Quel est le rôle de l'énergie en Théorie Quantique des Champs ?

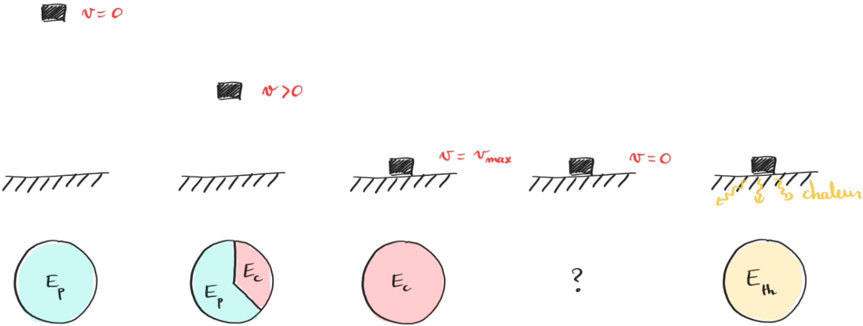
Antoine Bourget

IPhT, CEA, Saclay

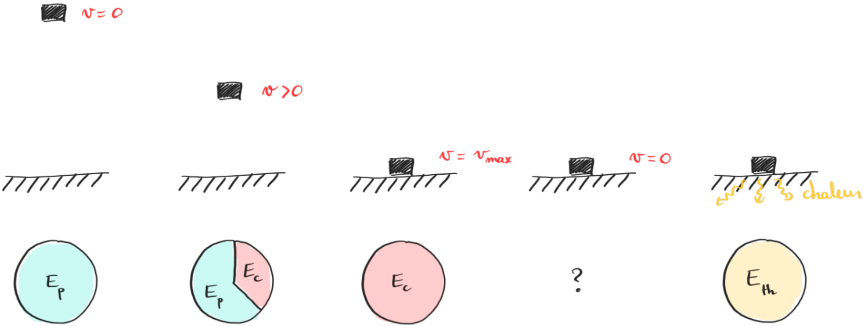
Timeworld, 18 novembre 2023

Plan

Une quantité conservée



Une quantité conservée



"Premier principe"

Dans un système physique isolé, l'énergie se conserve dans le temps.

Une quantité conservée

La conservation permet d'en apprendre plus sur le monde :

- Energie de chaleur
- Energie de masse
- Energie noire
- etc...

Une quantité conservée

La conservation permet d'en apprendre plus sur le monde :

- Energie de chaleur
- Energie de masse
- Energie noire
- etc...

Mais si c'est si divers, comment la définir ?

Une quantité conservée

La conservation permet d'en apprendre plus sur le monde :

- Energie de chaleur
- Energie de masse
- Energie noire
- etc...

Mais si c'est si divers, comment la définir ?

Définition du théoricien

L'énergie c'est la quantité qui, dans un système isolé,
se conserve au cours du temps,
du fait de l'invariance dans le temps des lois fondamentales.

Une quantité conservée

C'est un avatar du *théorème de Noether*.

Invariance $\leftrightarrow$ Quantité conservée.

Une quantité conservée

C'est un avatar du *théorème de Noether*.

$$\text{Invariance} \leftrightarrow \text{Quantité conservée.}$$

Ici :

$$\text{La physique est la même hier et demain} \leftrightarrow \text{Energie conservée.}$$

Une quantité conservée

C'est un avatar du *théorème de Noether*.

Invariance $\leftrightarrow$ Quantité conservée.

Ici :

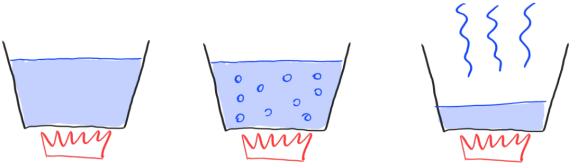
La physique est la même hier et demain $\leftrightarrow$ Energie conservée.

NB : c'est faux en cosmologie !

NASA, ESA, G. Illingworth, D. Magee,
P. Oesch, R. Bouwens, and the HUDF09 Team

Une quantité conservée

Pourtant, souvent on s'intéresse à ce qui se passe quand l'énergie varie :



Apport d'énergie extérieure → changement de phase.

