

Société Française de la Physique
Paris-Sud

16 décembre 2025

L'origine de la masse des particules : une révolution en cours

Gavin Salam
University of Oxford & All Souls College

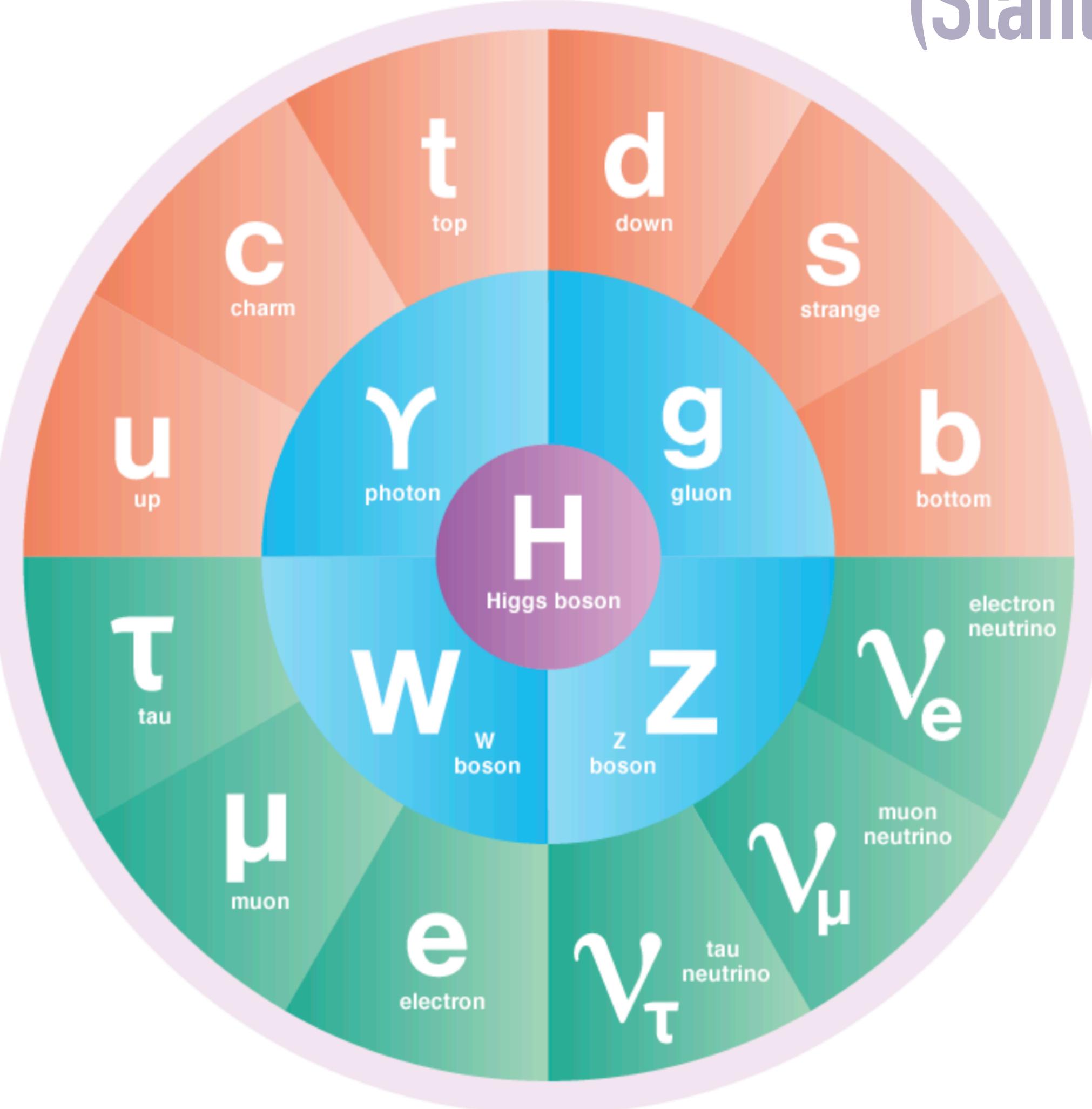


**Quelles sont les forces et composantes
fondamentales de l'univers ?**

**Pourquoi ont-elles les propriétés que
nous observons?**

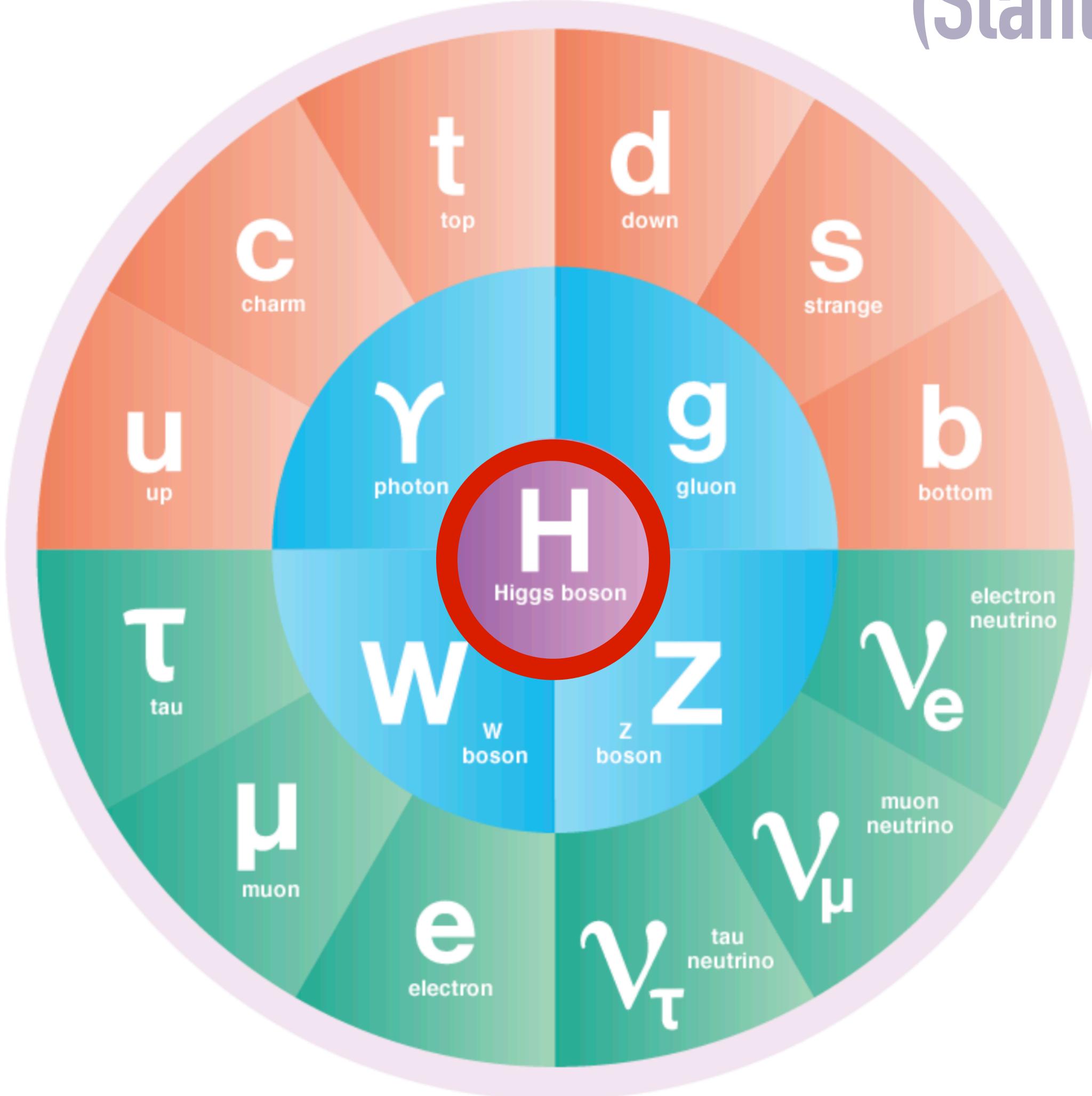
Le modèle standard (Standard Model = SM)

<https://www.symmetrymagazine.org/standard-model/>



particules

Le modèle standard (Standard Model = SM)

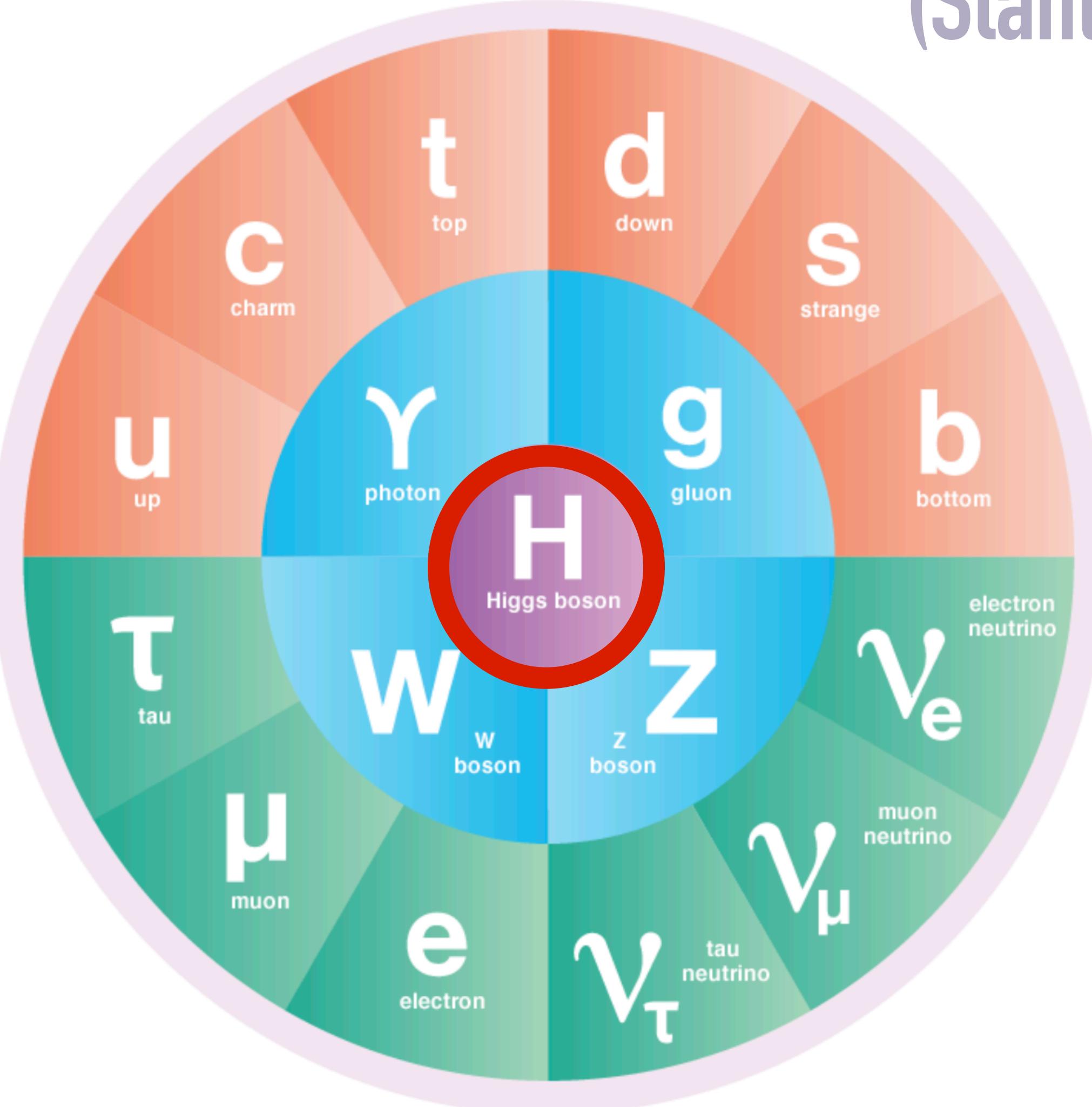


particules

**“le modèle standard
est complet”**

Le modèle standard (Standard Model = SM)

