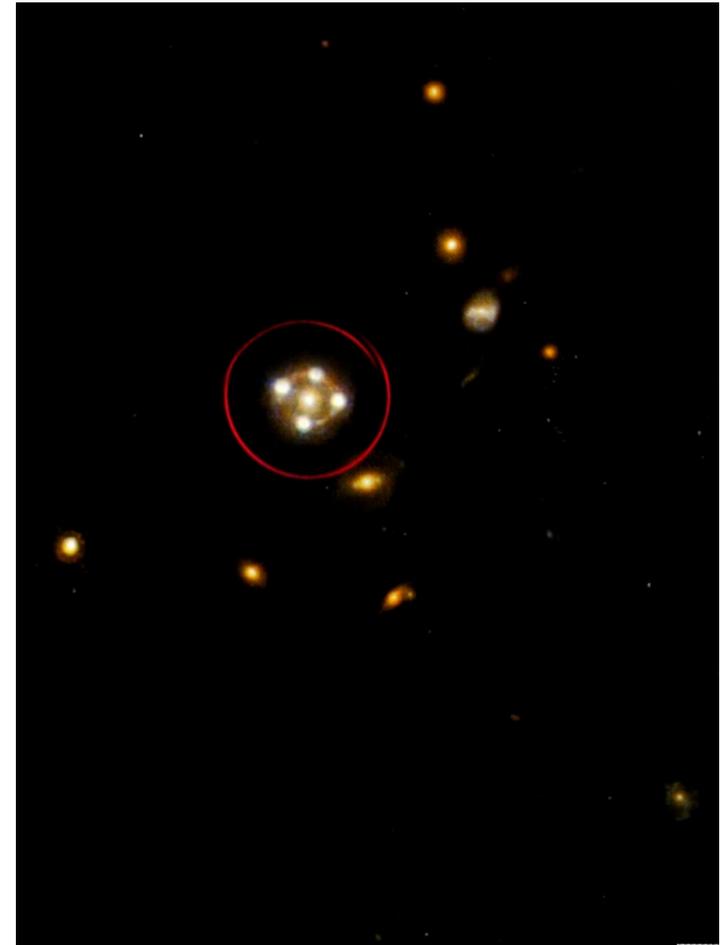


# RG ? Omniprésence !

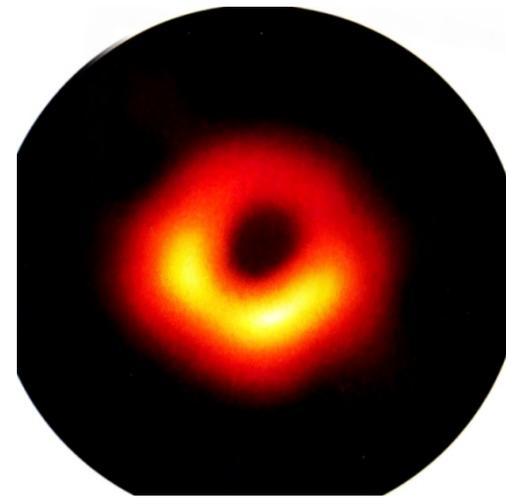
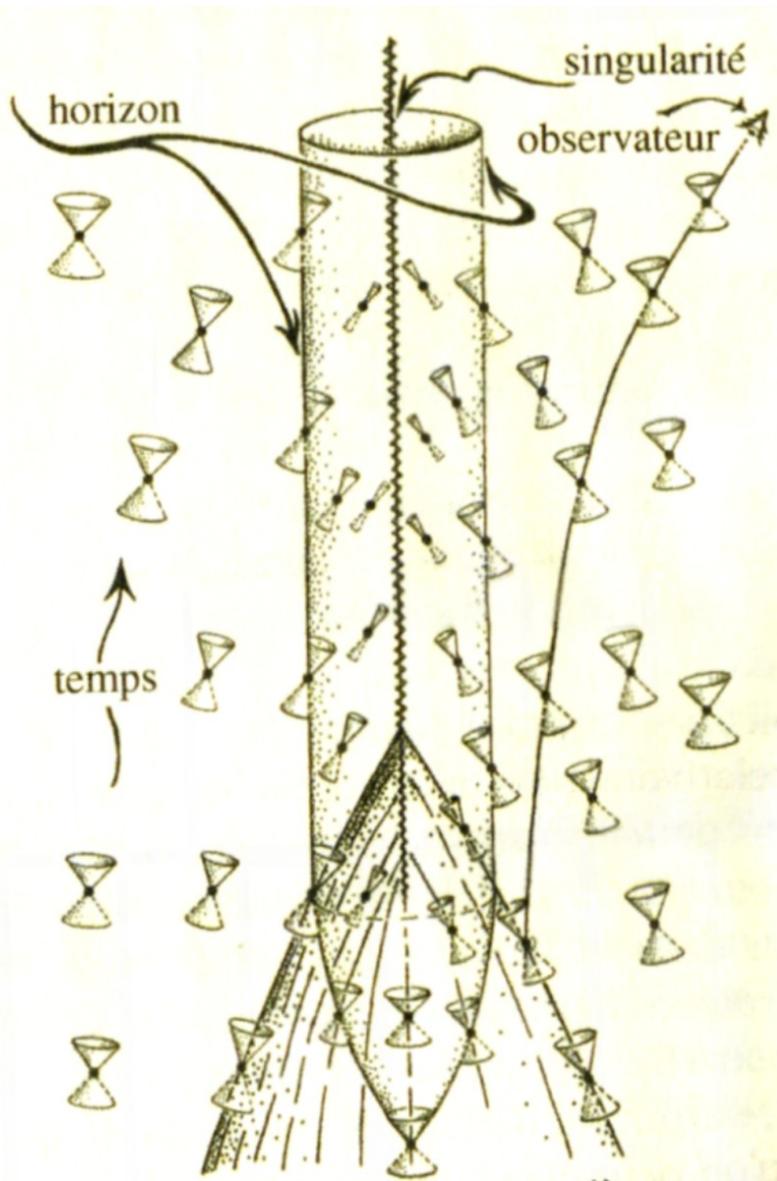
« Mirages » gravitationnels...



**Gravitational Lens**  
**Galaxy Cluster 0024+1654**  
Hubble Space Telescope · WFPC2



Pulsars  
Trous noirs  
Ondes gravitationnelles...



## Cônes de lumière près d'un Trou Noir

- définition locale en chaque point
- cônes penchés par la gravité ...

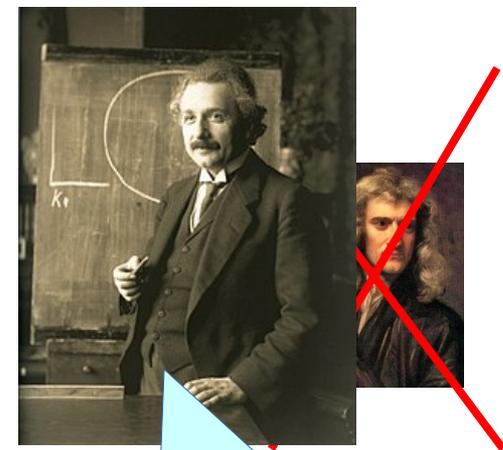
"Prison" pour la lumière

Possibilité de voyages dans le temps !!

# 1915 Relativité saison 2 !

Einstein généralise à la Gravité...

