

Un peu de vocabulaire... (2)

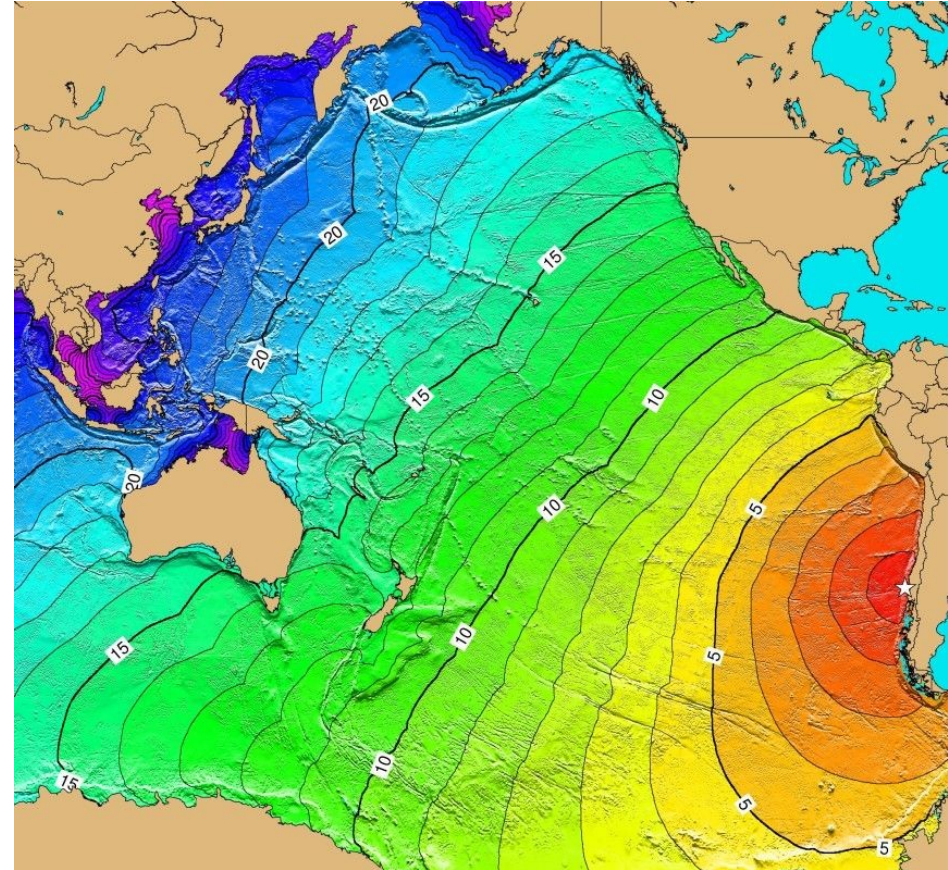
Et quelques digressions...

Énergie

Notions utilisées :

1. Introduction
- 2-3. Structure de la matière
4. Les ondes
9. Relativité générale
10. Mécanique quantique
15. Thermodynamique
16. Chaleur et énergie

Pour une meilleure compréhension,
certaines explications pourront être
légèrement simplifiées/tronquées
Images : Wikipédia sauf mention contraire



Séisme de Valdivia (1960)

Magnitude : 9,5-9,6

Énergie : ~10-100 fois la « Tsar Bomba »