<https://www.symmetrymagazine.org/standard-model/>



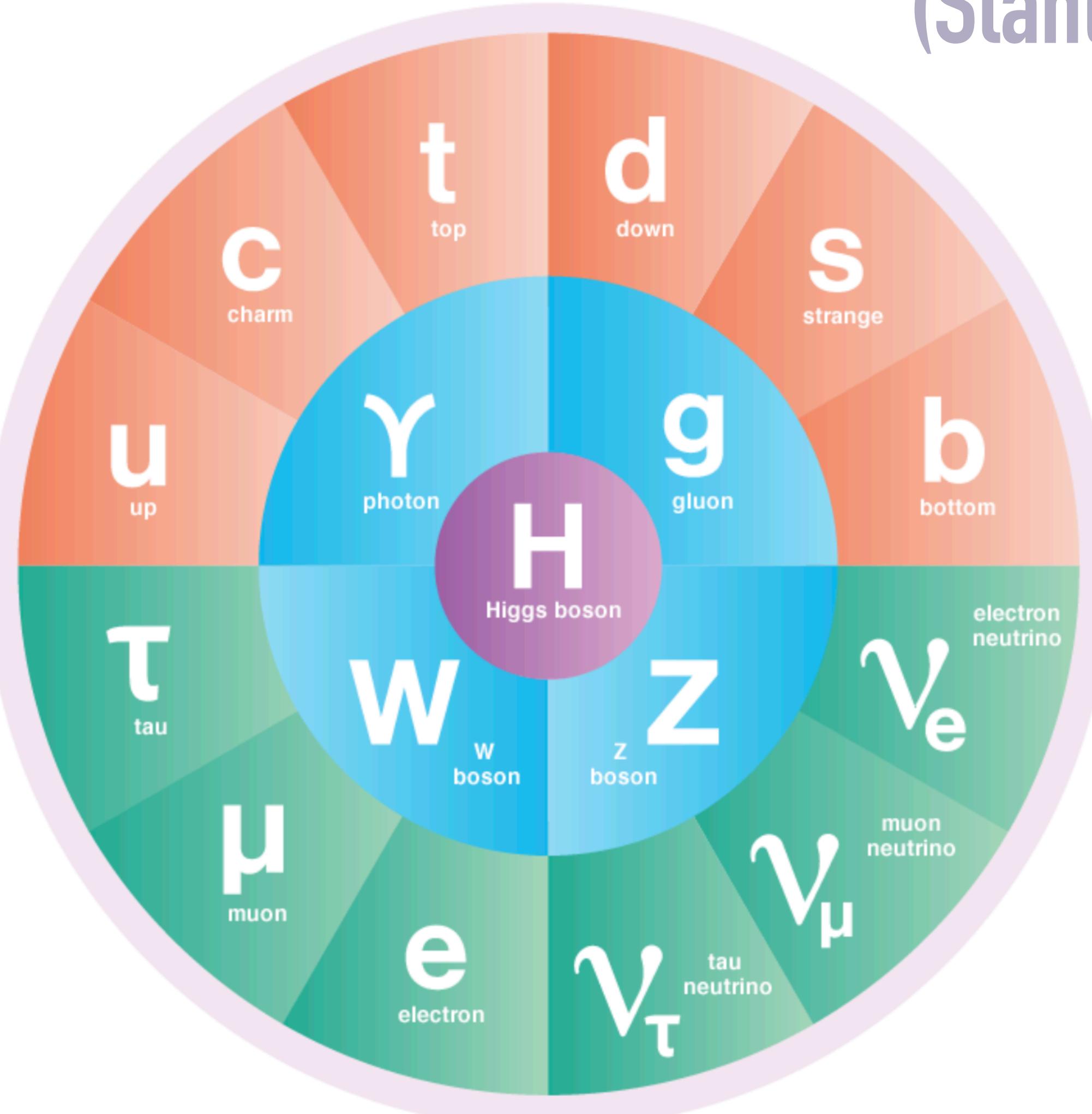
particules

**“le modèle standard
est complet”**

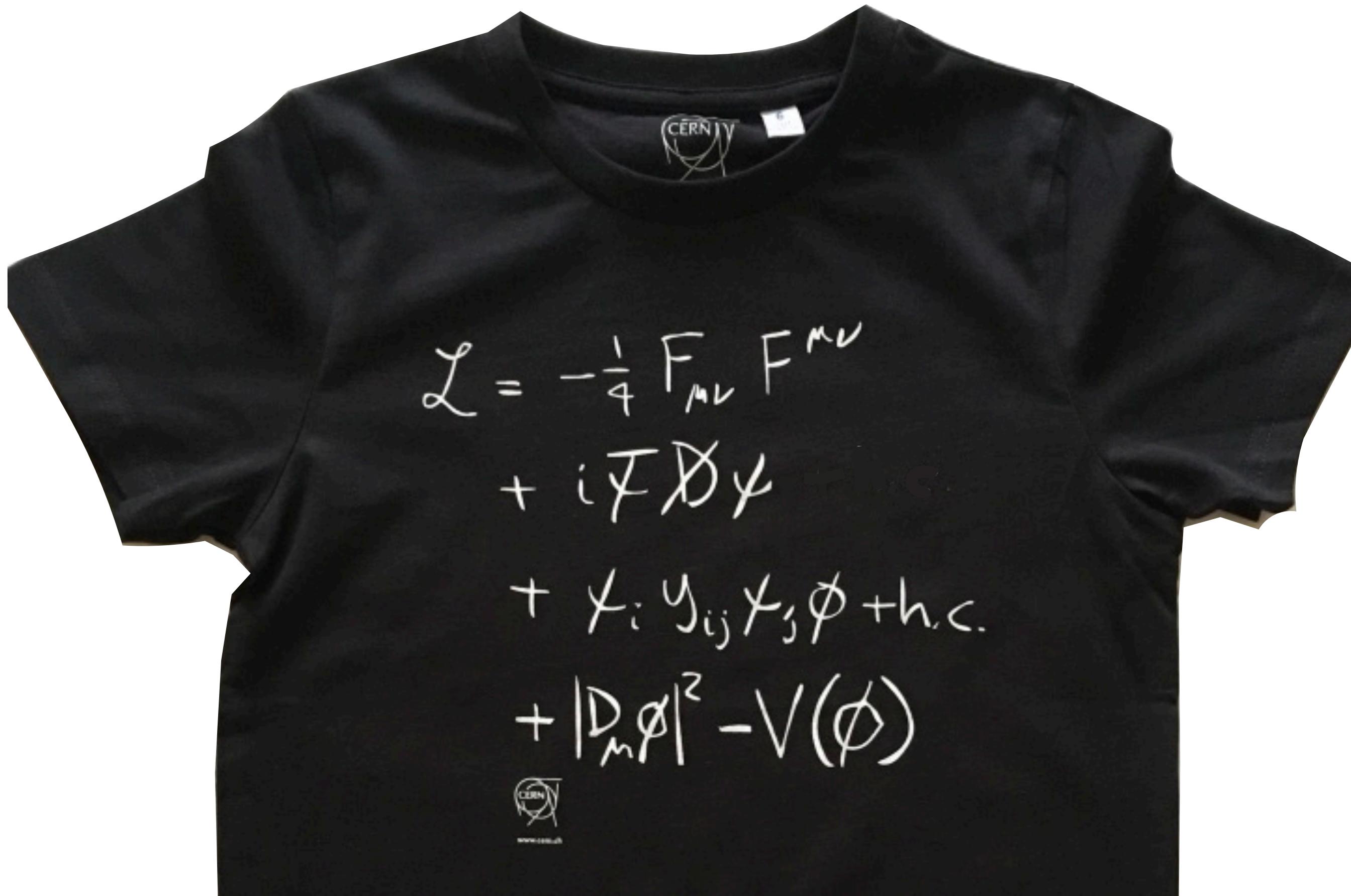


Le modèle standard (Standard Model = SM)

