Des cordes, pour quoi faire ?

Introduction à la théorie des cordes et à la cosmologie

Sommaire

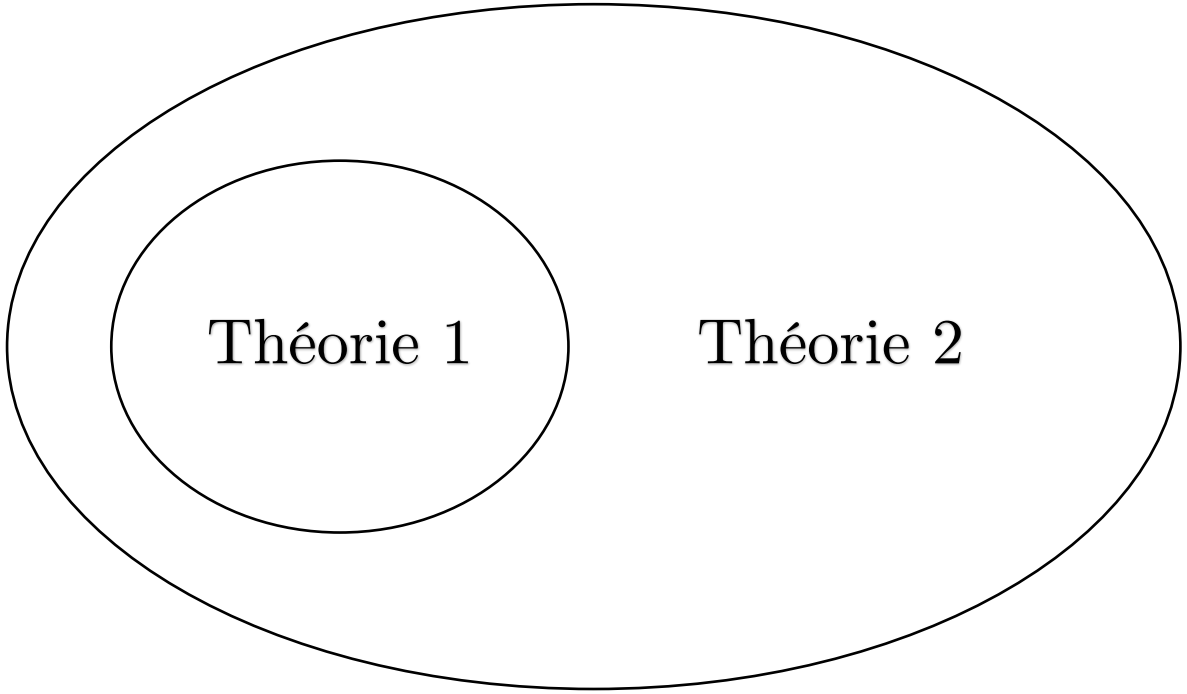
I – Les théories fondamentales et leur unification

II – Vers le modèle standard de la cosmologie

III – Vers le modèle standard de la physique de particules

IV – Aller plus loin : la théorie des cordes

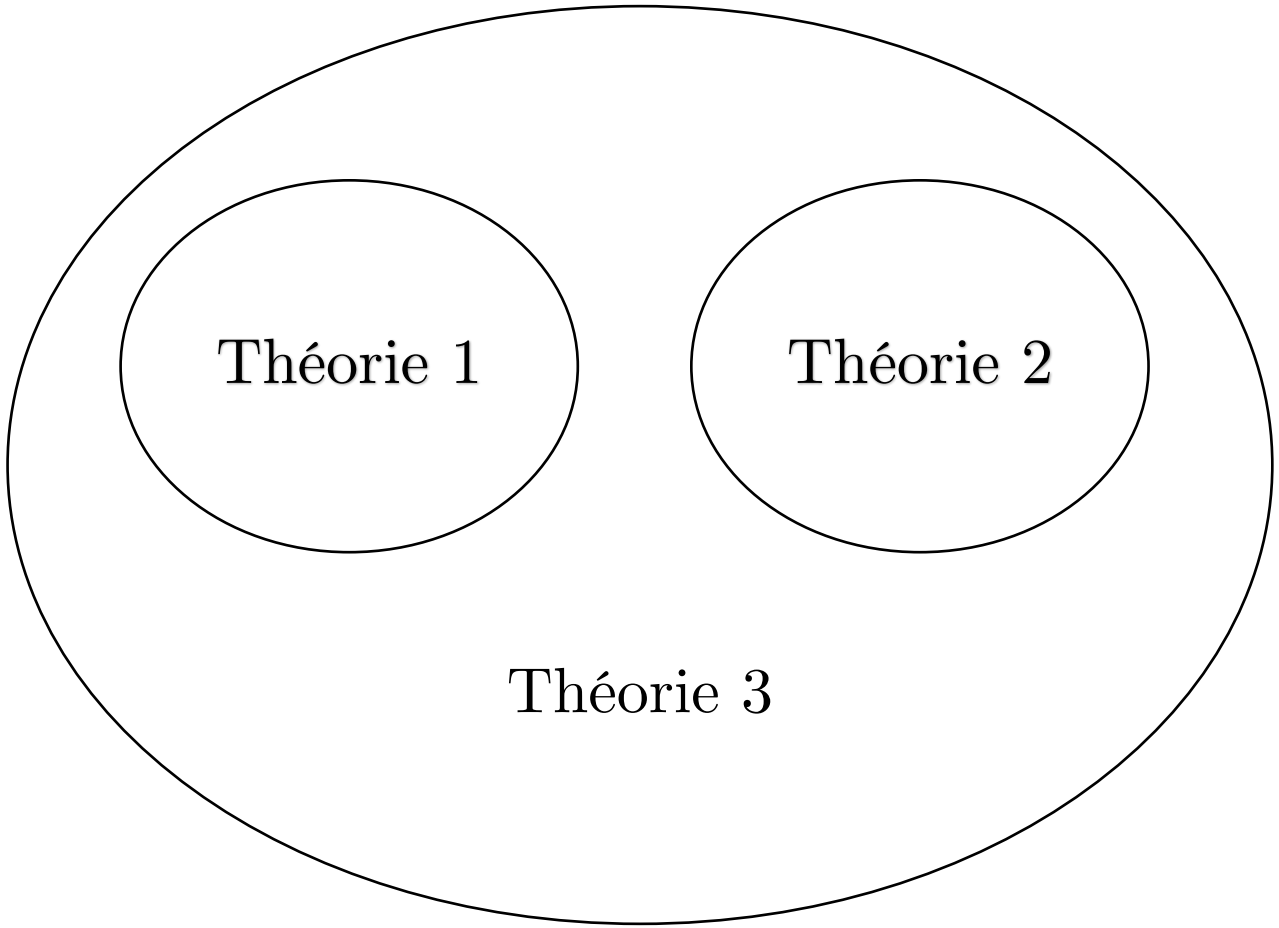
I – Les théories fondamentales et leur unification



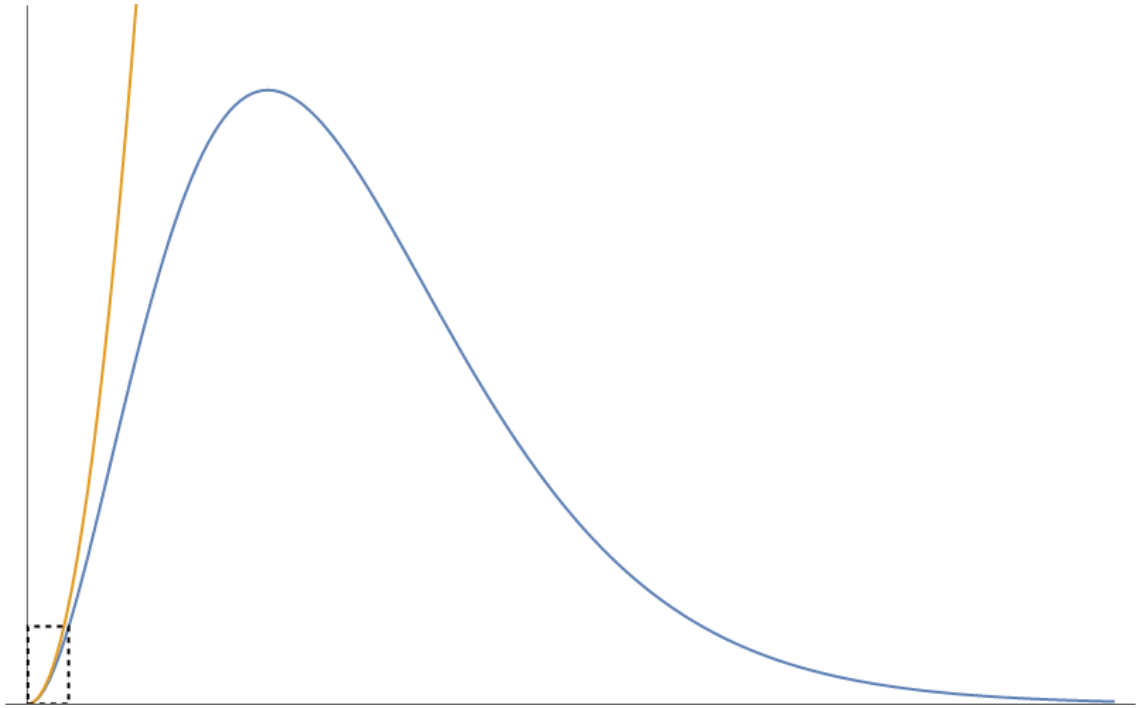
- Les théories ont des domaines d'application

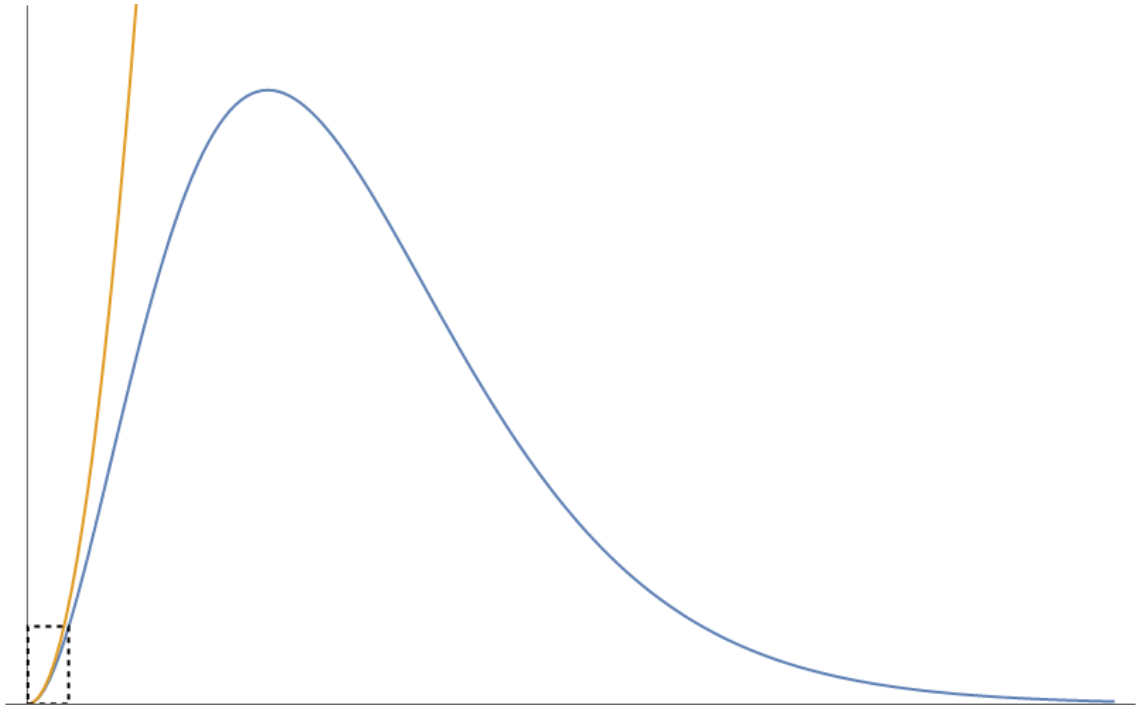
- Domaine d'application plus étendu → Théorie plus fondamentale

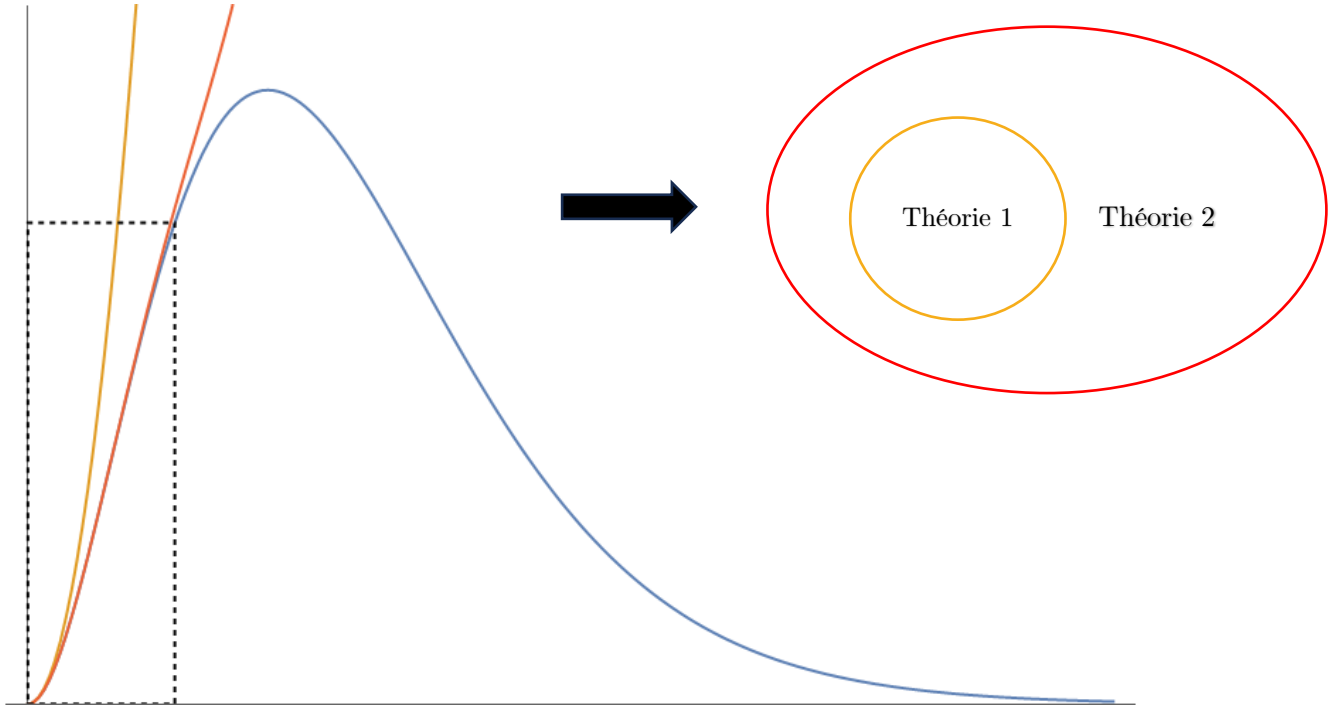
- La théorie 2 est plus fondamentale que la théorie 1

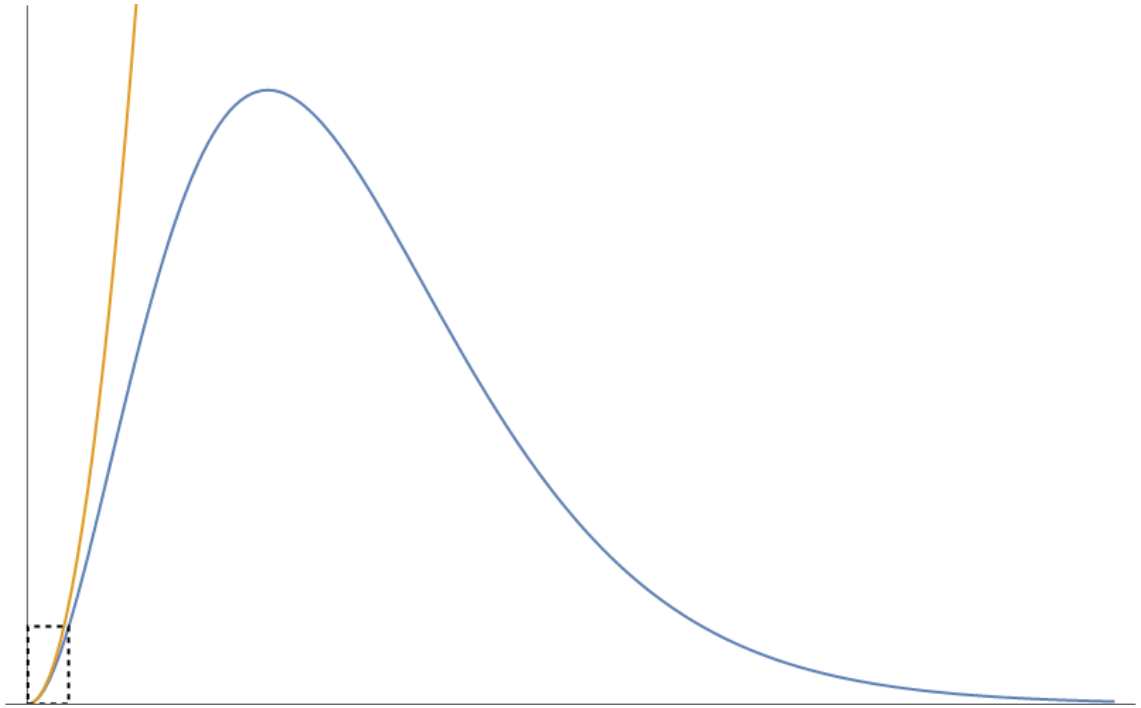


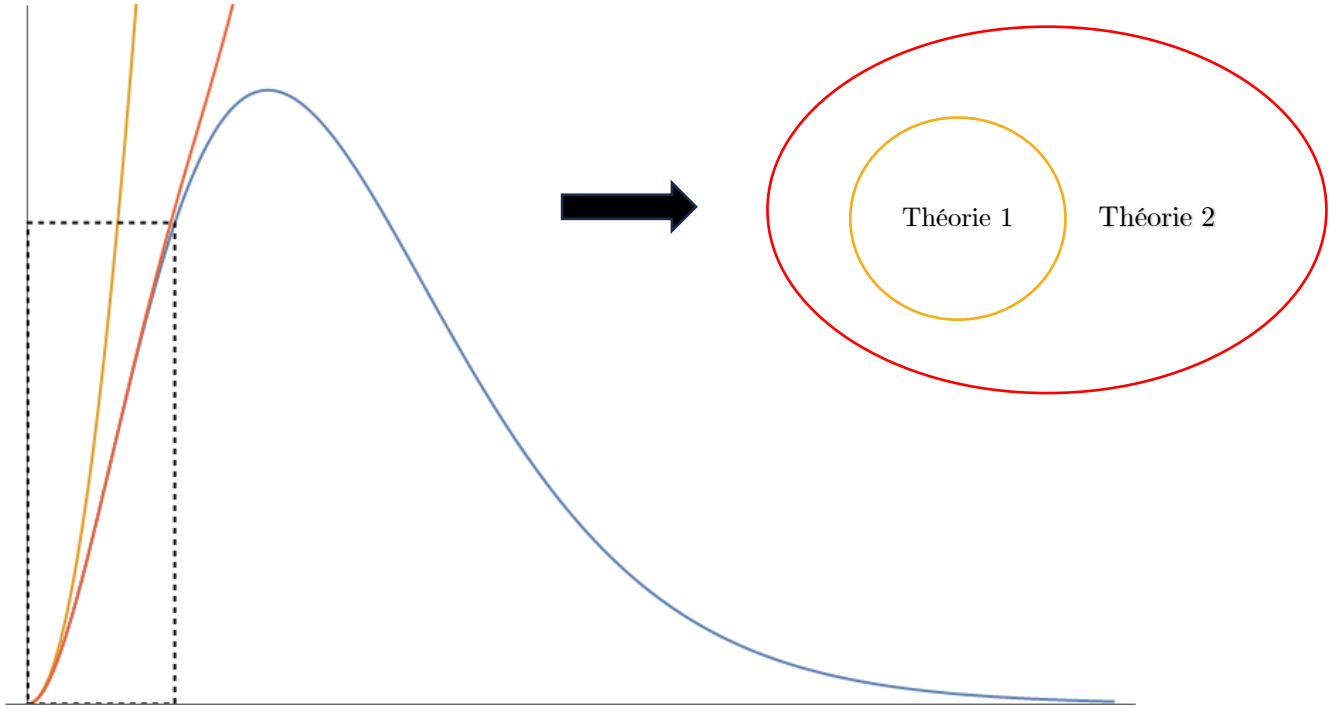
- Unification : la théorie 3 est plus fondamentale que les théories 1 et 2
- Elle les englobe toutes les deux

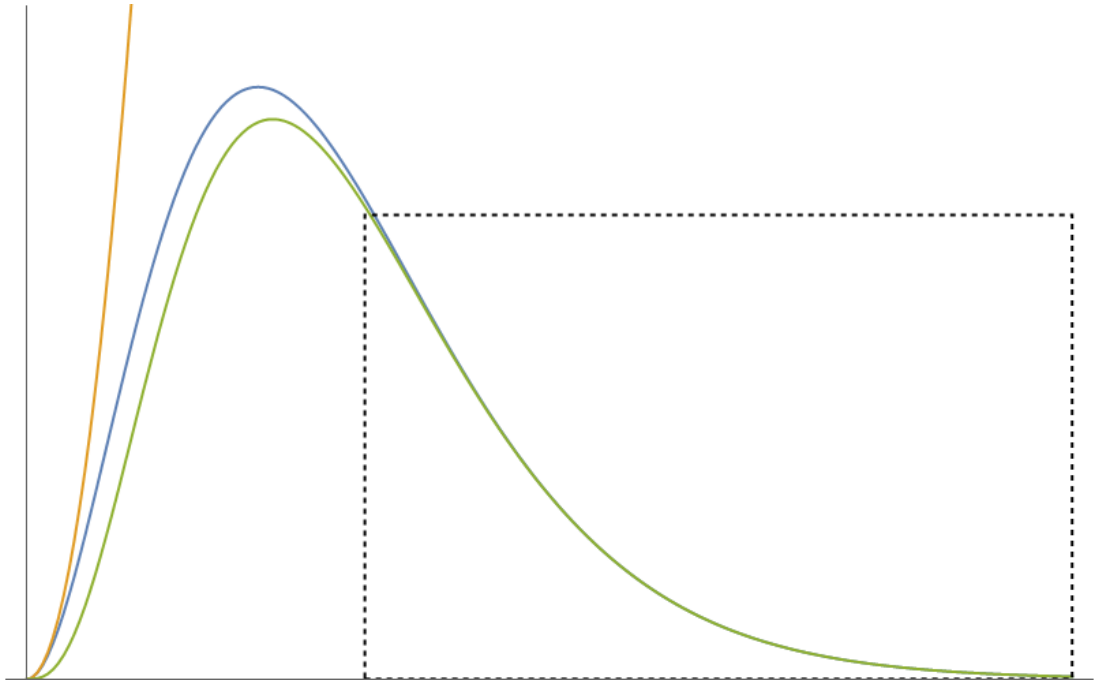


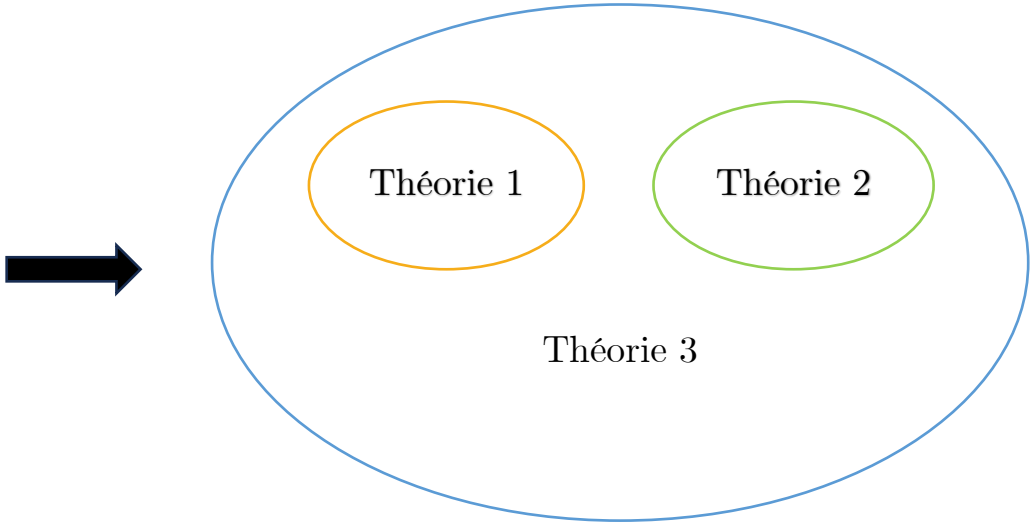



Théorie 1
Théorie 2

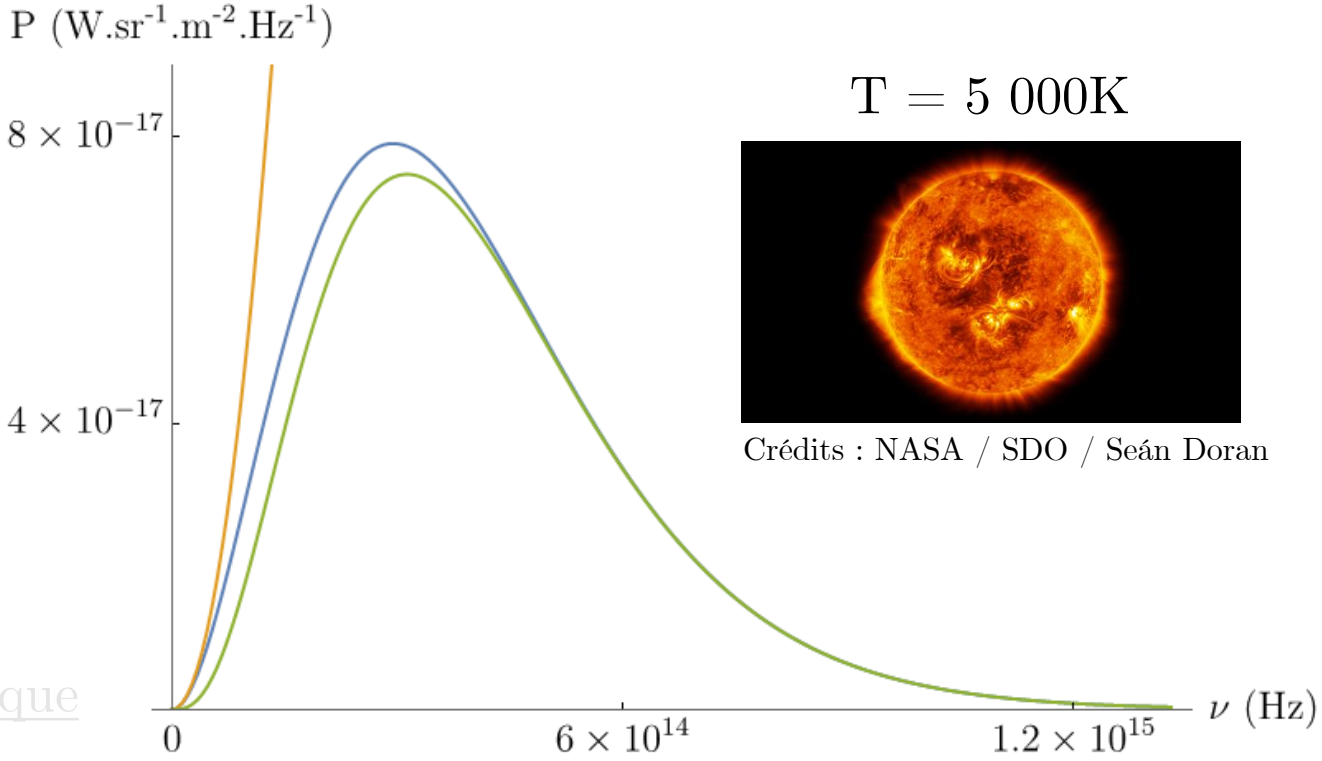



Théorie 1
Théorie 2




Théorie 1
Théorie 2
Théorie 3

- Spectre de rayonnement d'un corps noir



T = 5 000K

Crédits : NASA / SDO / Seán Doran

- Orange : Formule de Rayleigh-Jeans (début 1900), mécanique classique

$$P(\nu, T) = \frac{2k_{\mathrm{B}}T\nu^2}{c^3}$$

- Vert : Formule de Wien (1896), thermodynamique

$$P(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^3} \exp\left(-\frac{h\nu}{k_{\mathrm{B}}T}\right)$$

- Bleu : Loi de Planck (fin 1900), hypothèse de quanta d'énergie

$$P(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_{\mathrm{B}}T}\right) - 1}$$