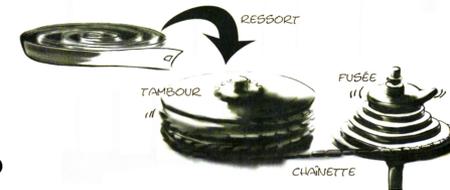
→ Conséquence ravageuse:  
tout  $t$  ne peut être que **local**



*"Le temps?  
C'est ce qu'indique  
MA montre !"*

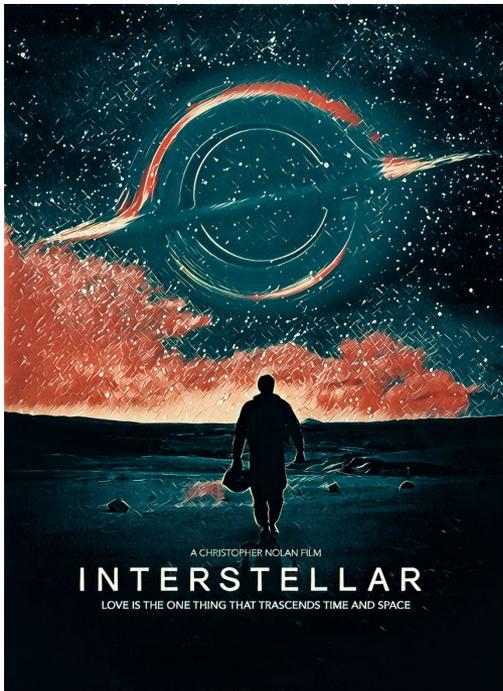
Piqûre de rappel: (Picard et Maupertuis)  
la  $T$  du pendule est fonction de "g"  
donc du lieu sur Terre

→ Remplacer le pendule par un ressort ?  
Par un super-quartz ? Par un tic-tac mega high-tech ?



**Inutile !**

**Tout "tic-tac" est fonction du lieu**

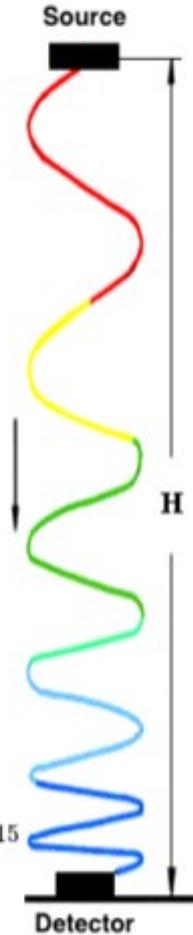


# Expérience de Pound et Rebka (Harvard 1960)



Les ondes lumineuses sont  
 - **étirées** si on monte d'un étage  
 - **raccourcies** si on descend...

In 1960, R. Pound and G. Rebka, Jr. at Harvard University conducted experiments in which photons (gamma rays) emitted at the top of a 22.57 m high apparatus were absorbed at the bottom, and photons emitted at the bottom of the apparatus were absorbed at the top. The experiment showed that photons which had been emitted at the top had a higher frequency upon reaching the bottom than the photons which were emitted at the bottom. And photons which were emitted at the bottom had a lower frequency upon reaching the top than the photons emitted at the top. These results are an important part of the experimental evidence supporting general relativity theory which predicts the observed "redshifts" and "blueshifts."



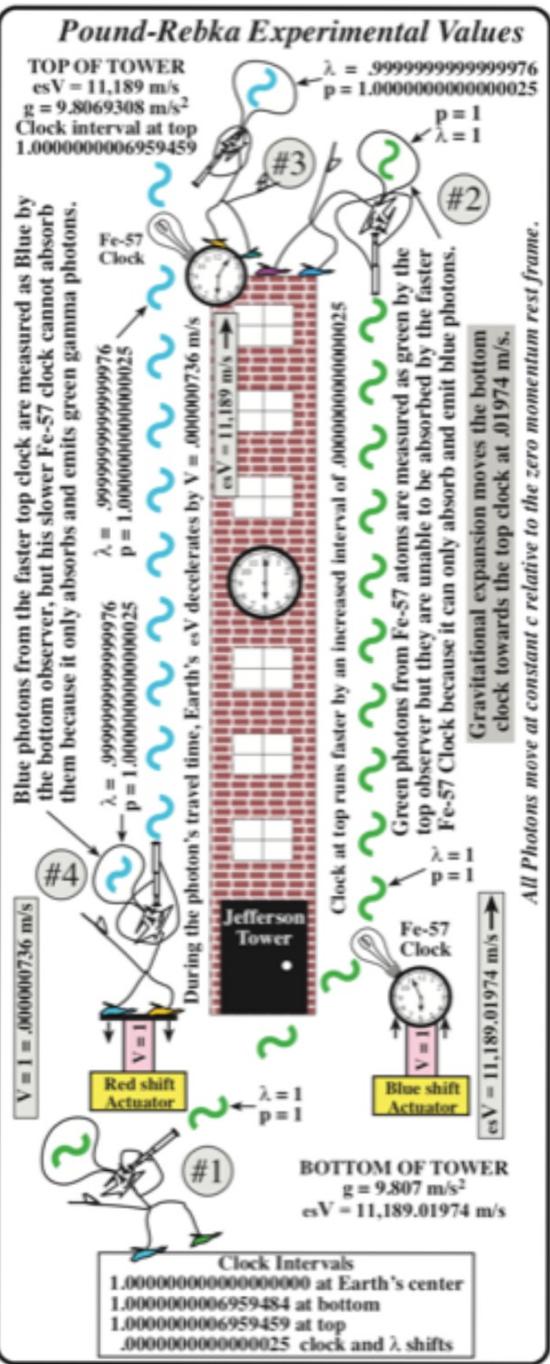
G. Rebka and his detector

$$h \cdot \Delta f = m_{ph} \cdot g \cdot H$$

$$h \cdot \Delta f = \frac{h \cdot f}{c^2} \cdot g \cdot H$$

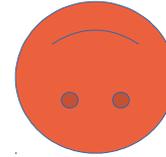
$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{g \cdot H}{c^2}$$

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 22,57 m}{(3 \cdot 10^8 \frac{m}{s})^2} \approx 2,5 \cdot 10^{-15}$$

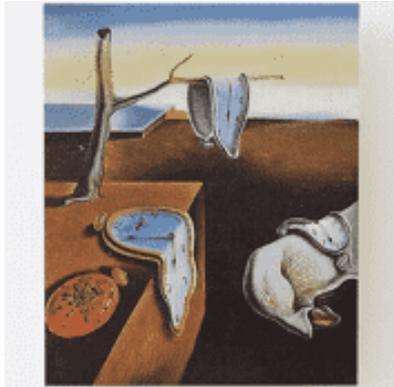


# 1915

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'$$



Cette conception de **temps relatif** dérange les physiciens anti-sémites, les philosophes kantien, les théologiens aristotéliens, les gens ordinaires, disons à peu près tout le monde (sauf Salvador Dali et **Paul Langevin**)



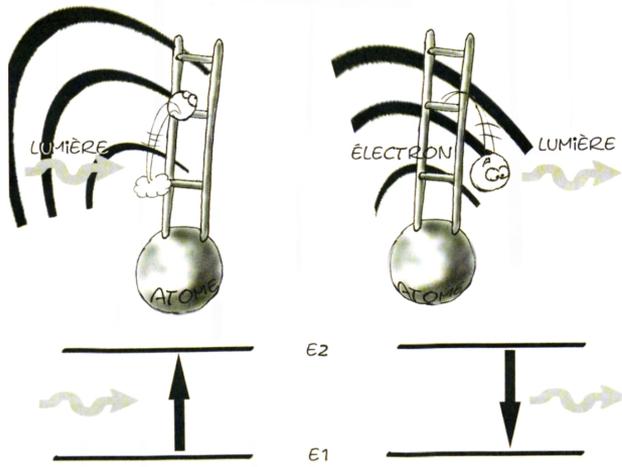
→ Comment tester ces idées ?