<https://www.symmetrymagazine.org/standard-model/>



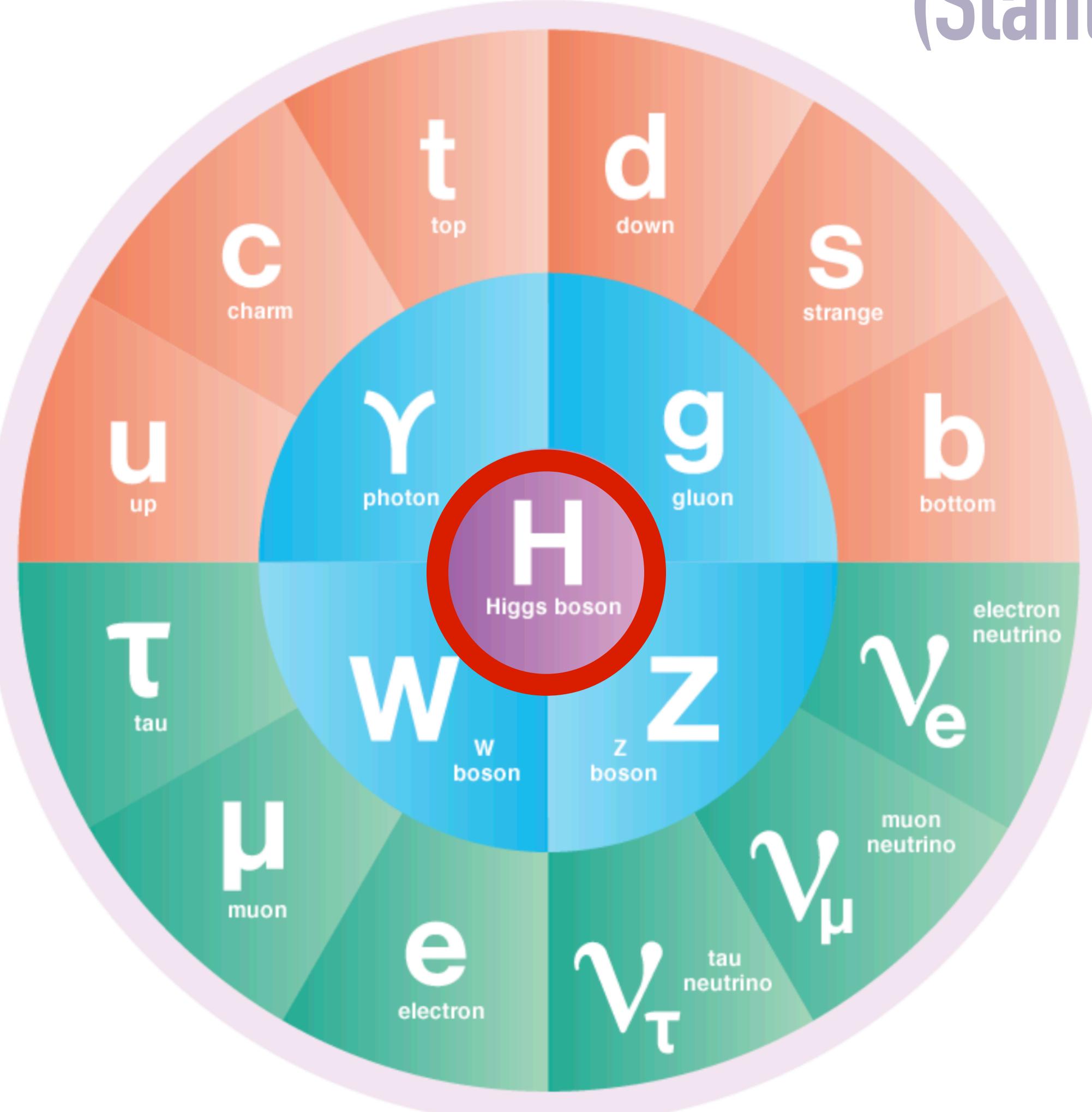
particules



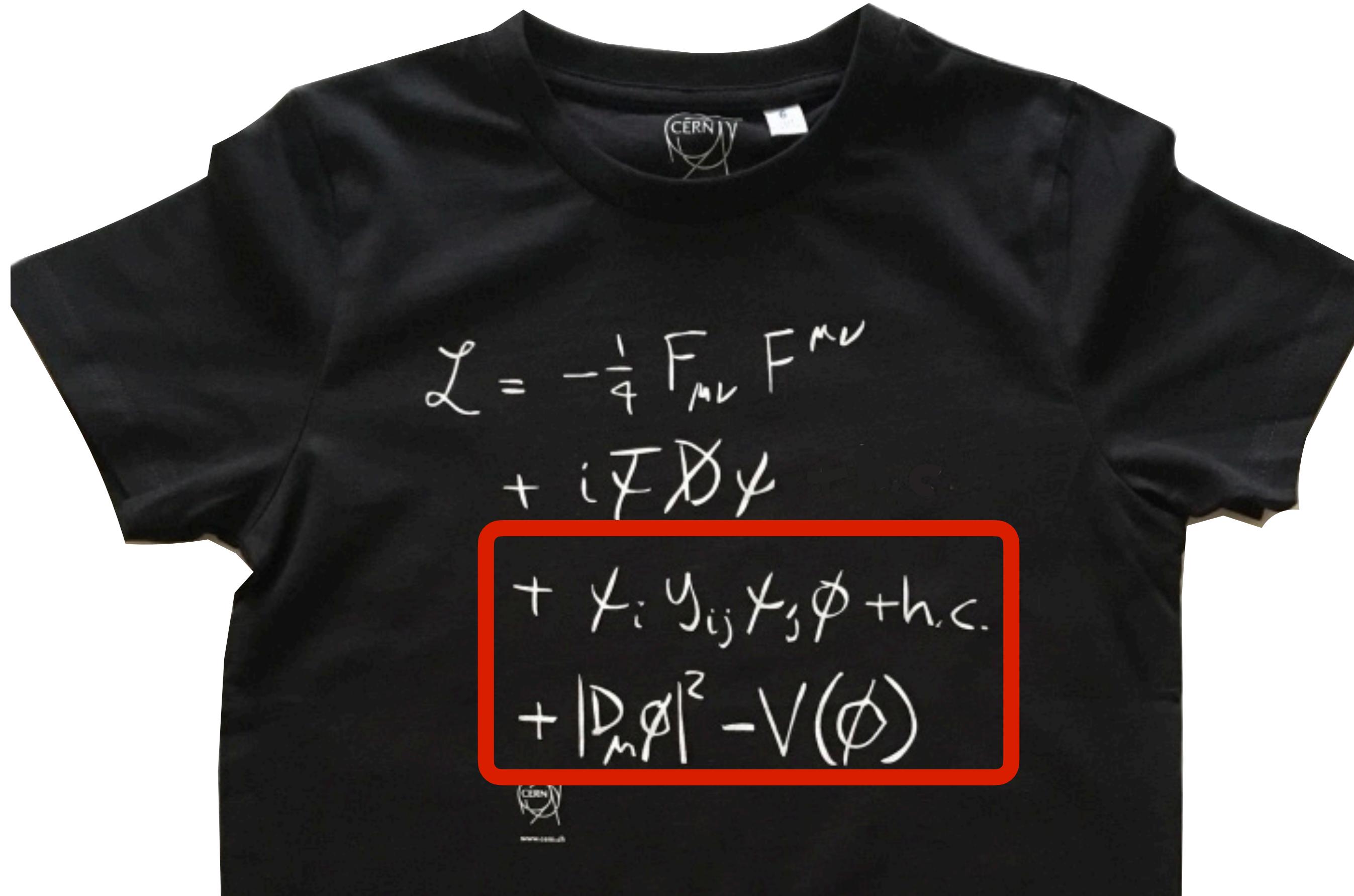
interactions

Le modèle standard (Standard Model = SM)

<https://www.symmetrymagazine.org/standard-model/>



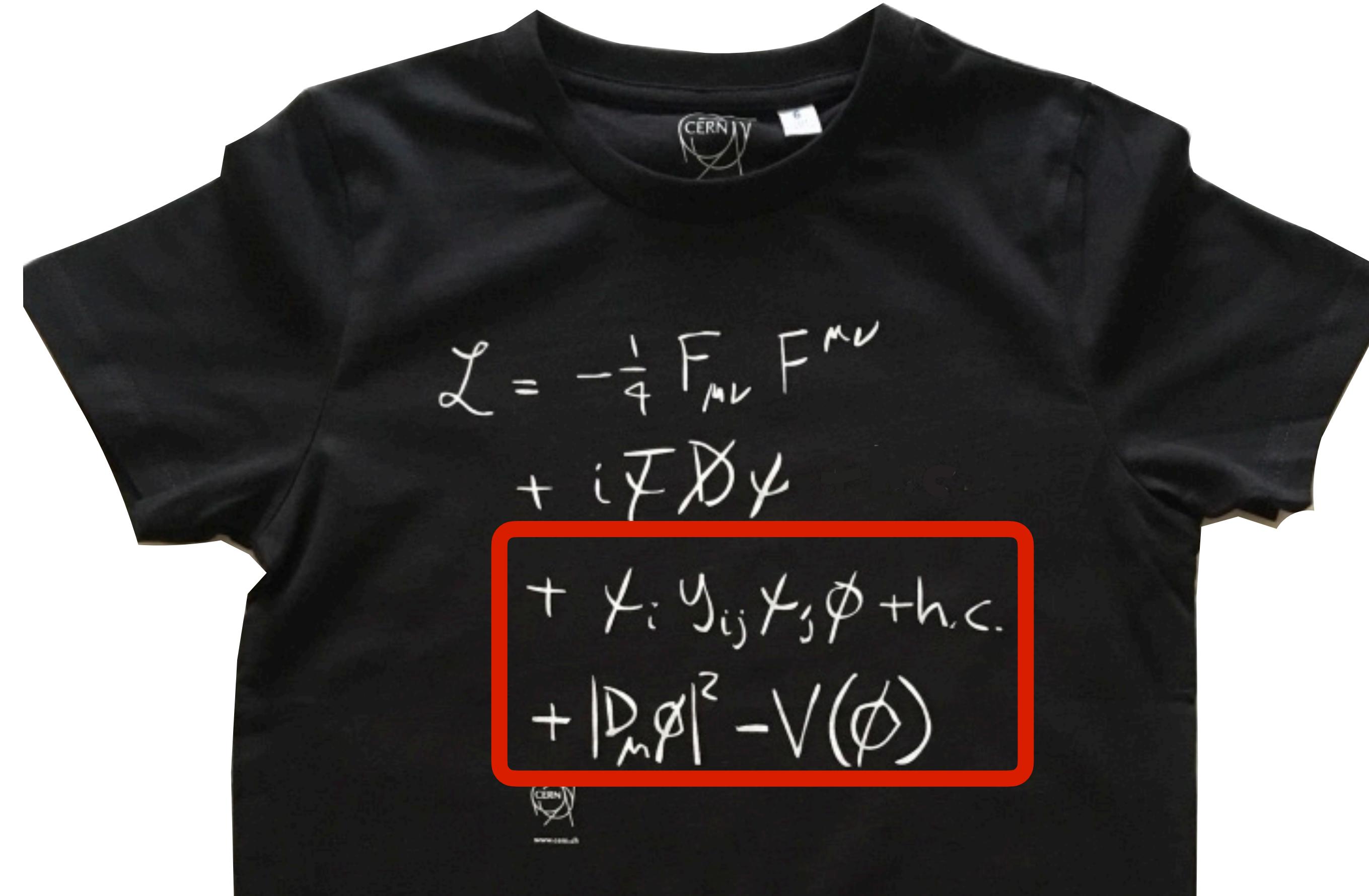
particules



interactions

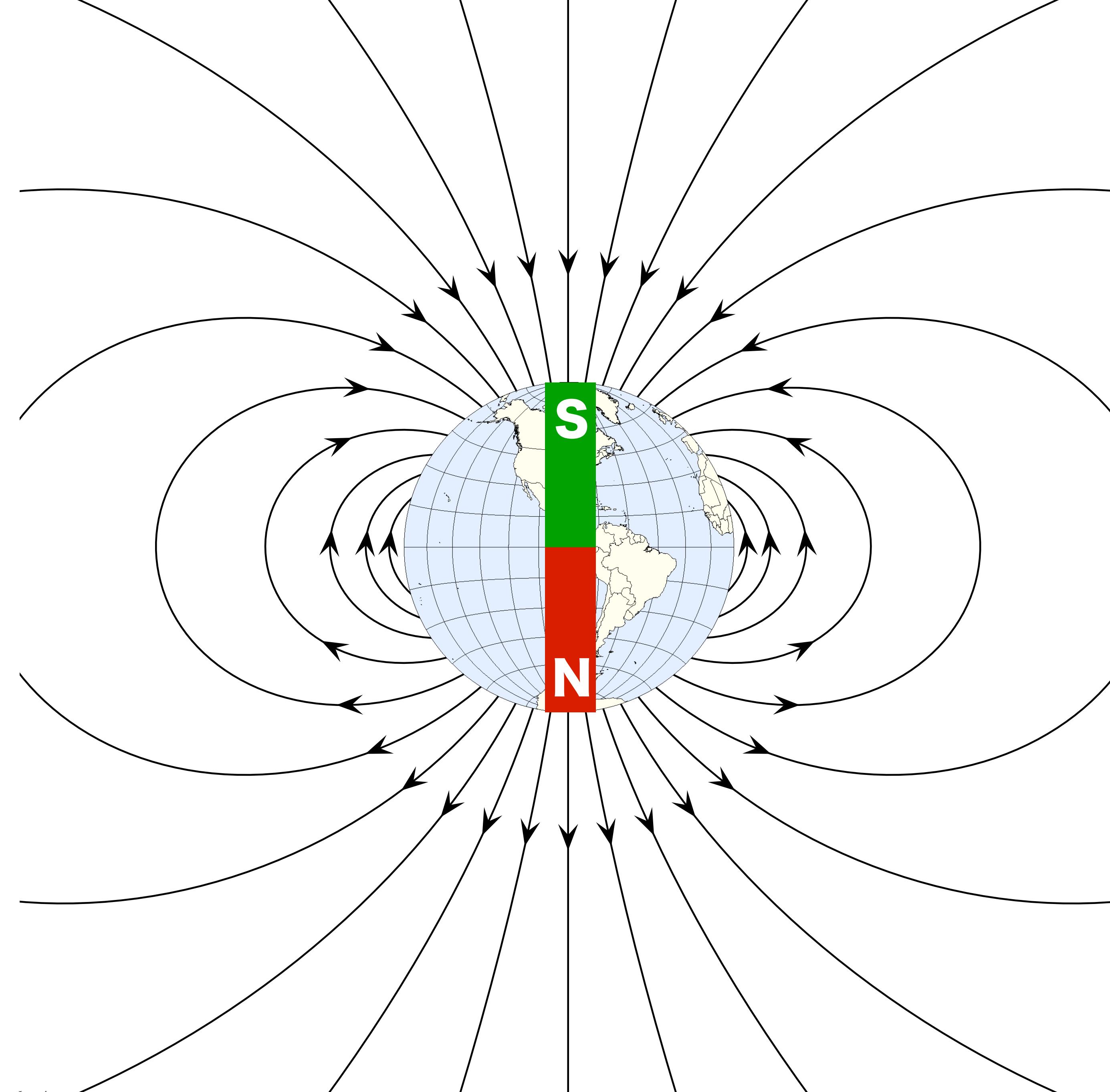
Le modèle standard (Standard Model = SM)