Conservation de l'énergie

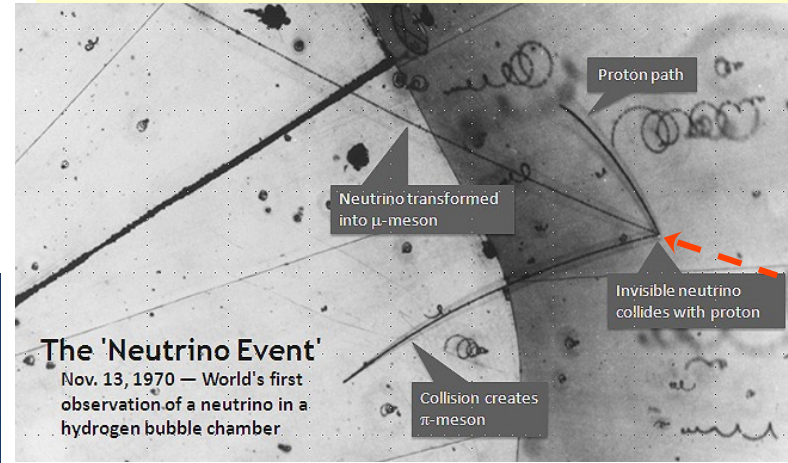
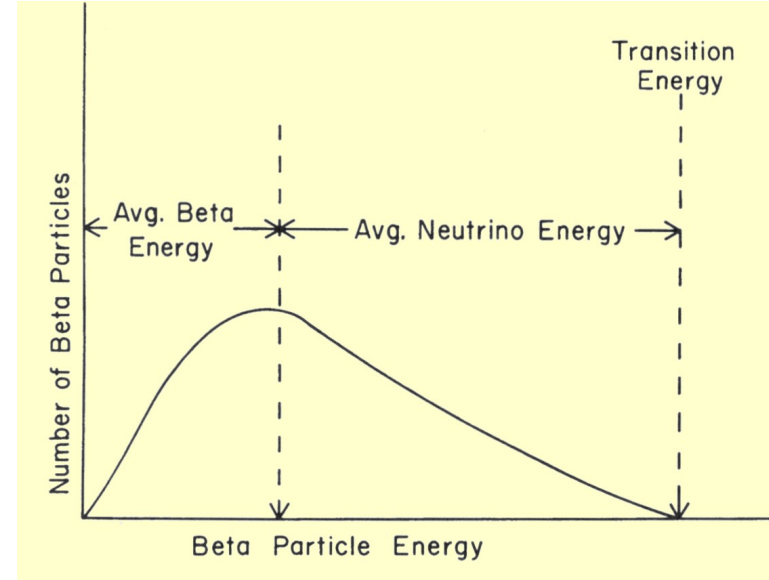
- Principe fondamental jamais invalidé
- **Théorème de Noether** (1915)
 - Einstein : « Monument de la pensée mathématique »
 - Exprime l'équivalence entre la **conservation des grandeurs physiques** et l'**invariance du « lagrangien » selon les symétries du système**
- Lagrangien = fonction permettant de décrire l'évolution du système (essentiel pour la théorie des champs)
- **L'invariance dans le temps des lois physiques entraîne la conservation de l'énergie**



- Contrairement à l'entropie (sauf réaction « **réversible** »)
$$dS = \frac{\delta Q}{T} = dS_{\text{échangée}} + dS_{\text{créée}} \quad \text{avec} \quad dS_{\text{créée}} \geq 0$$

Le neutrino

- Problème en 1930 concernant la désintégration β^- : le spectre de vitesse des électrons émis est **continu**
 - Article de Lise Meitner : la vitesse devrait être constante (quantifiée) et dépendante du corps observé
 - Cette réaction semble **ne pas respecter la conservation de l'énergie** (et de la quantité de mouvement et du spin)
- Réactions
 - **Certains physiciens (dont Bohr) étaient prêts à y renoncer**
 - Pauli postule l'émission d'une **autre particule** qui emporte l'énergie manquante → il existe une **nouvelle particule**, de charge électrique nulle, qui sera baptisée « **neutrino** »
- **Particule qui interagit extrêmement peu avec la matière**



Première observation d'un neutrino en 1970 dans une chambre à bulles : un neutrino (non visible) percute un proton, ce qui produit un muon et un pion.

Le premier principe

« Au cours d'une transformation quelconque d'un système fermé, la variation de son **énergie interne** est égale à la quantité d'énergie échangée avec le milieu extérieur, par **transfert thermique (chaleur)** et **transfert mécanique (travail)**. »

- On peut définir une fonction U nommée « **énergie interne** » ayant les propriétés suivantes :
 - U est une **fonction d'état**
 - U est **extensive**
 - U **se conserve dans un système isolé**