1) mesurer sérieusement & 2) envoyer des horloges dans l'espace !

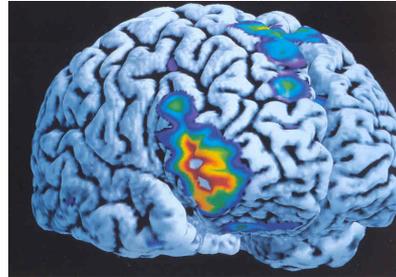
Pour commencer, il faudrait déjà améliorer la *précision* des "montres"  
d'un petit facteur **mille milliards...**

Ca tombe bien, on est en train d'inventer la **Mécanique Quantique...**

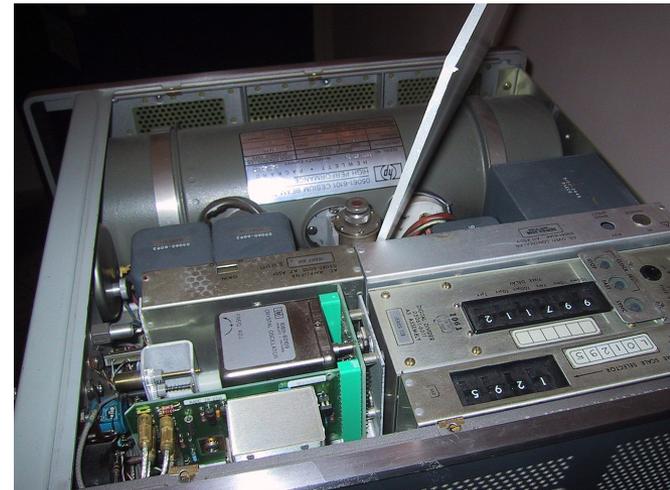




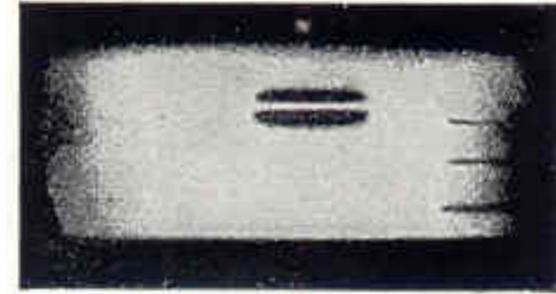
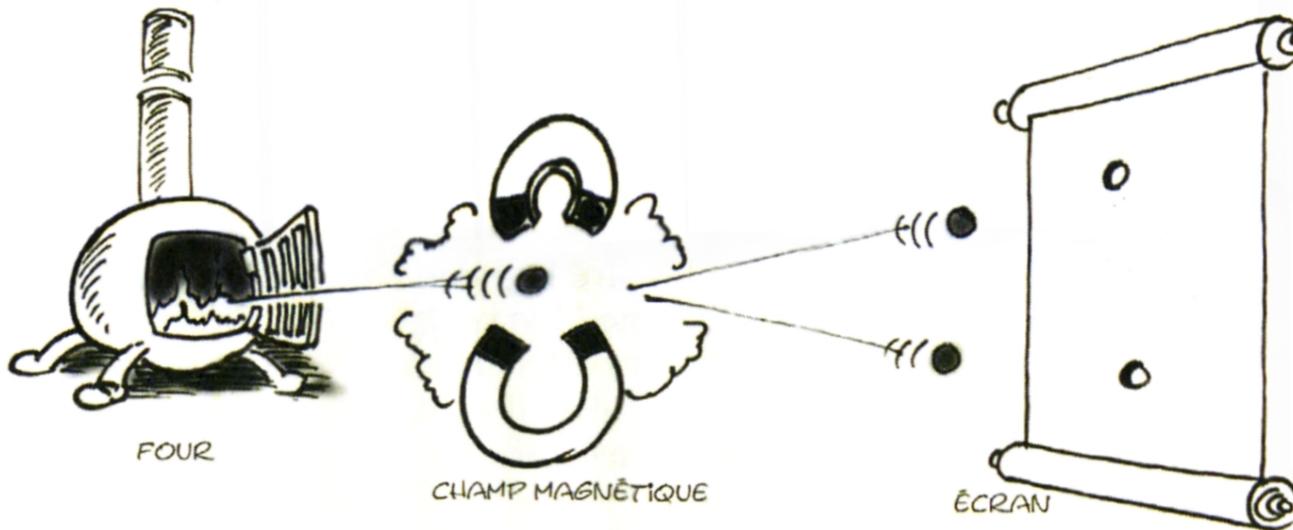
# Partie II



# Le Monde Quantique



# 1922 Expérience de Stern et Gerlach



!!!

Des atomes d'argent sont envoyés à 800 m/s dans un champ magnétique

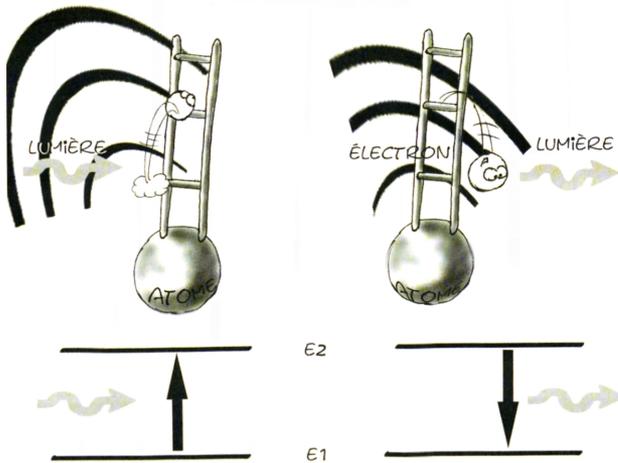
Effet attendu: une distribution des impacts sur une longue bande verticale

→ Observation réelle: juste DEUX taches !

*Comme si les tirages à la roulette ne donnent QUE le 1 et le 36 et rien d'autre..*

Toute la **Mécanique Quantique** est déjà là:

- 1) Etats discrets (au lieu d'un continuum)
- 2) La Probabilité règne en maître

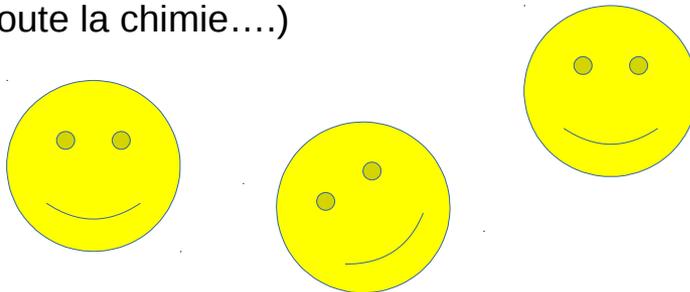


A l'échelle microscopique  
ce ne sont que  
**sauts** et **probabilités**

1926

Pour résoudre le problème le plus simple (l'atome d'hydrogène) Erwin **Schrödinger** part en vacances de ski et revient avec une équation qui fait sensation...