- Spectre de rayonnement d'un corps noir

- Orange : Formule de Rayleigh-Jeans (début 1900), mécanique classique

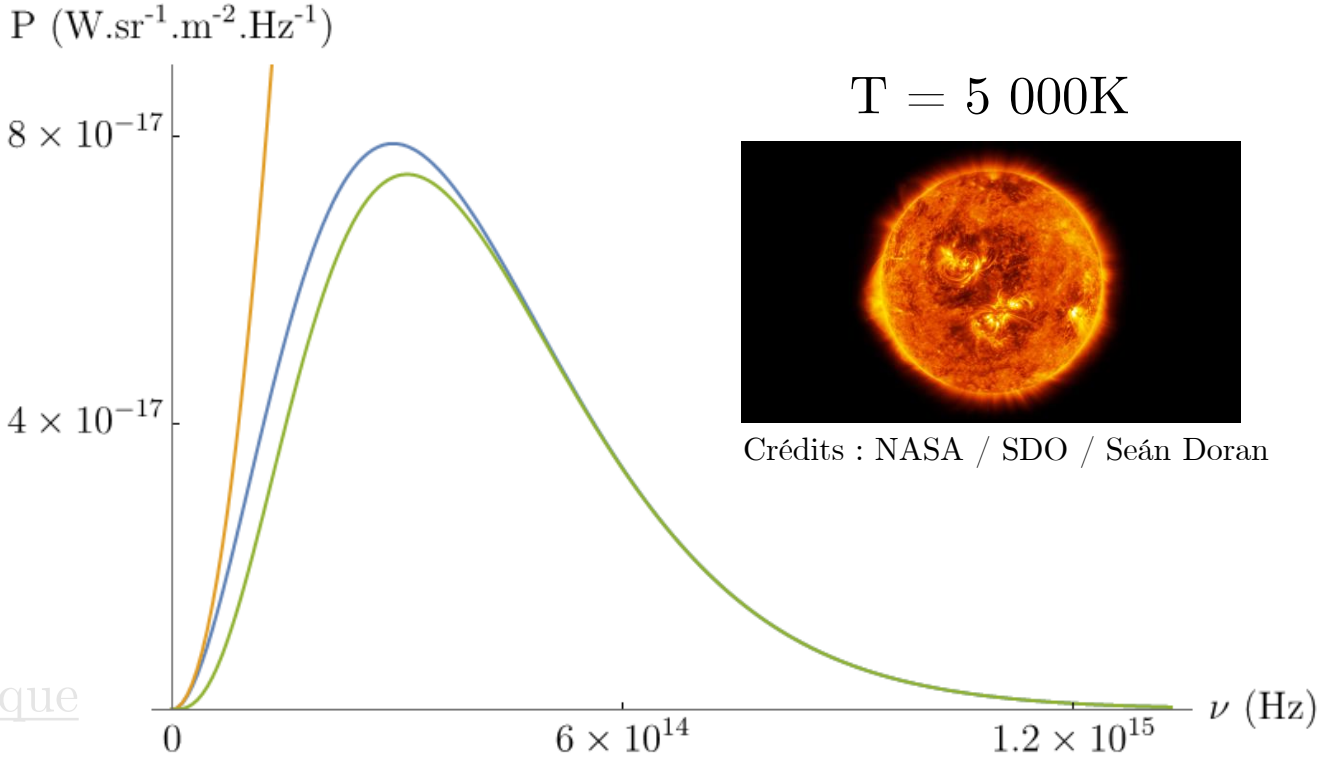
$$P(\nu, T) = \frac{2k_{\mathrm{B}}T\nu^2}{c^3}$$

- Vert : Formule de Wien (1896), thermodynamique

$$P(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^3} \exp\left(-\frac{h\nu}{k_{\mathrm{B}}T}\right)$$

- Bleu : Loi de Planck (fin 1900), hypothèse de quanta d'énergie

$$P(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_{\mathrm{B}}T}\right) - 1}$$



T = 5 000K

Crédits : NASA / SDO / Seán Doran

- Spectre de rayonnement d'un corps noir

- Orange : Formule de Rayleigh-Jeans (début 1900), mécanique classique

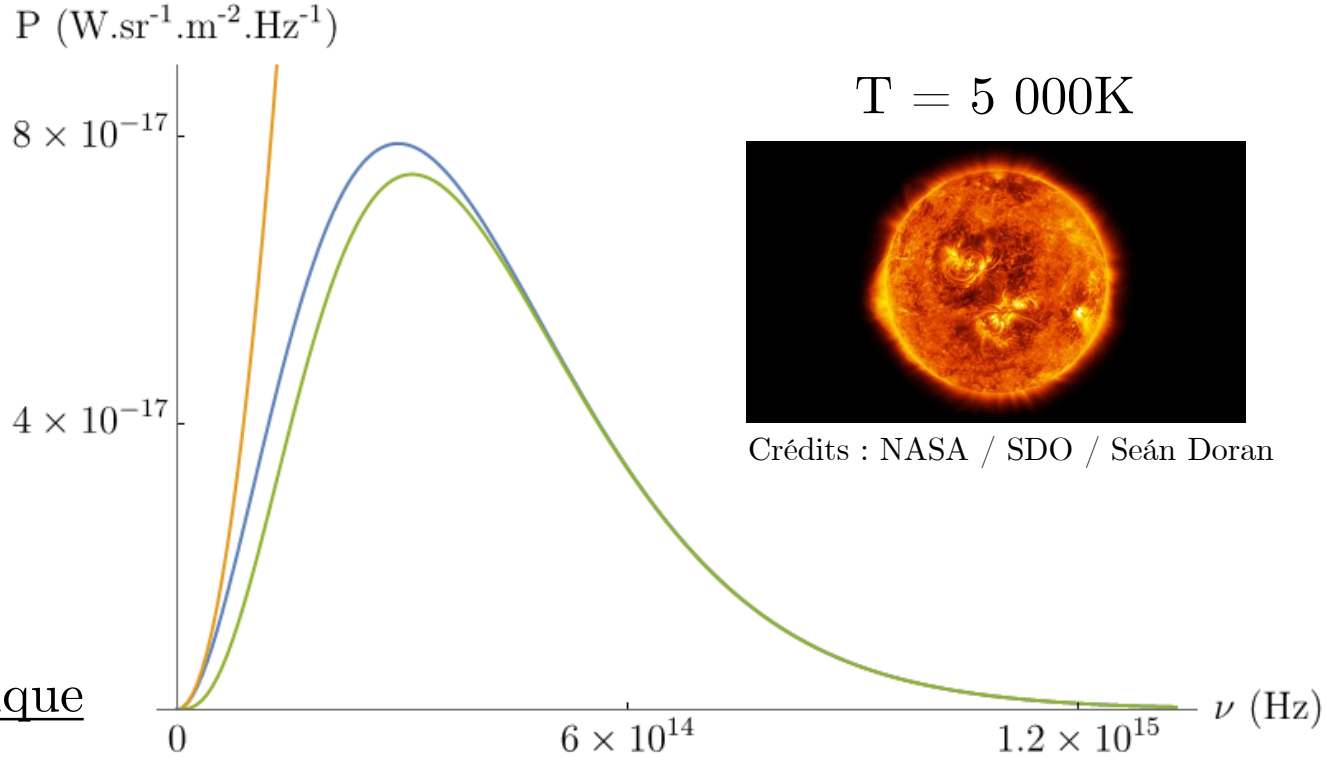
$$P(\nu, T) = \frac{2k_{\mathrm{B}}T\nu^2}{c^3}$$

- Vert : Formule de Wien (1896), thermodynamique

$$P(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^3}\exp\left(-\frac{h\nu}{k_{\mathrm{B}}T}\right)$$

- Bleu : Loi de Planck (fin 1900), hypothèse de quanta d'énergie

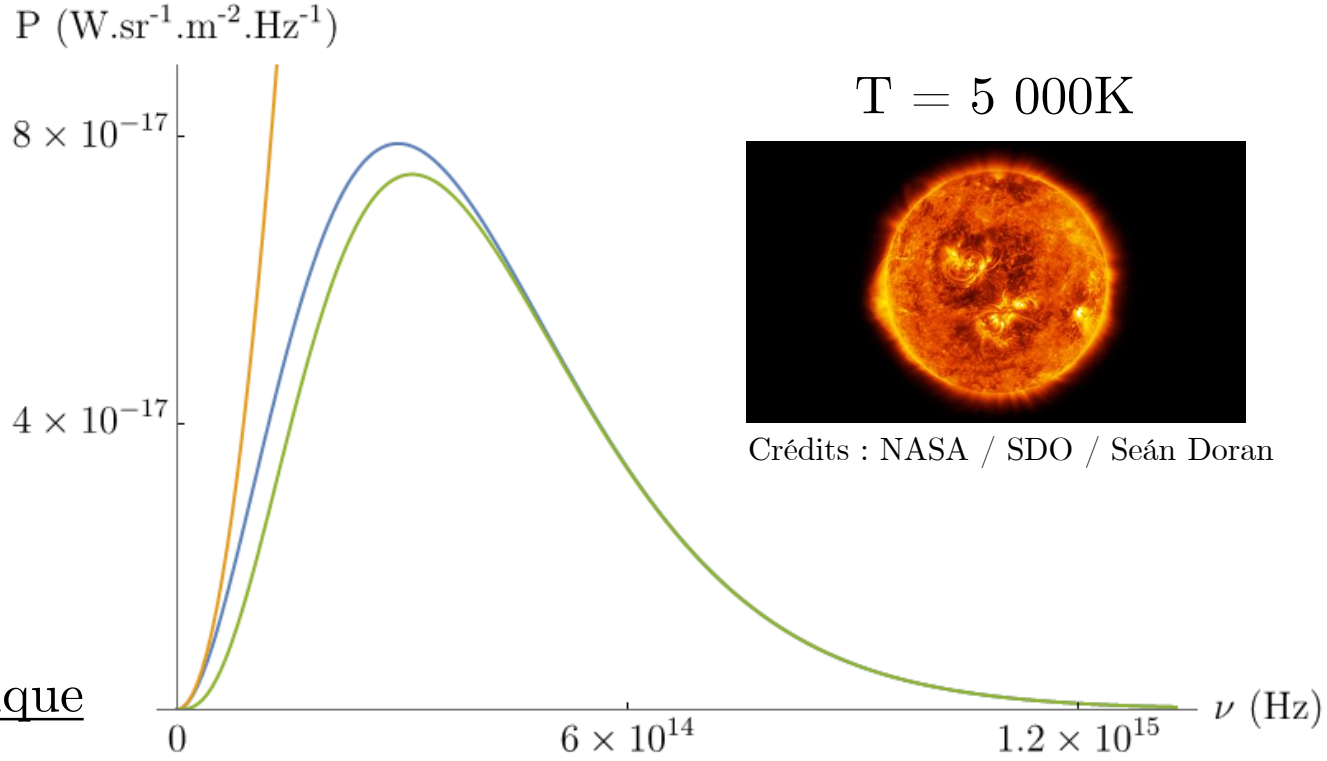
$$P(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^3}\frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_{\mathrm{B}}T}\right) - 1}$$



T = 5 000K

Crédits : NASA / SDO / Seán Doran

- Spectre de rayonnement d'un corps noir



T = 5 000K

Crédits : NASA / SDO / Seán Doran

- Orange : Formule de Rayleigh-Jeans (début 1900), mécanique classique

$$P(\nu, T) = \frac{2k_{\mathrm{B}}T\nu^2}{c^3}$$

- Vert : Formule de Wien (1896), thermodynamique

$$P(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^3} \exp\left(-\frac{h\nu}{k_{\mathrm{B}}T}\right)$$

- Bleu : Loi de Planck (fin 1900), hypothèse de quanta d'énergie

$$P(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_{\mathrm{B}}T}\right) - 1}$$

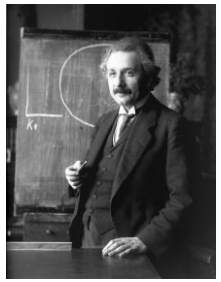
Une histoire d'échelle

100 000 al

Crédits : NASA

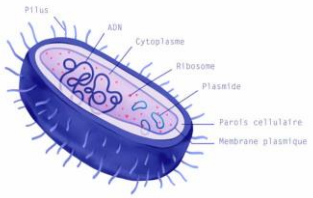
12 000 km

Crédits : F. Schmutzer

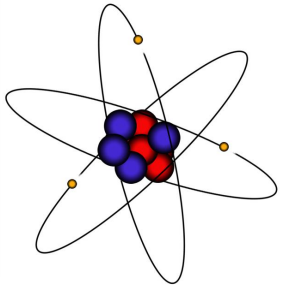


2 m

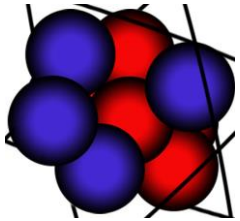
Crédits : lien



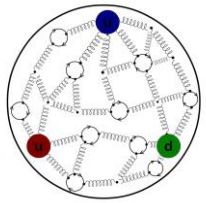
1 µm



0.1 nm



1 fm



10^{-18} m

Taille

Longueur d'onde

Visible

Energie

Intuition

Intuition

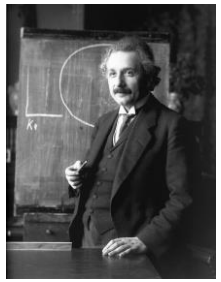
Une histoire d'échelle

100 000 al

Crédits : NASA

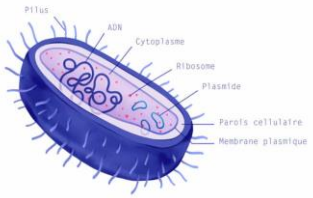
12 000 km

Crédits : F. Schmutzer

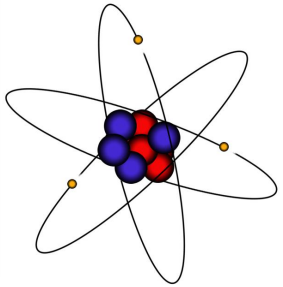


2 m

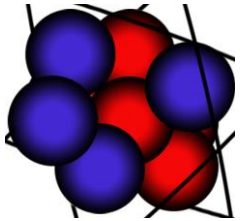
Crédits : lien



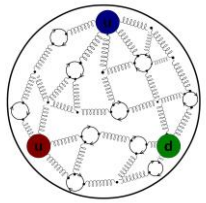
1 µm



0.1 nm



1 fm



10^{-18} m

Taille

Longueur d'onde

Visible

Energie

Intuition

Intuition

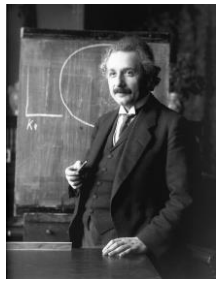
Une histoire d'échelle

100 000 al

Crédits : NASA

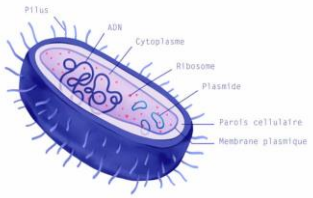
12 000 km

Crédits : F. Schmutzer

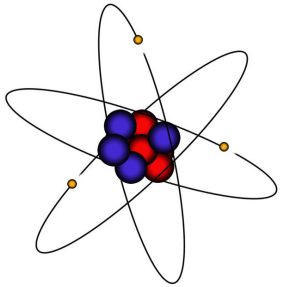


2 m

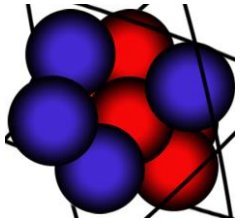
Crédits : lien



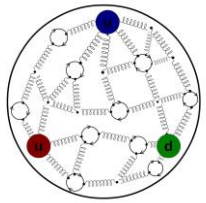
1 µm



0.1 nm



1 fm



10^{-18} m

Taille

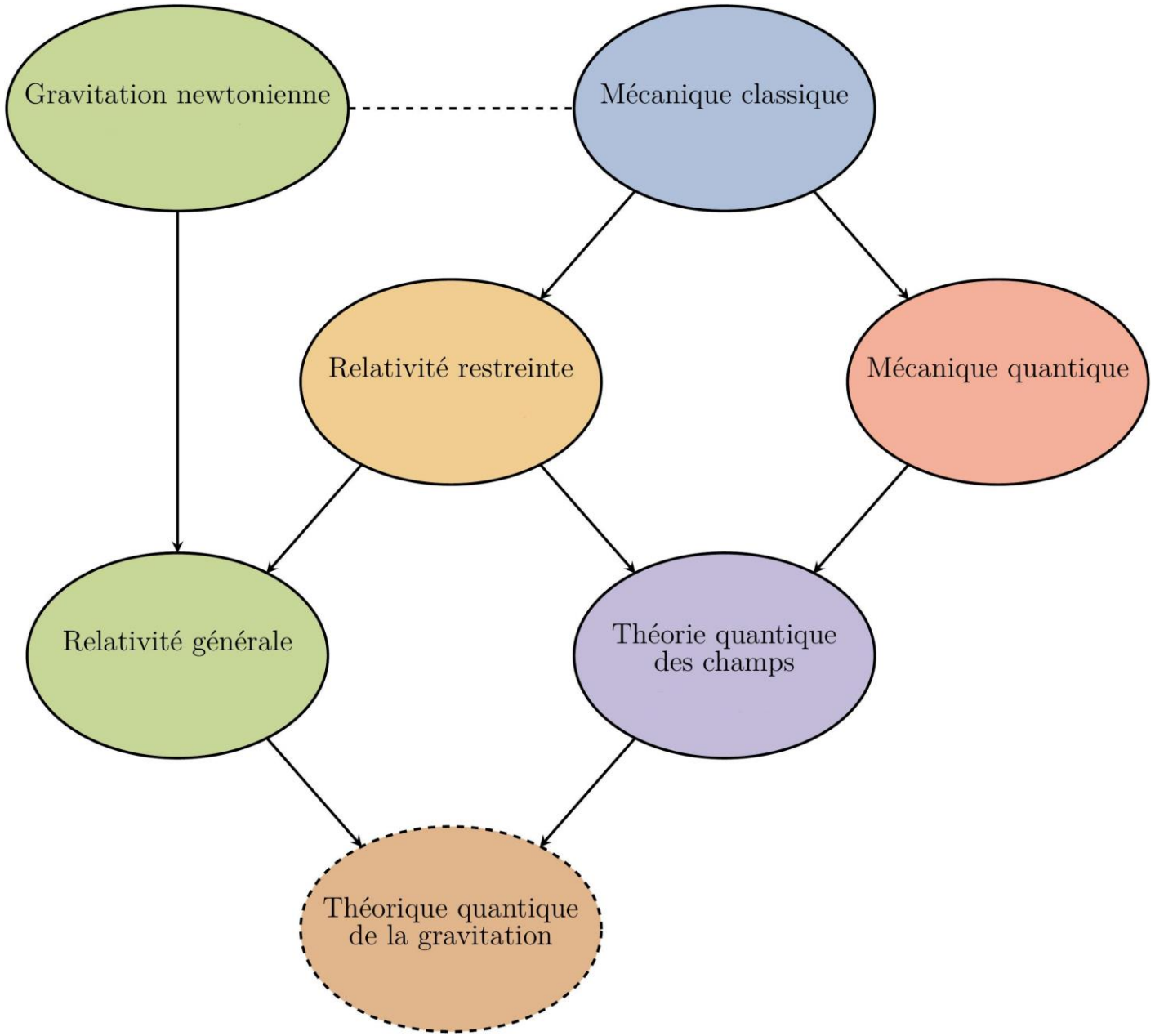
Longueur d'onde

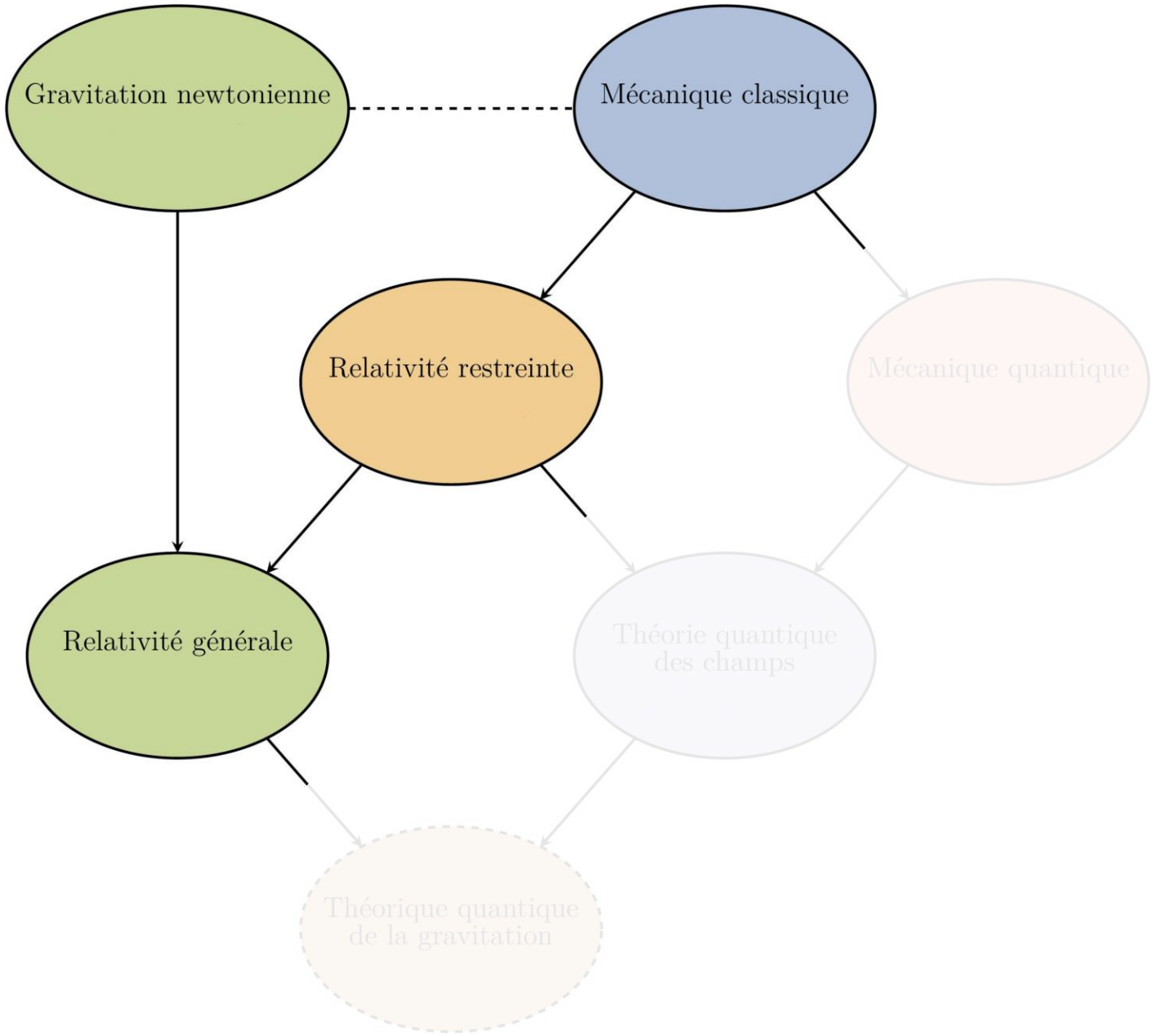
Energie

Visible

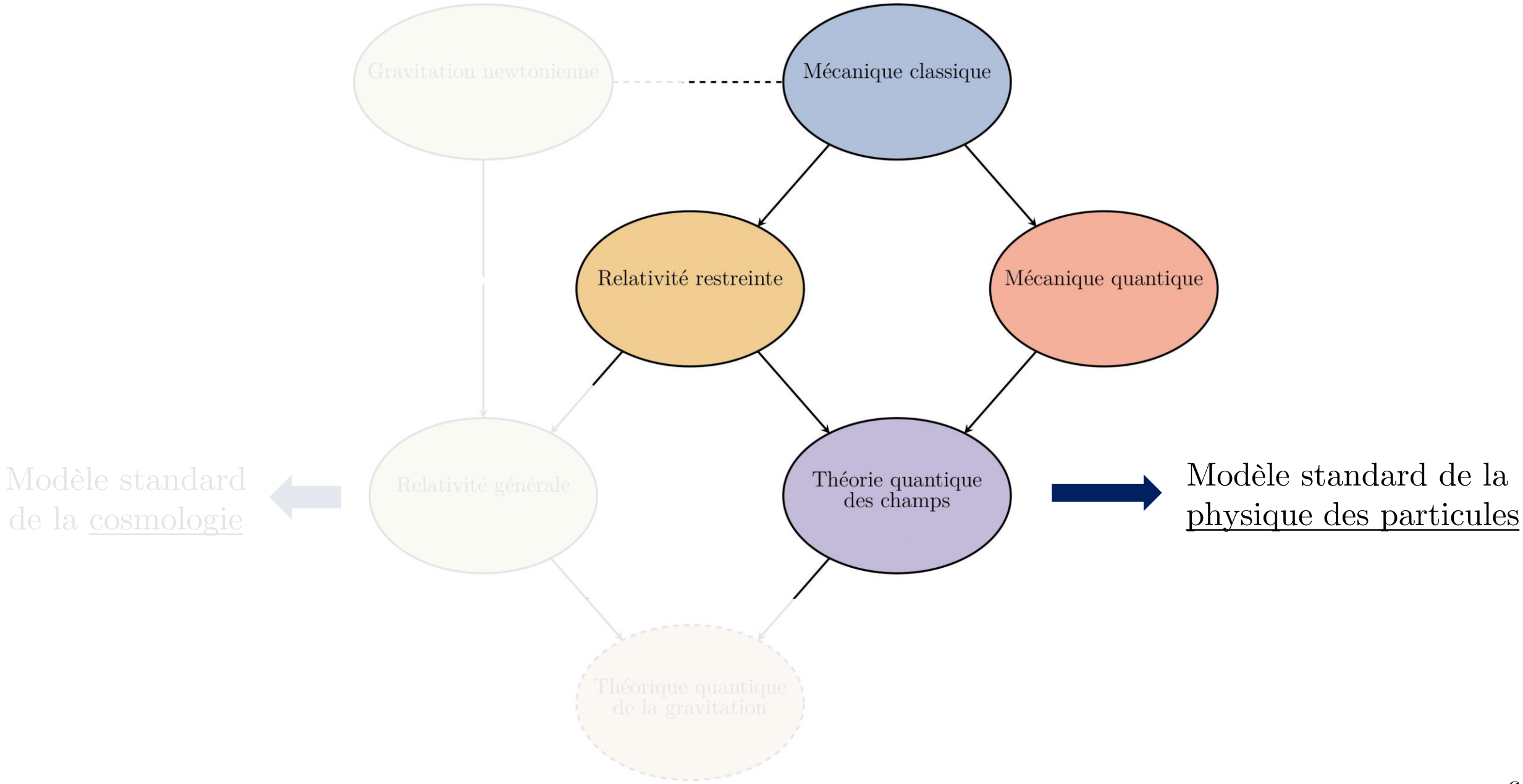
Intuition

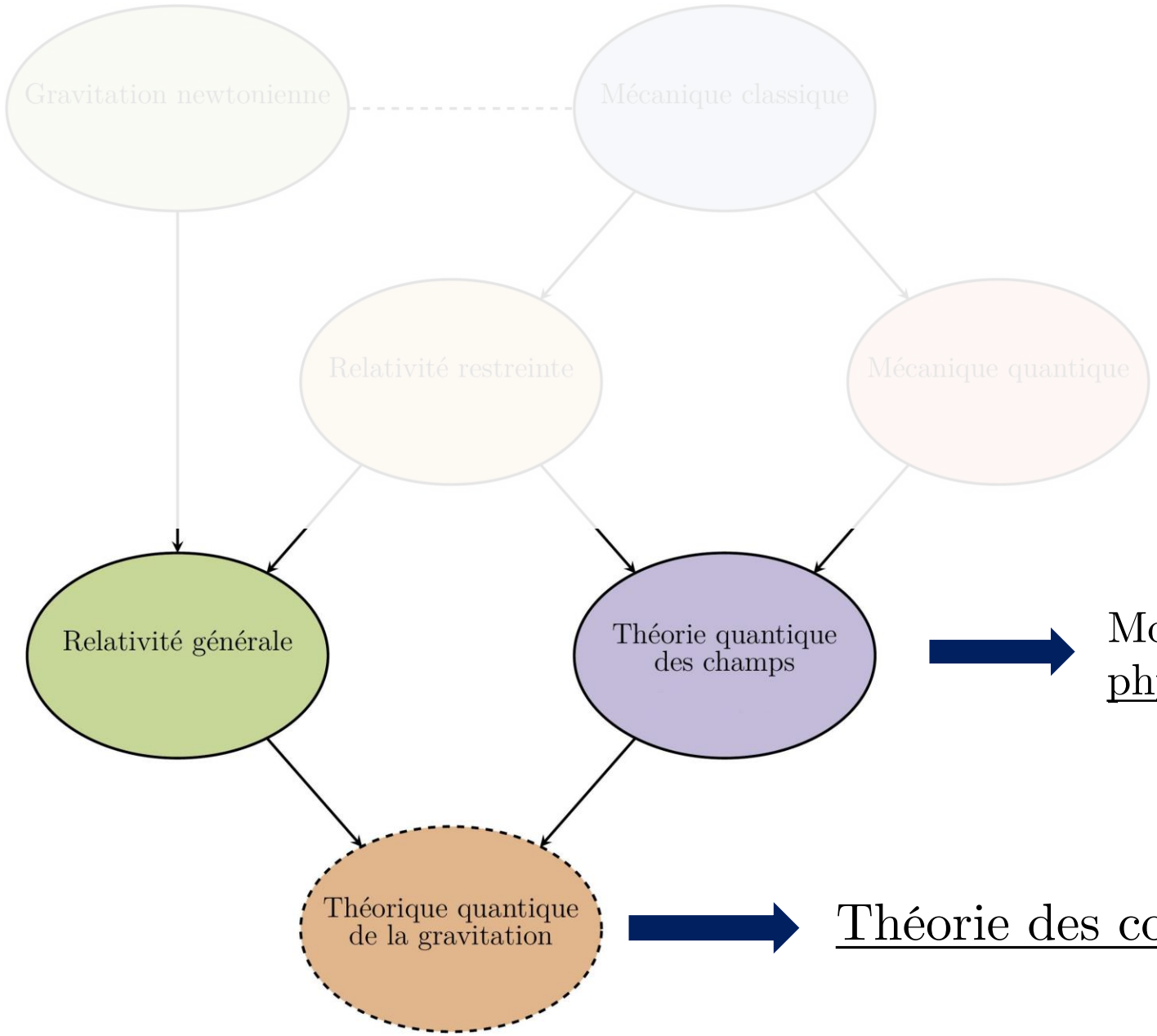
Intuition


Gravitation newtonienne
Mécanique classique
Relativité restreinte
Mécanique quantique
Relativité générale
Théorie quantique des champs
Théorique quantique de la gravitation