$$dU = dE_c + dE_p = \delta W + \delta Q$$

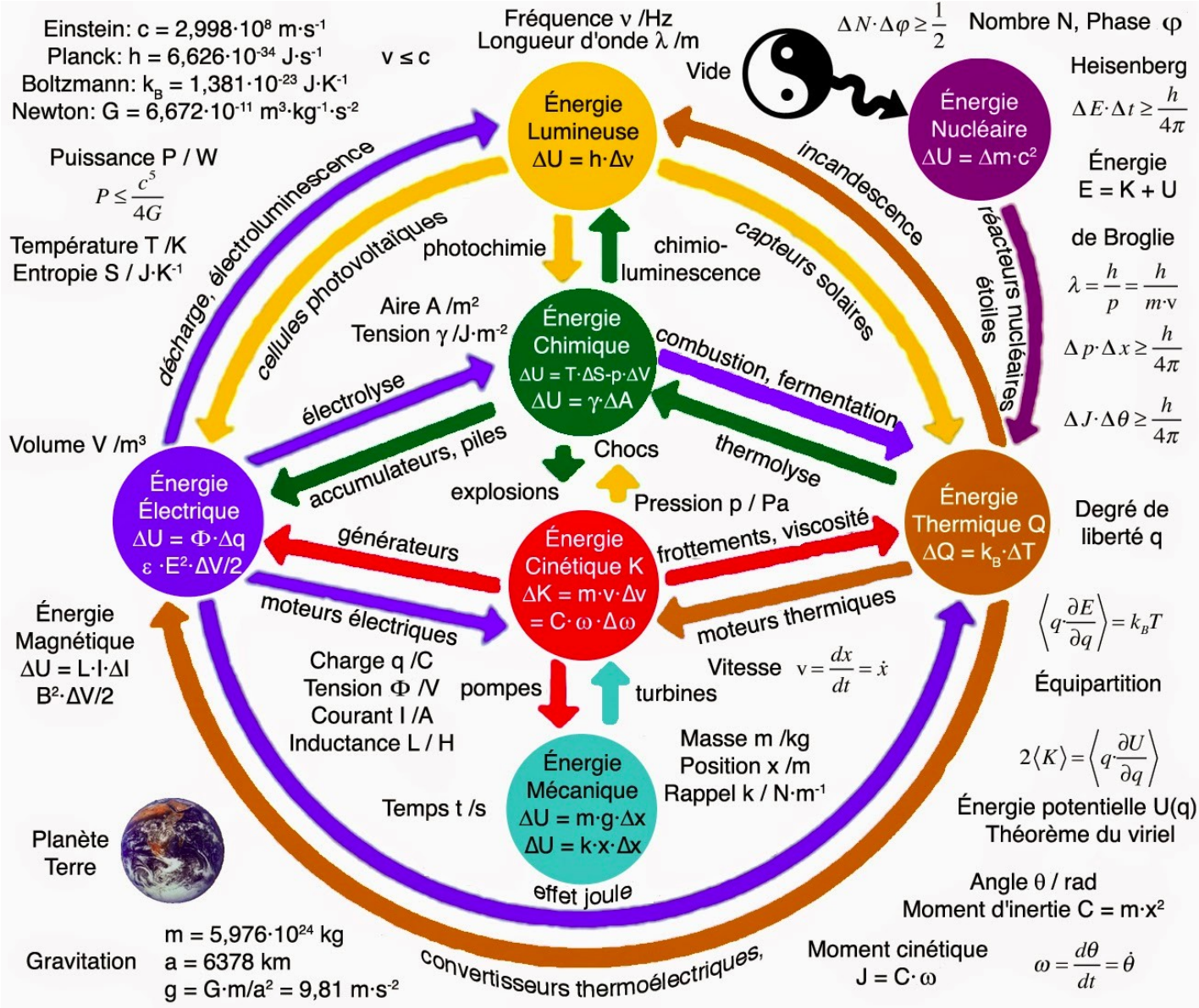
Noter la différence entre « d » et « δ »

Les différentes formes d'énergie

- Définition (larousse.fr) :
 - Grandeur caractérisant un système physique, gardant la même valeur au cours de toutes les transformations internes du système (loi de conservation) et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction
- Du grec ἐνέργεια, « force en action », par opposition à δύναμις « force en puissance »
- → « ce qui permet à quelque chose de se produire »
- **Énergie thermique** (énergie cinétique microscopique)
- **Énergie mécanique**
 - **Énergie cinétique** (mouvement d'un corps ou d'une particule)
 - **Énergie potentielle**
 - **de pesanteur** (gravitationnelle)
 - **élastique** (ressort)
- **Énergie électromagnétique** (rayonnement) = énergie cinétique
- **Énergie électrique**
- **Énergie chimique**, chaleur latente
- **Énergie de masse** ($E = m.c^2$)
- **Énergie du vide**
- **Énergie noire** et **énergie fantôme**