Plan

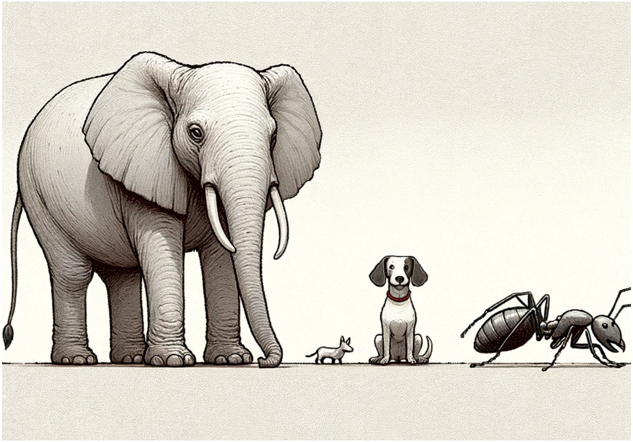
Une quantité conservée... par définition ?

L'importance des échelles en sciences

La renormalisation, entre mystère et simplicité

Conclusion

L'importance des échelles



Masse, volume de tissus à alimenter en énergie $\sim L^3$
Force des muscles, surfaces de contact respiratoire $\sim L^2$

L’importance des échelles

Physique statistique :

”More is different”

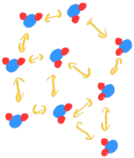
L'importance des échelles

Physique statistique :

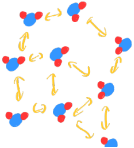
"More is different"

La physique aux grandes échelles peut-être qualitativement différente de la physique des constituants élémentaires, *et le lien n'est pas évident !*

$T = 274$ K



$T = 272$ K



L'importance des échelles

La physique dépend de **l'échelle** (de température, d'énergie, de distance, de temps).

Les domaines de la physique unifient ces échelles:

- Physique relativiste : $c = 299\,792\,458\,\mathrm{m/s}$.
- Physique quantique : $\hbar = \frac{h}{2\pi} = \frac{6.626\,070\,15 \cdot 10^{-34}}{2\pi}\ \mathrm{J \cdot s}$.
- Physique statistique : $k_B = 1.380\,649 \cdot 10^{-23}\mathrm{J/K}$.

Unités naturelles: on fixe $c = \hbar = k_B = 1$ et on peut tout mesurer en énergie !

L'importance des échelles

La physique dépend de **l'échelle** (de température, d'énergie, de distance, de temps).

Les domaines de la physique unifient ces échelles:

- Physique relativiste : $c = 299\,792\,458\,\mathrm{m/s}$.
- Physique quantique : $\hbar = \frac{h}{2\pi} = \frac{6.626\,070\,15 \cdot 10^{-34}}{2\pi}\ \mathrm{J \cdot s}$.
- Physique statistique : $k_B = 1.380\,649 \cdot 10^{-23}\mathrm{J/K}$.

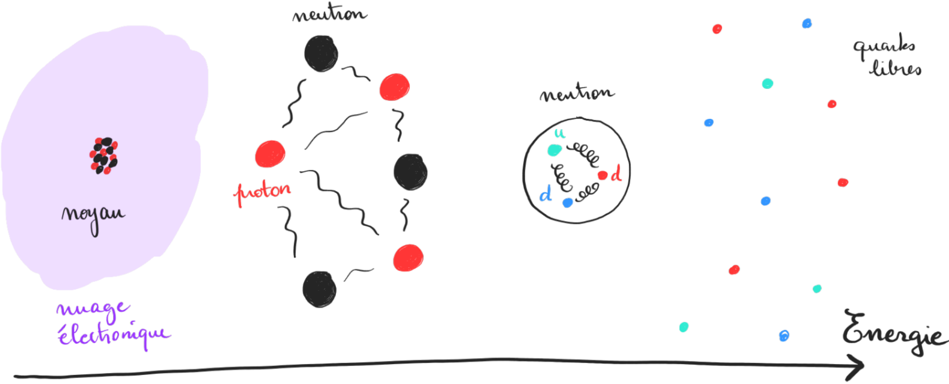
Unités naturelles: on fixe $c = \hbar = k_B = 1$ et on peut tout mesurer en énergie !

"Principe fondamental de la physique théorique"

La description d'un système se fait à l'aide d'un modèle valable à une échelle d'énergie donnée. Quand on change d'énergie, le modèle doit en général changer.