Elle s'applique à **tout**: atomes, molécules, cristaux, semi-conducteurs, supraconductivité, radioactivité et bientôt lasers, transistors, et...horloges atomiques (sans oublier toute la chimie...)



L'Equation de Schrödinger est donc un gros succès (très très gros).

$$i\hbar \cdot \partial\psi/\partial t = -\frac{\hbar^2}{2m}\partial^2\psi/\partial x^2 + V \cdot \psi$$

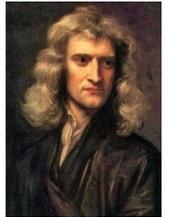


Dans le cadre de ces 4 conférences, notre question sera:

**Du neuf sur la nature du temps ?**

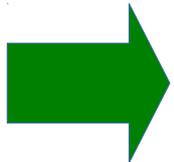
1) Schrödinger résoud surtout des situations stationnaires (dont le  $t$  est évacué)

2) pour les systèmes en évolution, remarquer la présence de la même opération **d/dt** que chez Newton, donc les mêmes *présupposés* quant à l'existence d'un **temps extérieur**, idéal, uniforme et lisse...



Toutefois:

- Newton calculait des **d/dt** de la vitesse (→ déterminisme absolu)
- Schrödinger calcule des **d/dt** d'une **probabilité**, ce qui est plus réaliste connaissant les travaux de Poincaré sur le chaos dyn. omniprésent

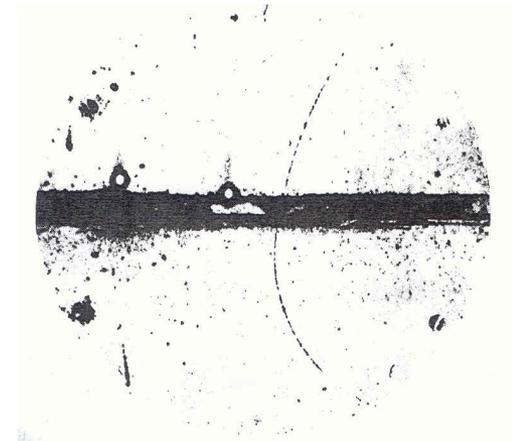


Et donc: **Rien de neuf** sur notre question.....

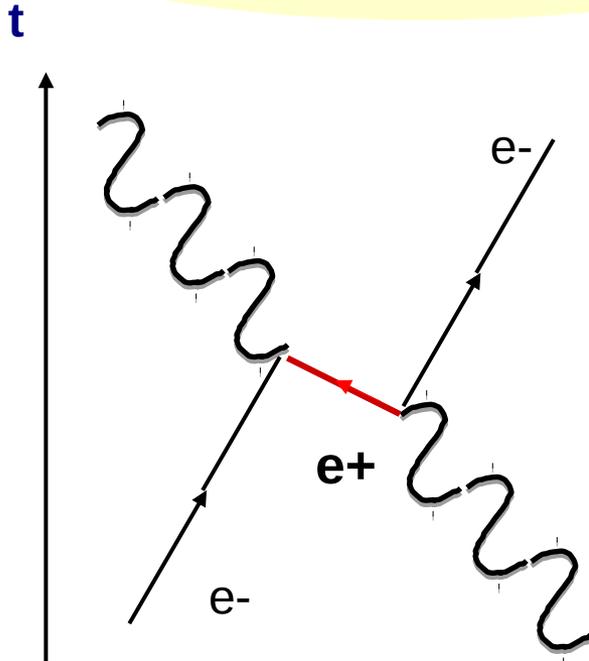
Rien de neuf ? ...Ah si, tout de même...

En mariant la Mécanique Quantique et la Relativité,  
Richard **Feynman** construit en 1948 la théorie QED.

Et là....Il y a du neuf avec ***l'antimatière*** !



Diffusion d'un photon (RX)  
par un électron (**effet Compton**):



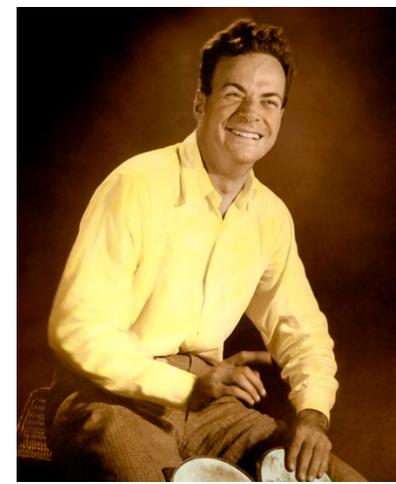
Le terme (de calcul) en rouge pourrait être, de  
manière **totalemment équivalente** :

- un positon (anti-électron) normal  
OU....

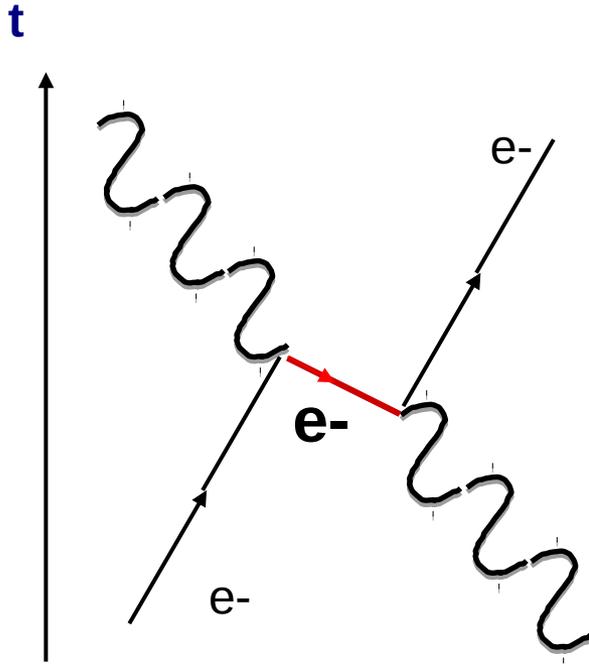
Rien de neuf ? ...Ah si, tout de même...

En mariant la Mécanique Quantique et la Relativité,  
Richard **Feynman** construit en 1948 la théorie QED.

Et là....Il y a du neuf avec ***l'antimatière*** !



Diffusion d'un photon (RX)  
par un électron (**effet Compton**):



Le terme (de calcul) en rouge pourrait être, de manière **totale**ment équivalente :

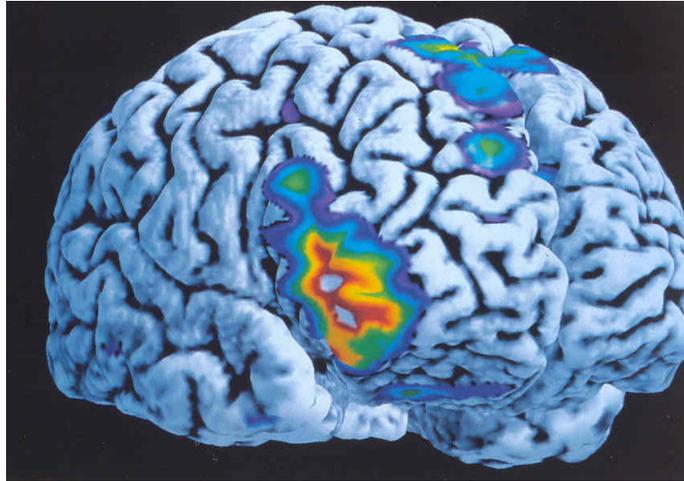
- un positon (anti-électron) normal  
OU
- un électron qui remonte le temps !!