Modèle standard de la <u>cosmologie</u>


Gravitation newtonienne
Mécanique classique
Relativité restreinte
Mécanique quantique
Modèle standard
de la cosmologie
Relativité générale
Théorie quantique
des champs
Modèle standard de la
physique des particules
Théorique quantique
de la gravitation



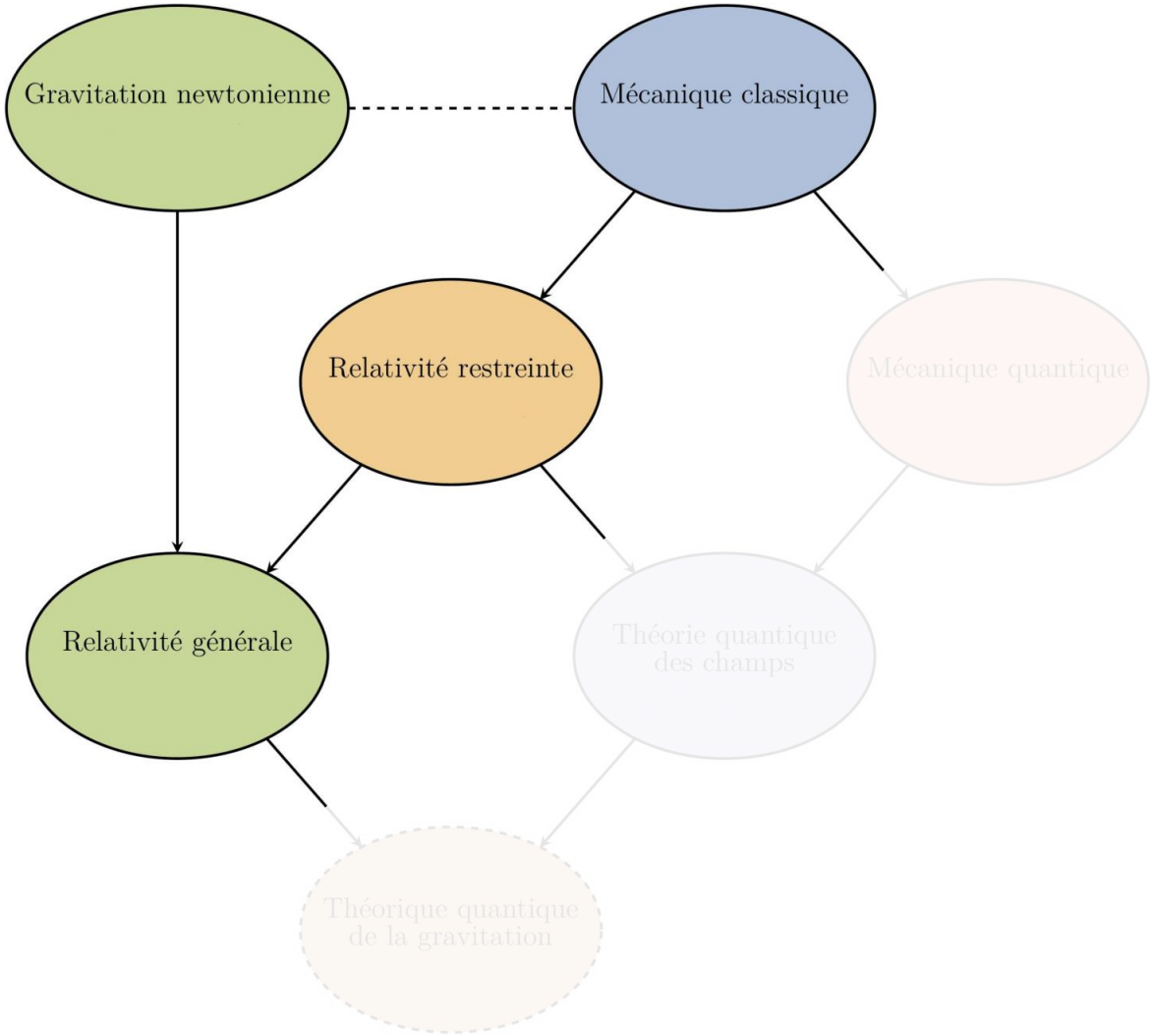
Modèle standard de la <u>cosmologie</u>

Modèle standard de la <u>physique des particules</u>

<u>Théorie des cordes</u>

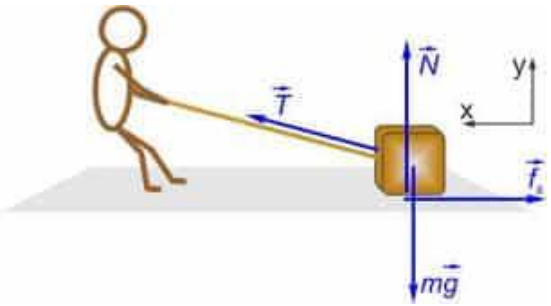
II – Vers le modèle standard de la cosmologie

Modèle standard
de la <u>cosmologie</u>

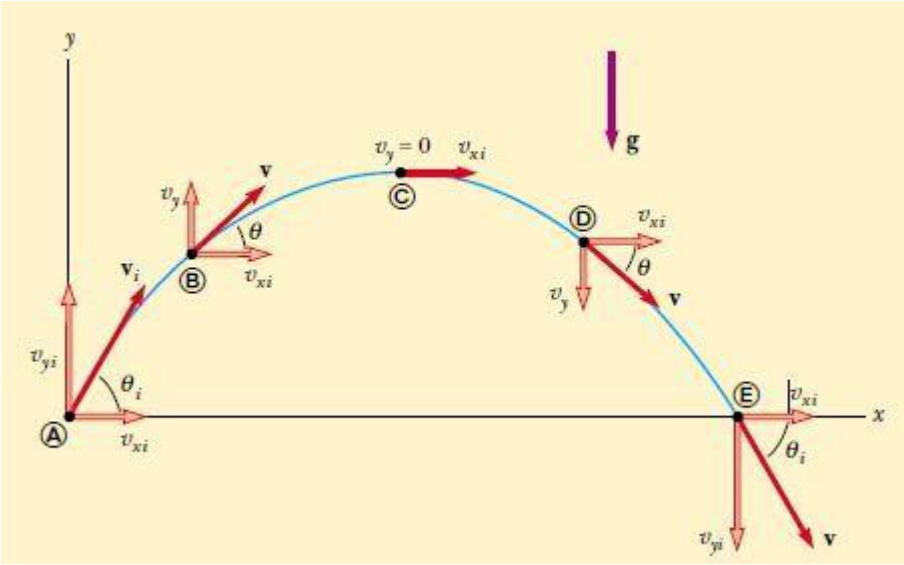


Mécanique classique

- Des <u>forces</u> mettent les objets en mouvements



Crédits : lien de l'image



Crédits : lien vers l'image

- Prédire des <u>trajectoires</u> :

position au cours du temps

- <u>Besoin de deux choses :</u> 1/Expression quantitative des forces

2/Une <u>loi</u> précise qui relie les forces au mouvement

Une loi en physique

- Format générique → $\boxed{\text{Phénomène} = \text{f}(\text{sources})}$

Sources : les forces

Phénomène : le mouvement

Expression précise selon les cas,
de manière générale : $\vec{F}$

Caractérisé par plusieurs variables :
vitesse $\vec{v}$, accélération $\vec{a}$, ...

- Peut impliquer des paramètres comme la masse m

$$\boxed{\text{Deuxième loi de Newton : } \vec{a} = \vec{F} / \text{m}}$$

Une loi en physique

- Format générique

$$\boxed{\text{Phénomène} = \text{f}(\text{sources})}$$

Sources : les forces

Expression précise selon les cas,
de manière générale : $\vec{F}$

Phénomène : le mouvement

Caractérisé par plusieurs variables :
vitesse $\vec{v}$, accélération $\vec{a}$, ...

- Peut impliquer des paramètres comme la masse m

$$\boxed{\text{Deuxième loi de Newton : } \vec{a} = \vec{F} / \text{m}}$$

Une loi en physique

- Format générique → $\boxed{\text{Phénomène} = \text{f}(\text{sources})}$

Sources : les forces

Phénomène : le mouvement

↓

Expression précise selon les cas,
de manière générale : $\vec{F}$

↓

Caractérisé par plusieurs variables :
<u>vitesse</u> $\vec{v}$, <u>accélération</u> $\vec{a}$, ...

- Peut impliquer des paramètres comme la masse m

$\boxed{\text{Deuxième loi de Newton : } \vec{a} = \vec{F} / \text{m}}$

Une loi en physique

- Format générique → $\boxed{\text{Phénomène} = \text{f}(\text{sources})}$

Sources : les forces

↓

Expression précise selon les cas,
de manière générale : $\vec{F}$

Phénomène : le mouvement

↓

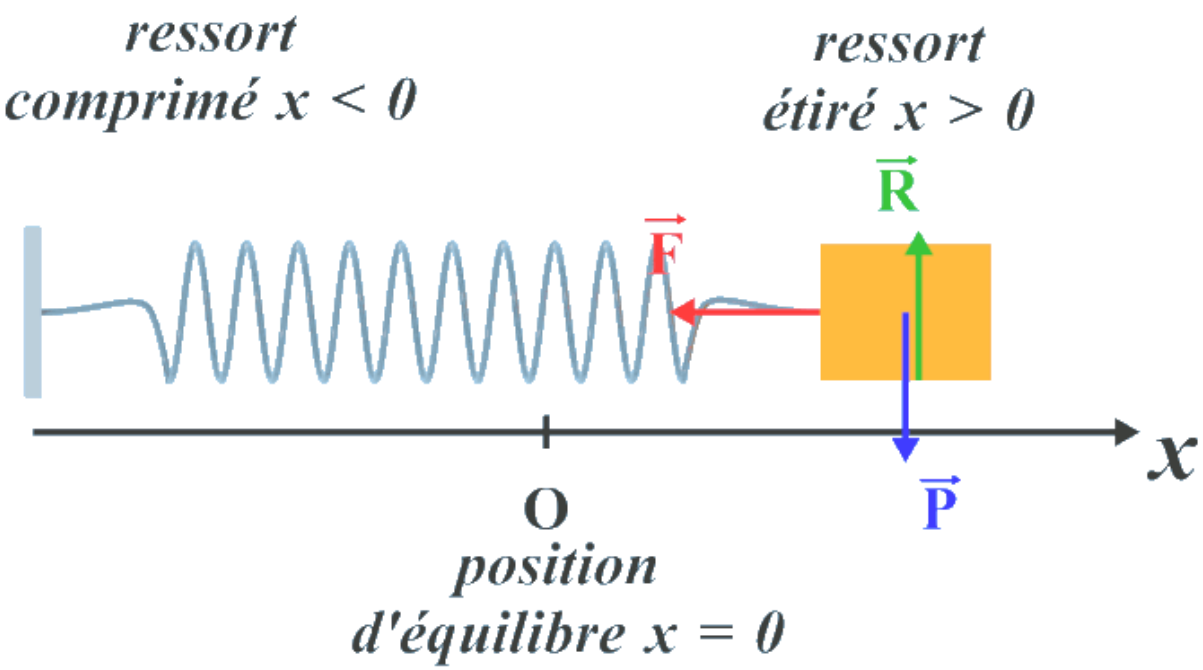
Caractérisé par plusieurs variables :
<u>vitesse</u> $\vec{v}$, <u>accélération</u> $\vec{a}$, ...

- Peut impliquer des paramètres comme la masse m

$$\boxed{\text{Deuxième loi de Newton : } \vec{a} = \vec{F} / \text{m}}$$

- <u>Résoudre</u> l'équation → Trajectoire

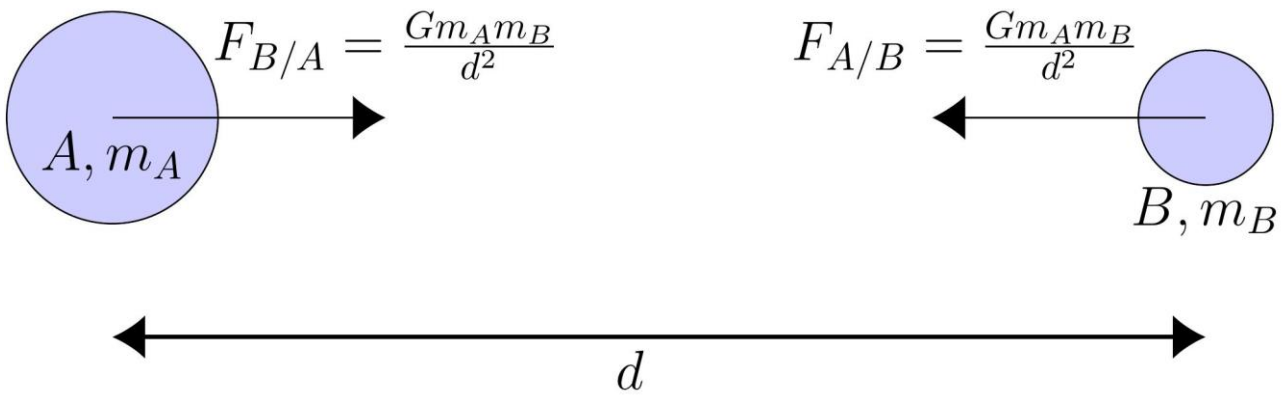
- <u>Exemple :</u> force de rappel d'un ressort

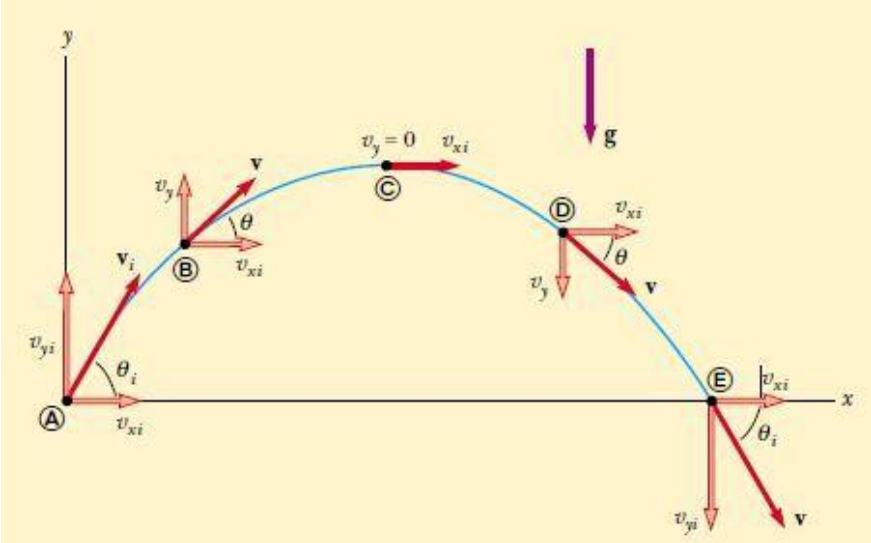


Crédits : lien de l'image

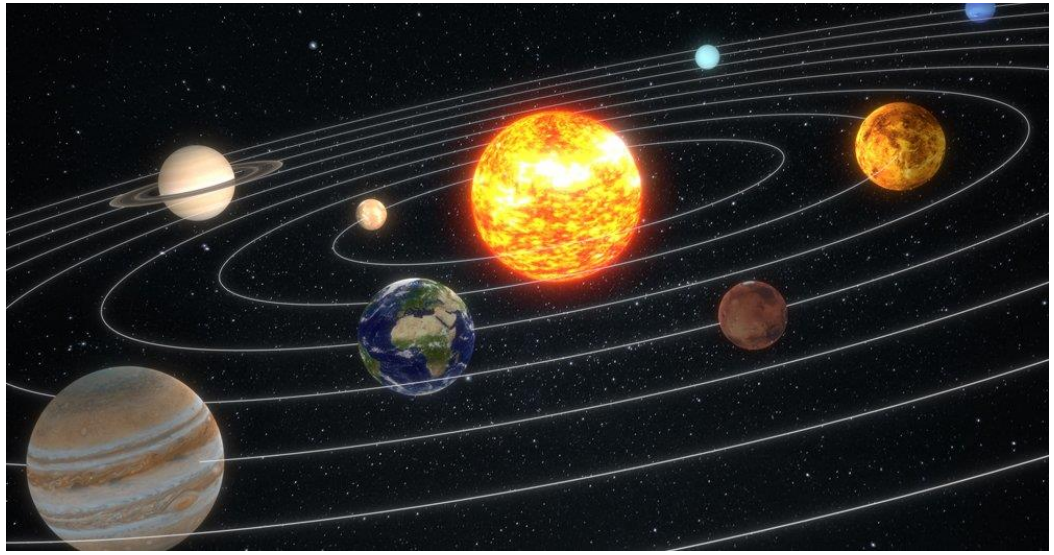
Gravitation newtonienne

- Une formule précise pour la <u>force gravitationnelle</u>



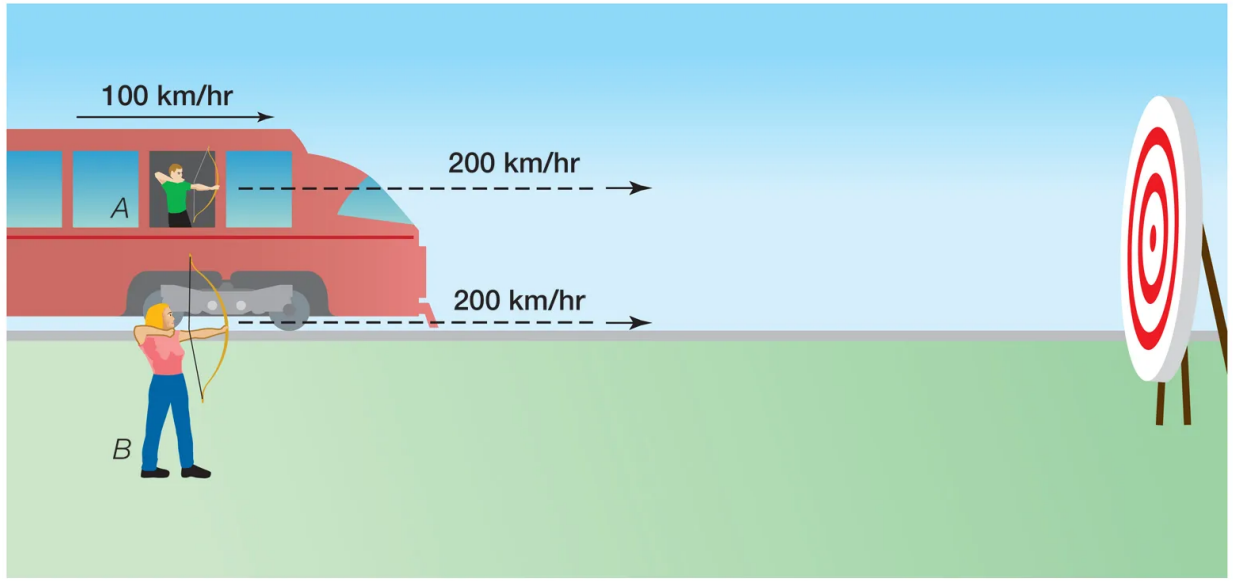


Crédits : lien vers l'image



Crédits : Y. Gominet/IMCCE/NASA

Un problème de vitesse



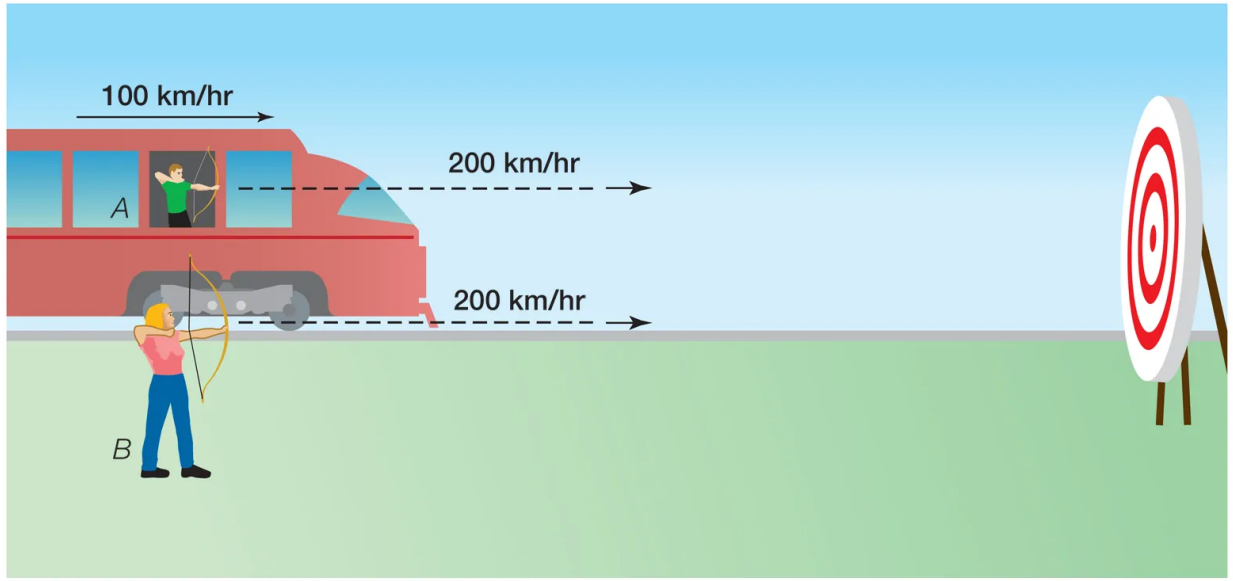
<u>Point de vue de B :</u> la flèche tirée par A se déplace à $100 + 200 = 300$ km/h

<u>Point de vue de B :</u> le laser tiré par A se déplace à $100 + c$ km/h ??!!

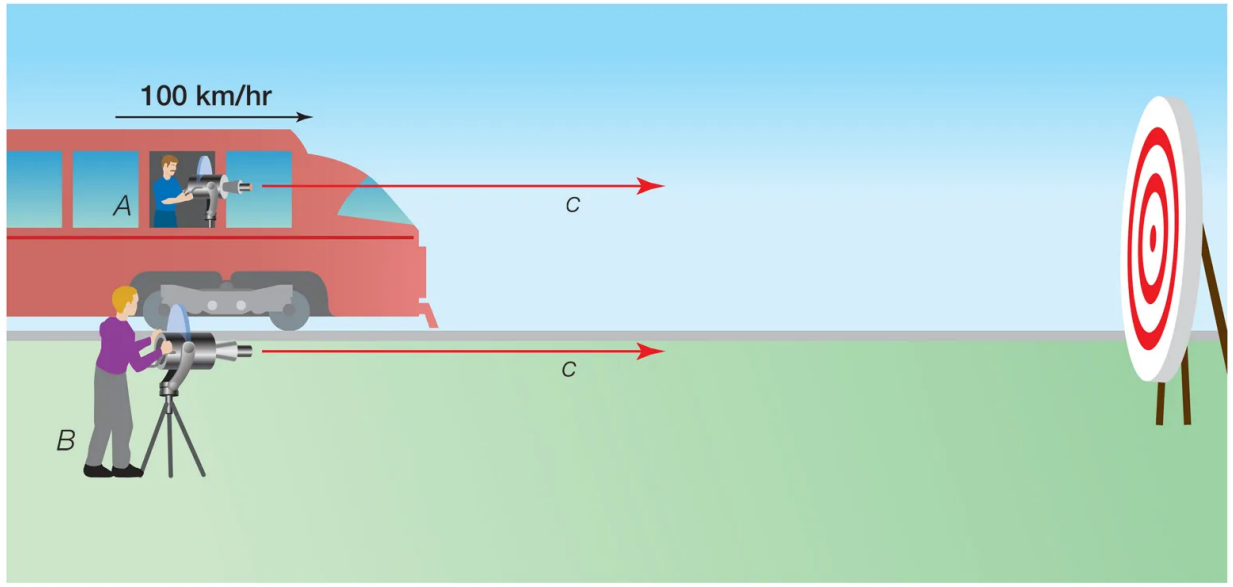
Non, c'est la même pour tout le monde !

Crédits : Encyclopedia Britannica, Inc

Un problème de vitesse



<u>Point de vue de B :</u> la flèche tirée par A se déplace à $100 + 200 = 300$ km/h

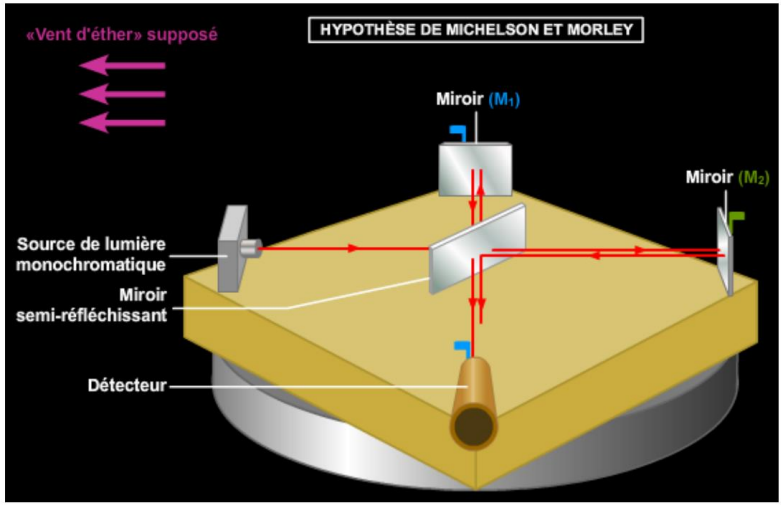


<u>Point de vue de B :</u> le laser tiré par A se déplace à $100 + c$ km/h ??!!

Non, c'est la même pour tout le monde !