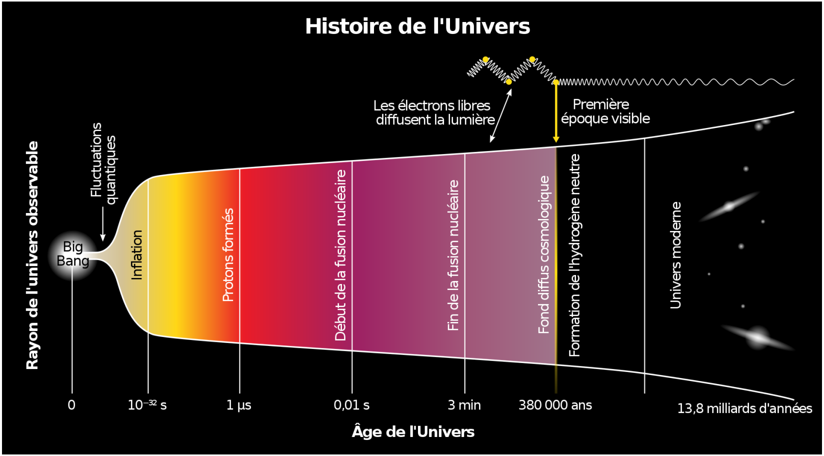
L'importance des échelles

En théorie quantique des champs, haute énergie = petite distance !



L'importance des échelles

En cosmologie, haute énergie = haute température = petit temps !



National Science Foundation, Yinweiche, Whidou & Simon Villeneuve, CC BY-SA 4.0.

L'importance des échelles

"Question fondamentale de la physique théorique"

Comment la description physique d'un système évolue-t-elle lorsque l'échelle d'énergie varie ?

L'importance des échelles

"Question fondamentale de la physique théorique"

Comment la description physique d'un système évolue-t-elle lorsque l'échelle d'énergie varie ?

Deux versants à cette question:

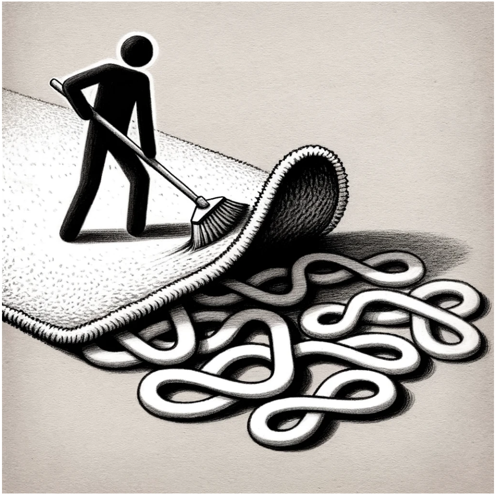
- Comment un système connu à basse énergie peut être décrit à haute énergie (par exemple, trouver un *modèle fondamental microscopique* pour les lois de l'univers, que nous connaissons à notre échelle)
- Comment un système de lois à haute énergie se traduit par un univers à basse énergie (par exemple, quelles sont les conséquences et prédictions expérimentales d'une théorie fondamentale donnée).

Parlons de théorie quantique des champs...

Plan

La renormalisation

En théorie quantique des champs, a-t-on vraiment $\infty = 0$?



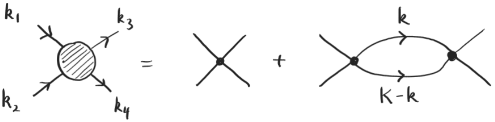
La renormalisation

Par exemple, dans une théorie avec un champ (scalaire) de masse *m* et un type d'intéraction

La renormalisation

Par exemple, dans une théorie avec un champ (scalaire) de masse m et un type d'intéraction

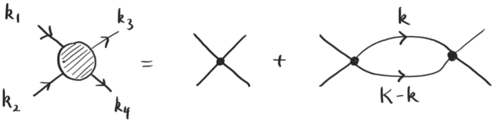
on peut calculer l'amplitude pour le processus



La renormalisation

Par exemple, dans une théorie avec un champ (scalaire) de masse m et un type d'intéraction

on peut calculer l'amplitude pour le processus

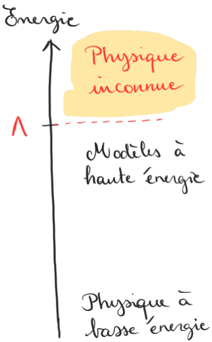


$$\mathcal{M} = -ig + \frac{1}{2}(-ig)^2 \int \frac{\mathrm{d}^4 k}{(2\pi)^4} \frac{i}{k^2 - m^2} \frac{i}{(K-k)^2 - m^2} + O(g^3)$$

L'intégrale diverge !