Cette interprétation vertigineuse permettrait  
d'expliquer de manière assez naturelle  
**pourquoi** l'anti-matière est **l'exacte**  
**symétrique** de la matière...

*(sympa, mais RIEN ne permet de trancher)*

Mise à part cette perspective fascinante sur le plan *philosophique*, la Physique Quantique déroule après 1926 son incroyable efficacité...

- l'**anti-matière** entre dans les hôpitaux (pour notre bien)



- la MQ éclaire les ressorts de la Radioactivité  
(→ révolution dans la **datation** des  
objets archéologiques, Libby 1964)

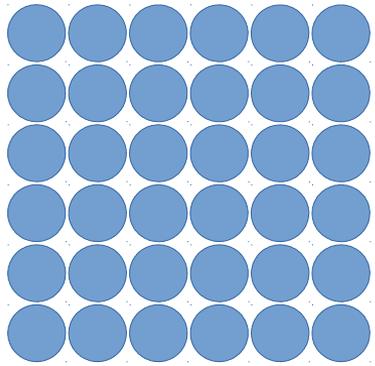


- elle permet de construire des **horloges atomiques**  
(hallucinantes de précision)

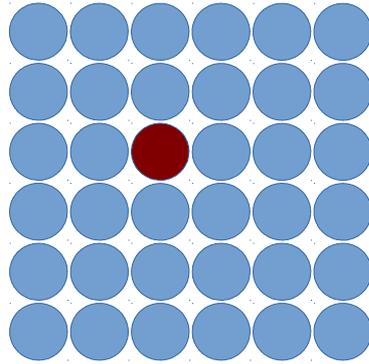
# Radioactivit

é

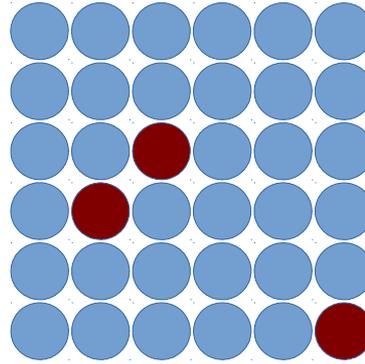
Le phénomène prend sa source dans le coeur des atomes (noyau).  
On ne peut ni le stopper, ni le ralentir...



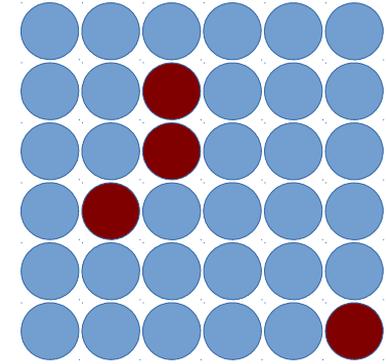
$t_1$



$t_2$



$t_3$

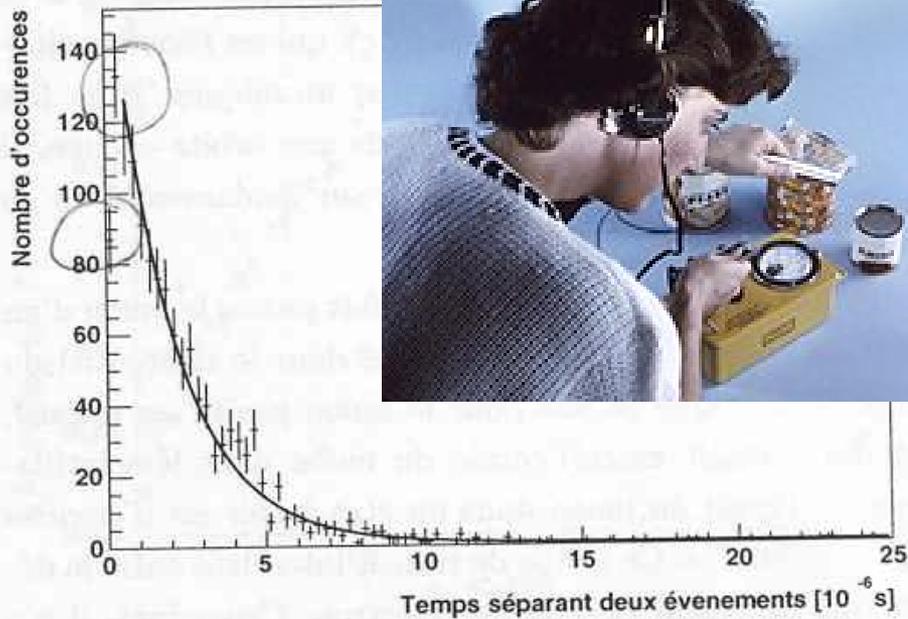


$t_4$

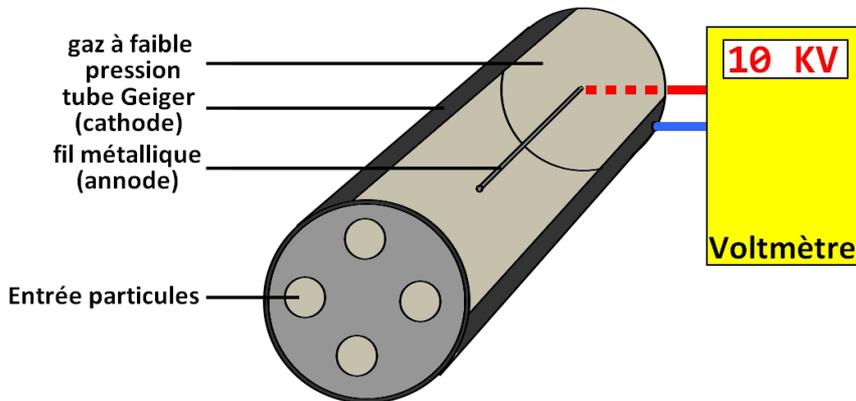
Phénomène à 100% **probabiliste**:  
on ne sait

- ni quel noyau d'atome va se transmuter
- ni à quel moment...

A chaque instant: les événements sont complètement **aléatoires** (en MQ, la **probabilité** règne en maître)



Après plusieurs “périodes”:  
apparition de la fonction exponentielle  
→ extrapolation vers le passé  
→ datation ( $^{14}\text{C}$  etc...)