Différentes formes d'énergie et conversions

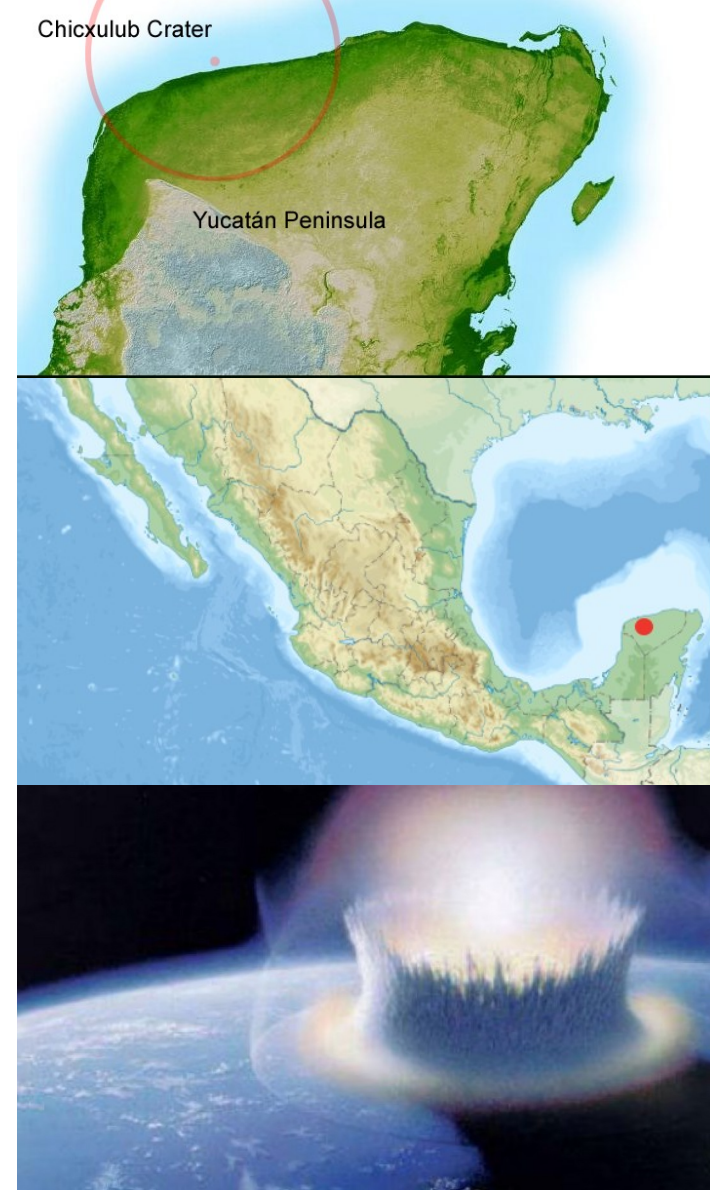
Noter la particularité de l'énergie nucléaire



Toutes les énergies proviennent du « Big Bang »

La chaleur

- Rappel : c'est l'énergie cinétique d'agitation microscopique des **atomes** & **molécules**
- Une conversion entre différentes formes d'énergie ne peut **jamais être totale**. Une partie de l'énergie est inévitablement « **perdue** » — transformée en chaleur.
 - Ex : moteur, roulement, ampoule, circuit électrique, ...
- Peut-on récupérer la chaleur « perdue » et la reconvertir en une autre forme d'énergie ?
 - Pas entièrement : comme la chaleur est un mouvement chaotique, il faut dépenser de l'énergie pour la « remettre en ordre »
 - **Le résultat net sera toujours une perte d'énergie**
 - Voir le **deuxième principe de la thermodynamique** et les machines thermiques
- C'est ~ la forme finale de l'énergie...



L'équivalence masse-énergie

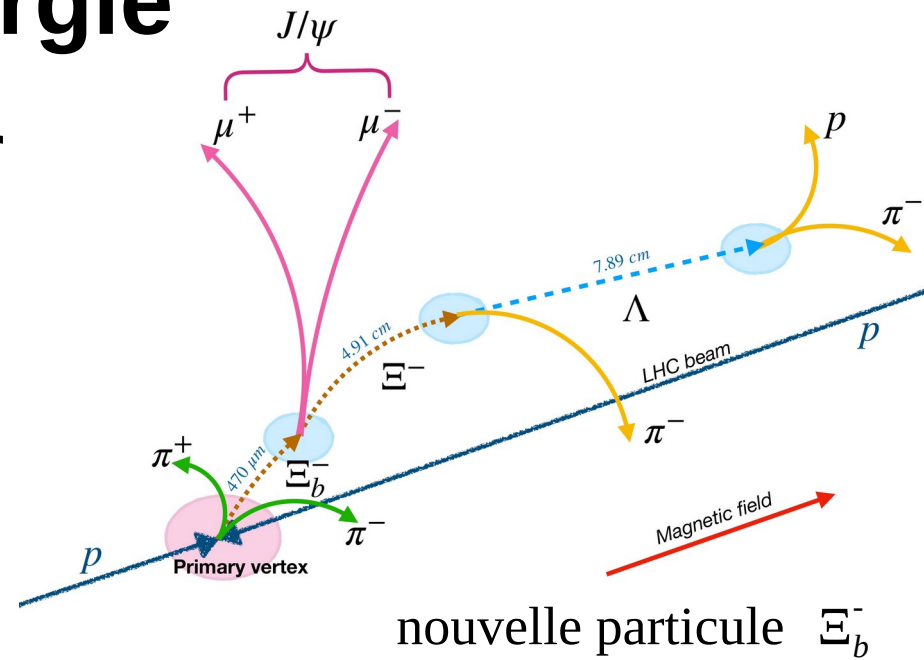
- Invariance de la norme du vecteur impulsion-énergie : $E = \gamma mc^2$!