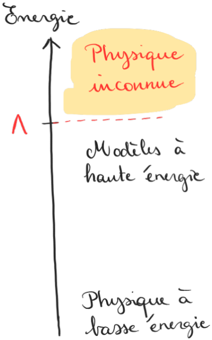
La renormalisation

Il faut *paramétrer notre ignorance* : la théorie n'est pas valable à toutes les échelles d'énergie, mais disons au moins jusqu'à Λ. Au-delà, on ne sait pas.



La renormalisation

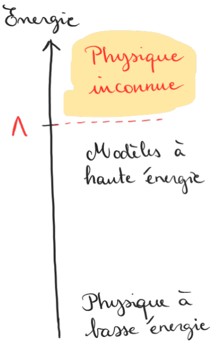
Il faut *paramétrer notre ignorance* : la théorie n'est pas valable à toutes les échelles d'énergie, mais disons au moins jusqu'à Λ. Au-delà, on ne sait pas.



- C'est *heureux* ! On peut construire les théories physiques petit à petit.

La renormalisation

Il faut *paramétrer notre ignorance* : la théorie n'est pas valable à toutes les échelles d'énergie, mais disons au moins jusqu'à Λ. Au-delà, on ne sait pas.



- C'est *heureux* ! On peut construire les théories physiques petit à petit.
- C'est *physique* ! Il ne s'agit pas d'une astuce mathématique.

La renormalisation

$$\mathcal{M} = -ig + iCg^2 \log \frac{\Lambda^2}{K^2} + O(g^3)$$

Mais quel est le sens physique de g? C'est la constante de couplage pour $K^2 = \Lambda^2$???

La renormalisation

$$\mathcal{M} = -ig + iCg^2 \log \frac{\Lambda^2}{K^2} + O(g^3)$$

Mais quel est le sens physique de g? C'est la constante de couplage pour $K^2 = \Lambda^2$???

Une expérience permet de mesurer la constante de couplage réelle g_R. Cette expérience est faite à un certaine énergie μ, donc

$$-ig_R = -ig + iCg^2 \log \frac{\Lambda^2}{\mu^2} + O(g^3)$$

La renormalisation

$$\mathcal{M} = -ig + iCg^2 \log \frac{\Lambda^2}{K^2} + O(g^3)$$

Mais quel est le sens physique de g? C'est la constante de couplage pour $K^2 = \Lambda^2$???

Une expérience permet de mesurer la constante de couplage réelle g_R. Cette expérience est faite à un certaine énergie μ, donc

$$-ig_R = -ig + iCg^2 \log \frac{\Lambda^2}{\mu^2} + O(g^3)$$

et donc

$$\mathcal{M} = -ig_R + iCg_R^2 \log \frac{\mu^2}{K^2} + O(g_R^3)$$

La renormalisation

$$\mathcal{M} = -ig + iCg^2 \log \frac{\Lambda^2}{K^2} + O(g^3)$$

Mais quel est le sens physique de g? C'est la constante de couplage pour $K^2 = \Lambda^2$???

Une expérience permet de mesurer la constante de couplage réelle g_R. Cette expérience est faite à un certaine énergie μ, donc

$$-ig_R = -ig + iCg^2 \log \frac{\Lambda^2}{\mu^2} + O(g^3)$$

et donc

$$\mathcal{M} = -ig_R + iCg_R^2 \log \frac{\mu^2}{K^2} + O(g_R^3)$$

Le paramètre initial g était

$$g = \lim_{\mu \to \infty} g_R(\mu)$$

(... il se peut aussi qu'on ne puisse pas prendre $\mu \to \infty$...)