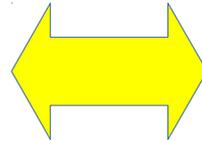
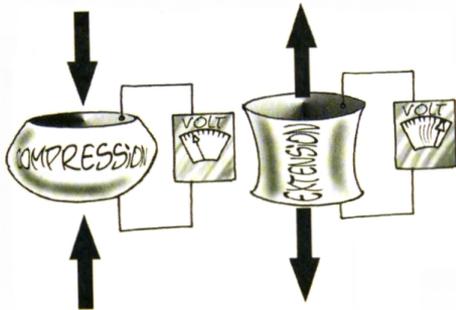
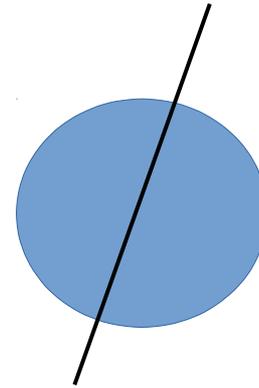
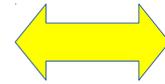




1950:

# l'horloge atomique !

“horloge” astronomique  
(scansion, pas “mesure”)  
**+2h par jour**

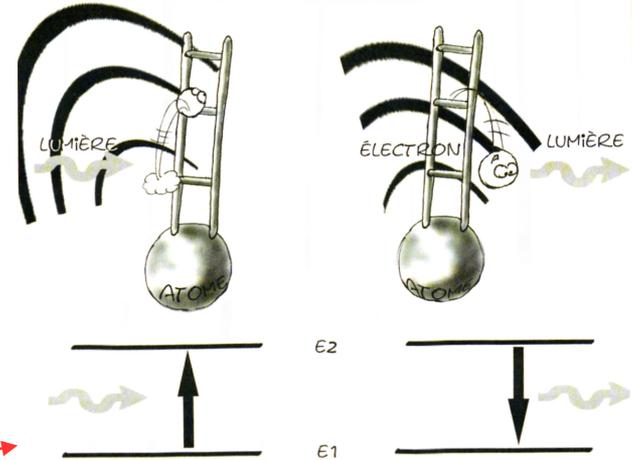
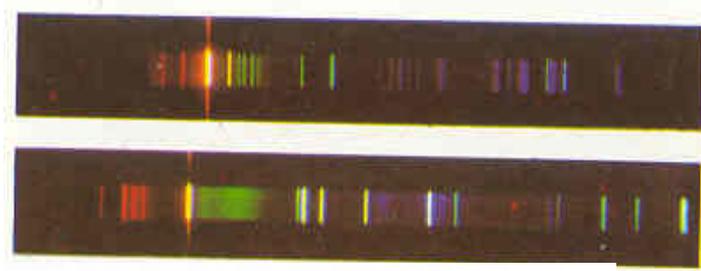


Horloge atomique ??

= un **quartz stabilisé** (par des oscillateurs très très très très très stables)

# Utiliser les atomes ????

- tous **semblables** (cristaux de quartz: non)
- très **stables** (13,2 milliards d'années)
- oscillateurs naturels



Certains de ces niveaux d'énergie sont un peu brouillés...  
Mais d'autres sont *hyper-“fins”* !

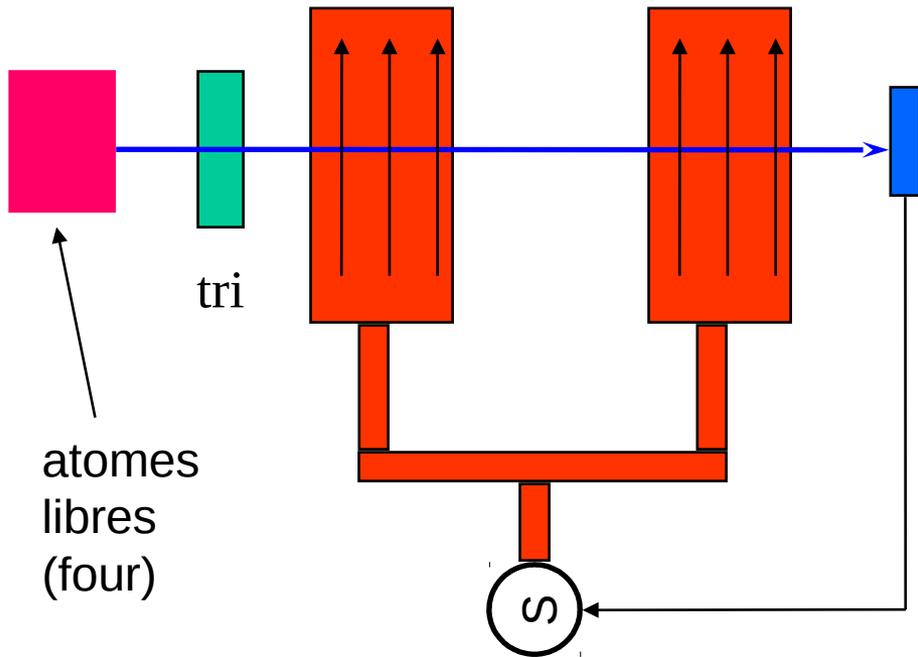
Et voilà le résultat....

1 mètre (de 1960) = **1 650 763,73** fois la longueur d'onde  
de la raie orange du  $^{86}\text{Kr}$

1 seconde (2018) = **9192 631 770** fois la transition hyperfine  
du niveau fondamental du  $^{133}\text{Cs}$