Crédits : Encyclopedia Britannica, Inc

- Expérience de Michelson-Morley

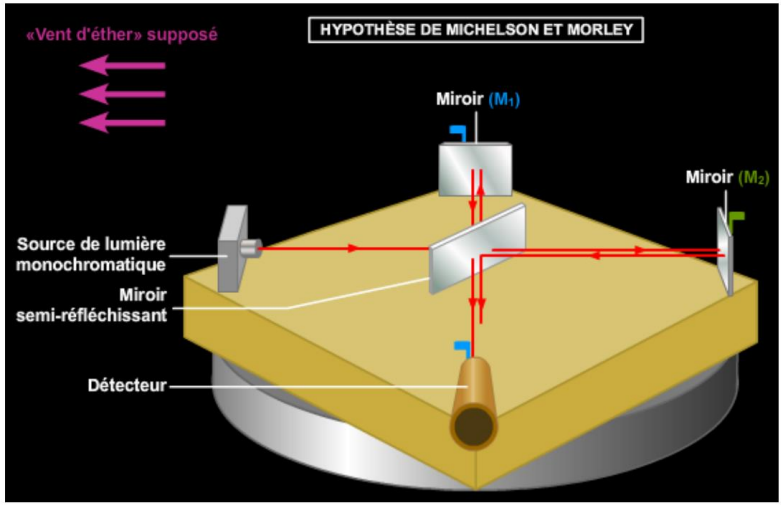


Crédits : lien de l'image

- Autre indice : théorie de l'électromagnétisme

La mécanique classique n'est qu'une approximation d'une réalité plus complexe, valide pour des faibles vitesses

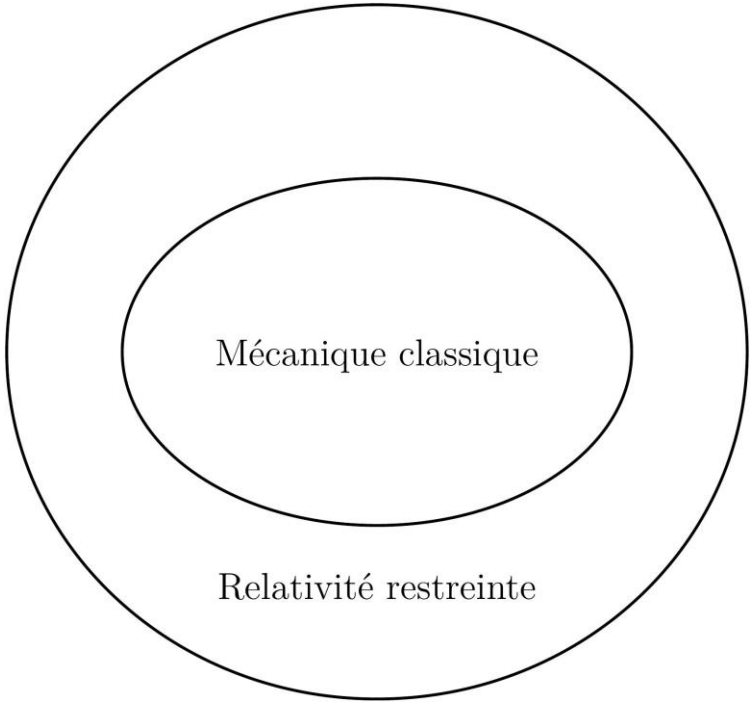
- Expérience de Michelson-Morley



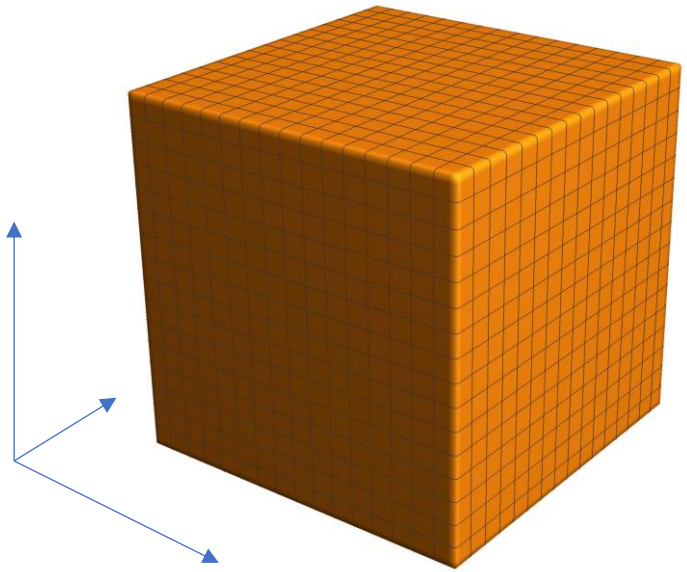
Crédits : lien de l'image

- Autre indice : théorie de l'électromagnétisme

La mécanique classique n'est qu'une approximation d'une réalité plus complexe, valide pour des faibles vitesses



La relativité restreinte



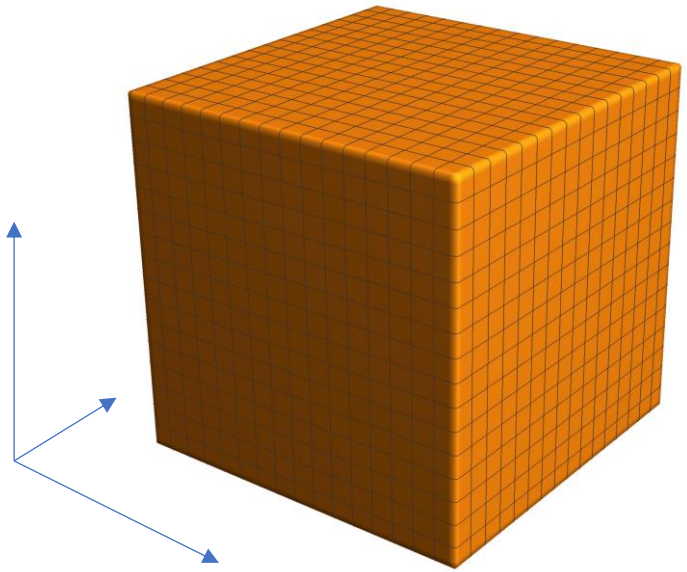
- Espace = objet géométrique à 3 dimensions

- Trajectoire = positions successives dans cet espace en fonction d'un temps absolu

- Espace-temps = on considère le temps comme une dimension supplémentaire pour former un objet géométrique à 4 dimensions

- Unification de l'espace et du temps

La relativité restreinte



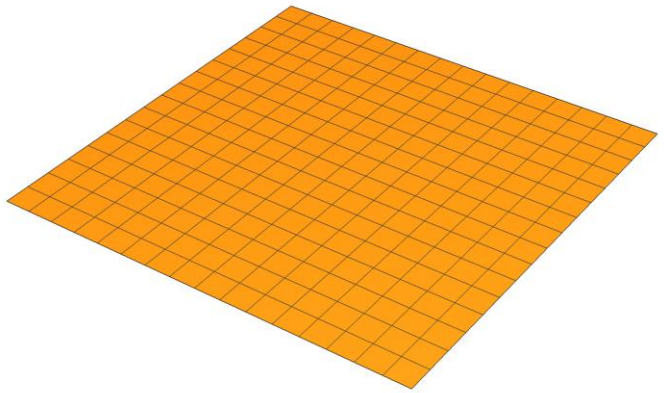
- Espace = objet géométrique à 3 dimensions

- Trajectoire = positions successives dans cet espace en fonction d'un temps absolu

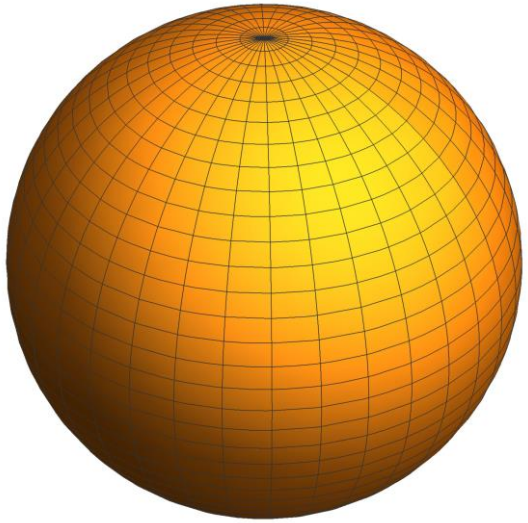
- Espace-temps = on considère le temps comme une dimension supplémentaire pour former un objet géométrique à 4 dimensions

- Unification de l'espace et du temps

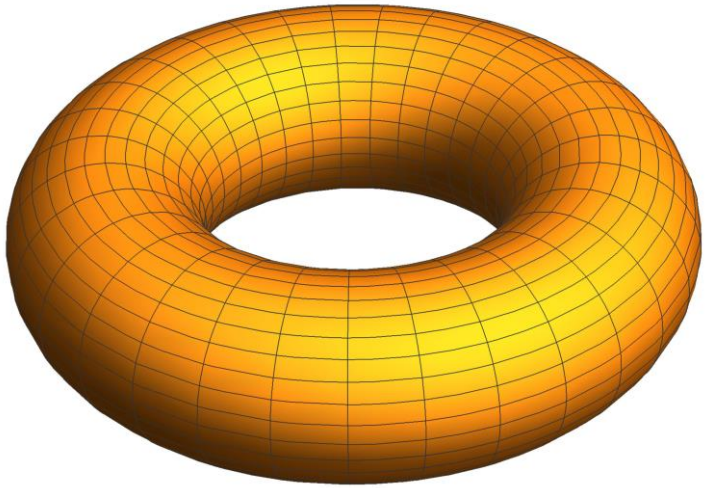
- Trois <u>géométries</u> différentes à 2 dimensions



Plan



Sphère

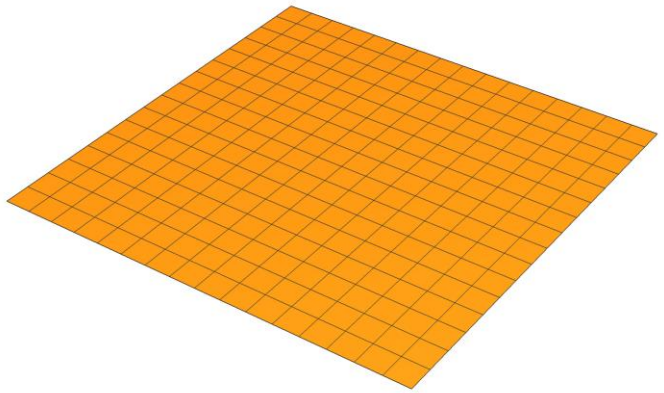


Tore

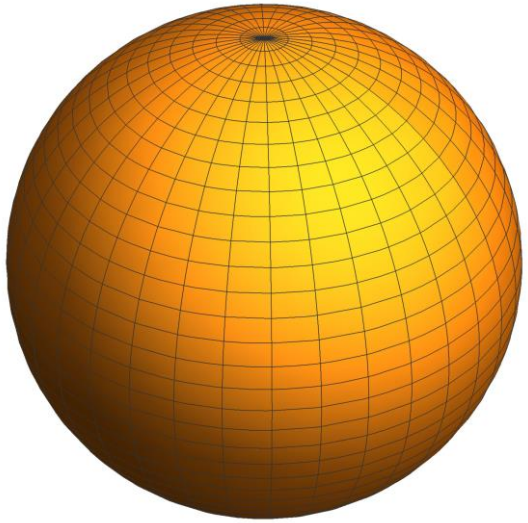
- La relativité restreinte spécifie une géométrie particulière pour l'espace-temps

⟹ Rend bien compte de la constance de la vitesse de la lumière

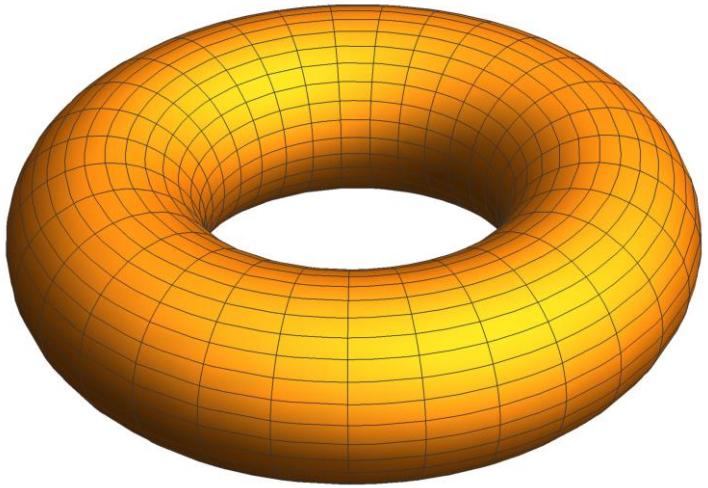
• Trois <u>géométries</u> différentes à 2 dimensions



Plan



Sphère



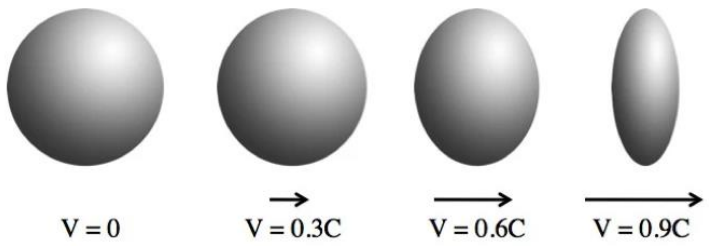
Tore

• La relativité restreinte spécifie une géométrie particulière pour l'espace-temps

→ Rend bien compte de la constance de la vitesse de la lumière

D'autres effets relativistes

- Contraction des longueurs



- Dilatation des durées

Jumeaux de Langevin

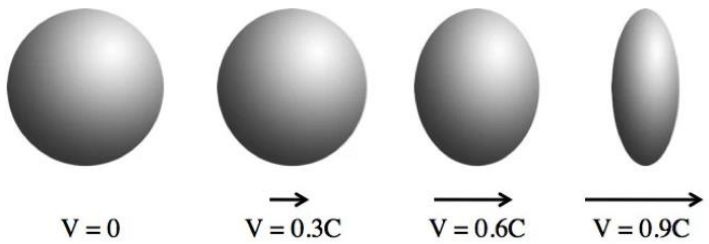
Crédits : lien vers l'image

Temps de vie des muons

Crédits : lien vers l'image

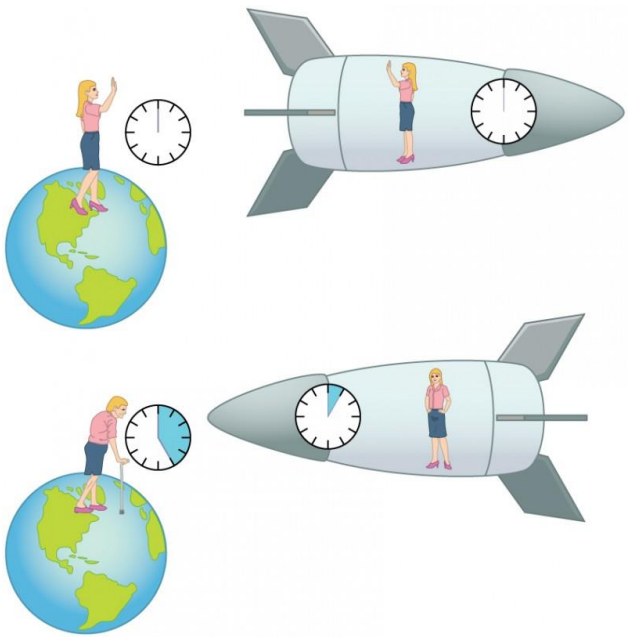
D'autres effets relativistes

- Contraction des longueurs



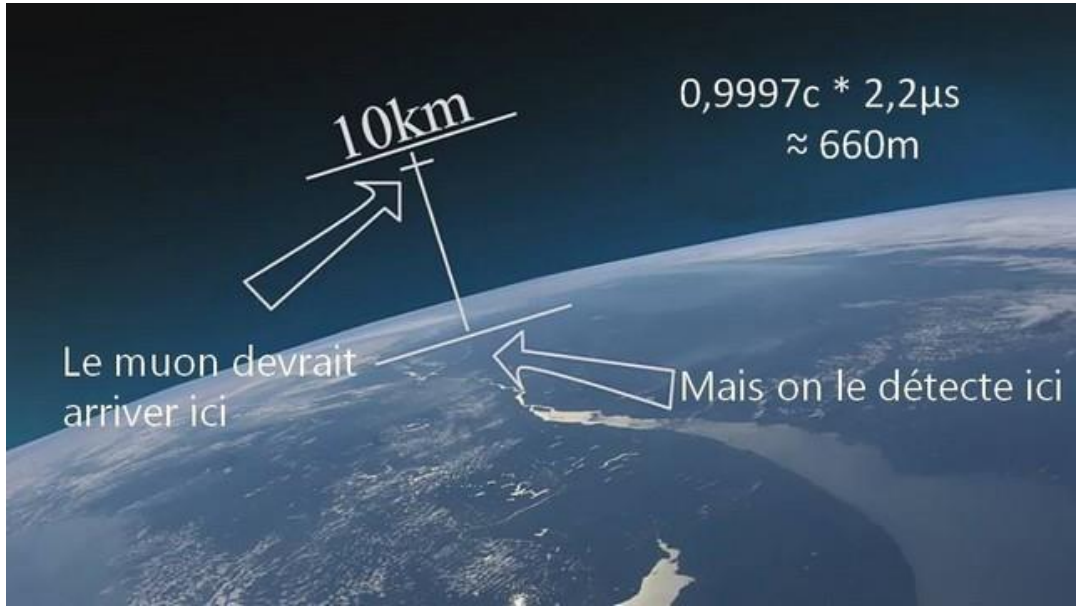
- Dilatation des durées

Jumeaux de Langevin



Crédits : lien vers l'image

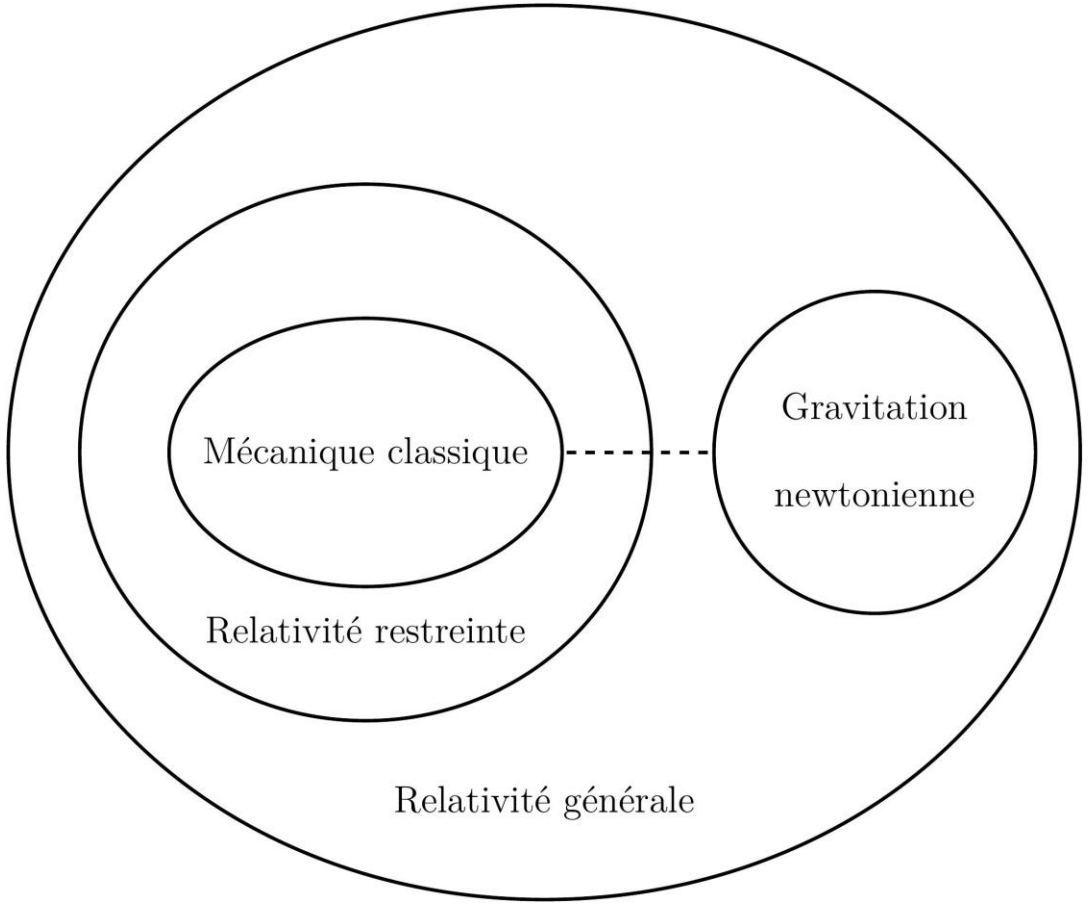
Temps de vie des muons



Crédits : lien vers l'image

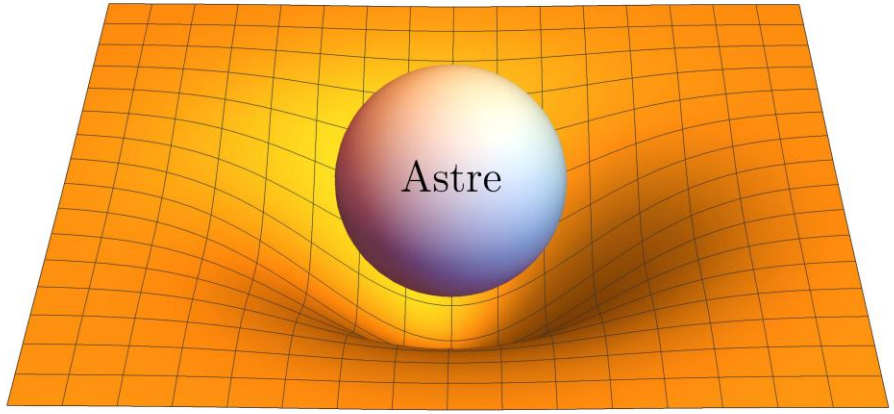
La relativité générale

- Décrire la gravitation en accord avec les principes relativistes



- Gravitation = courbure de l'espace-temps

  La masse (et l'énergie) déforment l'espace-temps



- Les systèmes physiques se déplacent en ligne droite (géodésiques)

- Les équations d'Einstein :

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

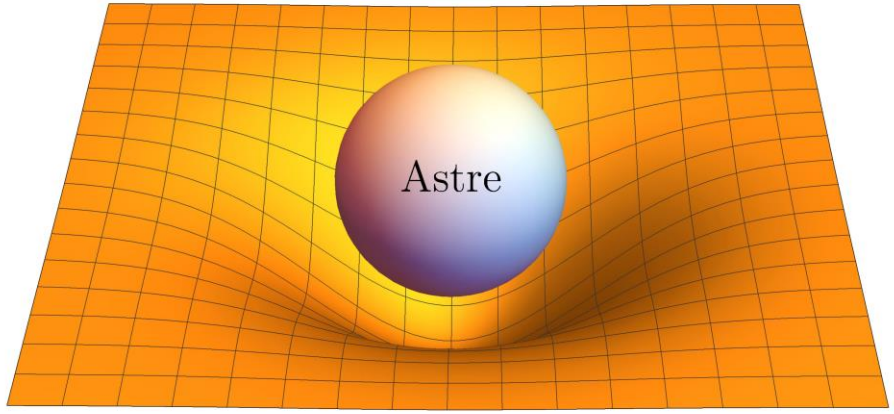
Dépend seulement de la géométrie

Des constantes

Masse / Energie

- Gravitation = courbure de l'espace-temps

  La masse (et l'énergie) déforment l'espace-temps



- Les systèmes physiques se déplacent en ligne droite (géodésiques)

- <u>Les équations d'Einstein :</u>

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

Dépend seulement de la géométrie

Des constantes

Masse / Energie

La cosmologie

- Décrire l'évolution de l'univers dans son ensemble

- Comment ?

En appliquant les équations d'Einstein à l'univers tout entier

- Simplifications :

  - Homogénéité

  - Isotropie

La cosmologie

- Décrire l'évolution de l'univers dans son ensemble

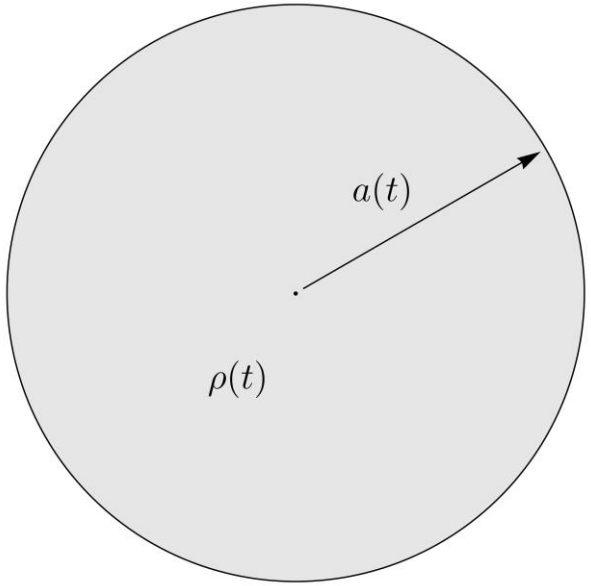
- Comment ?

En appliquant les équations d'Einstein à l'univers tout entier

- <u>Simplifications :</u>

  - Homogénéité

  - Isotropie



Modèle standard de la cosmologie : la recette

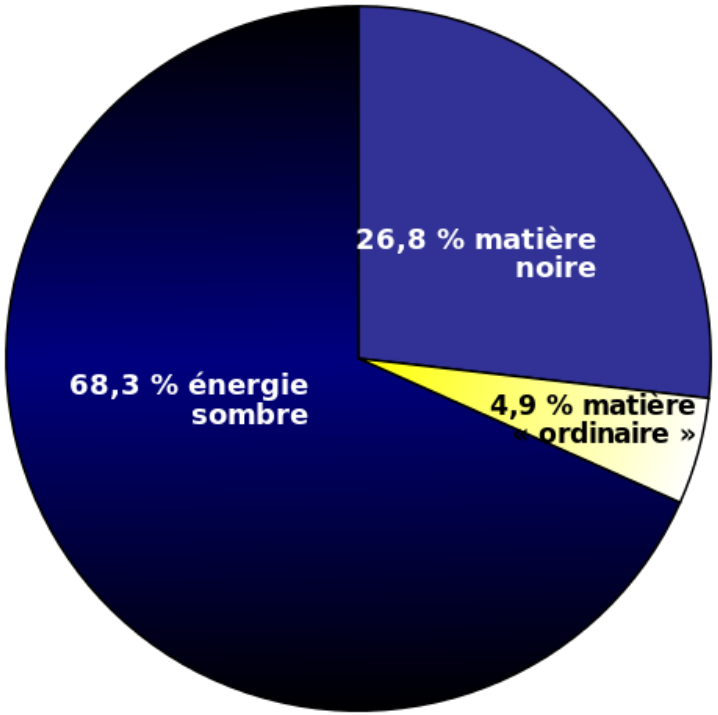
- <u>Ingrédients :</u>

  - 1 cuillérée à soupe de matière ordinaire

  - 5 cuillérée à soupe de matière noire

  - 20 cl d'énergie noire

  - Une pincée de lumière (radiation)



Crédits : Wikipédia, Szczureq, Simon Villeneuve

- <u>Préparation :</u>

  - Ajouter tous les ingrédients dans les équations d'Einstein jusqu'à obtention d'une solution

  - Servir sur un graphique (ou une jolie image selon l'envie)

Modèle standard de la cosmologie : la recette

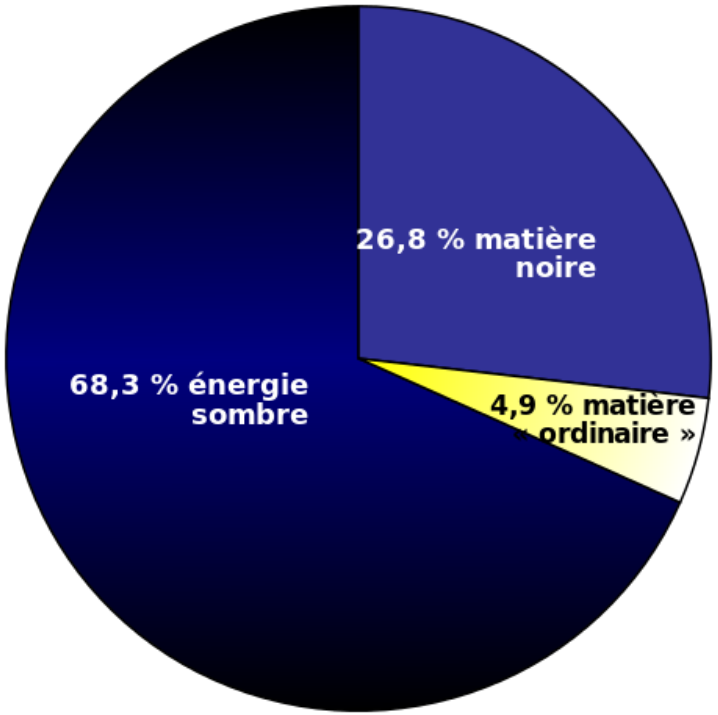
- <u>Ingrédients :</u>

  - 1 cuillérée à soupe de matière ordinaire

  - 5 cuillérée à soupe de matière noire

  - 20 cl d'énergie noire

  - Une pincée de lumière (radiation)

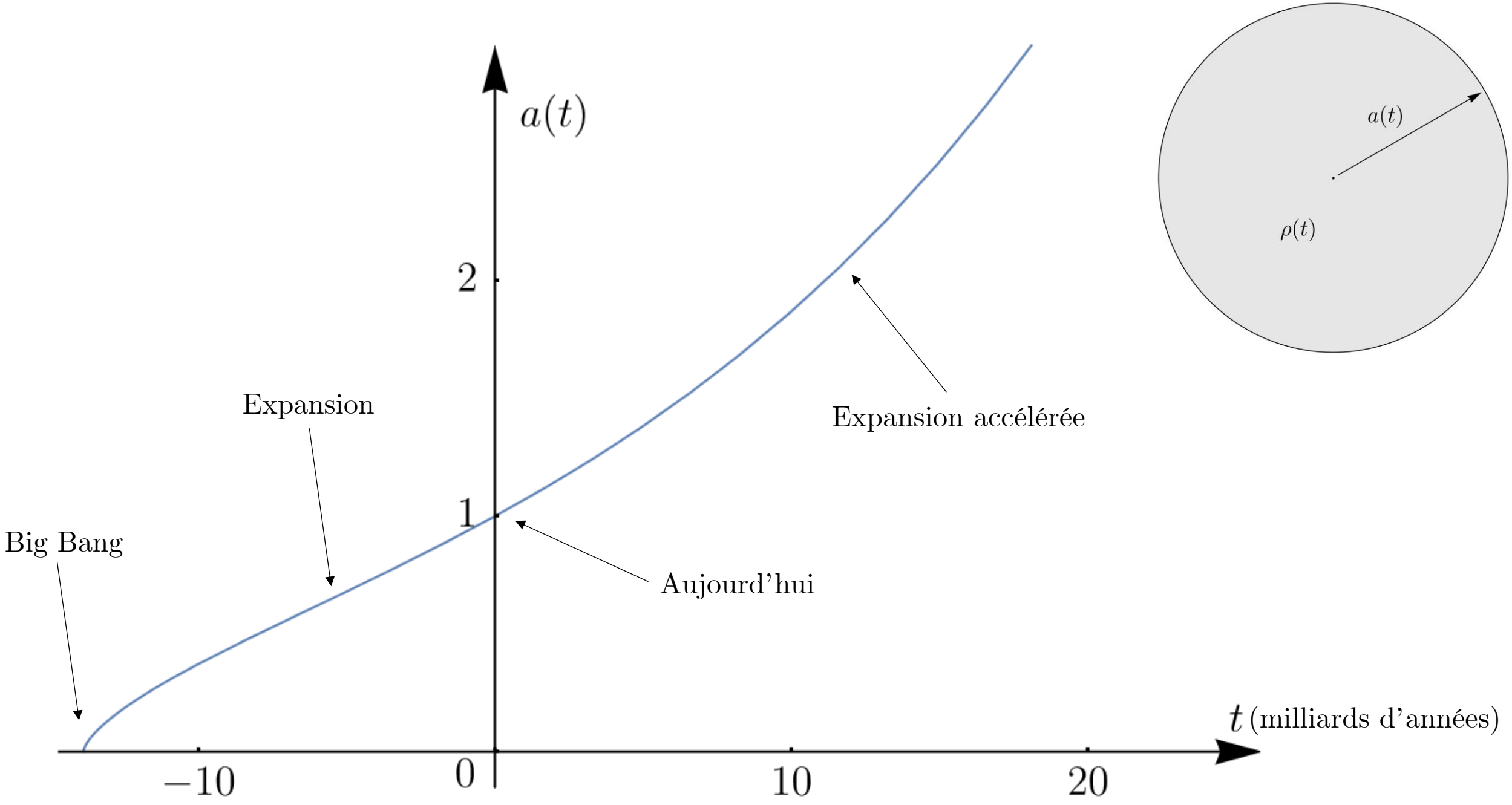


Crédits : Wikipédia, Szczureq, Simon Villeneuve

- <u>Préparation :</u>

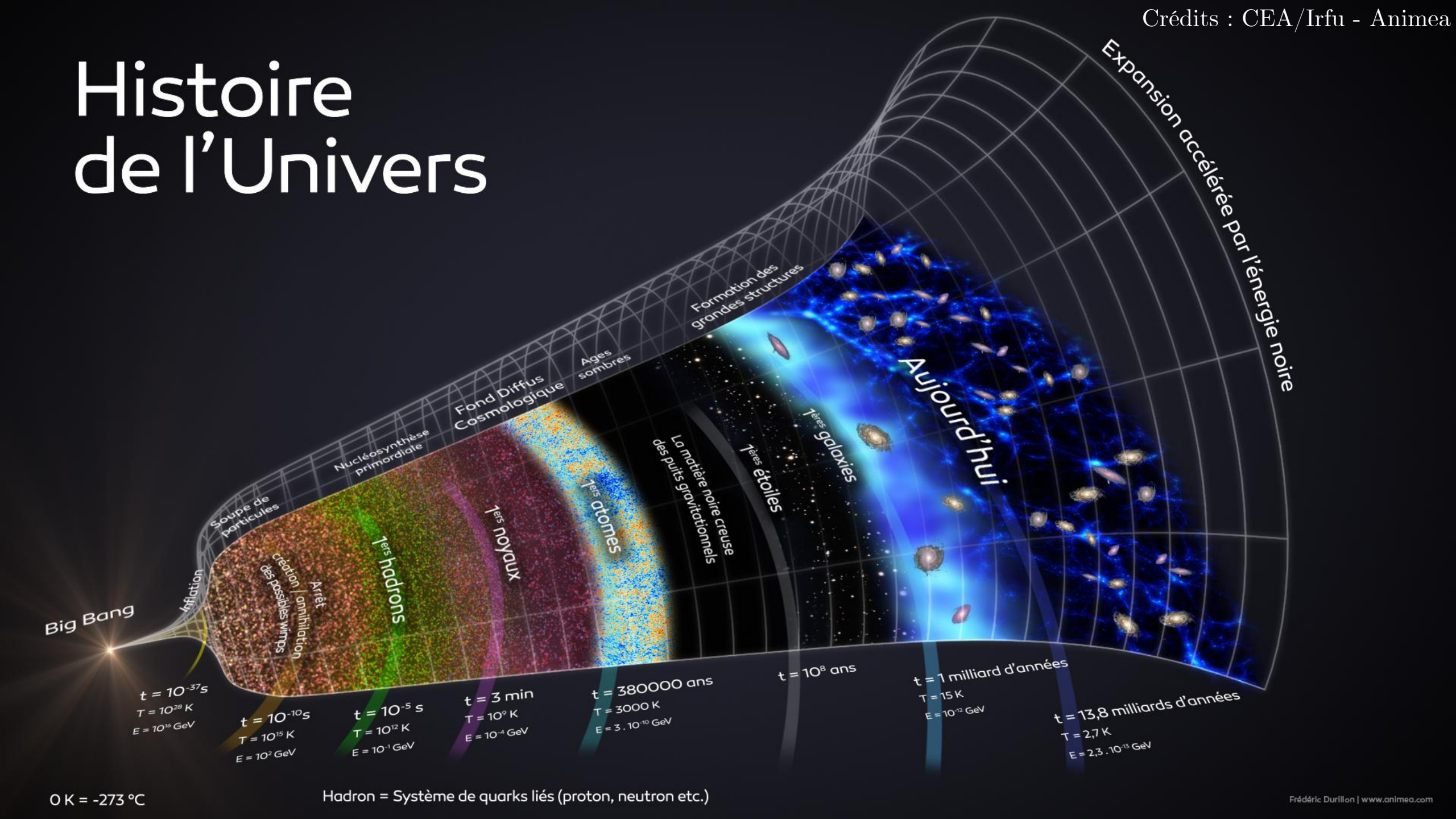
  - Ajouter tous les ingrédients dans les équations d'Einstein jusqu'à obtention d'une solution