La renormalisation

Ainsi la "constante" de structure fine $\alpha = \frac{e^2}{4\pi} \times \frac{1}{\hbar c \epsilon_0} \sim \frac{1}{137}$:

$$\alpha(\mu) = \frac{\alpha(\mu_0)}{1 - \frac{2}{3\pi}\alpha(\mu_0)\log\frac{\mu}{\mu_0}}\,, \qquad \mu_0, \mu_1 >> m_e\,.$$

La renormalisation

Ainsi la "constante" de structure fine $\alpha = \frac{e^2}{4\pi} \times \frac{1}{\hbar c \epsilon_0} \sim \frac{1}{137}$:

$$\alpha(\mu) = \frac{\alpha(\mu_0)}{1 - \frac{2}{3\pi}\alpha(\mu_0)\log\frac{\mu}{\mu_0}}\,, \qquad \mu_0, \mu_1 >> m_e\,.$$

Etalonnage à basse énergie:

$$\alpha(0\,\mathrm{GeV}) \sim \frac{1}{137}$$

La renormalisation

Ainsi la "constante" de structure fine $\alpha = \frac{e^2}{4\pi} \times \frac{1}{\hbar c \epsilon_0} \sim \frac{1}{137}$:

$$\alpha(\mu) = \frac{\alpha(\mu_0)}{1 - \frac{2}{3\pi}\alpha(\mu_0)\log\frac{\mu}{\mu_0}}\,, \qquad \mu_0, \mu_1 >> m_e\,.$$

Etalonnage à basse énergie:

$$\alpha(0\,\mathrm{GeV}) \sim \frac{1}{137}$$

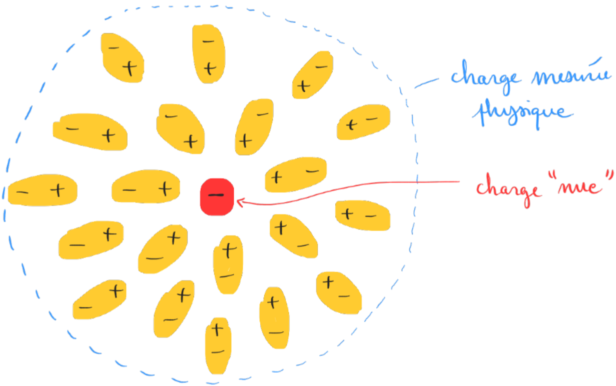
On trouve alors par exemple

$$\alpha(193\,\mathrm{GeV}) \sim \frac{1}{127}$$

Donc la charge de l'électron vaut e à basse énergie et $1,039 \times e$ à $193\,\mathrm{GeV}$.

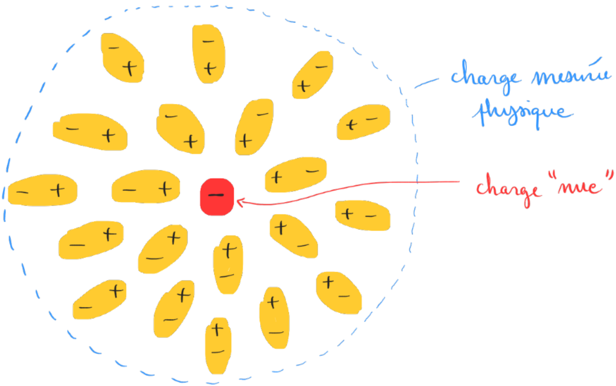
La renormalisation

Interprétation par écrantage :



La renormalisation

Interprétation par écrantage :



Note: $\alpha(\mu) \to \infty$ pour $\mu \sim m_e \exp\left(\frac{3\pi}{2\alpha}\right) \sim 10^{286}$ eV!

La renormalisation

Théories de jauge non-Abélienne pour le groupe $SU(N)$:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \overline{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi \qquad \text{avec} \qquad D_\mu = \partial_\mu - i g A_\mu$$

La renormalisation

Théories de jauge non-Abélienne pour le groupe $SU(N)$:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \overline{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi \qquad \text{avec} \qquad D_\mu = \partial_\mu - igA_\mu$$

Variation de la constante de couplage :

$$\beta(g) = M \frac{\partial g}{\partial M} = -\frac{g^3}{3(4\pi)^2}(11N - 2n_f) := -Cg^3$$

La renormalisation

Théories de jauge non-Abélienne pour le groupe $SU(N)$:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \overline{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi \qquad \text{avec} \qquad D_\mu = \partial_\mu - i g A_\mu$$

Variation de la constante de couplage :

$$\beta(g) = M \frac{\partial g}{\partial M} = -\frac{g^3}{3(4\pi)^2}(11N - 2n_f) := -C g^3$$

Alors

$$g^2(\mu) = \frac{g(\mu_0)^2}{1 + 2C g(\mu_0)^2 \log \frac{\mu}{\mu_0}}$$

Le comportement dépend du signe de $(11N - 2n_f)$.