Avec
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} > 1$$

- L'énergie peut être convertie en masse et vice-versa (principe des collisionneurs de particules)

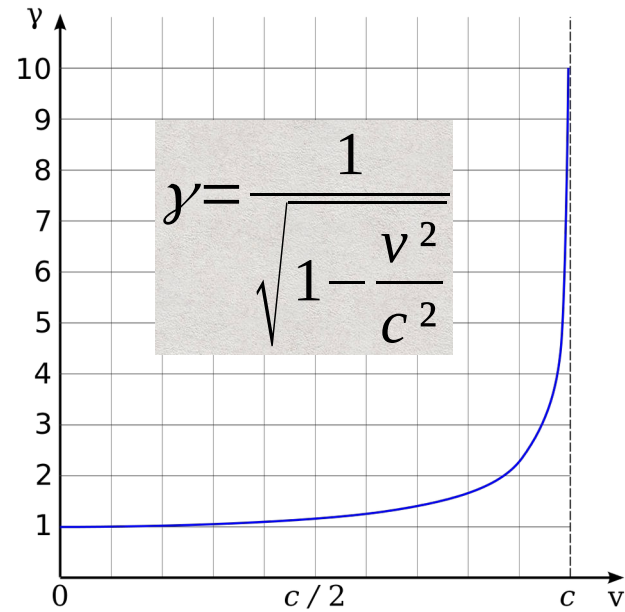
- Lorsque $v \ll c$, on peut « linéariser » : $E = \gamma mc^2 \approx mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 + \dots$

On retrouve $E_{\text{masse}} = mc^2$ et $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ (énergie cinétique classique)



Facteur de Lorentz et énergie

- Principe d'équivalence : $E = \gamma mc^2$
- Lorsque l'on approche de la vitesse de la lumière, l'énergie augmente très rapidement
 - Il devient **de plus en plus difficile d'accélérer**



LHC (CERN), $\gamma=7500$, $v = 99,999999\%$ de c

- C'est comme si la particule était **de plus en plus lourde** (masse inertielle)
- c est une **barrière infranchissable** (contrairement au « mur du son »)

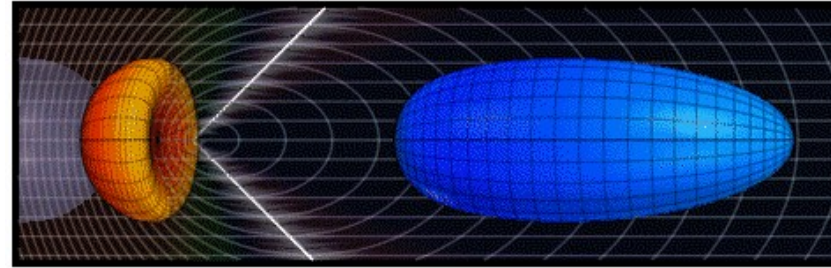
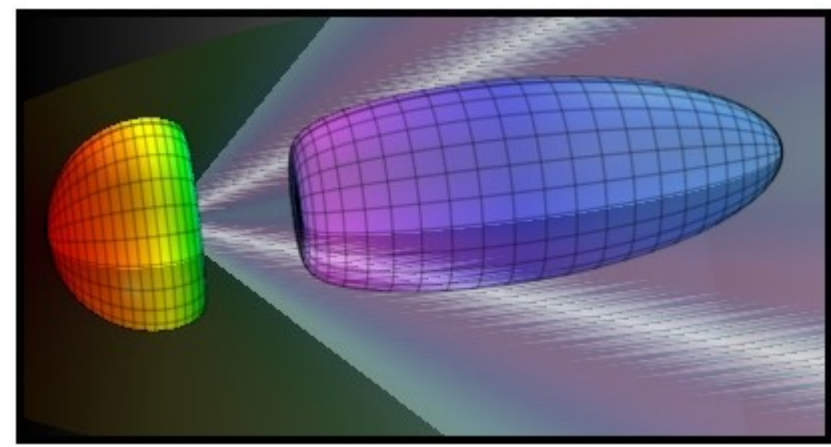