  - Servir sur un graphique (ou une jolie image plus digeste)


$a(t)$
2
1
0
-10
10
20
t (milliards d'années)
Big Bang
Expansion
Aujourd'hui
Expansion accélérée
$a(t)$
$\rho(t)$

Crédits : CEA/Irfu - Animea

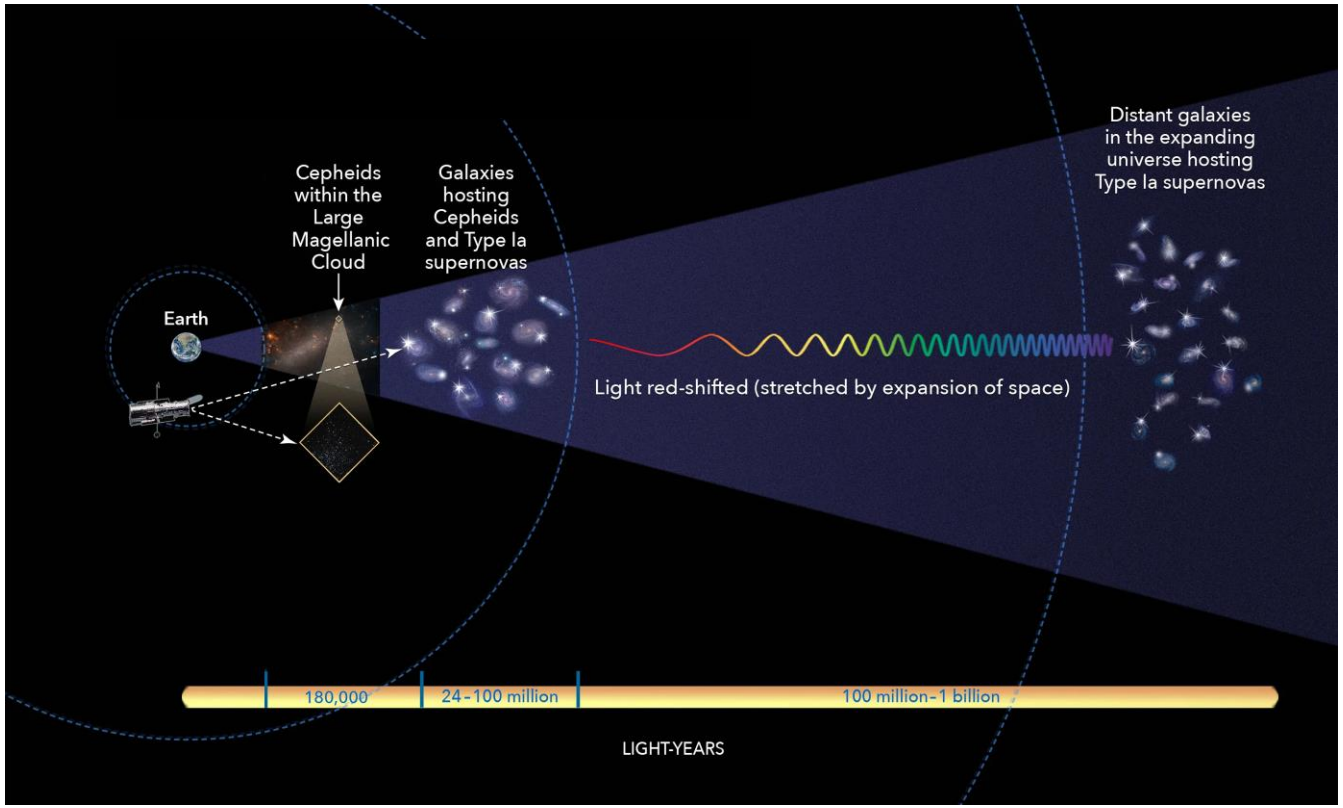
Histoire de l'Univers



Une expansion qui s'accélère

- On mesure la distance d'astres

- Leur magnitude en fonction de la distance nous renseigne sur l'expansion



Crédits : NASA, ESA, and A. Feild (STScI)

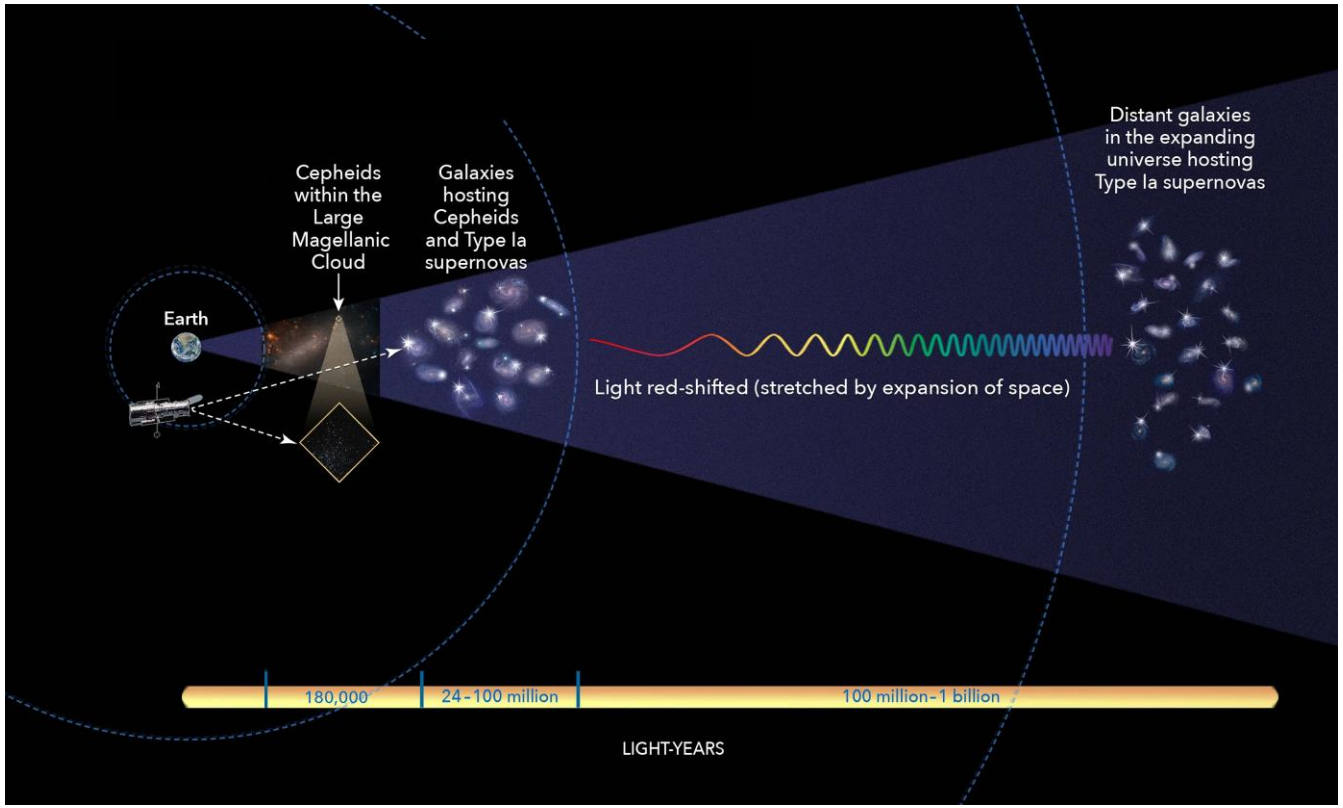
- Expansion accélérée, provoquée par l'énergie noire

- Modélisée par une constante cosmologique dans les équations d'Einstein

Une expansion qui s'accélère

- On mesure la distance d'astres

- Leur magnitude en fonction de la distance nous renseigne sur l'expansion

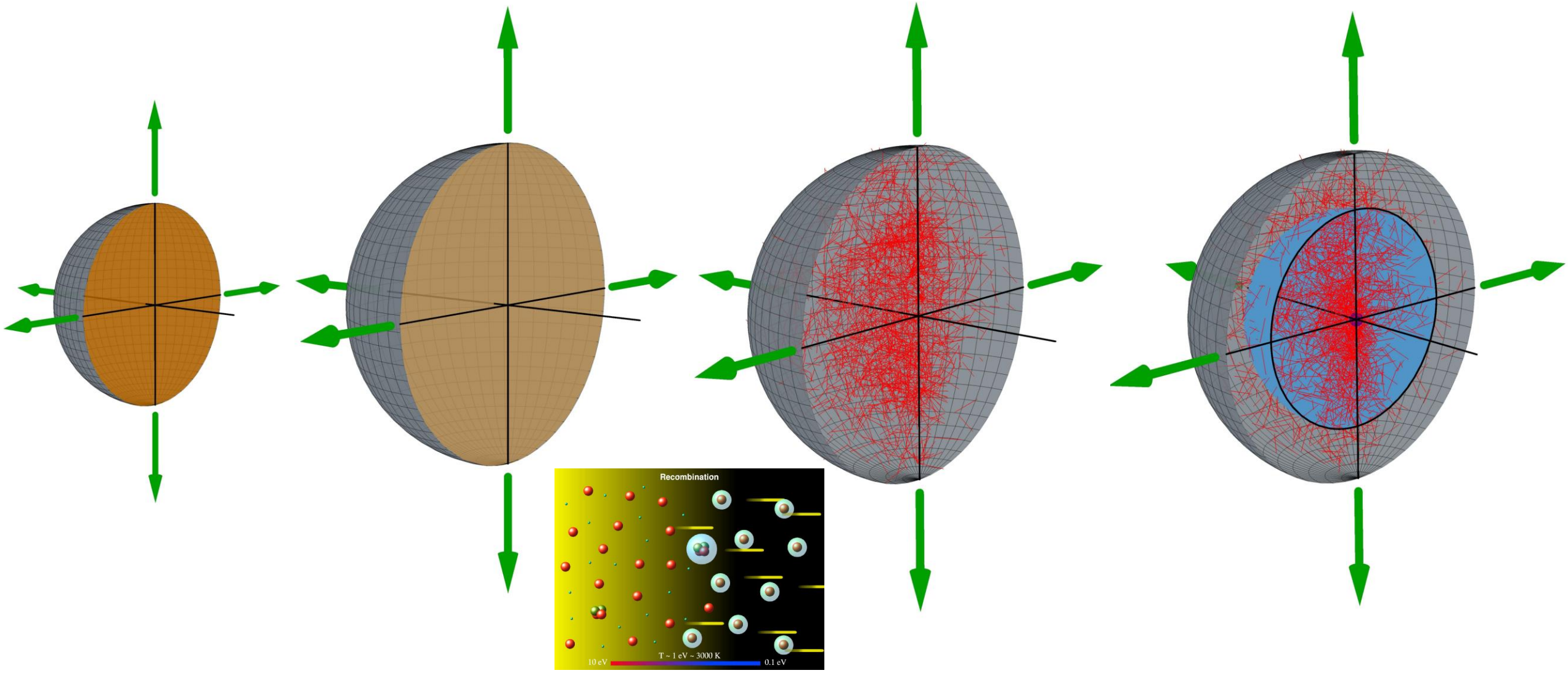


Crédits : NASA, ESA, and A. Feild (STScI)

- <u>Expansion accélérée</u>, provoquée par l'énergie noire

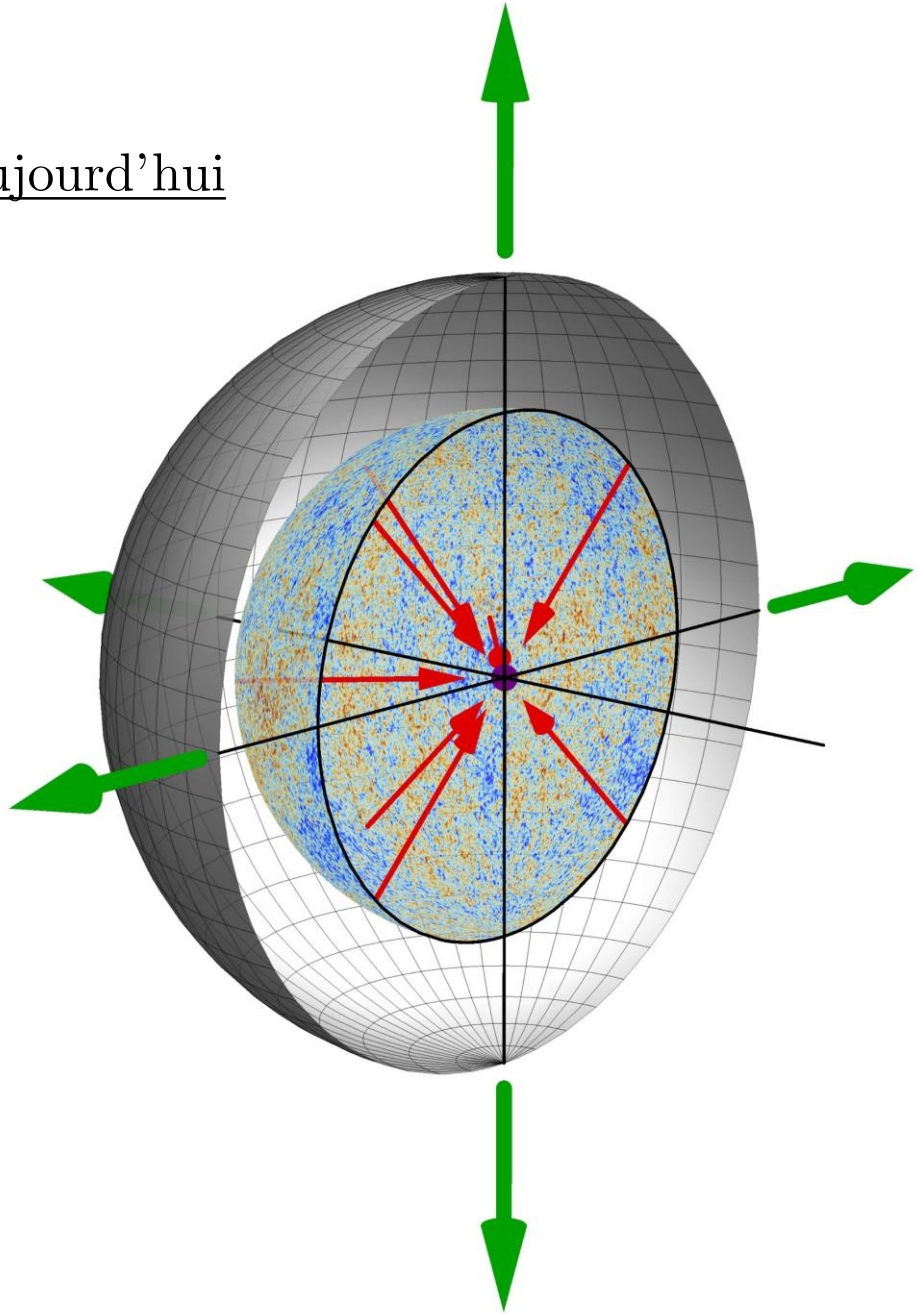
- Modélisée par une constante cosmologique dans les équations d'Einstein

Le fond diffus cosmologique

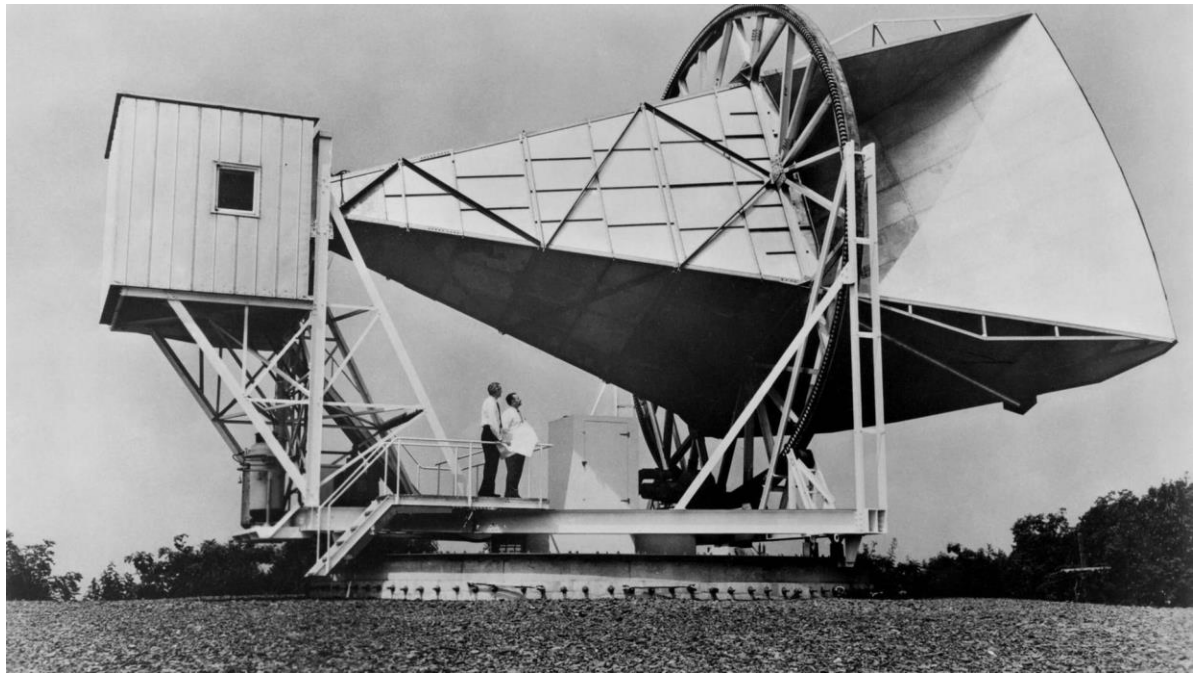


Crédits : lien de l'image

Aujourd'hui

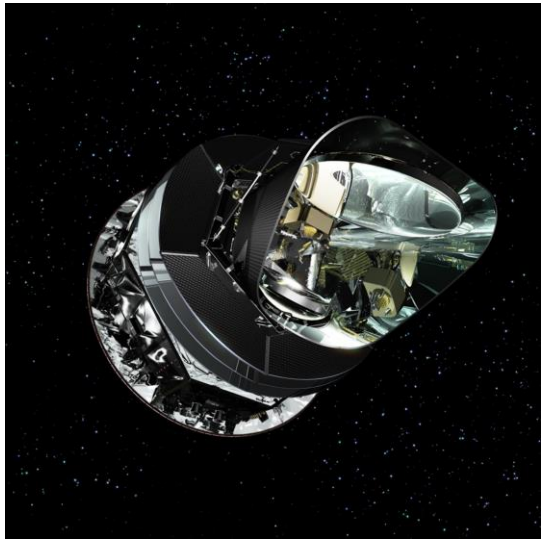


Penzias et Wilson (1964)

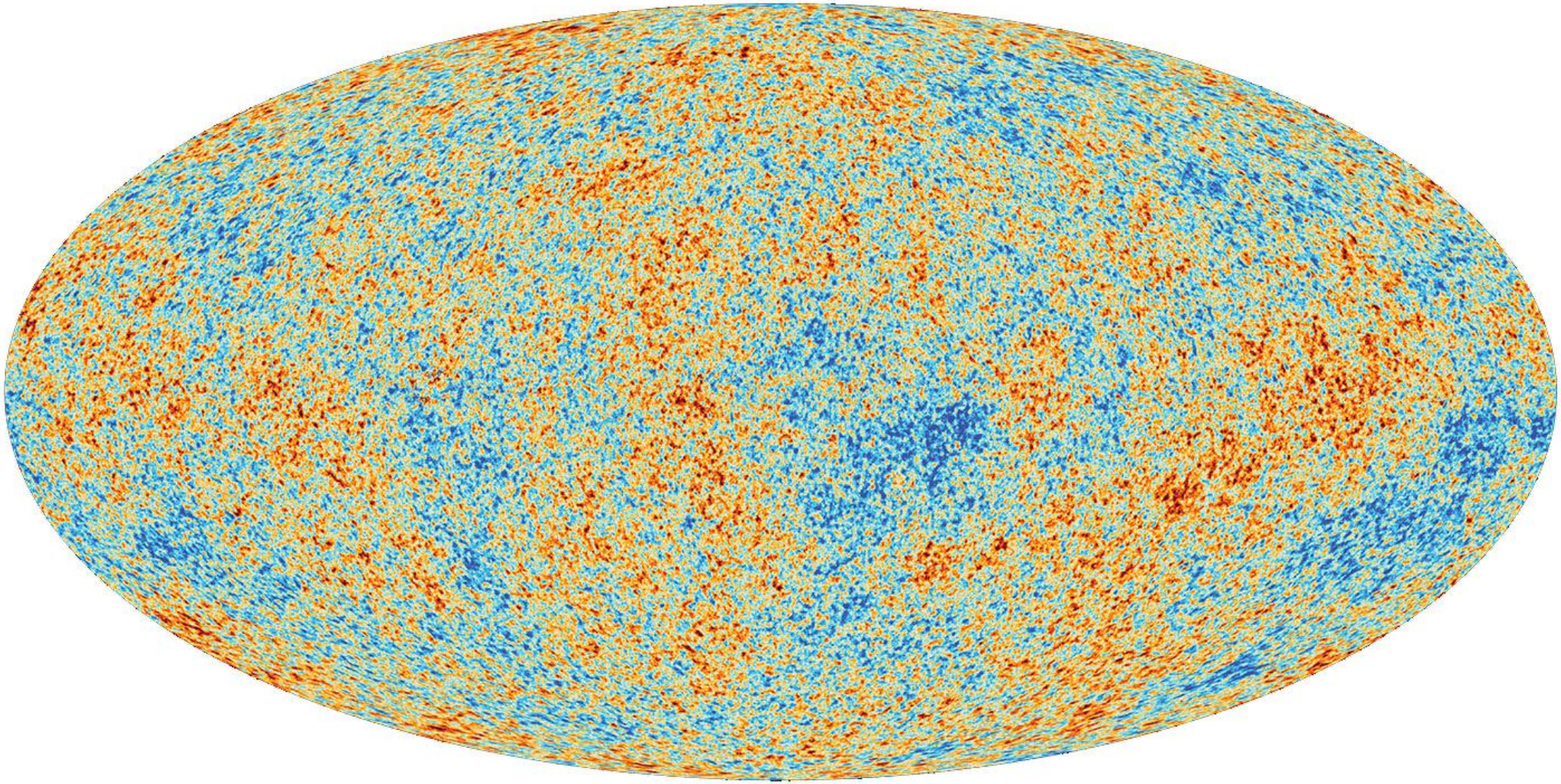


Crédits : NASA

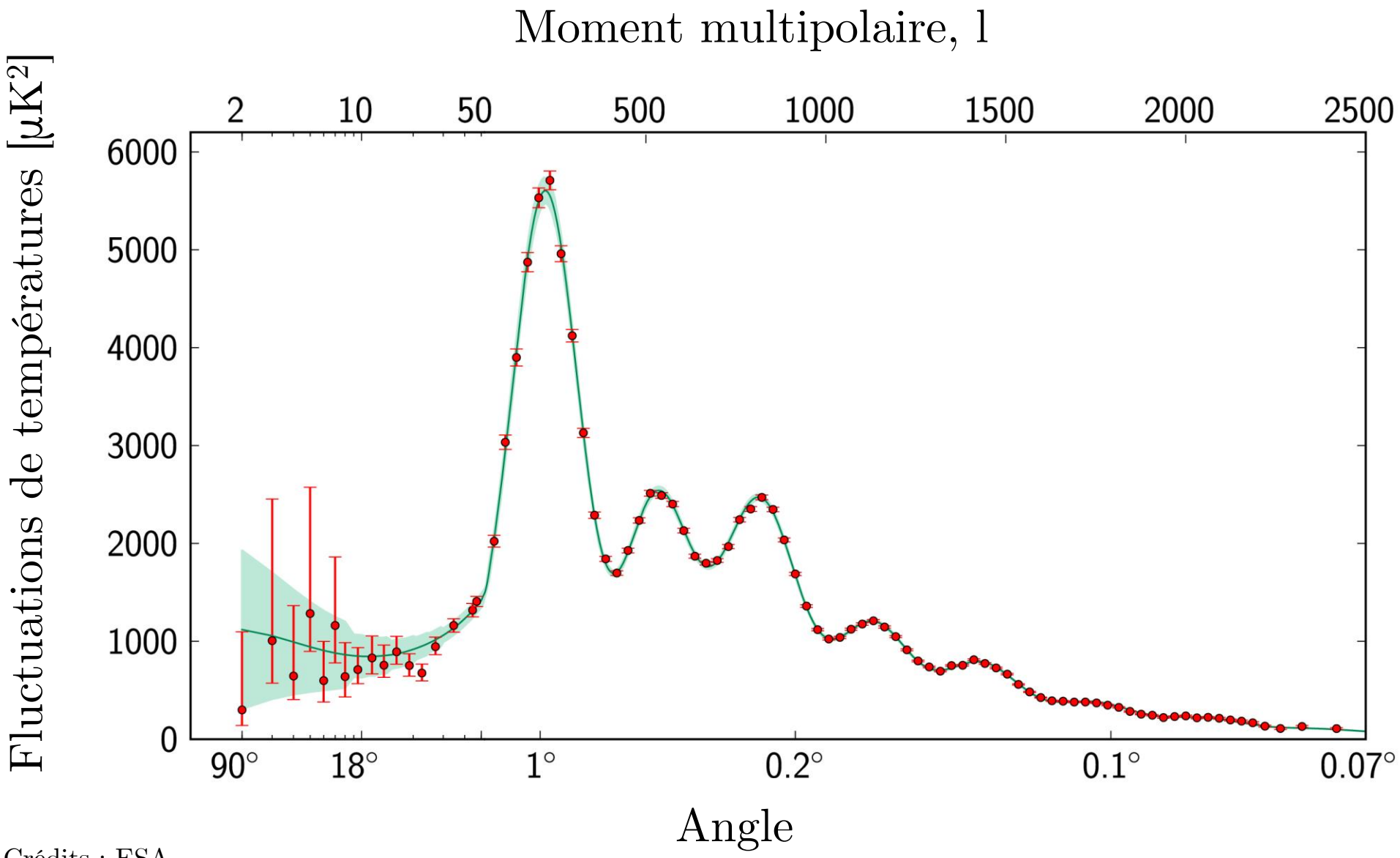
Crédits : Wikipédia



Crédits : ESA

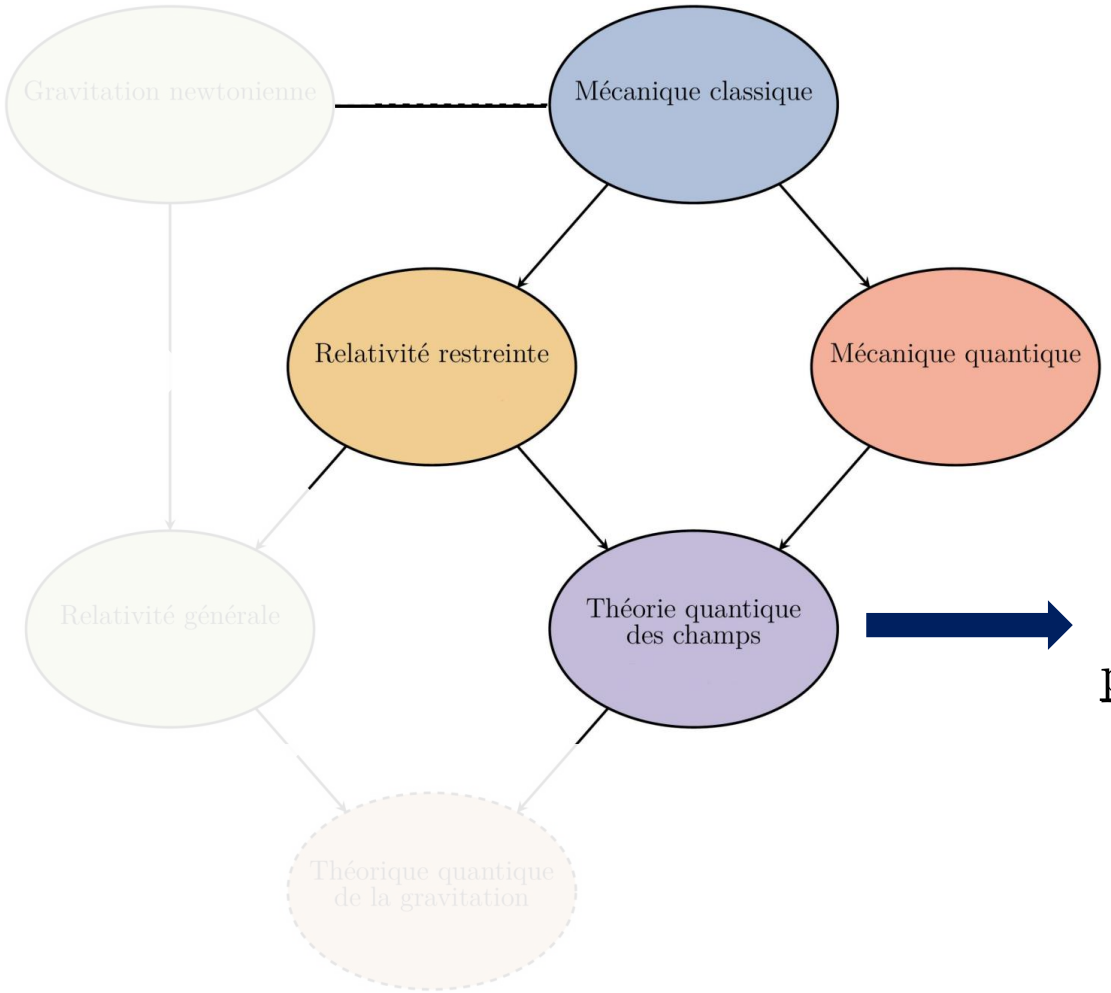


Crédits : ESA


Moment multipolaire, l
2
10
50
500
1000
1500
2000
2500
Fluctuations de températures [μK²]
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
90°
18°
1°
0.2°
0.1°
0.07°
Angle