La renormalisation

Théories de jauge non-Abélienne pour le groupe $SU(N)$:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \overline{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi \qquad \text{avec} \qquad D_\mu = \partial_\mu - igA_\mu$$

Variation de la constante de couplage :

$$\beta(g) = M\frac{\partial g}{\partial M} = -\frac{g^3}{3(4\pi)^2}(11N - 2n_f) := -Cg^3$$

Alors

$$g^2(\mu) = \frac{g(\mu_0)^2}{1 + 2Cg(\mu_0)^2 \log\frac{\mu}{\mu_0}}$$

Le comportement dépend du signe de $(11N - 2n_f)$.

Chromodynamique quantique : $N = 3$ et $n_f = 6$ donc $\beta < 0$: liberté asymptotique et esclavage infrarouge.

La renormalisation

The Nobel Prize in Physics 2004

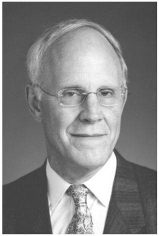


Photo from the Nobel Foundation archive.

David J. Gross

Prize share: 1/3

Photo from the Nobel Foundation archive.

H. David Politzer

Prize share: 1/3

Photo from the Nobel Foundation archive.

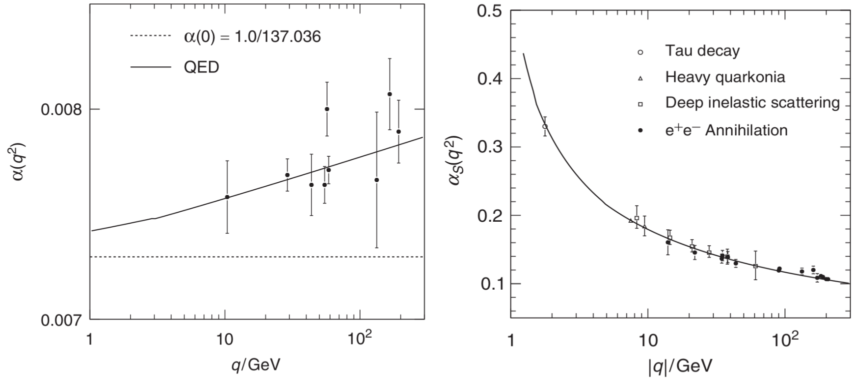
Frank Wilczek

Prize share: 1/3

The Nobel Prize in Physics 2004 was awarded jointly to David J. Gross, H. David Politzer and Frank Wilczek "for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction"

La renormalisation

"Constantes" de couplage pour les interactions électromagnétique et forte:



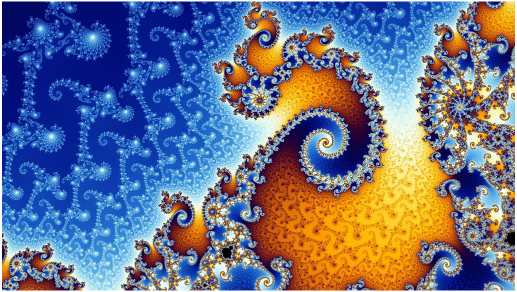
M. Thomson, Modern Particle Physics, CUP, 2013.

Plan

Conclusion

La renormalisation donne un sens quantitatif à la quête de la compréhension fondamentale de l'univers. L'ignorance peut nous renseigner.

- Pour l'électromagnétisme : divergence à une certaine énergie $\rightarrow$ nouvelle physique nécessaire !
- Pour l'interaction forte : la théorie est bien définie à toute énergie : $\rightarrow$ théorie fondamentale !
- On peut avoir des points d'arrêt non triviaux, les théories conformes



- Pour la gravité, le problème reste ouvert...