Les tachyons

- Particules **hypothétiques** (du grec ancien ταχύς / takhýs = rapide)
- vitesse **toujours supérieure à c** (vitesse de la lumière dans le vide)
 - **Pas incompatible** avec le fait que c soit une **limite infranchissable**
- une **énergie qui diminue lorsque la vitesse augmente**

- Si $v > c$, $1 - \frac{v^2}{c^2} < 0$ alors $\gamma = 1/\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ est **imaginaire** or $E = \gamma m c^2$ est **réelle** donc **m est imaginaire**

Correction par rapport à la vidéo de l'émission 8



Simulation de l'observation d'un tachyon. Puisque ce dernier se déplace plus rapidement que la lumière, son approche ne pourrait être vue (comme un avion supersonique).

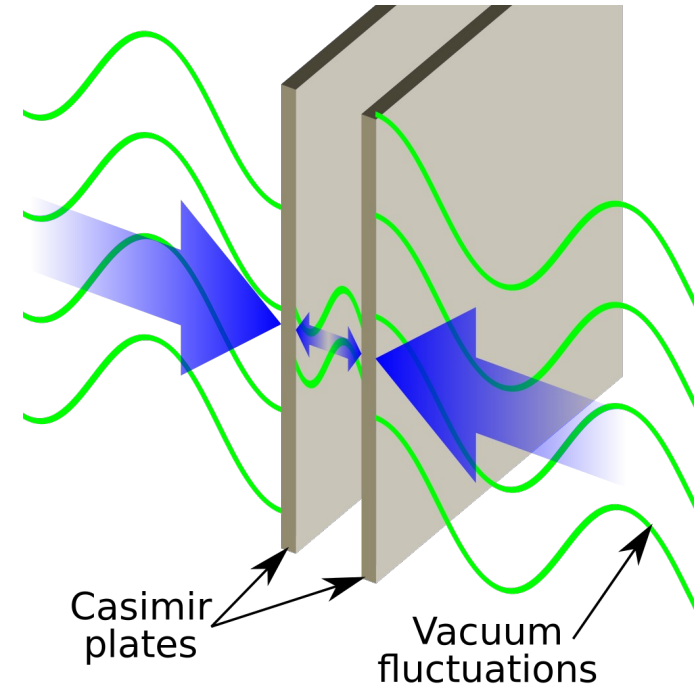
Une fois le tachyon passé, l'observateur pourrait voir deux images du tachyon allant dans des directions opposées. La ligne représente l'onde de choc engendrée par l'**effet Tcherenkov**.

$$i^2 = -1$$

L'énergie du vide

- C'est l'énergie de l'état fondamental des **champs quantiques** = énergie du **point zéro**
 - le « vide quantique » n'est pas vide
 - **Principe d'incertitude** appliqué au couple **énergie/temps**
 - **Négligeable à l'échelle macroscopique** car les fluctuations se moyennent et s'annulent sur de grands volumes
 - détectable uniquement à **très petite échelle** (= énergie d'autant plus **grande** que le volume considéré est **petit**)
- Les **fluctuations du champ quantique** peuvent faire apparaître des **paires particule-antiparticule** pendant des temps **très courts** (particules « **virtuelles** » **non observables**)
 - **Effet Casimir** (force attractive entre deux plaques parallèles conductrices et non chargées)
 - **Décalage de Lamb** (séparation de niveaux d'énergie d'un électron dans l'atome d'hydrogène, non prédit par eq. de Dirac)