**l'exploration des interactions
du secteur Higgs du modèle
standard ne fait que
commencer**

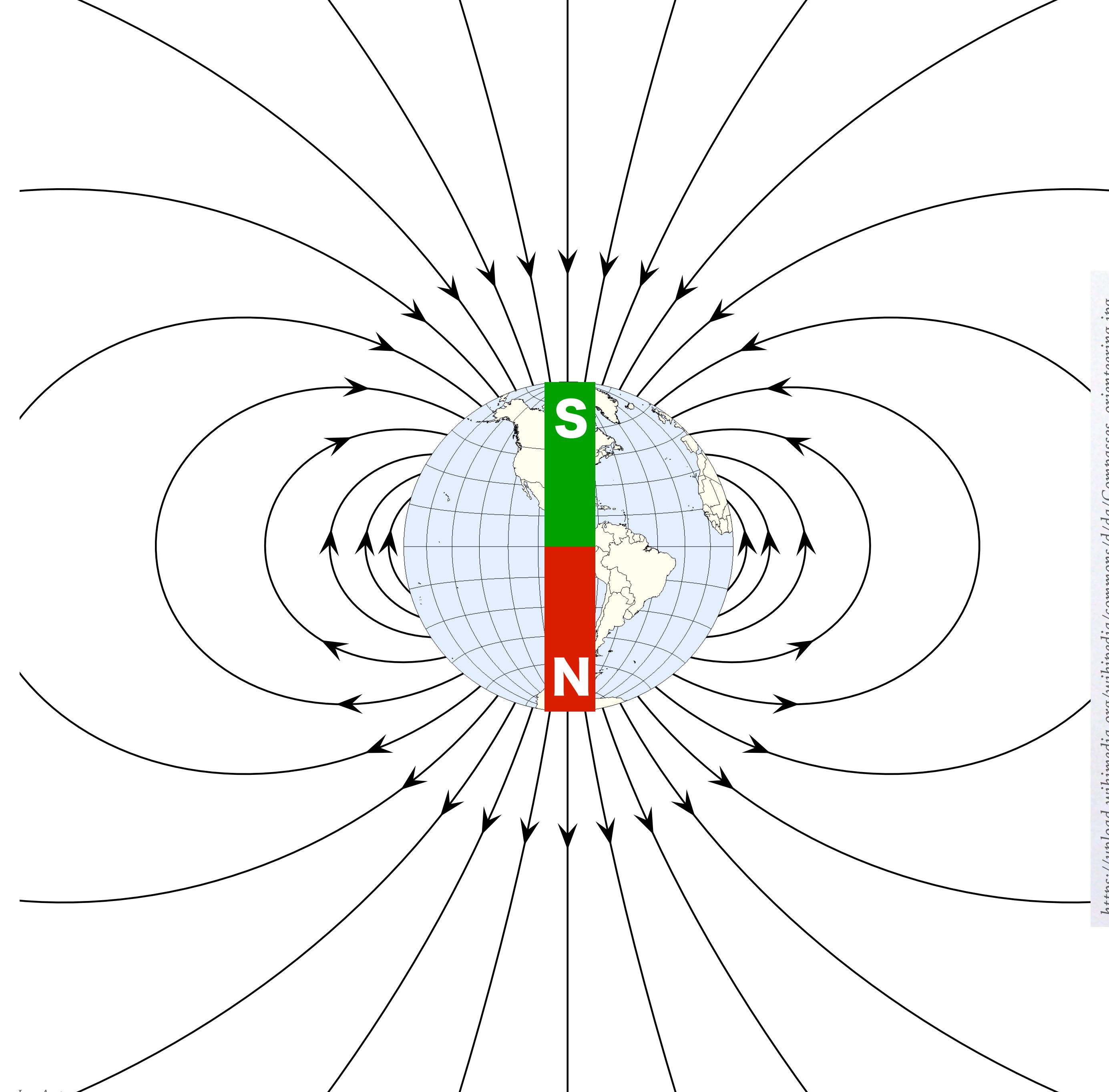


interactions

La physique du Higgs



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFPt_Dipole_field.svg
https://en.wikipedia.org/wiki/Western_Hemisphere#/media/File:Western_Hemisphere_LamAz.png



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFPt_Dipole_field.svg

https://en.wikipedia.org/wiki/Western_Hemisphere#/media/File:Western_Hemisphere_LamAz.png



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/da/Compasses_orienteering.jpg