Crédits : ESA

III – Vers le modèle standard de la physique des particules

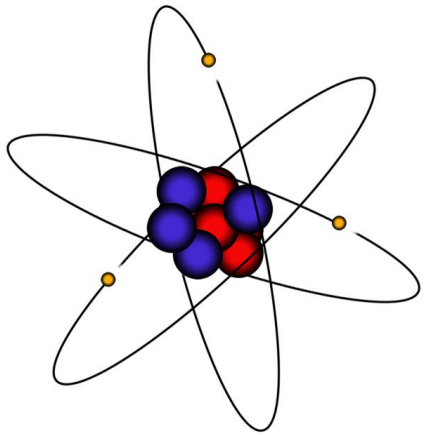


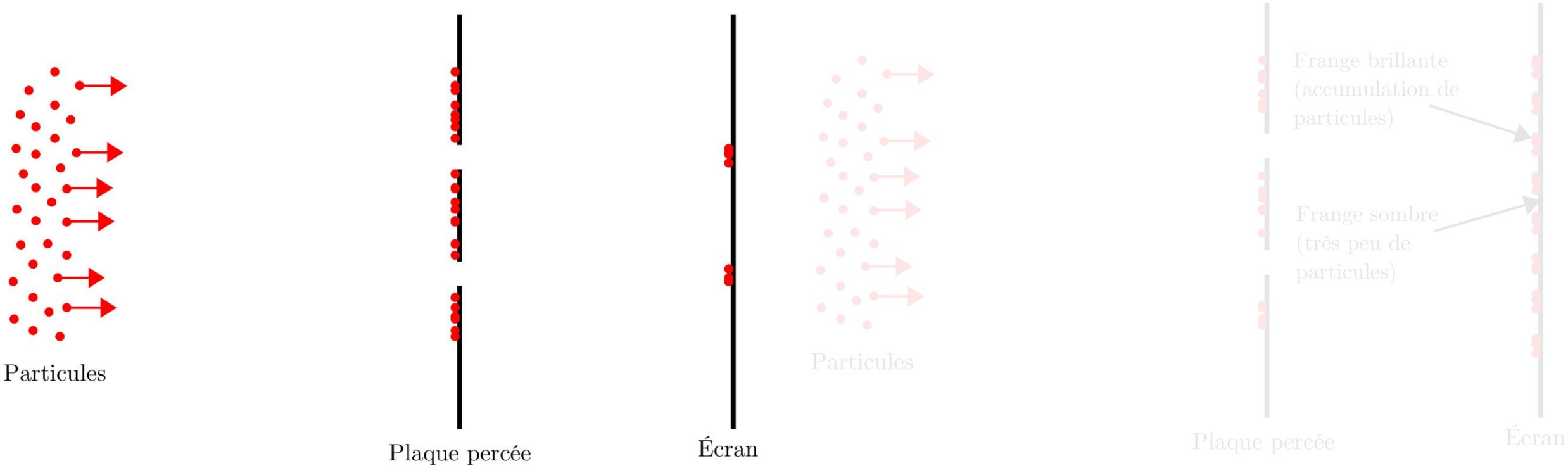
Modèle standard de la physique des particules

La mécanique quantique

<u>Motivations :</u>

- Stabilité des atomes
- Expérience des fentes d'Young

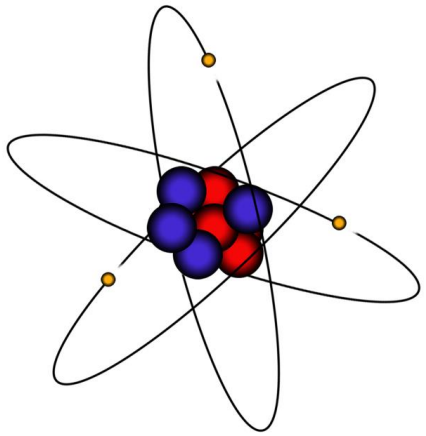


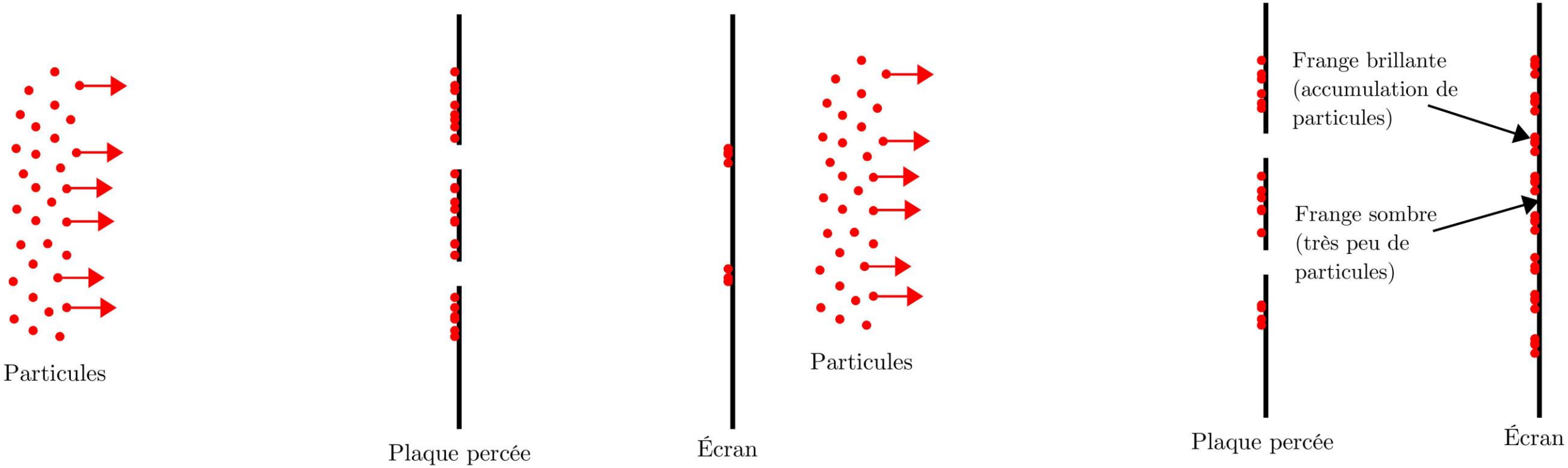


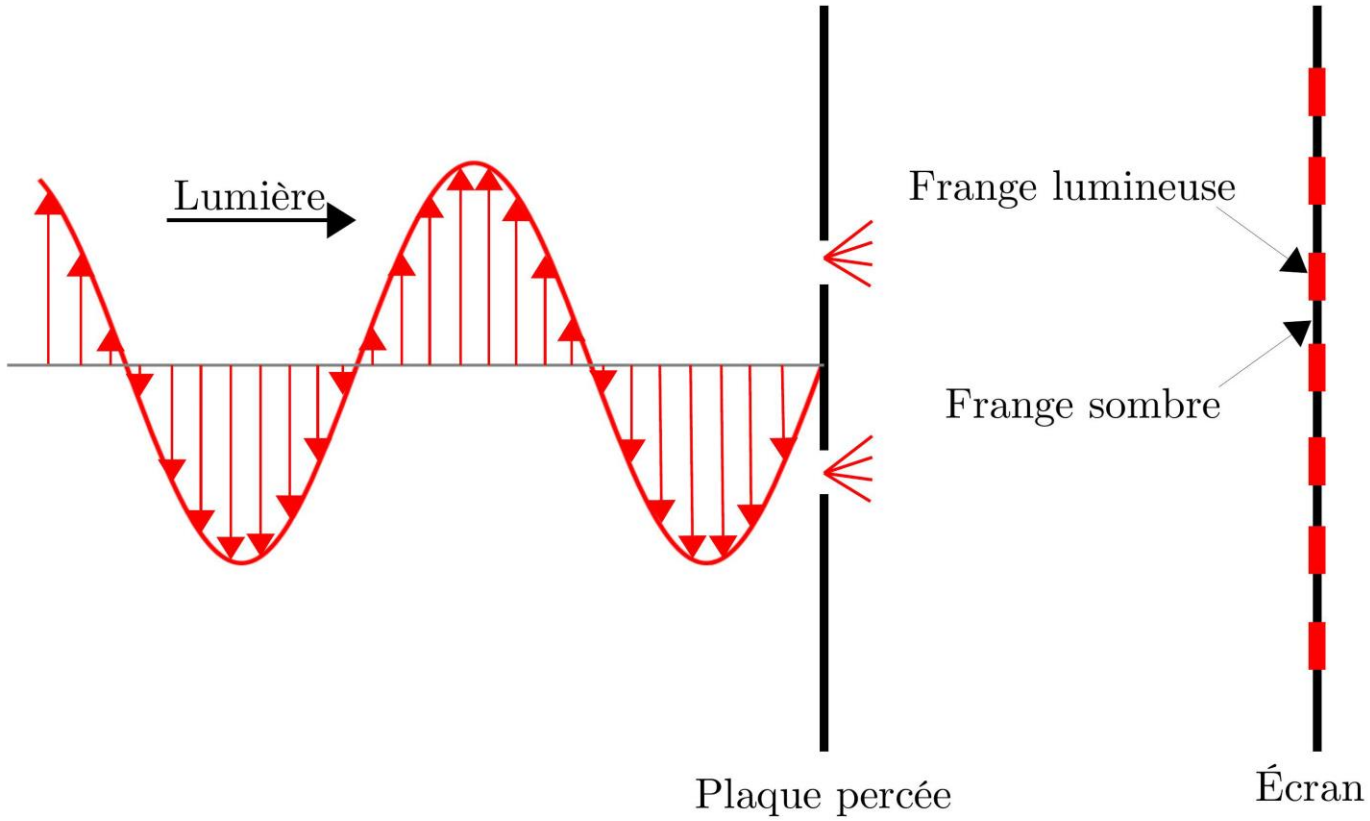
La mécanique quantique

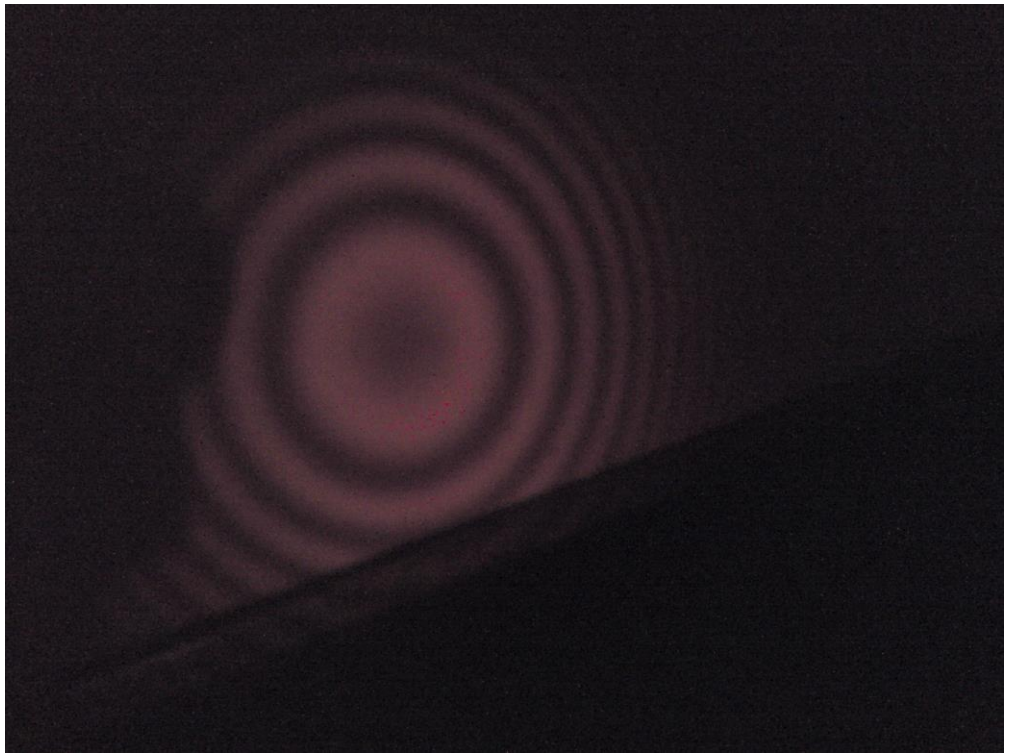
<u>Motivations :</u>

- Stabilité des atomes
- Expérience des fentes d'Young

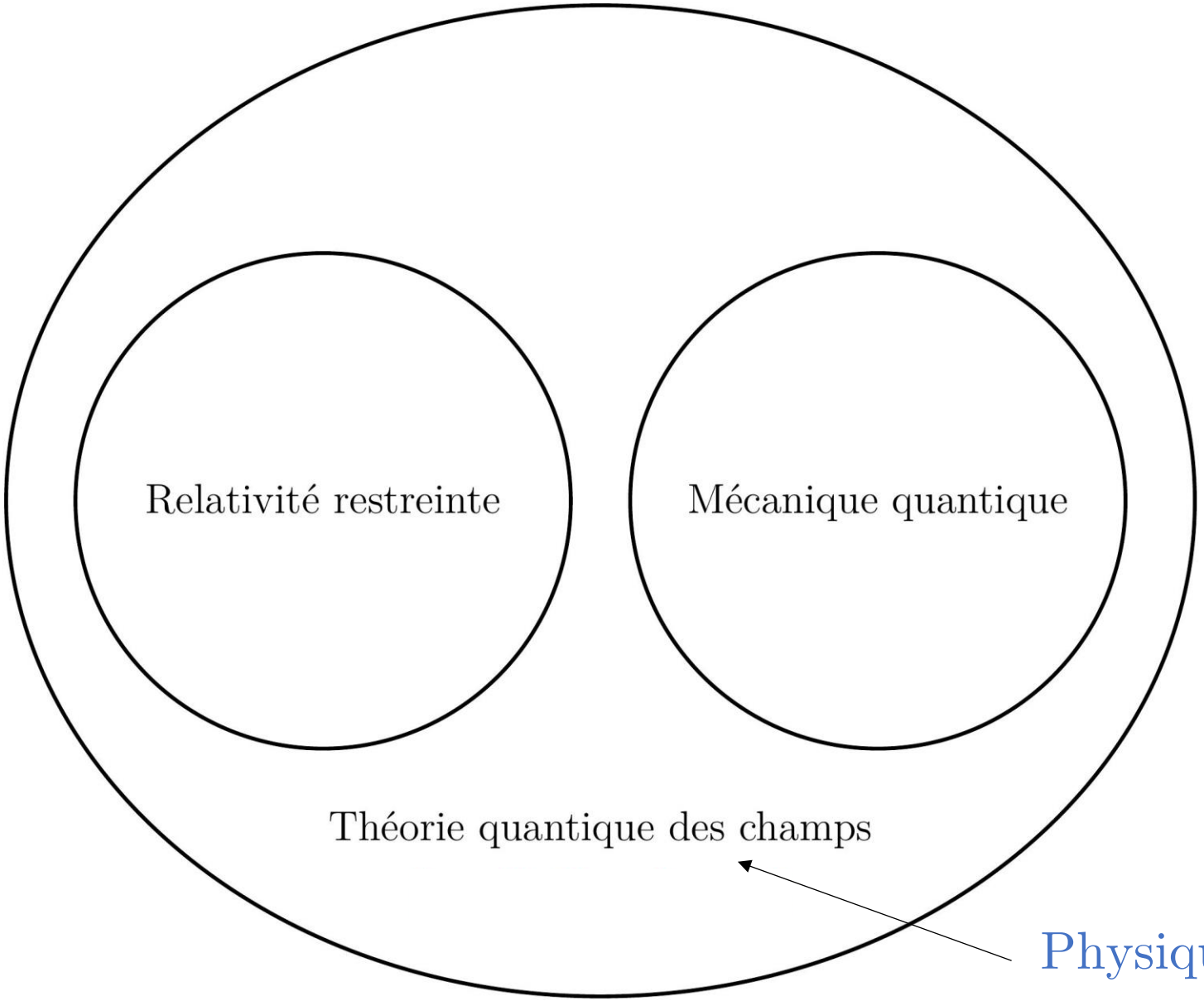


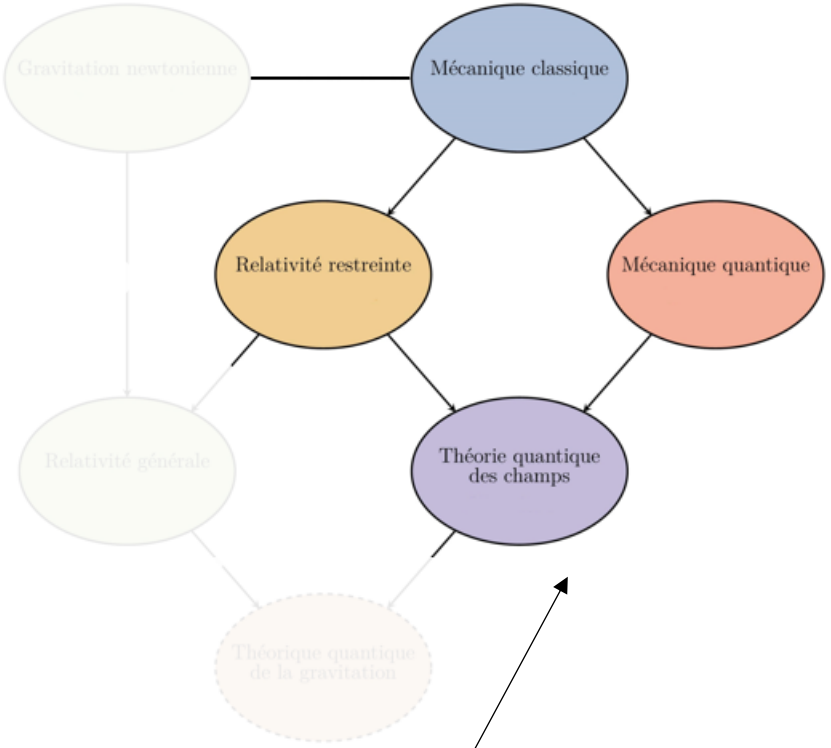






- Dualité onde-corpuscule

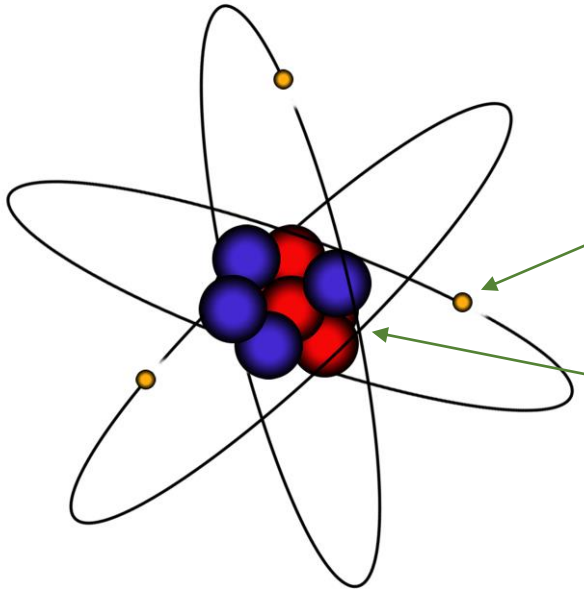




Physique des particules

- Constituants élémentaires
- Interactions fondamentales

Des particules...



- Electron

Noyaux = protons + neutrons

- Quarks (up, down)

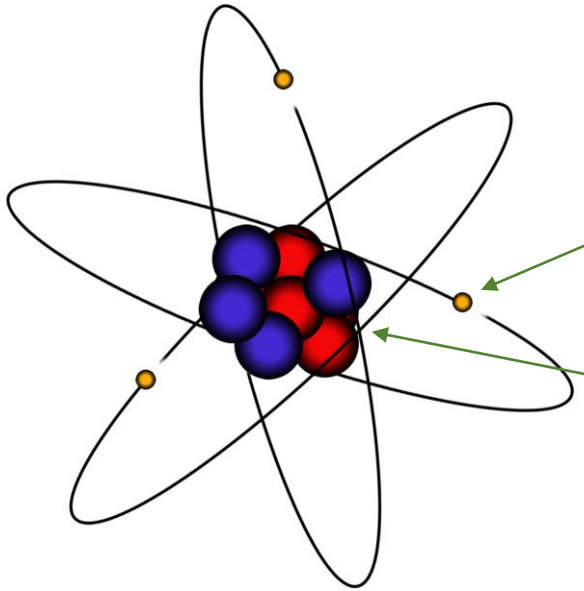
- Muon, tau

- Charm, strange, top, bottom

Crédits : NASA / SDO / Seán Doran

- Neutrinos x3

Des particules...



- Electron

Noyaux = protons + neutrons

- Quarks (up, down)

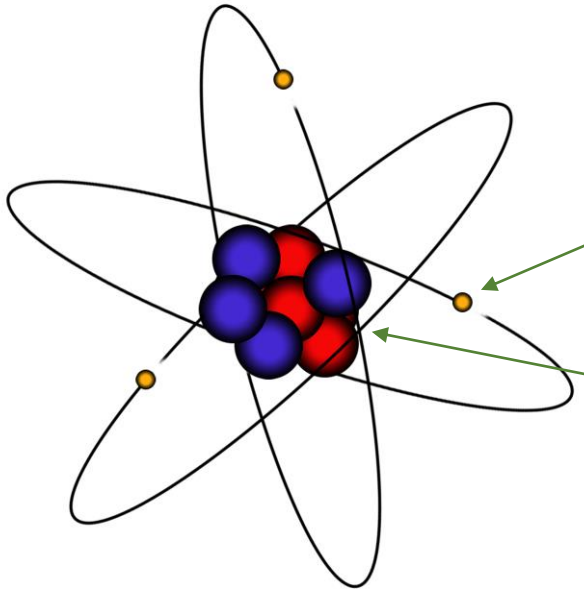
- Muon, tau

- Charm, strange, top, bottom

- Neutrinos x3

Crédits : NASA / SDO / Seán Doran

Des particules...



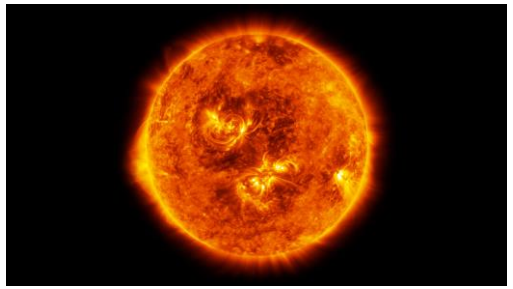
- Electron

Noyaux = protons + neutrons

- Quarks (up, down)

- Muon, tau

- Charm, strange, top, bottom

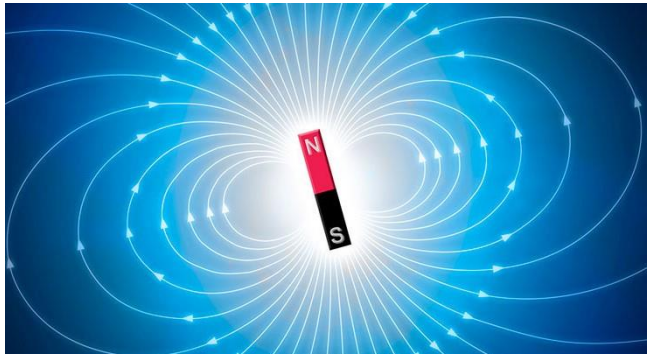


- Neutrinos x3

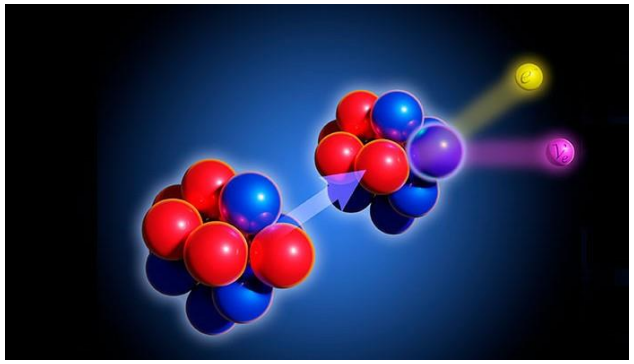
Crédits : NASA / SDO / Seán Doran

Des interactions...