$$\sigma_E \cdot \sigma_t \geq \hbar/2$$



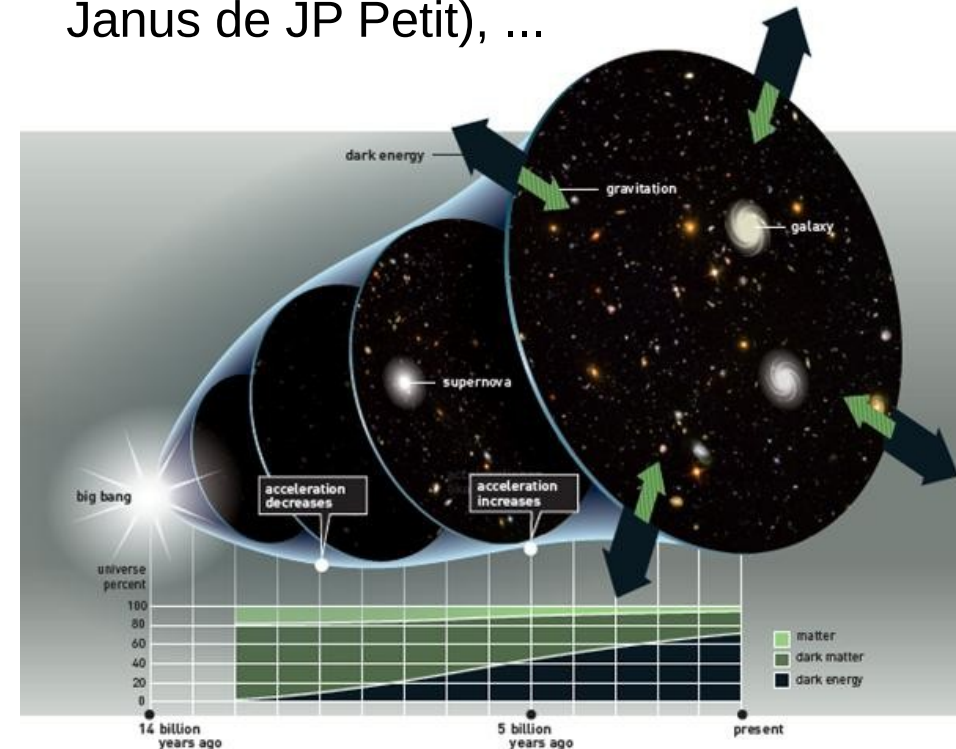
Confirme l'existence de
champs quantiques

L'énergie noire

- 1998 : découverte de l'**accélération de l'expansion l'Univers** !
 - Les galaxies s'éloignent les unes des autres de **plus en plus vite**
- interprétation : « **anti-gravité** » associée à une **pression négative** → « **énergie noire** »
Correspond à $\Lambda > 0$
- Rappels :
 - 1917 : Einstein l'introduit dans son équation pour que l'Univers reste statique (« la plus grande bêtise de ma vie »)
 - 1931 : Einstein accepte l'expansion de l'Univers → propose $\Lambda = 0$

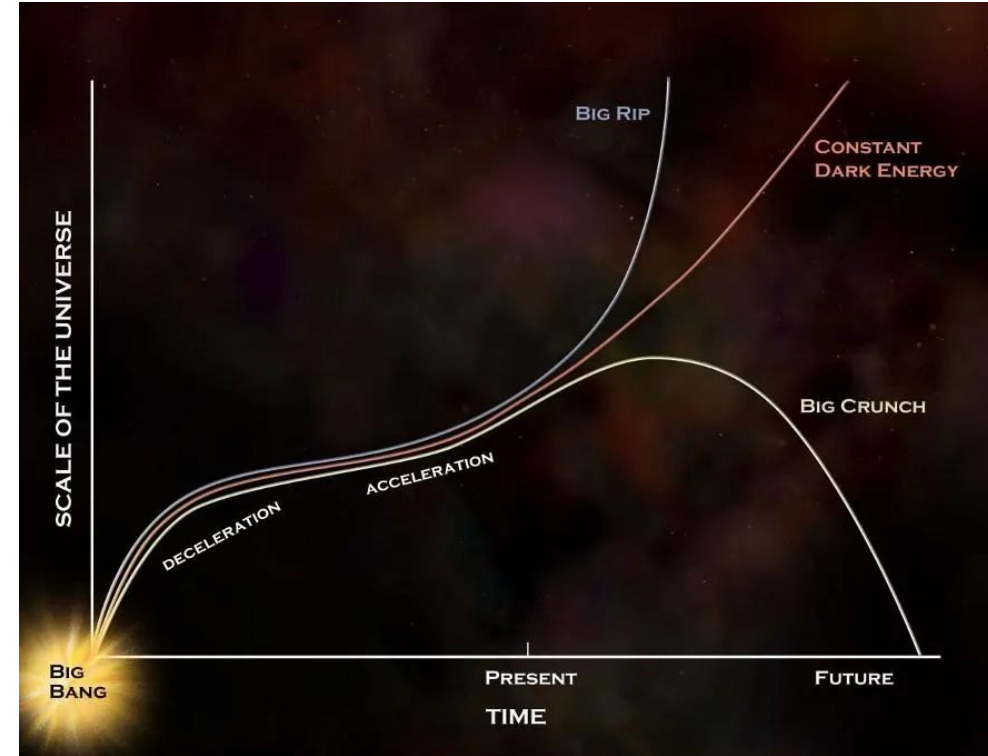
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8 \pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