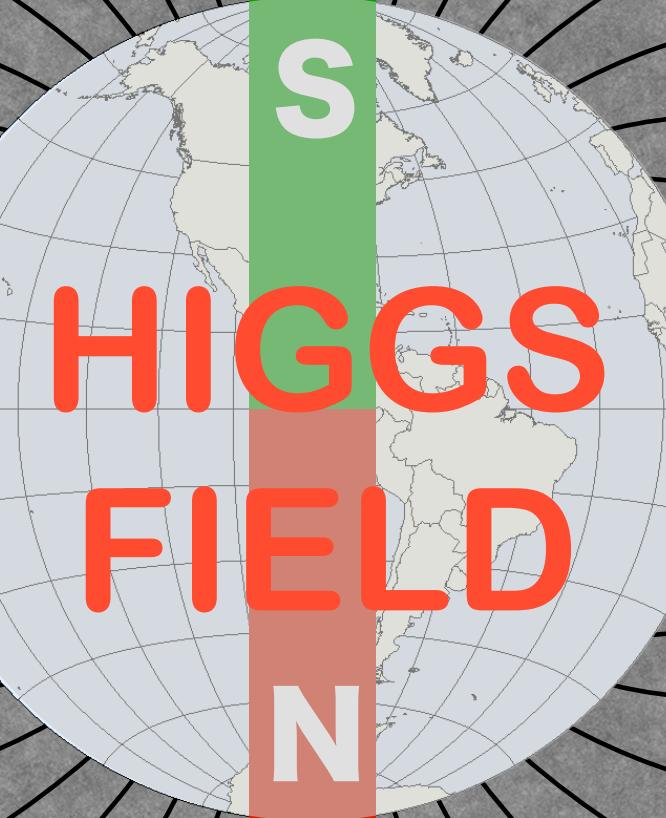
HIGGS
FIELD

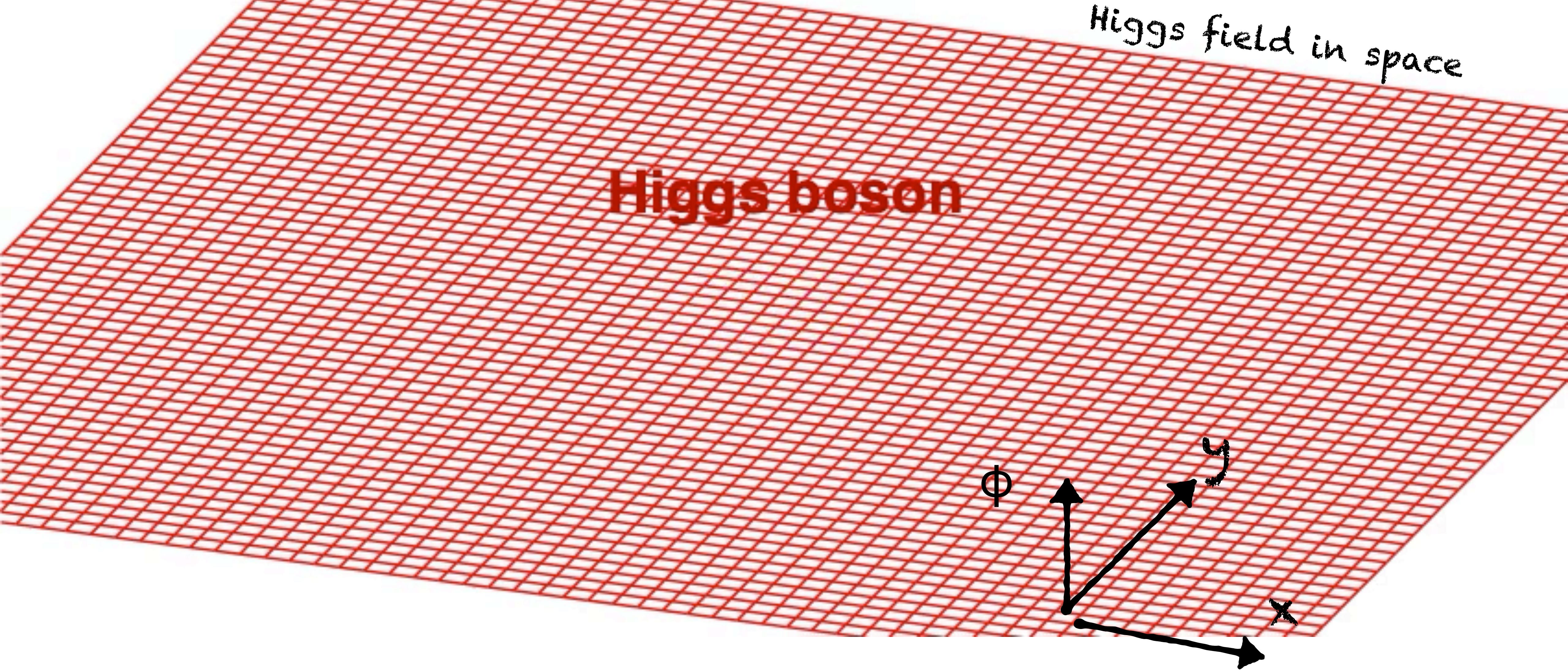
HIGGS
FIELD

HIGGS
FIELD

HIGGS
FIELD

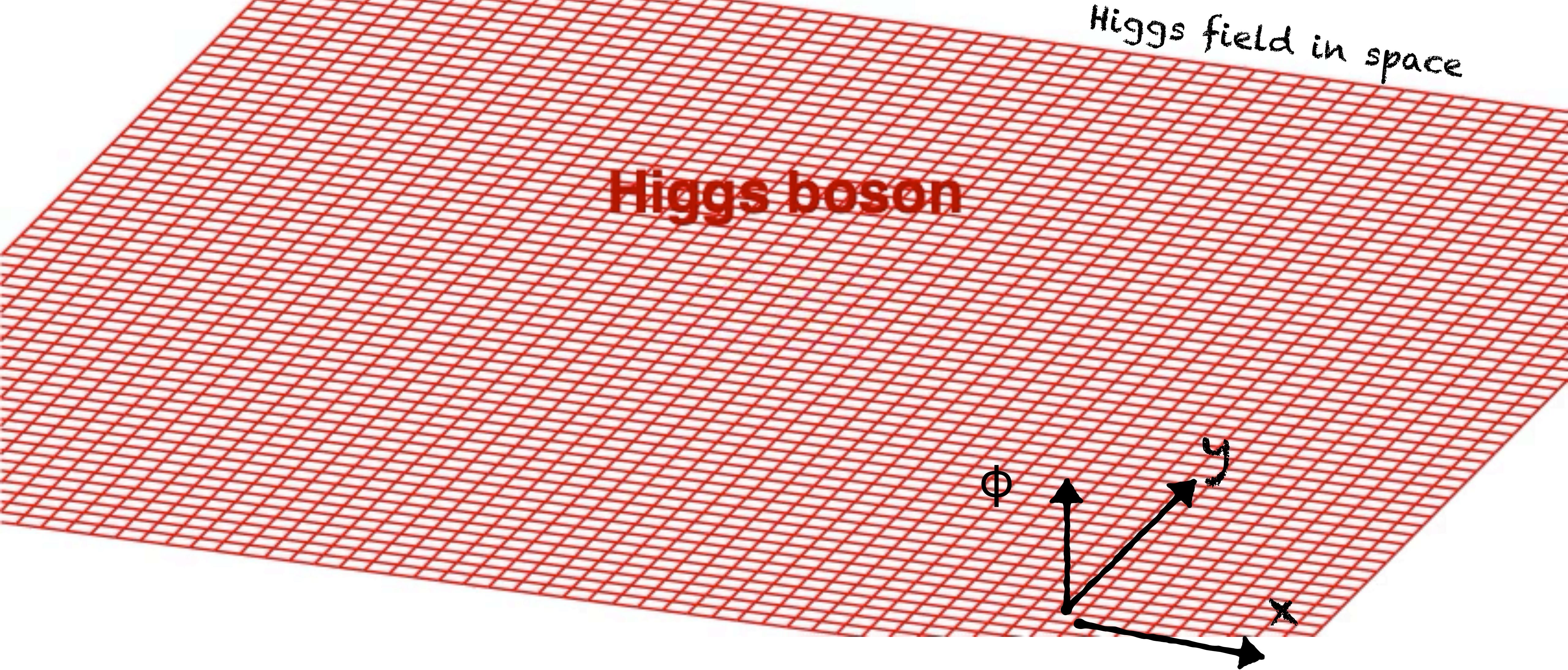
HIGGS
FIELD





Le champ de Higgs (ϕ) peut prendre une valeur différente à chaque endroit.

Le boson de Higgs correspond à fluctuation localisée du champ



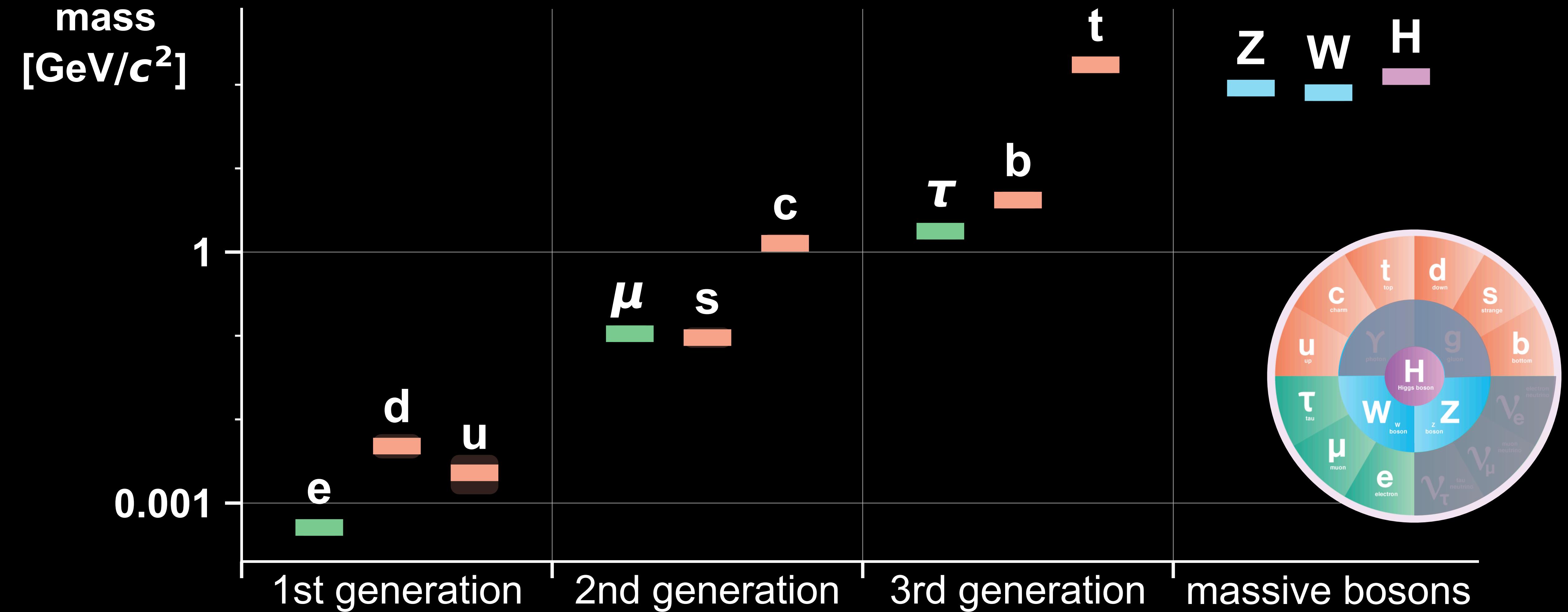
Le champ de Higgs (ϕ) peut prendre une valeur différente à chaque endroit.

Le boson de Higgs correspond à fluctuation localisée du champ

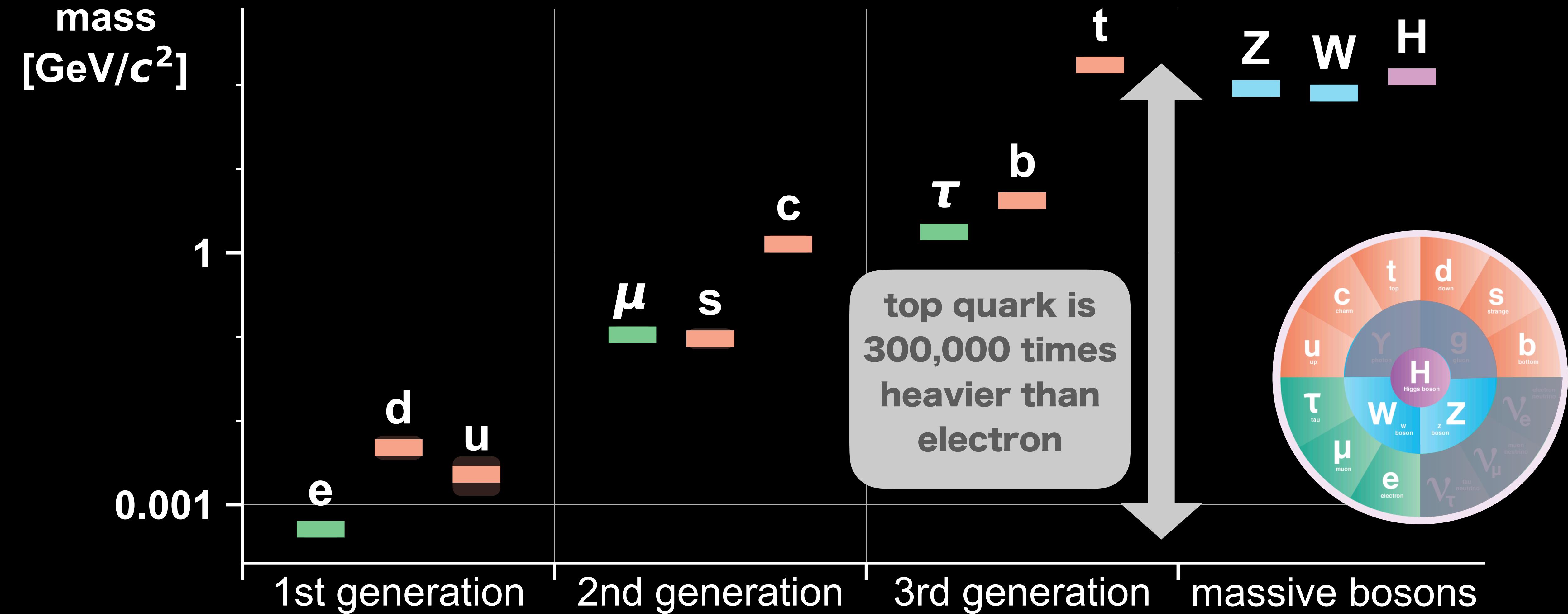
une hypothèse au cœur du
modèle standard

les particules fondamentales
obtiennent leur masse grâce à leur
interaction avec le champ de Higgs

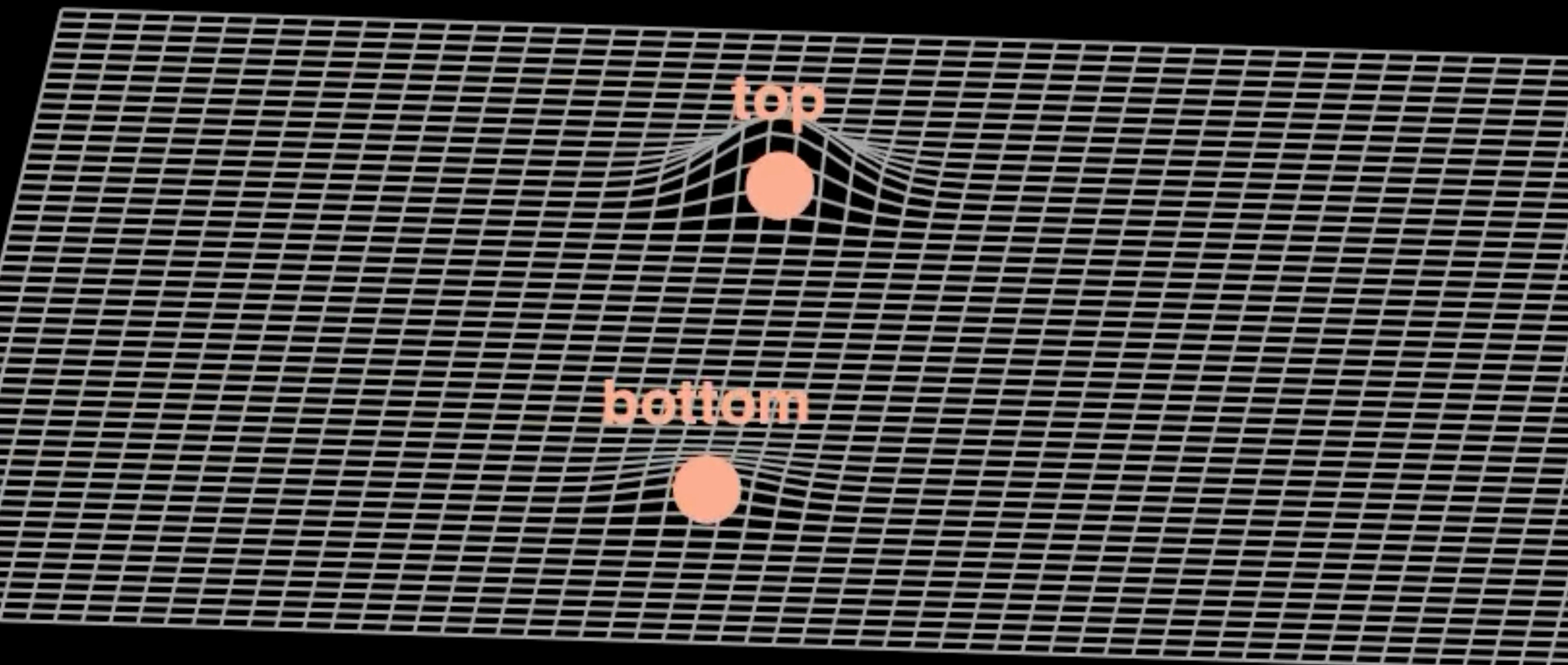
Standard Model massive particles (except ν)