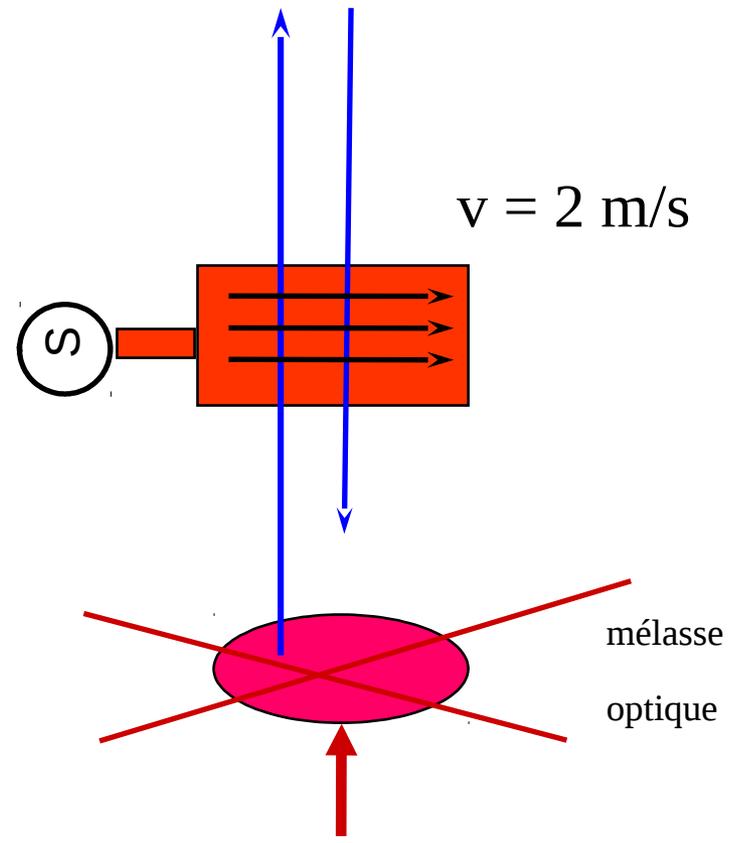
# Ramsey 1946

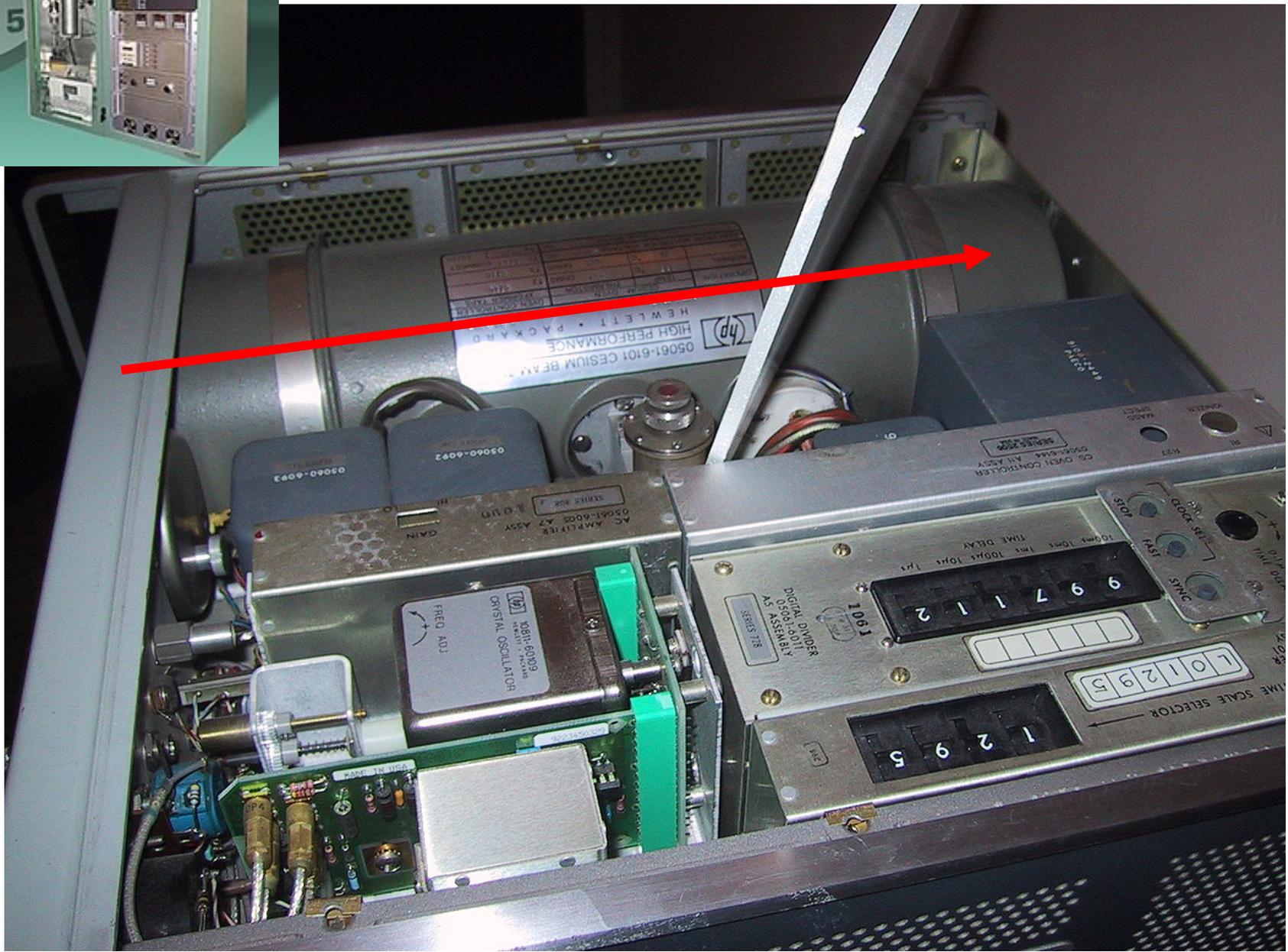


$d = 1 \text{ m}, v = 100 \text{ m/s}$

$$\Delta\nu/\nu = 10^{-13}$$

# fontaine atomique





# GPS et GALILEO

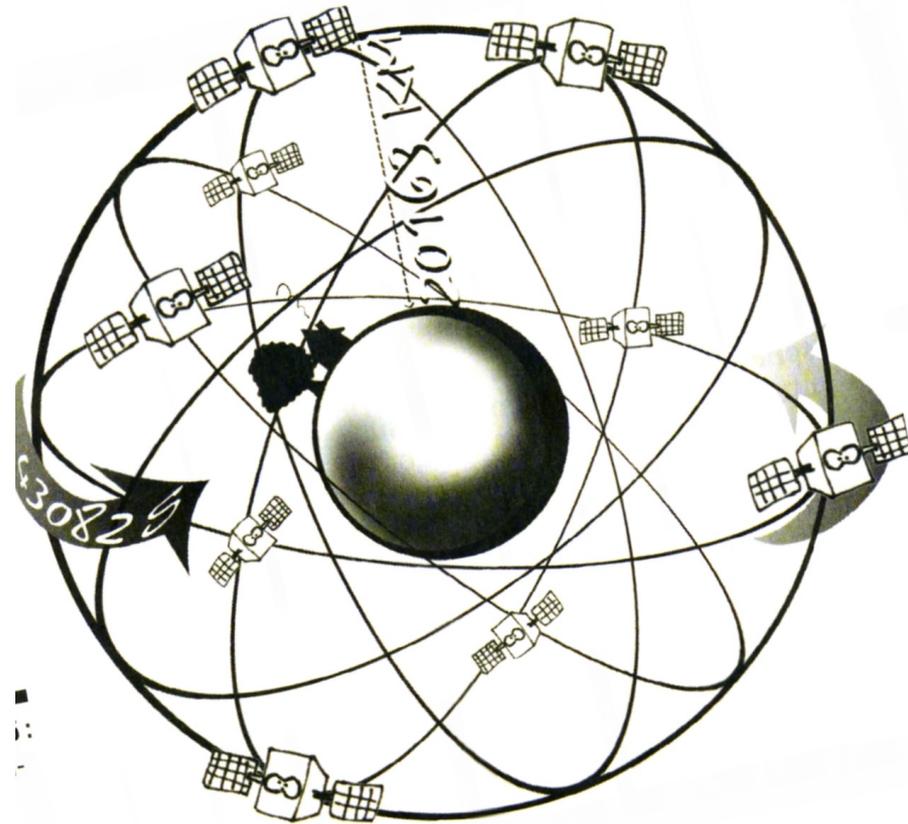
(une espèce d'apothéose  
de la physique moderne)

Quantique+Relativité  
main dans la main

-Chaque satellite embarque une HA

-Corrections obligatoires des effets  
de **dilatation du temps**

- 1) mouvement (R.Restreinte)
- 2) gravité (Relativité Générale)



# Horloge atomique = stabilité exceptionnelle

Ces engins comparent des fréquences avec une précision hallucinante...

1 $\pm$  0,000000000000001 s (13 zéros, ou un dix-millième de ns)

→ Rapporté à la plage de temps qui nous sépare de Lucy:  
"1 s d'écart"...

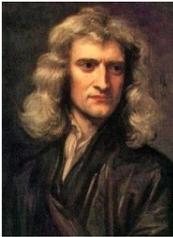
1 an = 25 millions de secondes



Écart ? Retard ??  
Par rapport à quoi?

Après cette débauche de science (et de technologie) on repose la question:

## Et la **nature du temps** dans tout ça ??



1) Newton avait postulé un temps **absolu**

→ Dynamité par Einstein ! “t” est **fonction du lieu** (à cause de la gravité)

2) Newton avait dénigré le “temps vulgaire” des horlogers.