- Remplirait **uniformément** tout l'Univers : 68 % de la densité d'énergie totale
- **Hypothétique**, de **nature inconnue** : énergie du vide (liée à la constante cosmologique), particules inconnues, modification des modèles (ex : modèle Janus de JP Petit), ...



L'énergie fantôme

- Candidat à l'**énergie noire**
- Propriété très particulière : sa densité **augmente** lors de l'expansion de l'Univers
- **Énergie cinétique négative**
- « **Grand déchirement** » (un scénario d'évolution de l'Univers) : si l'énergie sombre est effectivement de l'énergie fantôme, l'Univers s'achemine vers un « **big rip** » → **expansion infinie qui dépasse toutes les forces de cohésion** : tout est *in fine* « déchiré », des amas de galaxie aux particules élémentaires...



L'énergie libre

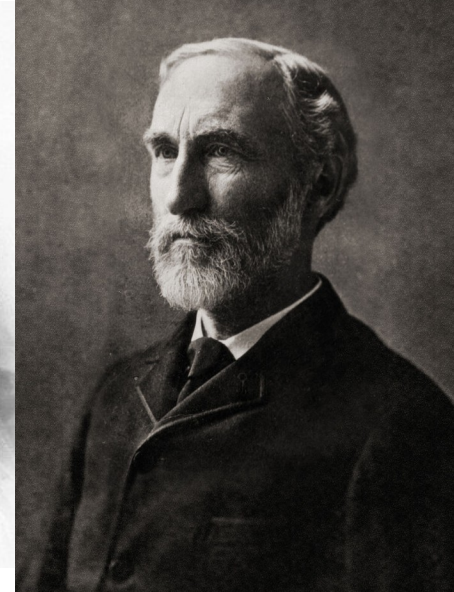
- Ou « énergie de Helmholtz »

$$F = U - TS$$

- Premier et deuxième principes : une transformation réelle (irréversible) à T et V constants ne peut s'effectuer qu'avec une **diminution de l'énergie libre** du système
 - « **Moins d'énergie et/ou plus d'entropie** »
 - (À T et p constantes $\rightarrow G =$ « **enthalpie libre** » – « **énergie libre de Gibbs** »)
- Condition d'évolution spontanée d'un système à température et volume constants : $dF \leq 0$



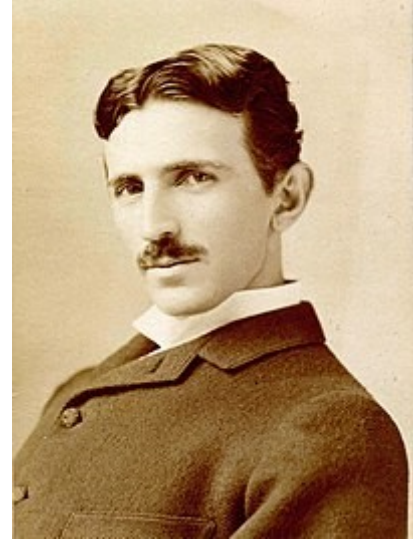
Hermann von Helmholtz
(1821-1894)



Josiah Willard Gibbs
(1839-1903)



L'énergie « libre »



Nikola Tesla (1856-1943)

- Ou énergie « **surnuméraire** », « **surunitaire** » : énergie fournie par un dispositif **en excédent** de l'énergie qu'il a reçue – notion de « **surunité** » liée au **mouvement perpétuel** (« **unité** »)
- Certains veulent extraire de l'énergie des **fluctuations quantiques du vide** : « **emprunt** » d'une fraction **infime** de l'énergie qui finirait par retourner au vide

Mais cela serait **contraire au principe de conservation de l'énergie**

- Rappel : un « principe physique » est **vérifié par la pratique** mais **pas démontré par la théorie**
- Le deuxième principe **interdit le mouvement perpétuel**
 - **Dissipation de l'énergie & augmentation de l'entropie**
 - *Et donc a fortiori la surunité*