Standard Model massive particles (except ν)

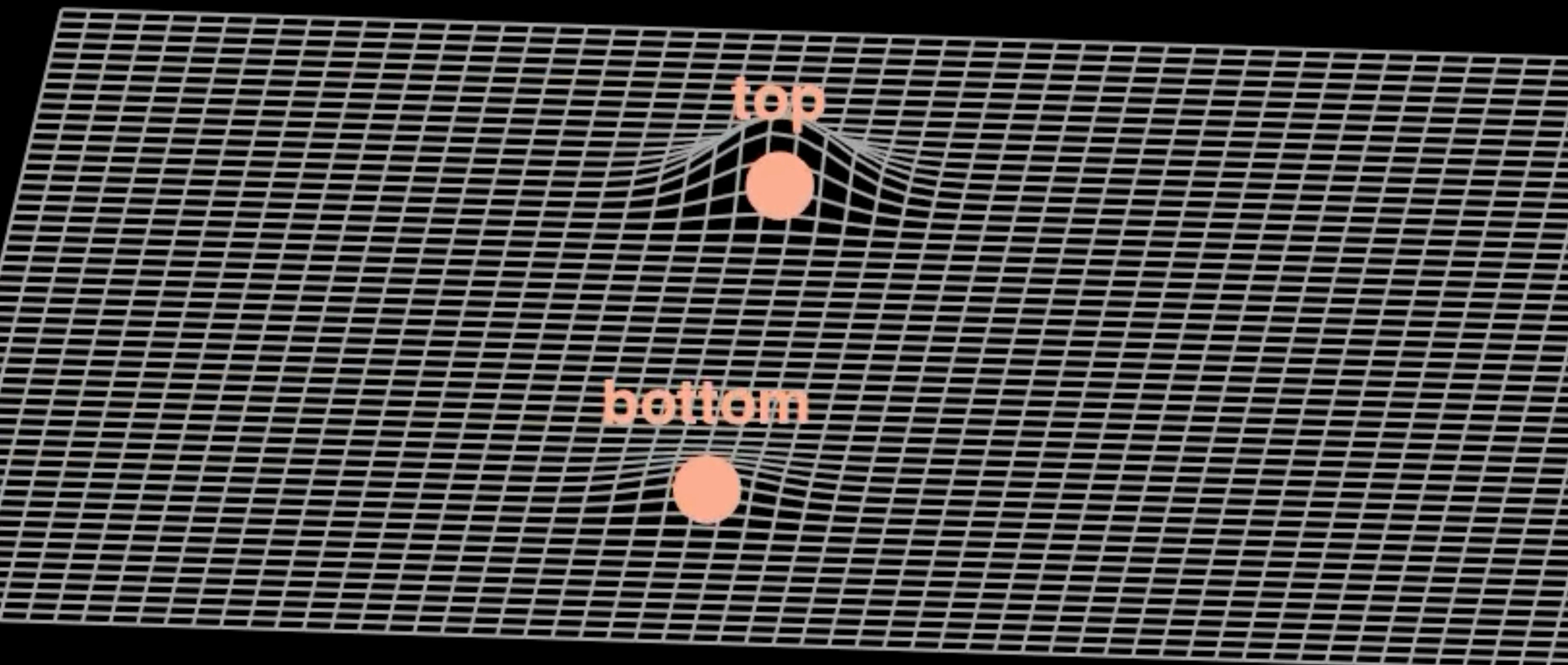


champ de Higgs



Modèle standard: la masse plus élevée du top vient d'une interaction plus forte avec le champ de Higgs

champ de Higgs



Modèle standard: la masse plus élevée du top vient d'une interaction plus forte avec le champ de Higgs

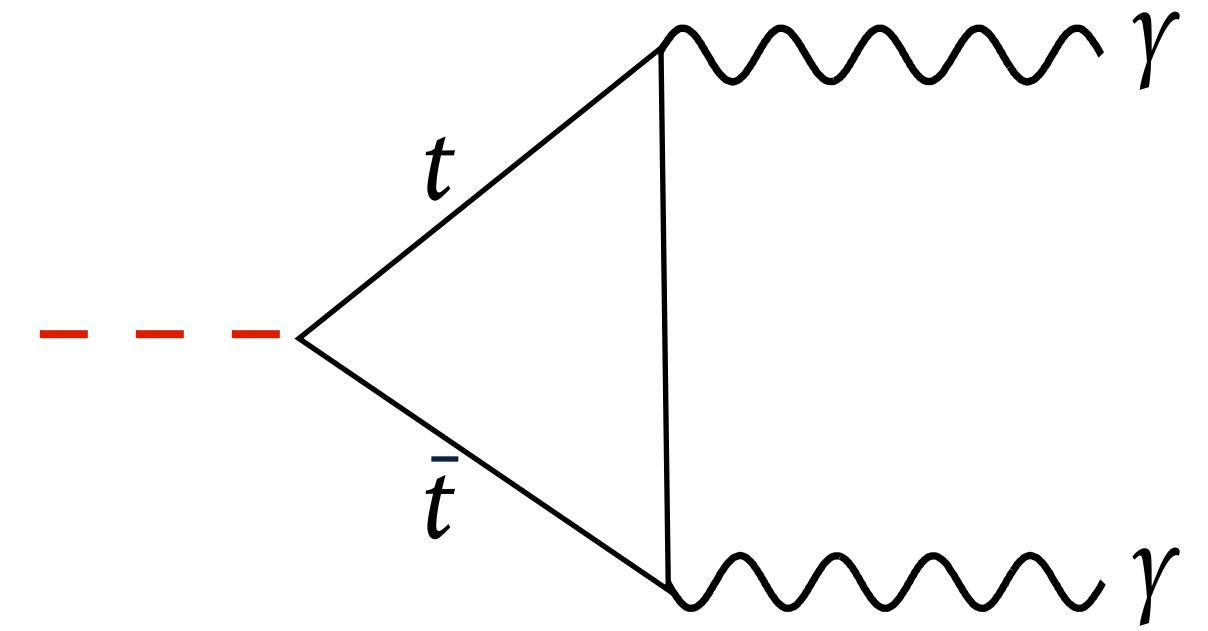
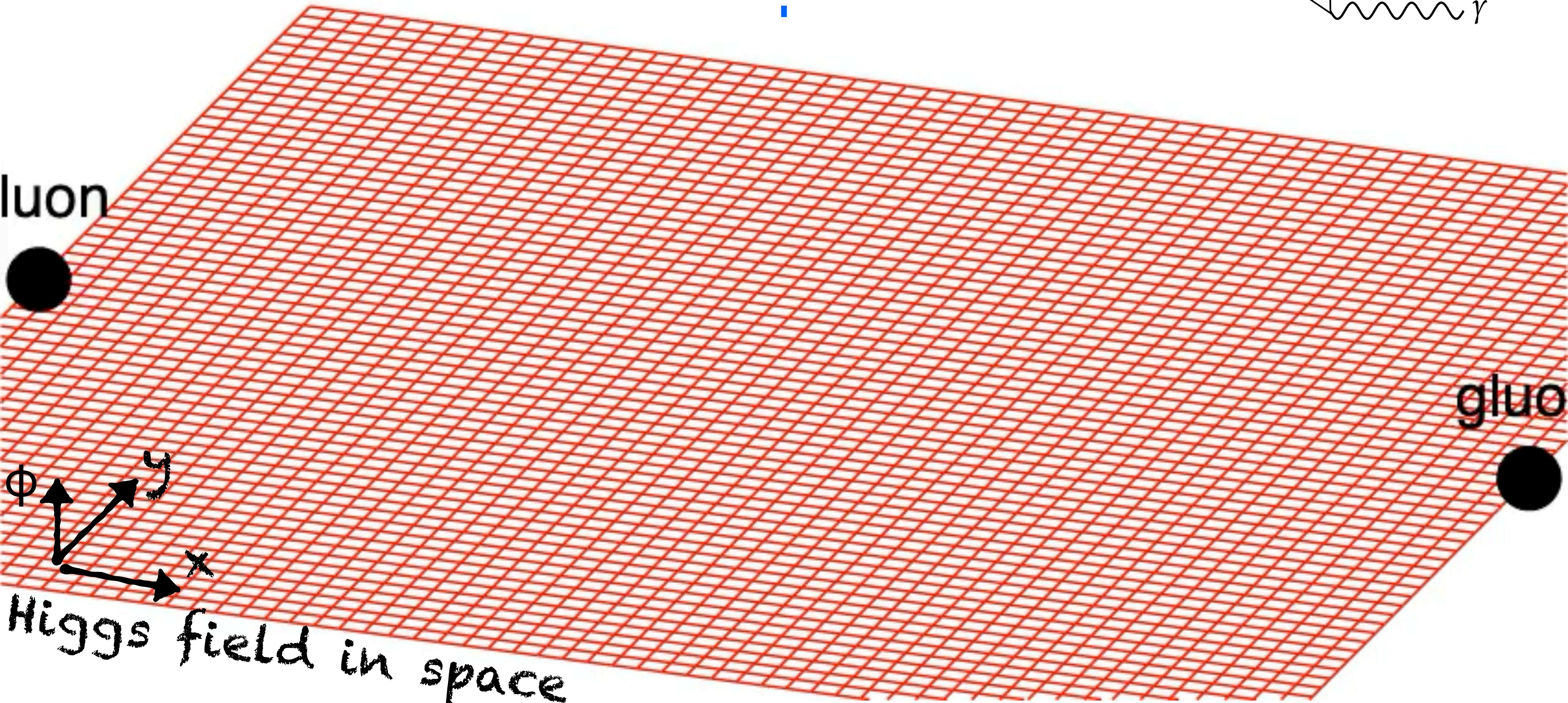
champ de Higgs

cette hypothèse, est-elle réalisée dans la nature ?