(2021: une seconde de dérive sur 10 milliards d'années)

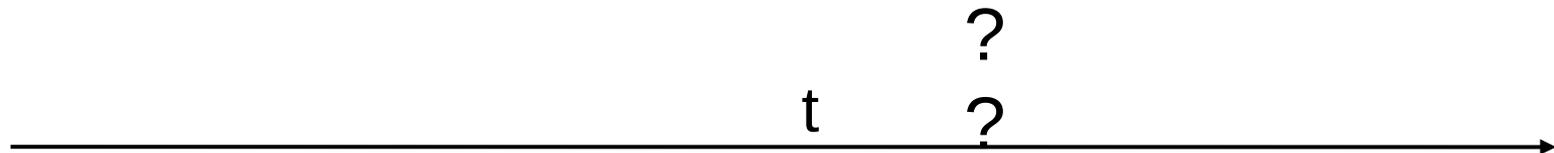
→ Einstein révèle qu’un “**t** différent” coule à différents étages dans différents tiroirs de ce bureau, et même...

...à l’intérieur des horloges atomiques !!!



3) Newton avait besoin d’un “t” découpable à l’infini pour ses opérations  $d/dt$  (“dériver”=déduire un état ultérieur à partir du précédent)

→ **Poincaré** a dynamité les fantasmes de **déterminisme** (prédictibilité)



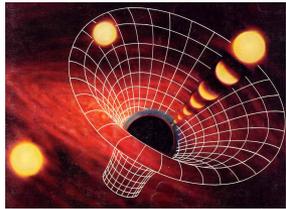
# 1) Fin du temps *absolu* !!

”....MA montre” (AE)

Deux horloges distinctes (forcément situées en deux lieux différents) auront TOUJOURS **un tic-tac différent**

(cf. *la cacophonie de carillons au début de Time (Pink Floyd)*...)

**Et ça bouge en permanence ! (dist. Jupiter-Terre...)**



2) Les horloges atomiques affichent une stabilité fantastique, OK. Mais la précision sur une mesure de fréquence ne nous apprend rien...

**Ces appareils ne “mesurent” pas “le” temps puisque “t” est différent en chaque point interne de l’horloge !**

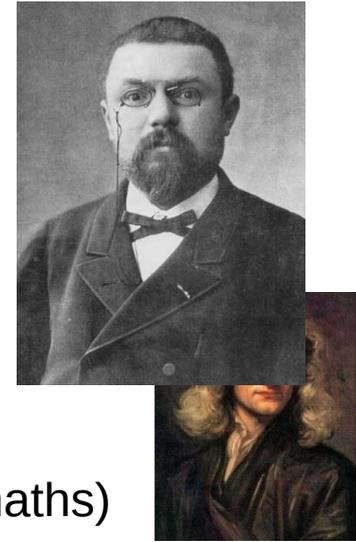
3) Le temps atomique coordonné (**TAI**) est obtenu par un *calcul*: un ordinateur du BIPM calcule la *moyenne* des tic-tacs de *plusieurs dizaines* d’horloges au césium réparties dans le monde...

→ **Aucune** horloge atomique n’a le “**temps vrai**”

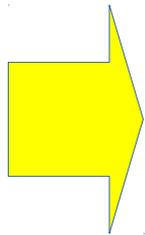
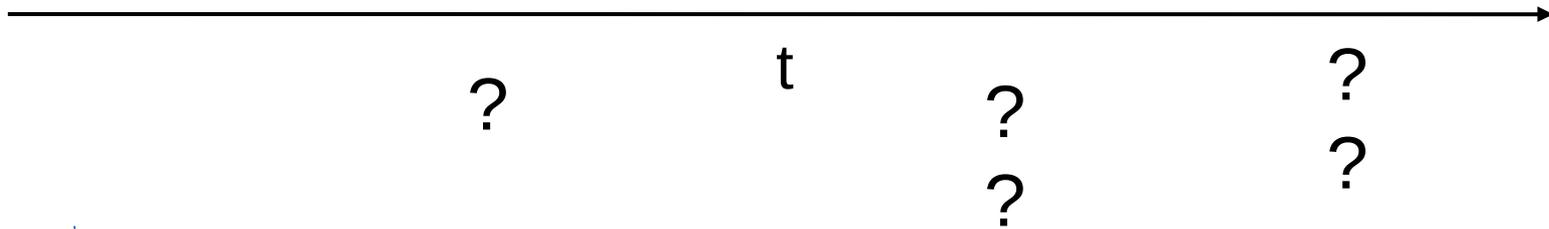
→ Le “temps”, même le plus fin, reste **une convention humaine !**



# Quid de la nature du temps ?



4) Que reste-t-il d'un "t" découpable à l'infini ("nombre réel" en maths) postulé **pour** autoriser des opérations mathématiques  $d/dt$  puisque **le déterminisme est mort** ?

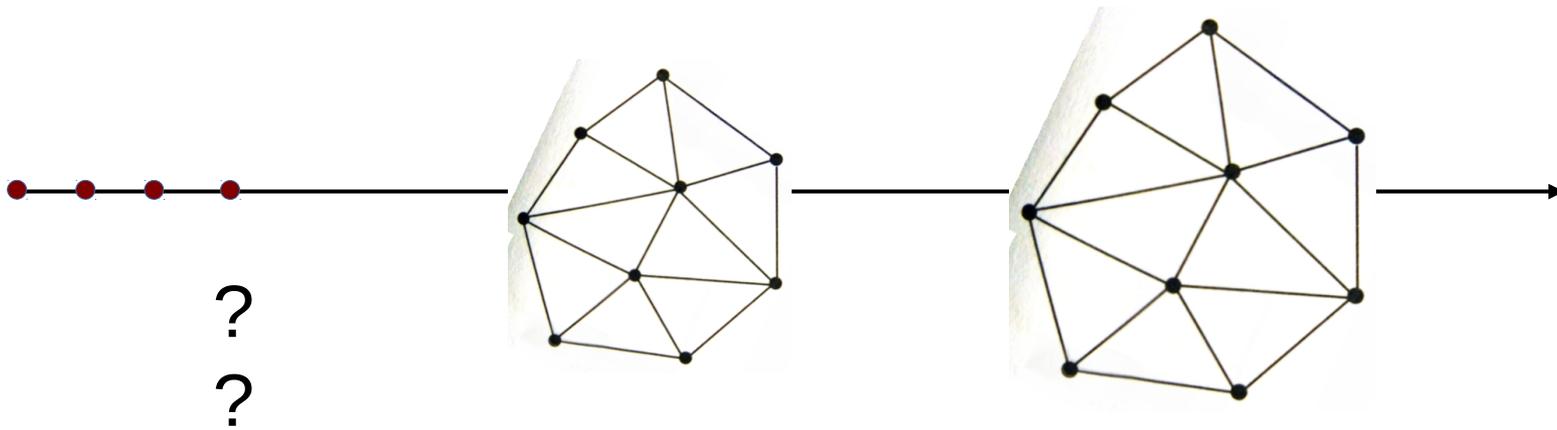


Existe-t-il seulement une alternative?

What else ?

En bon français:





Dans les théories ultra-modernes de **Gravité Quantique**:

- le temps n'apparaît pas d'emblée !! (Wheeler-DeWitt)
- quand il apparaît, il est discrétisé !!!!! (Carlo Rovelli)  
(ça évite les singularités dans les trous noirs et aux "début" des Univers étranges comme le nôtre, sujets à un Big-Bang)



LA RECHERCHE CONTINUE !





Merci pour votre attention !!

**“L’existence au moins apparente du temps a toujours suscité chez moi un profond agacement” (M.Houellebecq)**