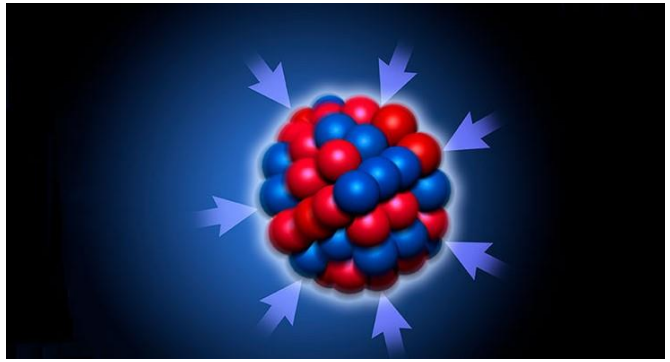
- Interaction électromagnétique



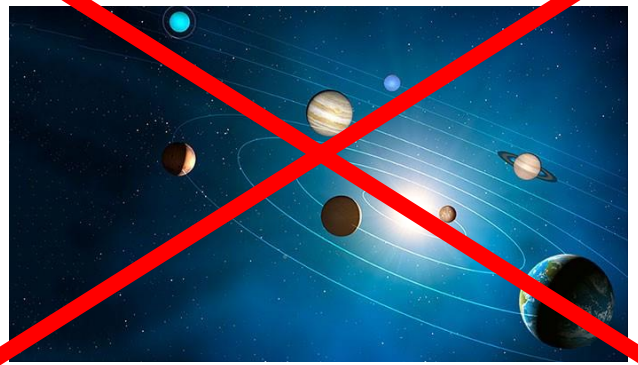
- Interaction faible



- Interaction forte



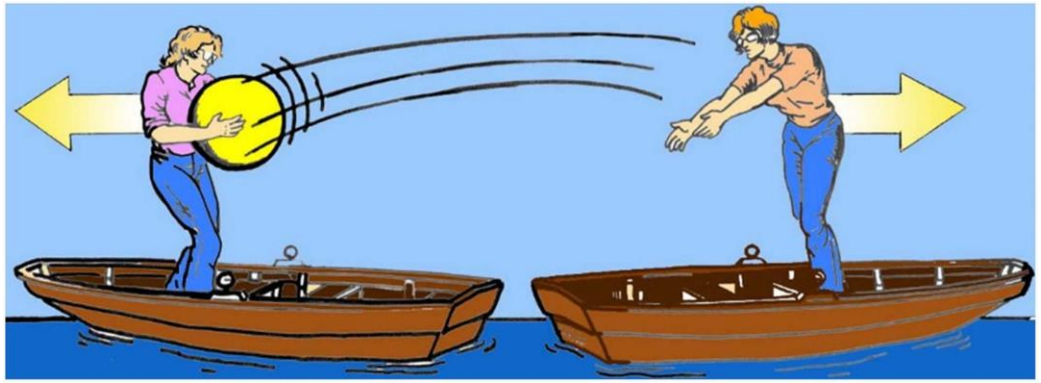
- Gravitation



Crédits images : MARK GARLICK/SCIENCE PHOTO LIBRARY/GETTY IMAGES PLUS; ADAPTED BY L. STEENBLIK HWANG

Et encore des particules

- Force = échange de particules



Crédits : Daniel Claes

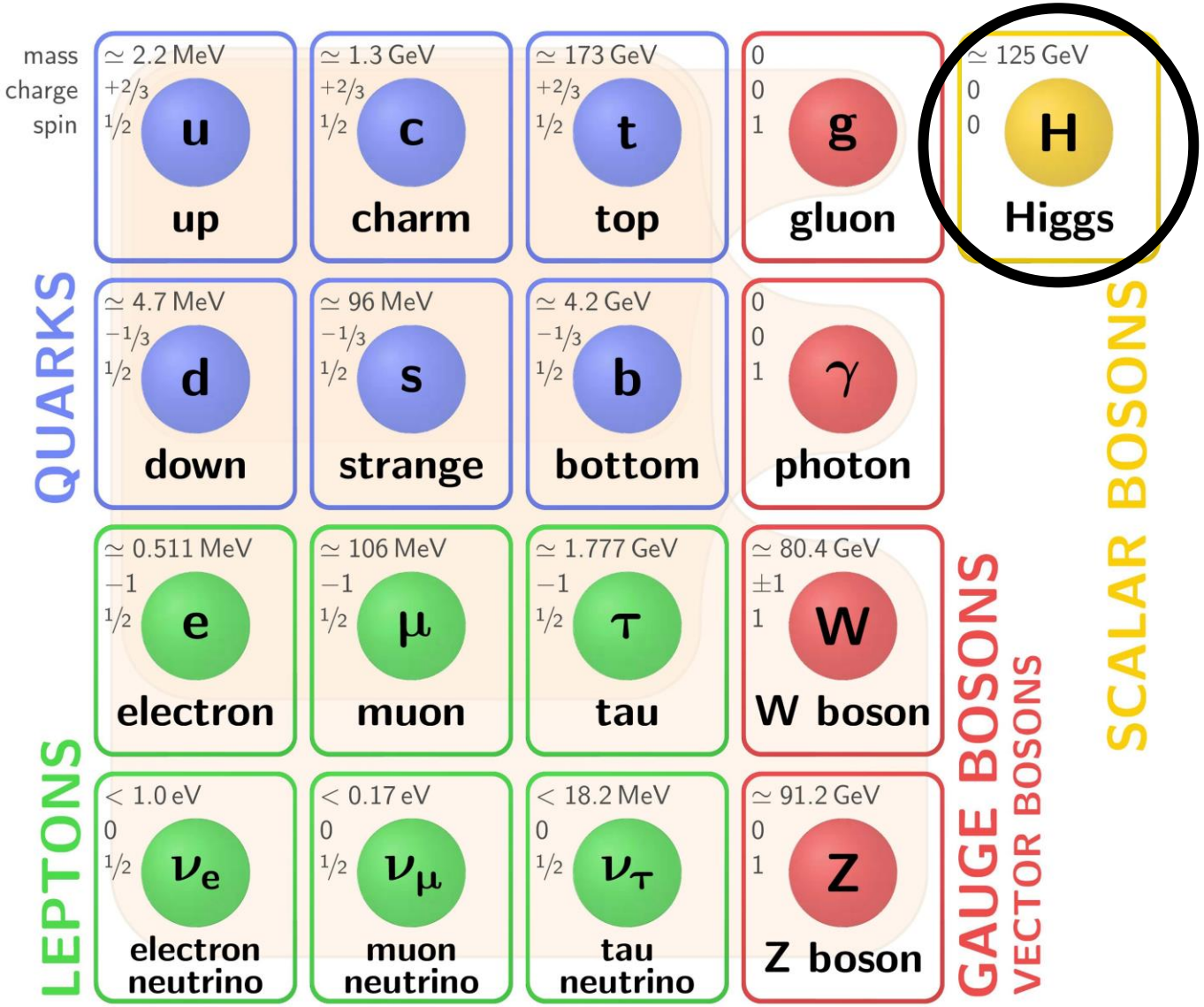
- Particules <u>médiatrices</u> des interactions fondamentales :

  - Interaction électromagnétique : photon

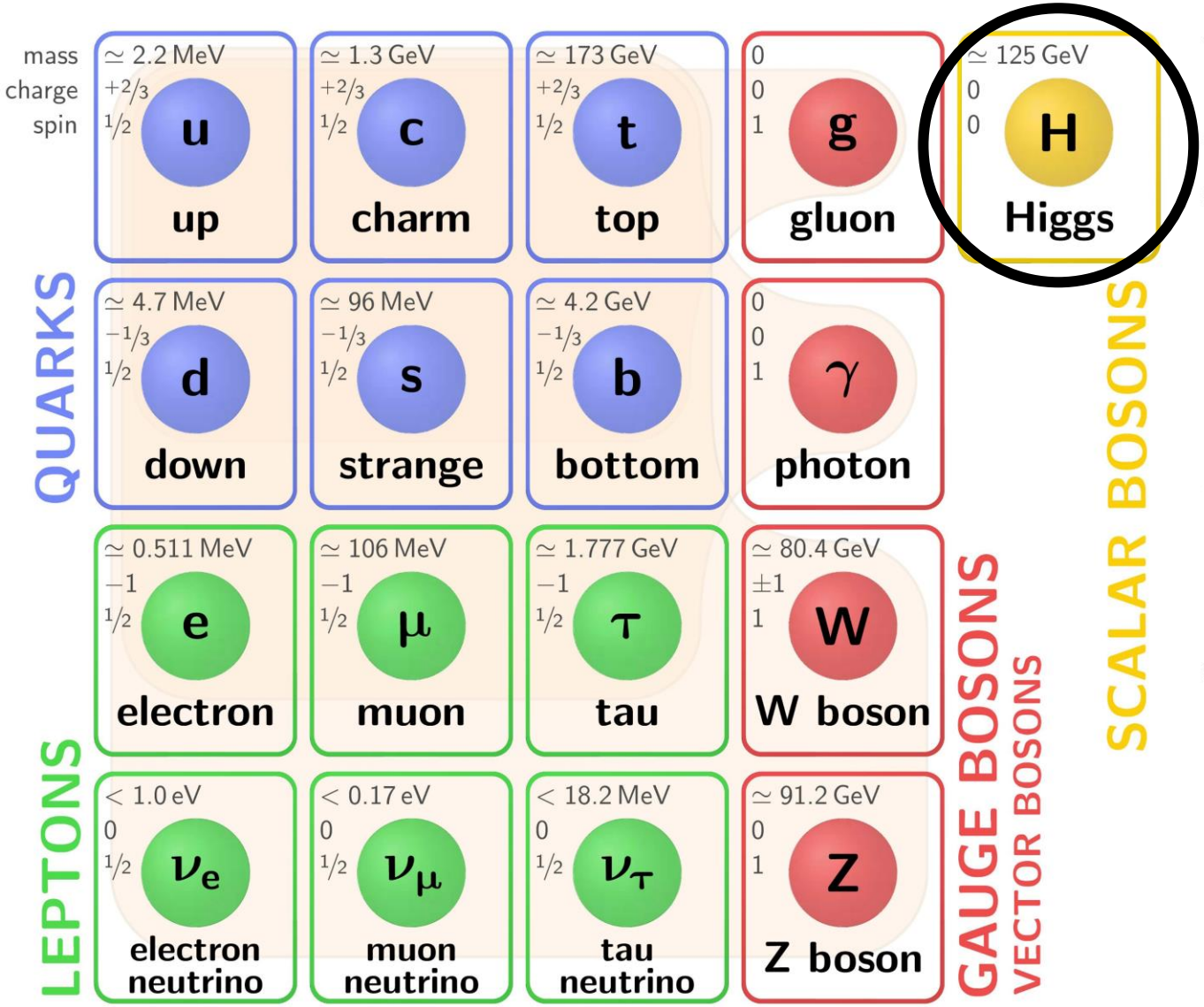
  - Interaction faible : trois particules (Z^0, W^+, W^-)

  - Interaction forte : huit gluons

Modèle standard de la physique des particules



Modèle standard de la physique des particules

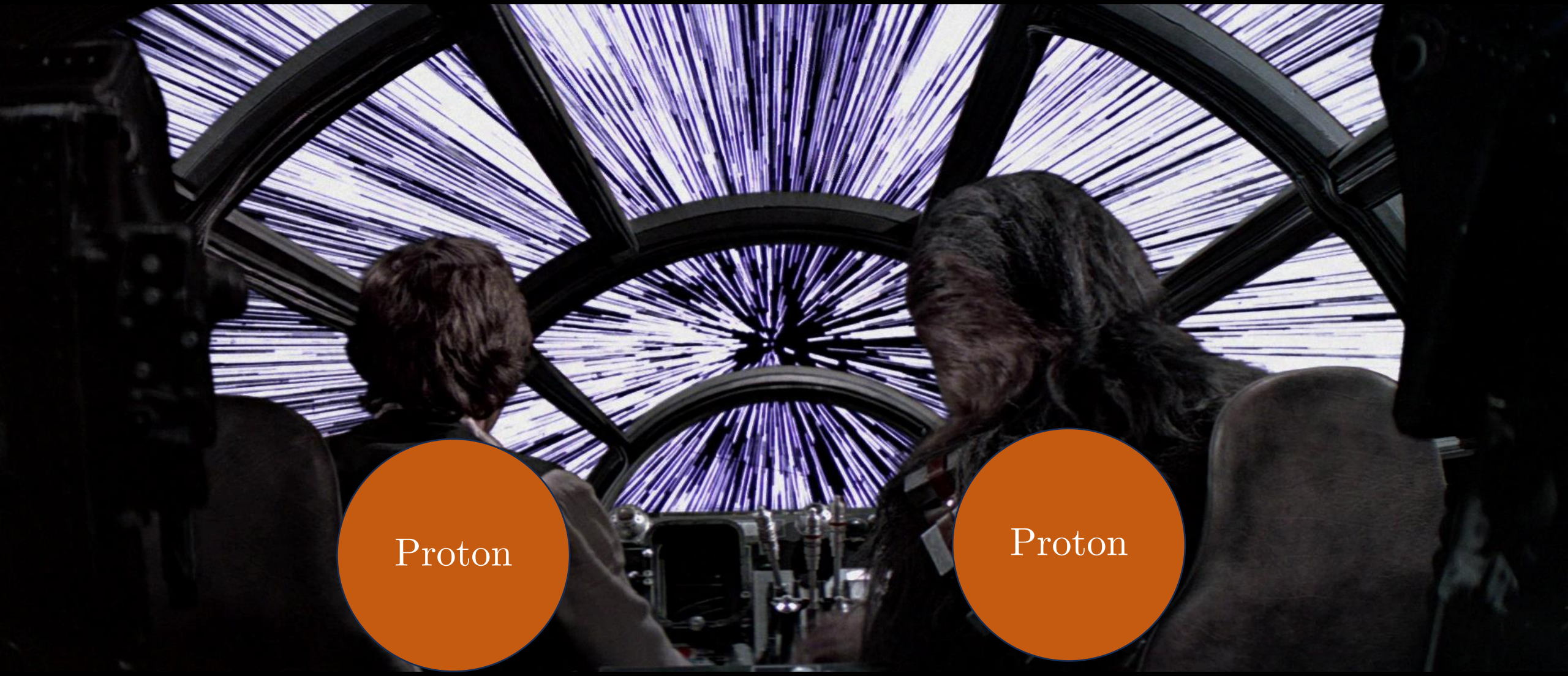


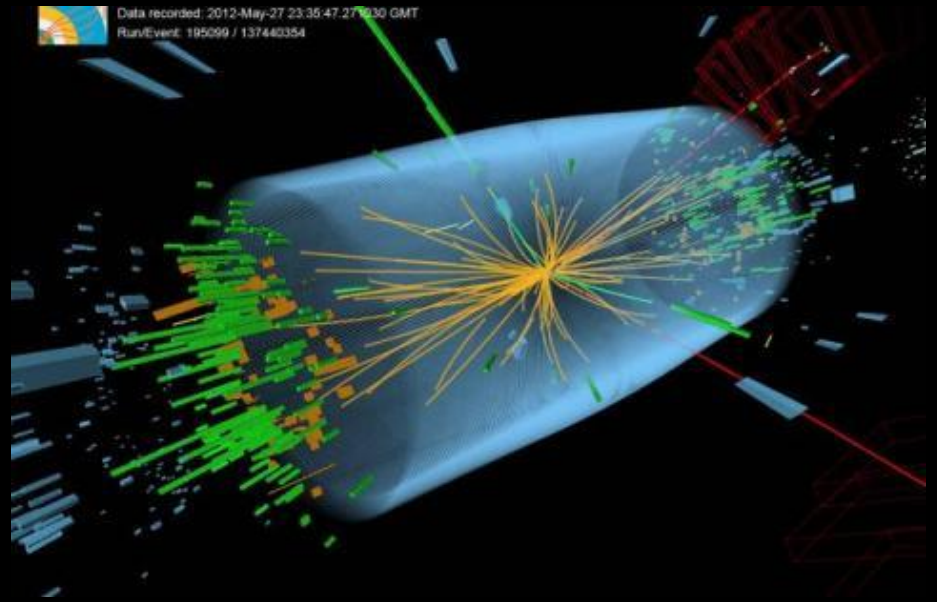
$$
\begin{aligned}
&\mathcal{L}_{SM} = \\
&-\tfrac{1}{2}\partial_\nu g^a_\mu \partial_\nu g^a_\mu - g_s f^{abc}\partial_\mu g^a_\nu g^b_\mu g^c_\nu - \tfrac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g^b_\mu g^c_\nu g^d_\mu g^e_\nu - \partial_\nu W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - M^2 W^+_\mu W^-_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\nu Z^0_\mu \partial_\nu Z^0_\mu - \\
&\tfrac{1}{2c_w^2} M^2 Z^0_\mu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - igc_w[\partial_\nu Z^0_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - Z^0_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + \\
&Z^0_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)] - igs_w[\partial_\nu A_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - A_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + \\
&A_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)] - \tfrac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\mu W^+_\nu W^-_\nu + \tfrac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\nu W^+_\mu W^-_\nu + g^2 c_w^2 (Z^0_\mu W^+_\mu Z^0_\nu W^-_\nu - \\
&Z^0_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w^2 (A_\mu W^+_\mu A_\nu W^-_\nu - A_\mu A_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z^0_\nu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - \\
&2A_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu] - \tfrac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \tfrac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \beta_h [\tfrac{2M^2}{g^2} + \tfrac{2M}{g}H + \tfrac{1}{2}(H^2 + \\
&\phi^0\phi^0 + 2\phi^+\phi^-)] + \tfrac{2M^4}{g^2}\alpha_h - g\alpha_h M[H^3 + H\phi^0\phi^0 + 2H\phi^+\phi^-] - \tfrac{1}{8}g^2\alpha_h[H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+\phi^-)^2 + \\
&4(\phi^0)^2\phi^+\phi^- + 4H^2\phi^+\phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - gMW^+_\mu W^-_\mu H - \tfrac{1}{2}g\tfrac{M}{c_w^2} Z^0_\mu Z^0_\mu H - \tfrac{1}{2}ig[W^+_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^- - \\
&\phi^-\partial_\mu\phi^0) - W^-_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu\phi^0)] + \tfrac{1}{2}g[W^+_\mu(H\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu H) - W^-_\mu(H\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu H)] + \\
&\tfrac{1}{2}g\tfrac{1}{c_w}(Z^0_\mu(H\partial_\mu\phi^0 - \phi^0\partial_\mu H) + M(\tfrac{1}{c_w}Z^0_\mu\partial_\mu\phi^0 + W^+_\mu\partial_\mu\phi^- + W^-_\mu\partial_\mu\phi^+) - ig\tfrac{s_w^2}{c_w}MZ^0_\mu(W^+_\mu\phi^- - \\
&W^-_\mu\phi^+) + igs_w MA_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - ig\tfrac{1-2c_w^2}{2c_w}Z^0_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) + igs_w A_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \\
&\phi^-\partial_\mu\phi^+) - \tfrac{1}{4}g^2 W^+_\mu W^-_\mu[H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+\phi^-] - \tfrac{1}{8}g^2\tfrac{1}{c_w^2}Z^0_\mu Z^0_\mu[H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2\phi^+\phi^-] - \\
&\tfrac{1}{2}g^2\tfrac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- + W^-_\mu\phi^+) - \tfrac{1}{2}ig^2\tfrac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) + \tfrac{1}{2}g^2 s_w A_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- + W^-_\mu\phi^+) + \\
&\tfrac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - g^2\tfrac{s_w}{c_w}(2c_w^2 - 1)Z^0_\mu A_\mu\phi^+\phi^- - g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu\phi^+\phi^- + \tfrac{1}{2}ig_s\lambda^a_{ij}(\bar{q}^\sigma_i\gamma^\mu q^\sigma_j)g^a_\mu - \\
&\bar{e}^\lambda(\gamma\partial + m^\lambda_e)e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda(\gamma\partial + m^\lambda_\nu)\nu^\lambda - \bar{u}^\lambda_j(\gamma\partial + m^\lambda_u)u^\lambda_j - \bar{d}^\lambda_j(\gamma\partial + m^\lambda_d)d^\lambda_j + igs_w A_\mu[-(\bar{e}^\lambda\gamma^\mu e^\lambda) + \\
&\tfrac{2}{3}(\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu u^\lambda_j) - \tfrac{1}{3}(\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu d^\lambda_j)] + \tfrac{ig}{4c_w}Z^0_\mu[(\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda\gamma^\mu(4s_w^2 - 1 - \gamma^5)e^\lambda) + (\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu(\tfrac{4}{3}s_w^2 - 1 - \\
&\gamma^5)d^\lambda_j) + (\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(1 - \tfrac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5)u^\lambda_j)] + \tfrac{ig}{2\sqrt{2}}W^+_\mu[(\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)U^{lep}_{\lambda\kappa}e^\kappa) + (\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(1+\gamma^5)C_{\lambda\kappa}d^\kappa_j)] + \\
&\tfrac{ig}{2\sqrt{2}}W^-_\mu[(\bar{e}^\kappa U^{lep}_{\kappa\lambda}\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{d}^\kappa_j C^\dagger_{\kappa\lambda}\gamma^\mu(1+\gamma^5)u^\lambda_j)] + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+[-m^\kappa_e(\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)e^\kappa) + \\
&m^\lambda_\nu(\bar{\nu}^\gamma U^{lep}_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)e^\kappa)] + + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^-[m^\lambda_e(\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)\nu^\kappa) - m^\kappa_\nu(\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)\nu^\kappa)] - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_\nu}{M}H(\bar{\nu}^\lambda\nu^\lambda) - \\
&\tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_e}{M}H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_\nu}{M}\phi^0(\bar{\nu}^\lambda\gamma^5\nu^\lambda) - \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_e}{M}\phi^0(\bar{e}^\lambda\gamma^5 e^\lambda) - \tfrac{1}{4}\bar{\nu}_\lambda M^R_{\lambda\kappa}(1-\lambda^5)\hat{\nu}_\kappa - \tfrac{1}{4}\overline{\bar{\nu}_\lambda M^R_{\lambda\kappa}(1-\lambda^5)\hat{\nu}_\kappa} + \\
&\tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+[-m^\kappa_d(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1-\lambda^5)d^\kappa_j) + m^\lambda_u(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1+\lambda^5)d^\kappa_j)] + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^-[m^\lambda_d(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)u^\kappa_j) - \\
&m^\kappa_u(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1-\lambda^5)u^\kappa_j)] - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_u}{M}H(\bar{u}^\lambda_j u^\lambda_j) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_d}{M}H(\bar{d}^\lambda_j d^\lambda_j) + \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_u}{M}\phi^0(\bar{u}^\lambda_j\gamma^5 u^\lambda_j) - \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_d}{M}\phi^0(\bar{d}^\lambda_j\gamma^5 d^\lambda_j)
\end{aligned}
$$

Bosons de jauge : A_μ, W_μ, Z^0, g_μ	Masses : m_d, m_u, m_e, m_H, M_W
Quarks : u^κ, d^κ	Constantes de couplage : $g = \sqrt{4\pi\alpha}, g_S$
Leptons : e^λ, ν^λ	$C_{\lambda\kappa}$: matrice de Cabibbo-Kobawashi-Maskawa
Higgs : $H, \Phi^0, \Phi^+, \Phi^-$	f^{abc} : constantes de structure de $SU(3)$

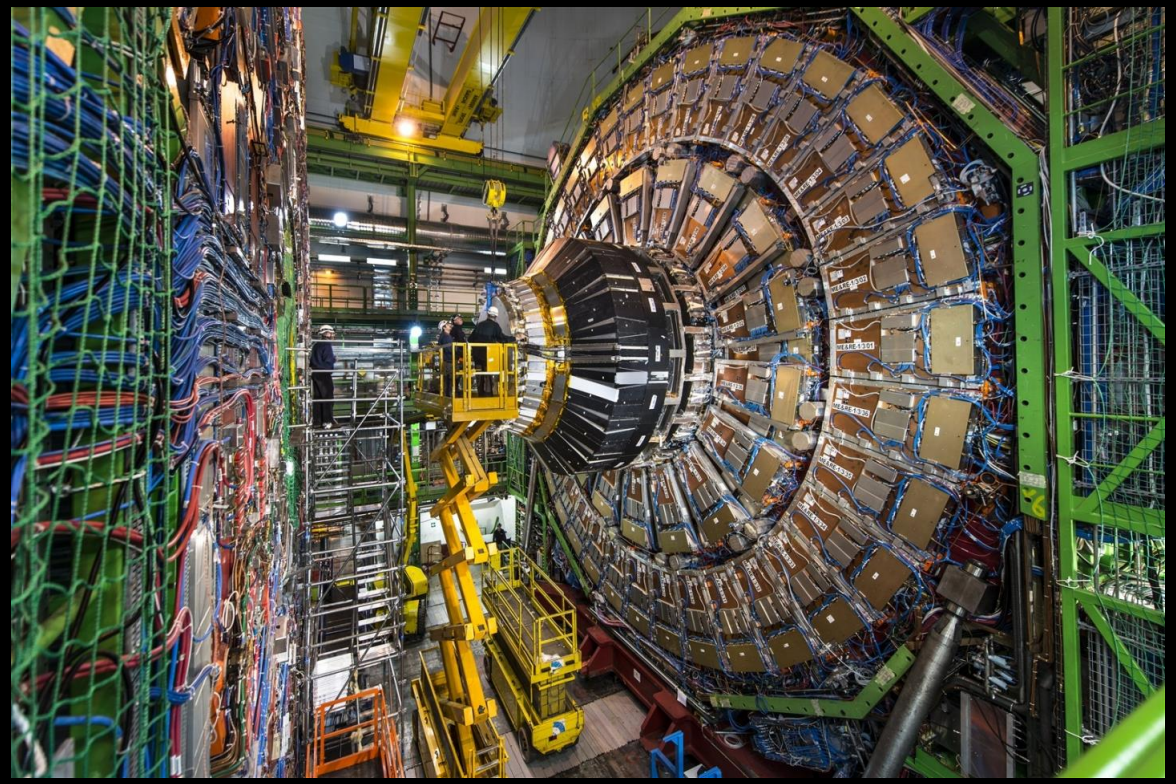
Les fantômes de Faddeev-Popov sont omis pour simplifier ;)

Le LHC

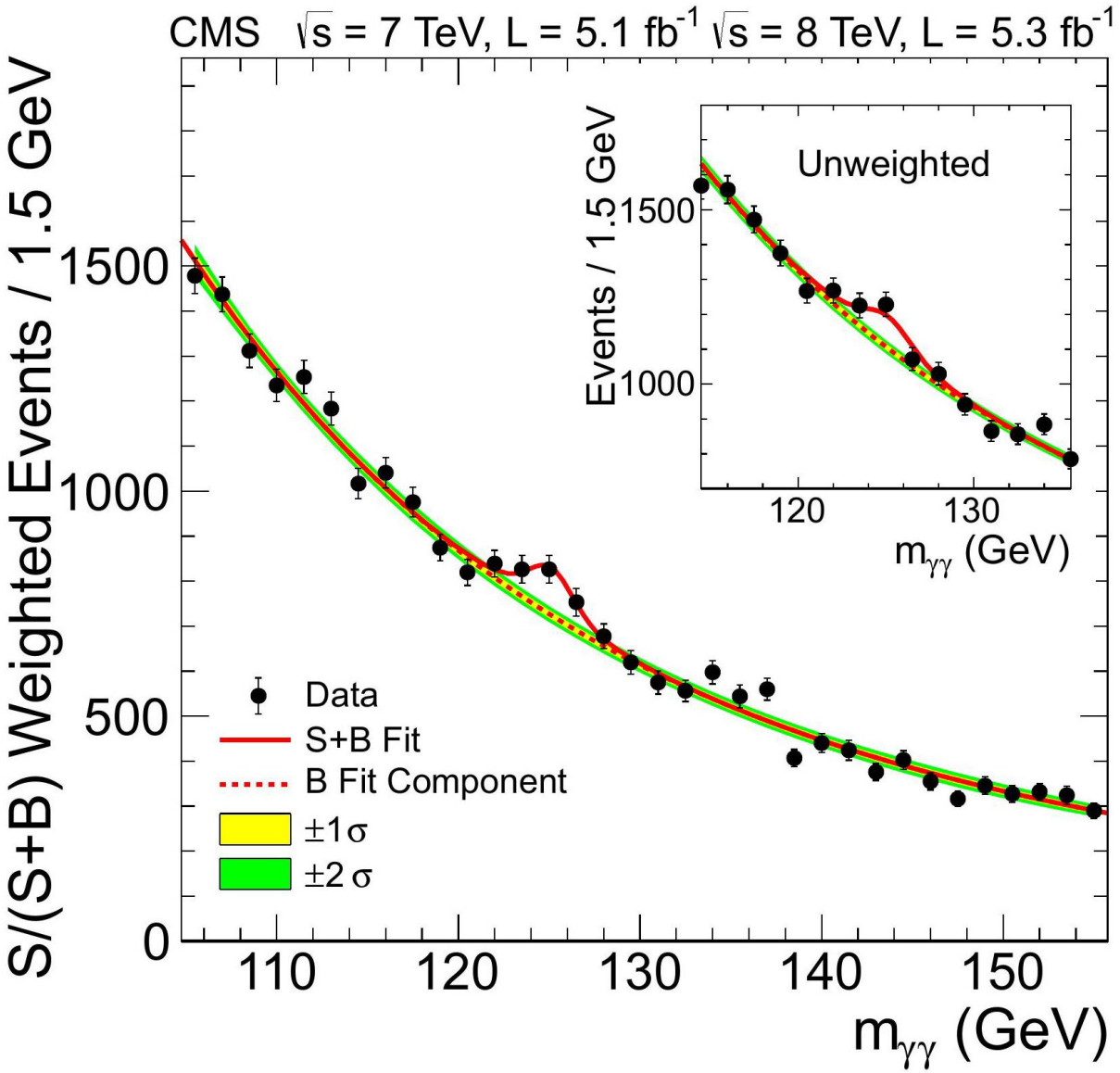



Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.27
Run/Event: 195099 / 137440354