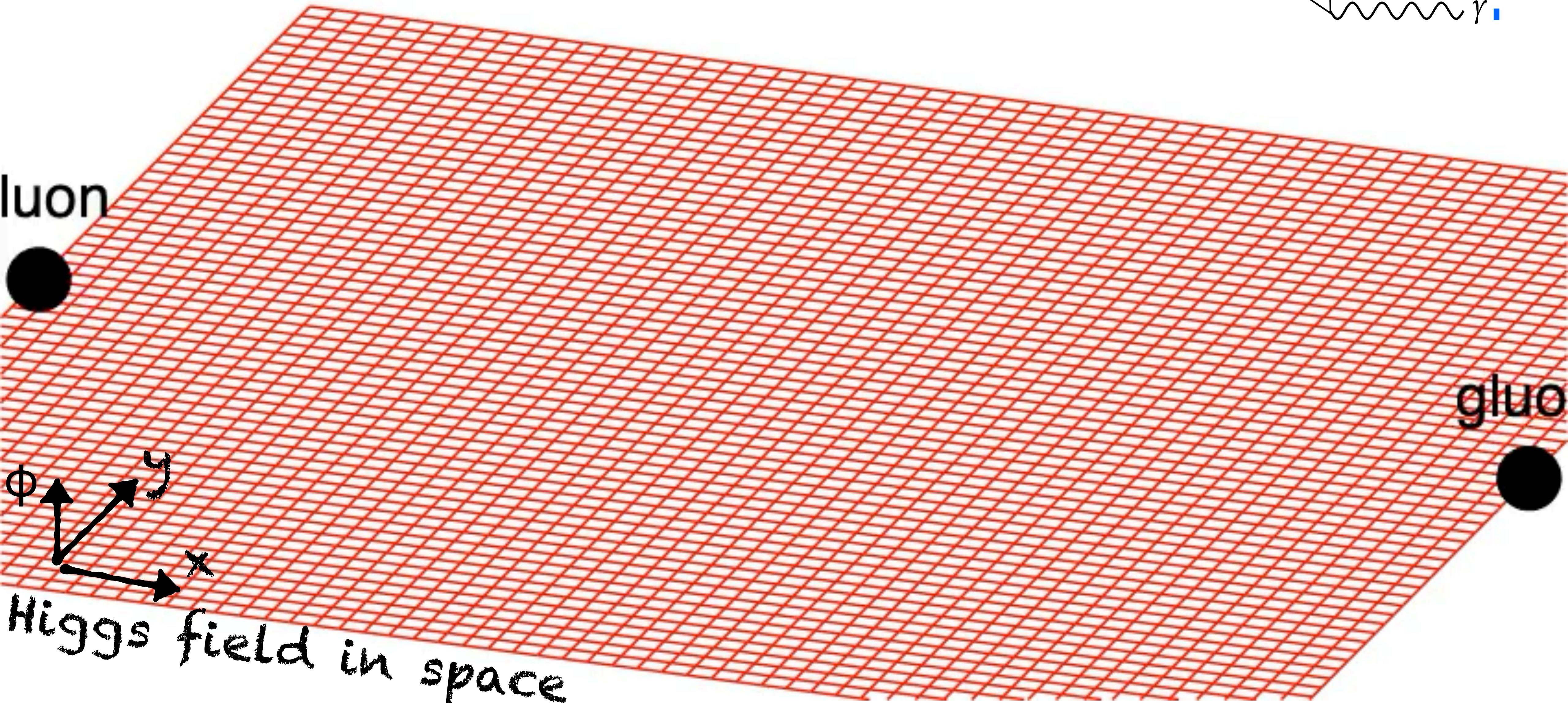


Modèle standard: la masse plus élevée du top vient d'une interaction plus forte avec le champ de Higgs

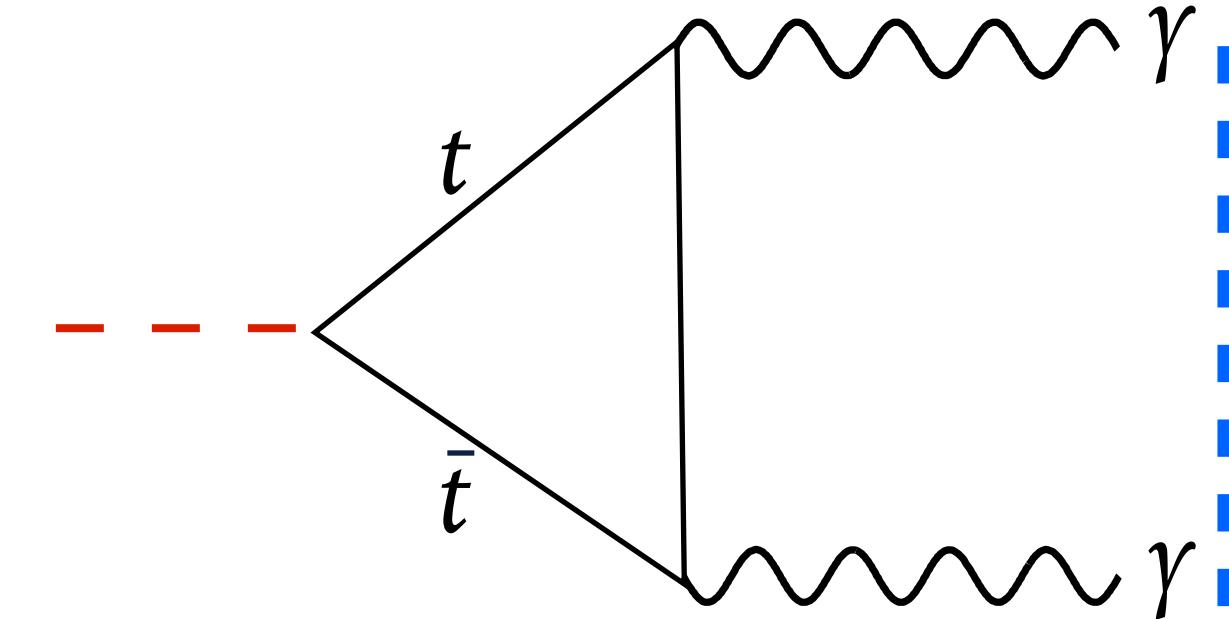
Une collision au LHC comme celles ayant révélé le boson de Higgs



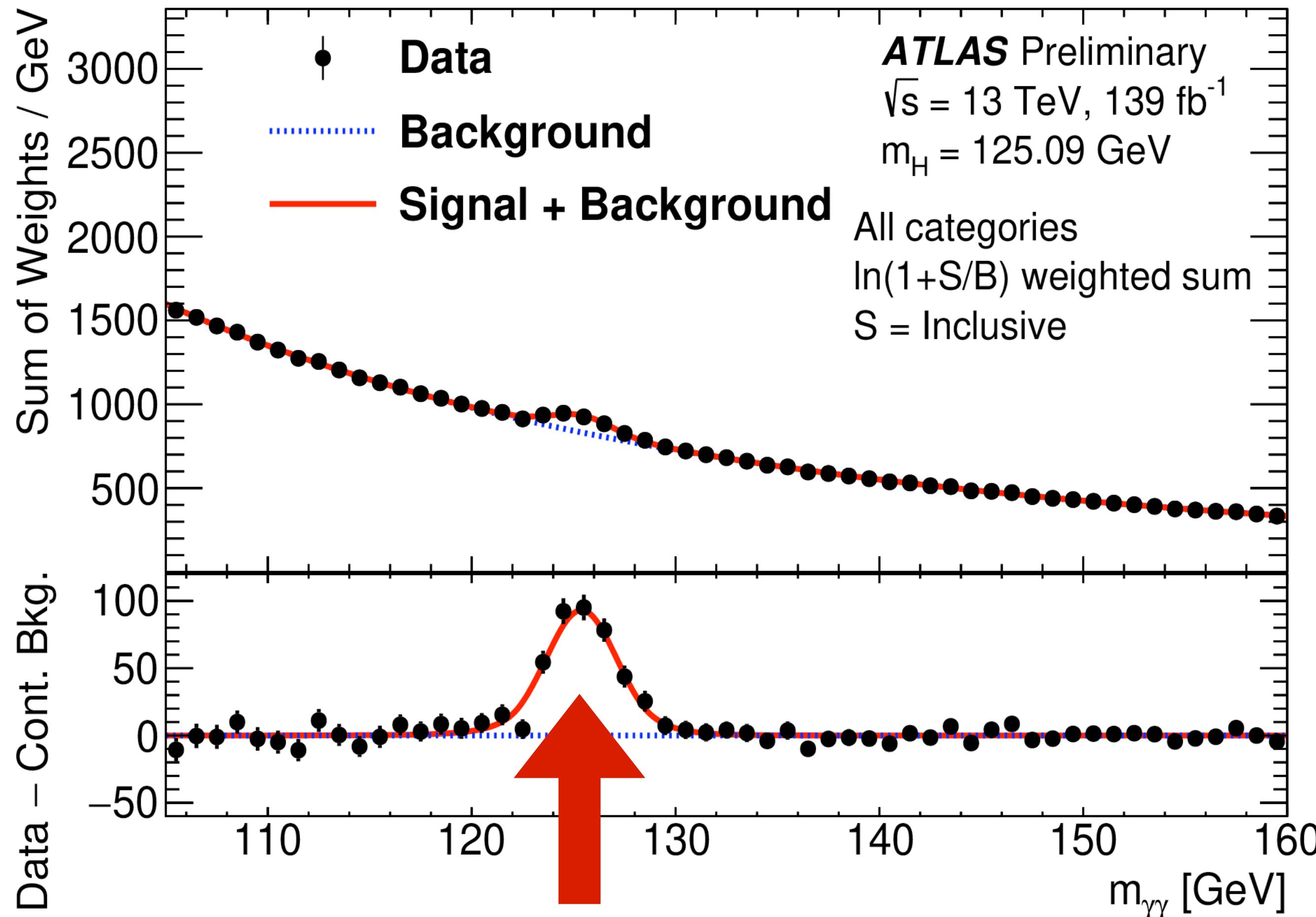
Une collision au LHC comme celles ayant révélé le boson de Higgs