LHCb
ATLAS
CERN
SUISSE
FRANCE
CMS
ALICE
SPS 7 km
LHC 27 km



- Découverte du boson de Higgs



- Prédictions théorie/expérience d'une précision monumentale

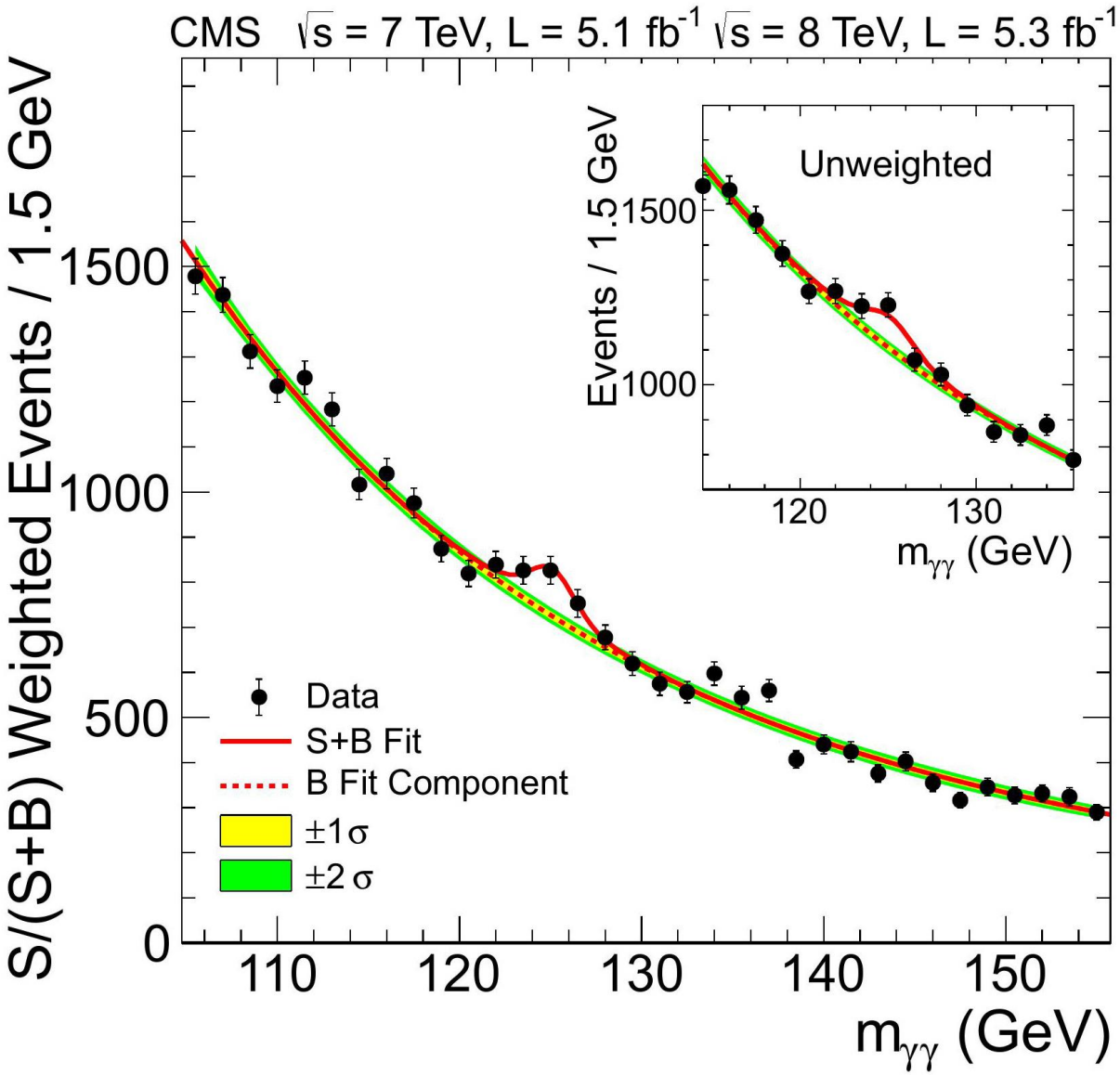
Exemple : moment magnétique anomal de l'électron

$$g_{\text{th}} = 2.001\ 159\ 652\ 181\ 643(764)$$

$$g_{\text{exp}} = 2.001\ 159\ 652\ 180\ 73(28)$$

Douzième chiffre après la virgule

- Découverte du boson de Higgs



- Prédictions théorie/expérience d'une précision monumentale

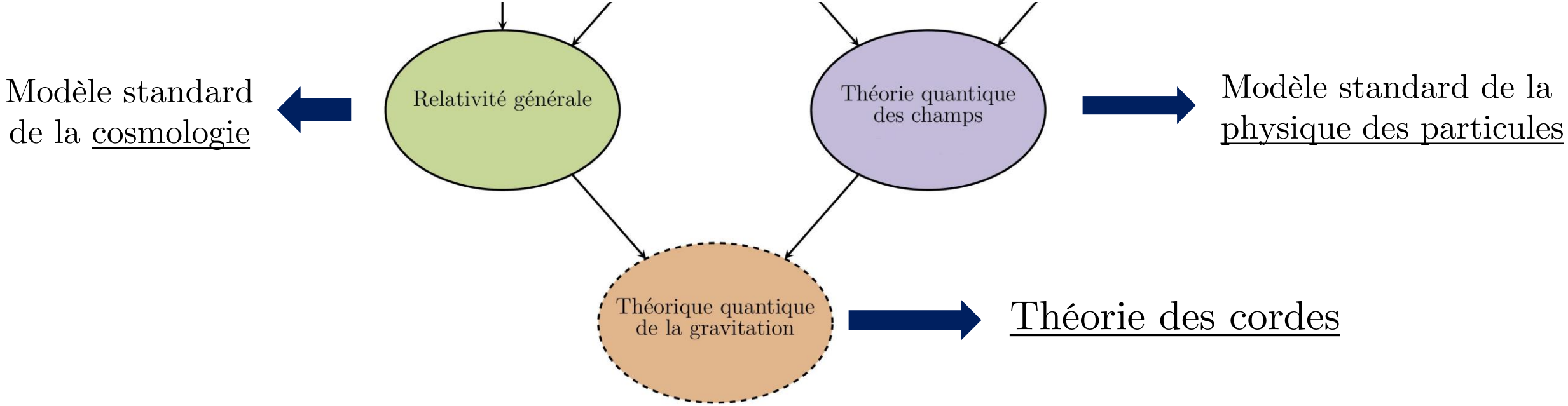
<u>Exemple :</u> moment magnétique anomal de l'électron

$$g_{\text{th}} = 2.001\ 159\ 652\ 181\ 643(764)$$

$$g_{\text{exp}} = 2.001\ 159\ 652\ 180\ 73(28)$$

Douzième chiffre après la virgule

IV – Aller plus loin : la théorie des cordes



Les limites des modèles

<u>Cosmologie</u>

- Nature de la matière noire
- Nature de l'énergie noire

Les limites des modèles

<u>Cosmologie</u>

- Nature de la matière noire
- Nature de l'énergie noire
- Origine de l'univers
  - Echelle de Planck

Les limites des modèles

Cosmologie	Physique des particules
• Nature de la matière noire	• De nouvelles particules ?
• Nature de l'énergie noire	
• Origine de l'univers - Echelle de Planck	

Les limites des modèles

Cosmologie

- Nature de la matière noire
- Nature de l'énergie noire
- Origine de l'univers
  - Echelle de Planck

Physique des particules

- De nouvelles particules ?
- Gravitation quantique

Les limites des modèles

Cosmologie

- Nature de la matière noire
- Nature de l'énergie noire
- Origine de l'univers
  - Echelle de Planck

Physique des particules

- De nouvelles particules ?
- Gravitation quantique
- Problèmes de hiérarchies

La théorie des cordes

- Une théorie candidate de gravitation quantique

- Unifie toutes les forces fondamentales

⟹ Opportunité de s'attaquer à la cosmologie et à la physique des particules dans un formalisme unique

Conférence cette semaine au LaPTh: Strings and Cosmology

La théorie des cordes

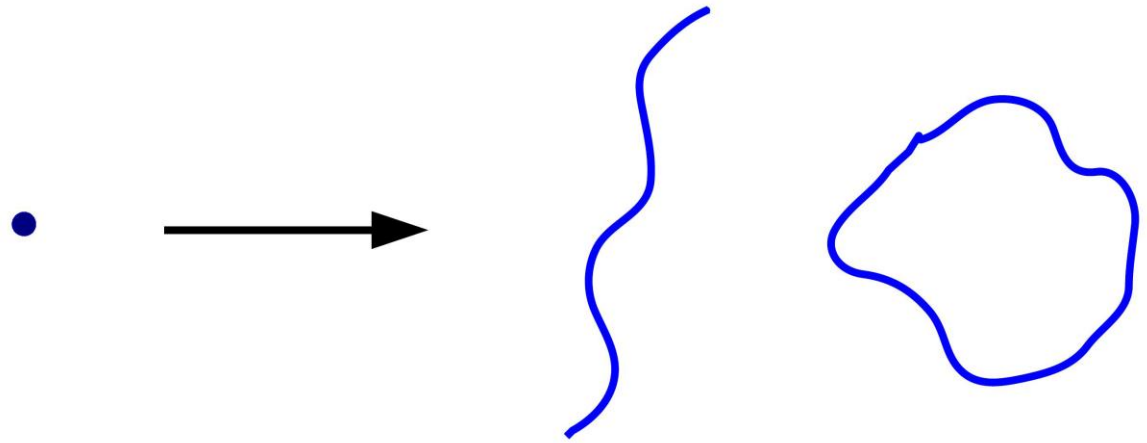
- Une théorie candidate de gravitation quantique

- Unifie toutes les forces fondamentales

→ Opportunité de s'attaquer à la cosmologie et à la physique des particules dans un formalisme unique

<u>Conférence cette semaine au LaPTh:</u> Strings and Cosmology

Point de départ : des cordes

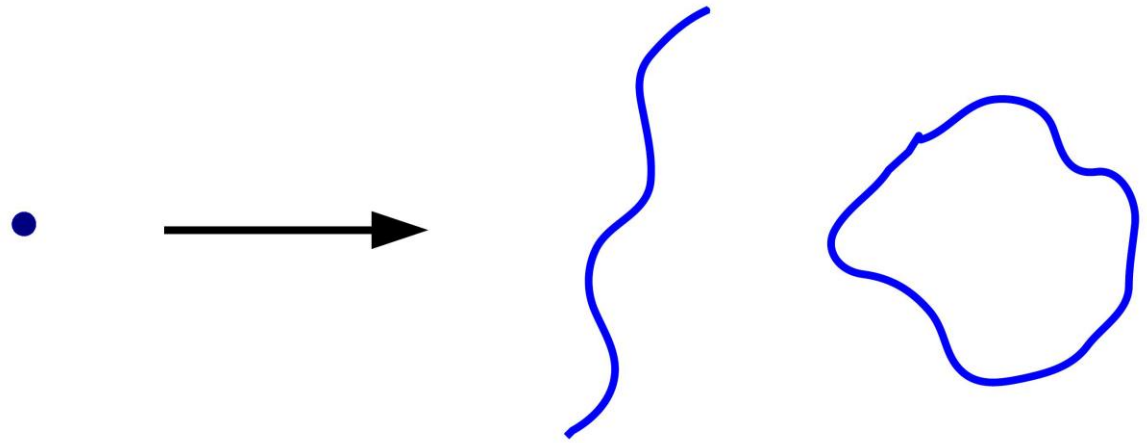


• Constituants élémentaires étendus dans une direction

Description quantique

Description relativiste : les cordes bougent dans l'espace-temps

Point de départ : des cordes

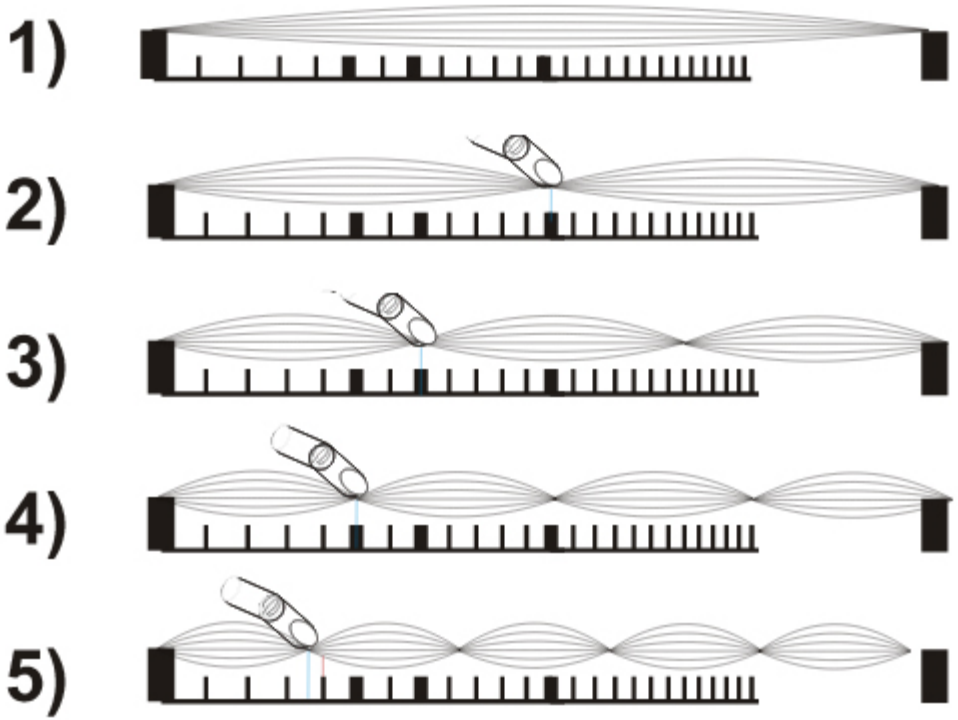


• Constituants élémentaires étendus dans une direction

Description quantique

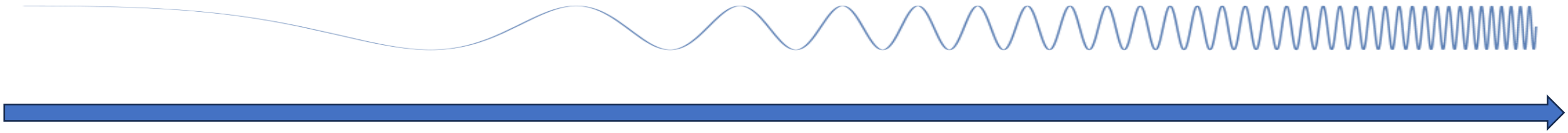
Description relativiste : les cordes bougent dans l'espace-temps

Crédits : lien de l'image



Crédits : lien de l'image

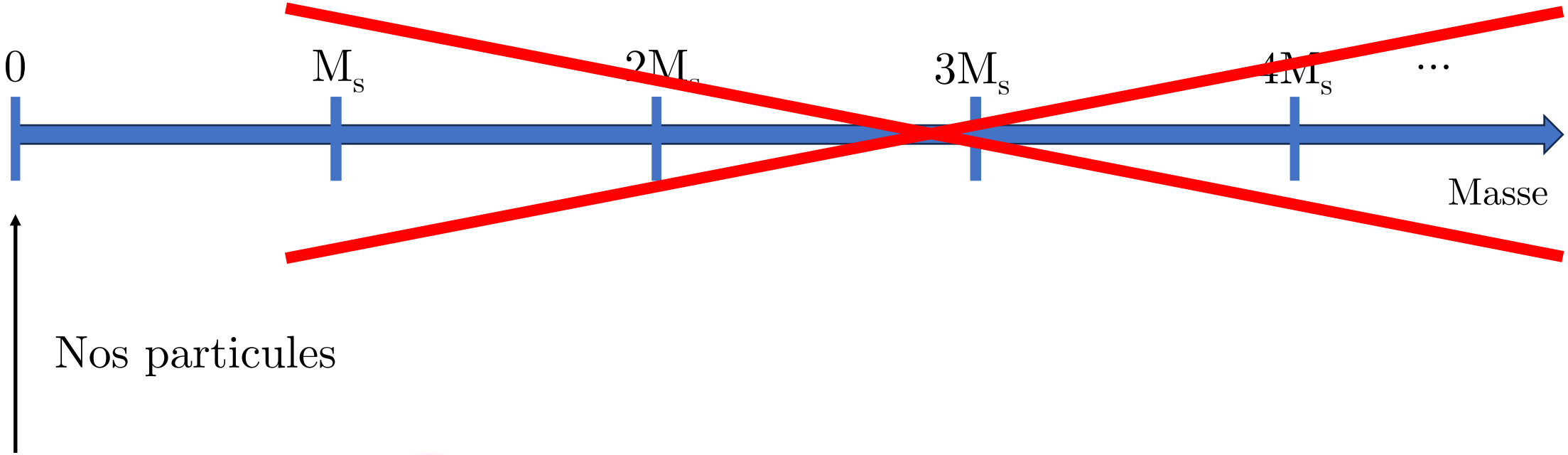
Longueur d'onde



Energie

Masse

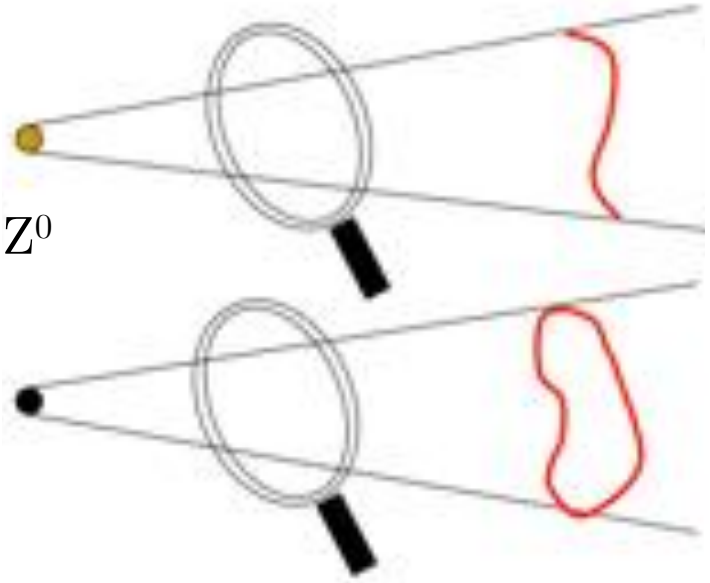
0
M_s
$2M_s$
$3M_s$
$4M_s$
...
Masse

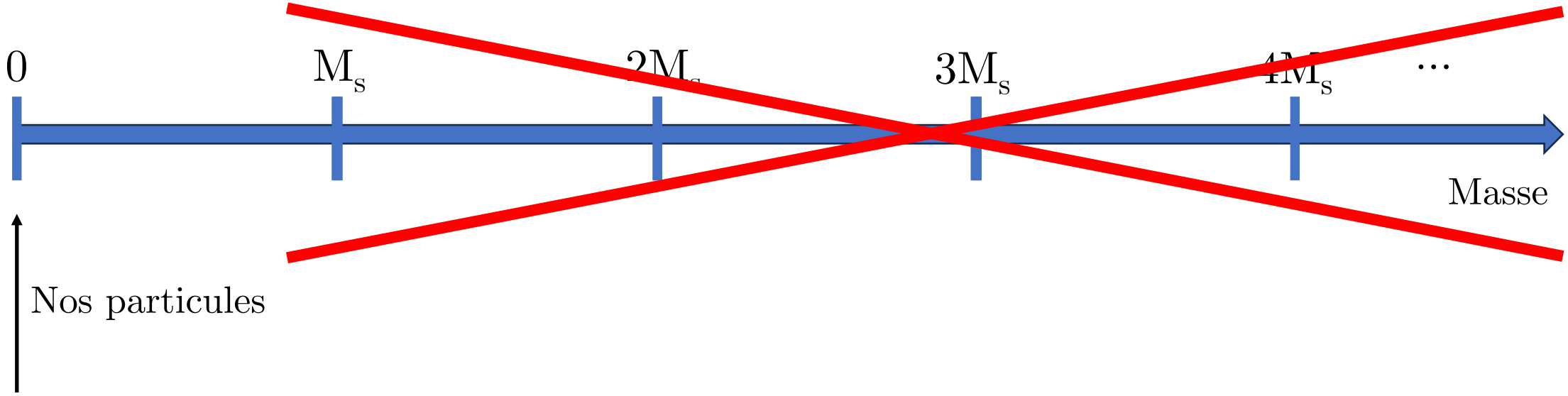


Nos particules

photon
gluon
W^+, W^-, Z^0

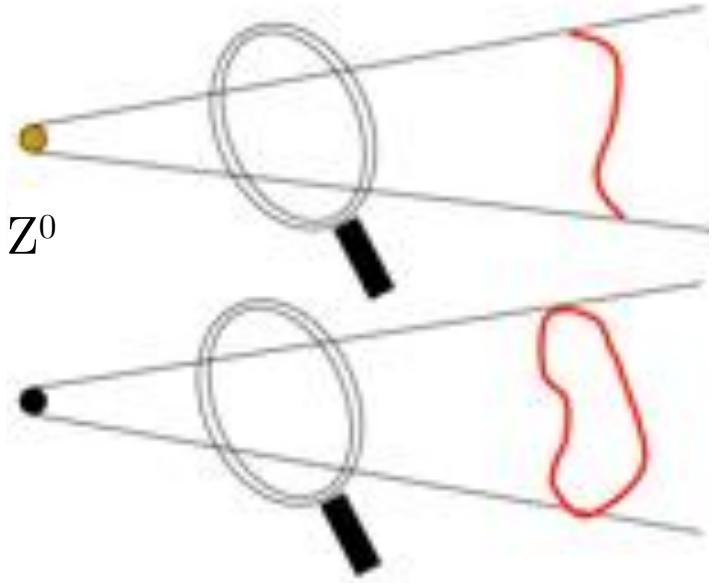
graviton





photon
gluon
W^+, W^-, Z^0

graviton



Gravitation quantique

Reproduit la relativité générale

Unification des interactions

Des dimensions supplémentaires

- Cohérence de la théorie → 10 dimensions d'espace-temps

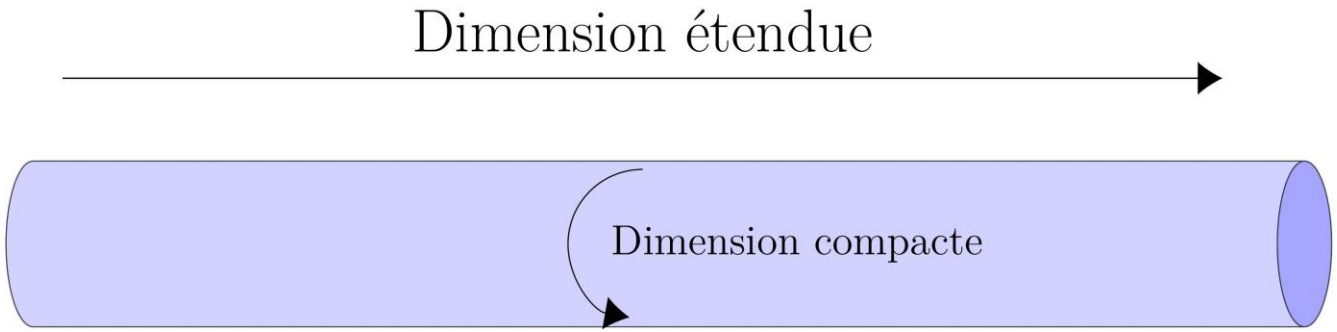
- Compactification

- 4 dimensions étendues + 6 dimensions compactes

Des dimensions supplémentaires

- Cohérence de la théorie → 10 dimensions d'espace-temps

- Compactification

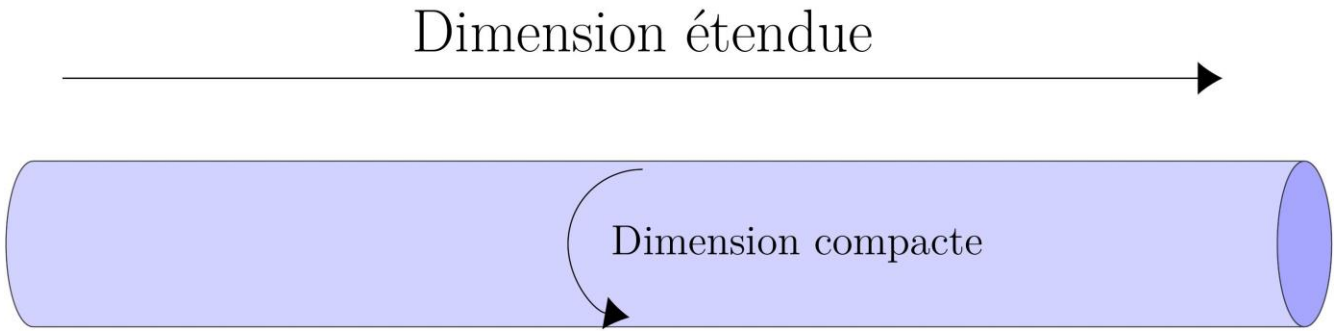


- 4 dimensions étendues + 6 dimensions compactes

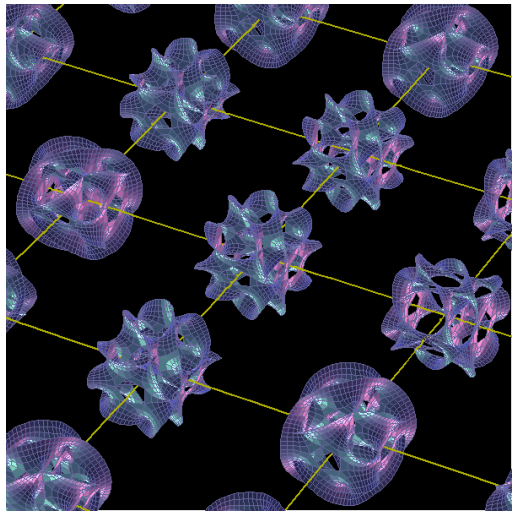
Des dimensions supplémentaires

- Cohérence de la théorie → 10 dimensions d'espace-temps

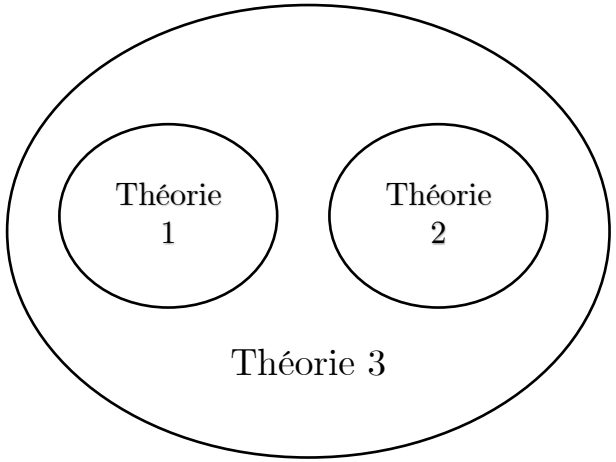
- Compactification



- 4 dimensions étendues + 6 dimensions compactes

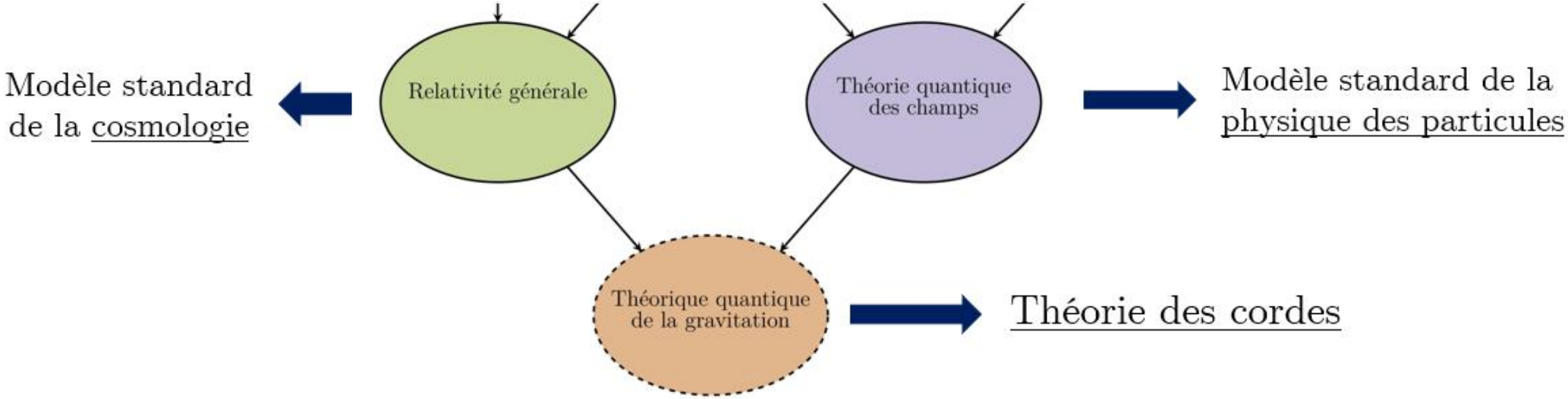


Conclusions



- La physique fondamentale grimpe les échelles

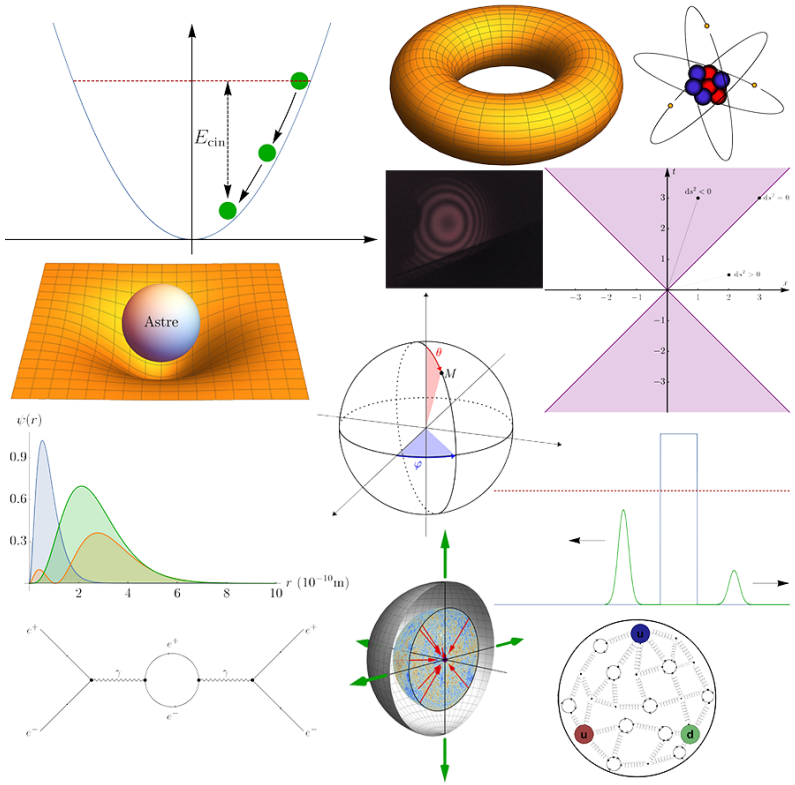
- Mène à deux théories et deux modèles standards



- La théorie des cordes comme formalisme pour unifier ces modèles

Mon livre de vulgarisation

- <u>Editions Matériologiques</u>
- 406 pages et 160 figures



Merci pour votre attention !