t
 \bar{t}

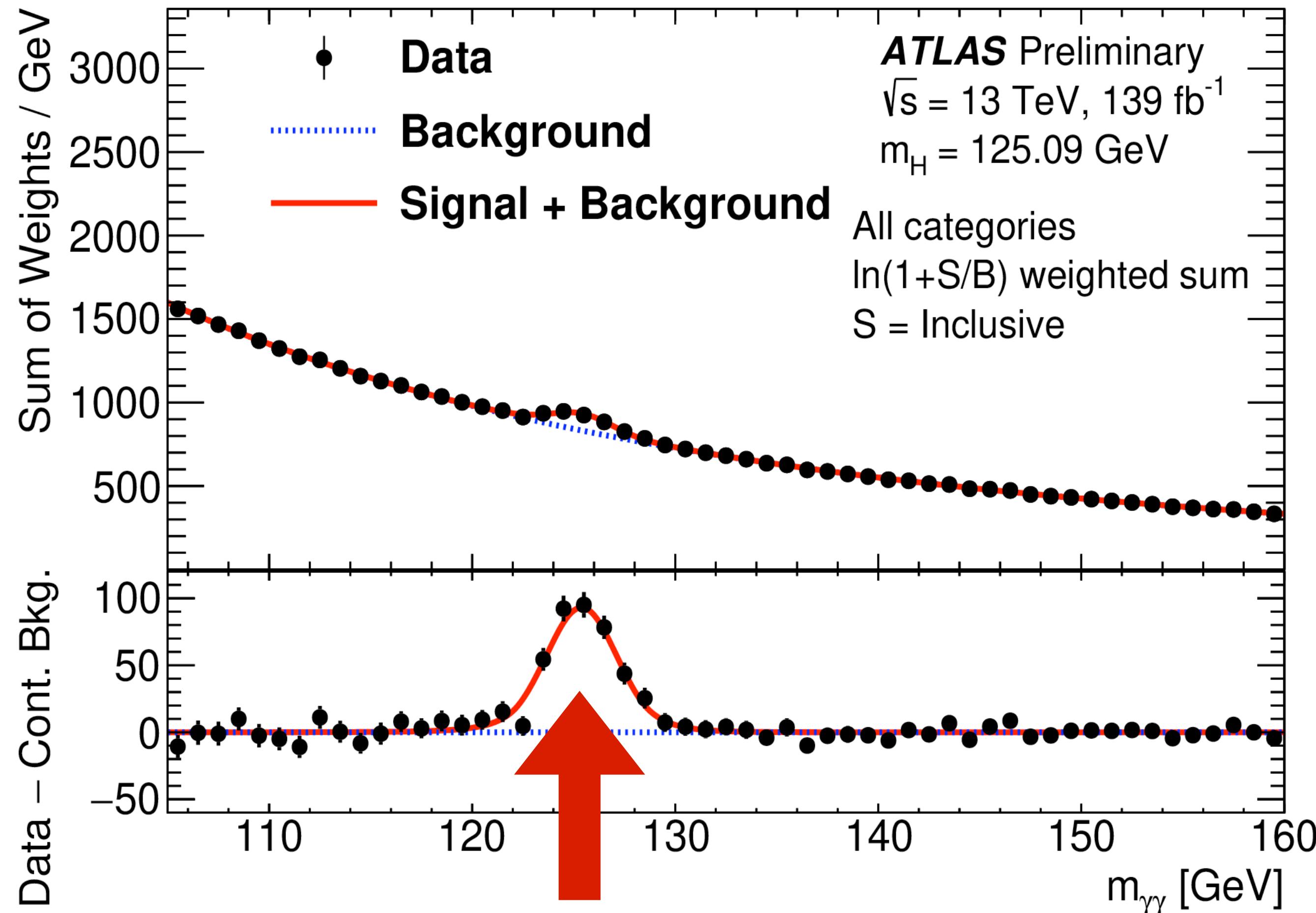


- Enregistrer les collisions avec deux photons ;
- Les classifier selon la somme des énergies des deux photons (γ)

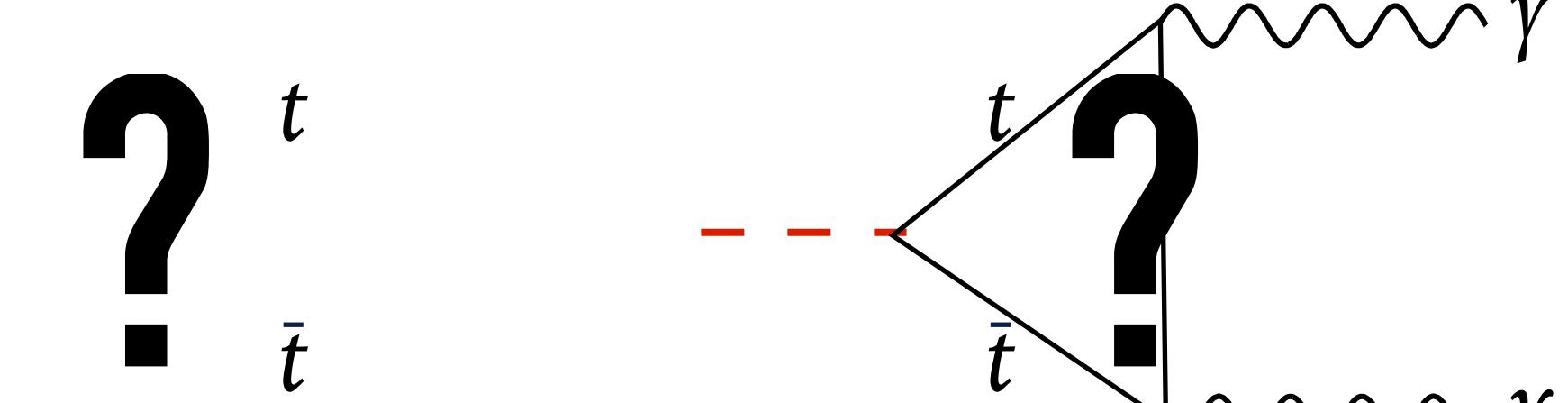


surplus de collisions avec une
énergie spécifique
= boson de Higgs

- Enregistrer les collisions avec deux photons ;
- Les classifier selon la somme des énergies des deux photons (γ)

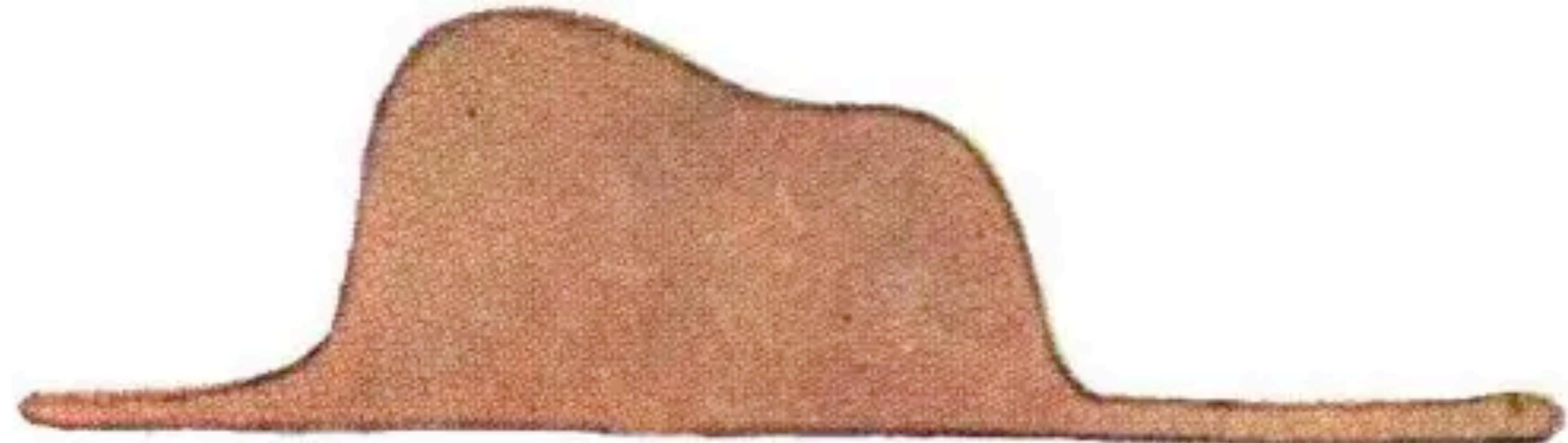


surplus de collisions avec une
énergie spécifique
= boson de Higgs



niveau du surplus compatible avec le MS au niveau de ~10% mais comment s'assurer que ce sont bien des quarks top dans les étapes intermédiaires ?

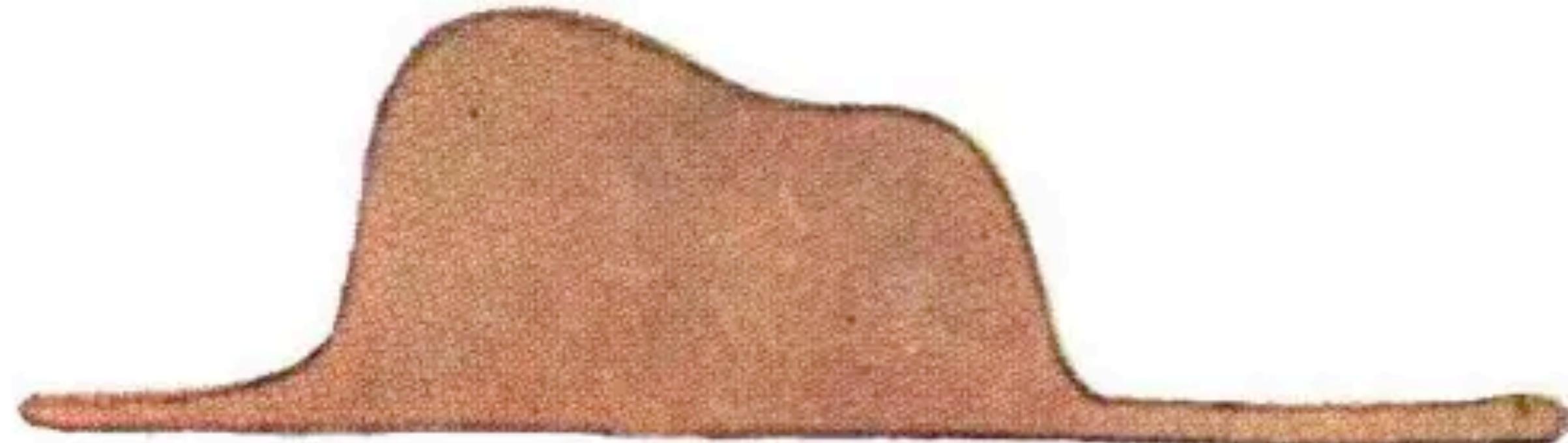
Mon dessin numéro 1



« Pourquoi un chapeau ferait-il peur ? »

Le Petit Prince, Antoine de Saint-Exupéry

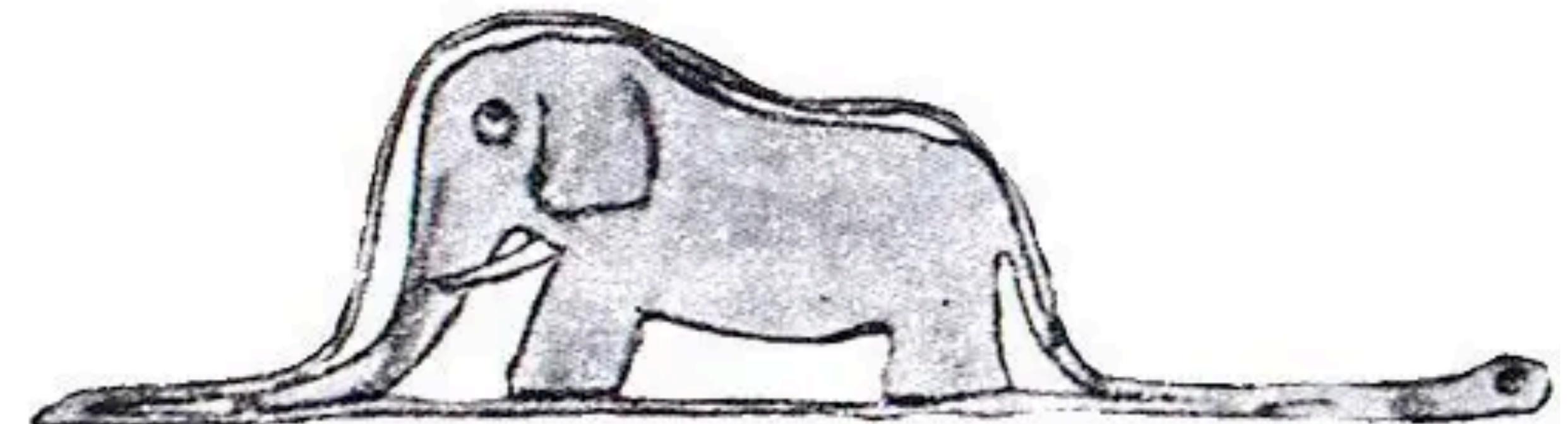
Mon dessin numéro 1



« Pourquoi un chapeau ferait-il peur ? »

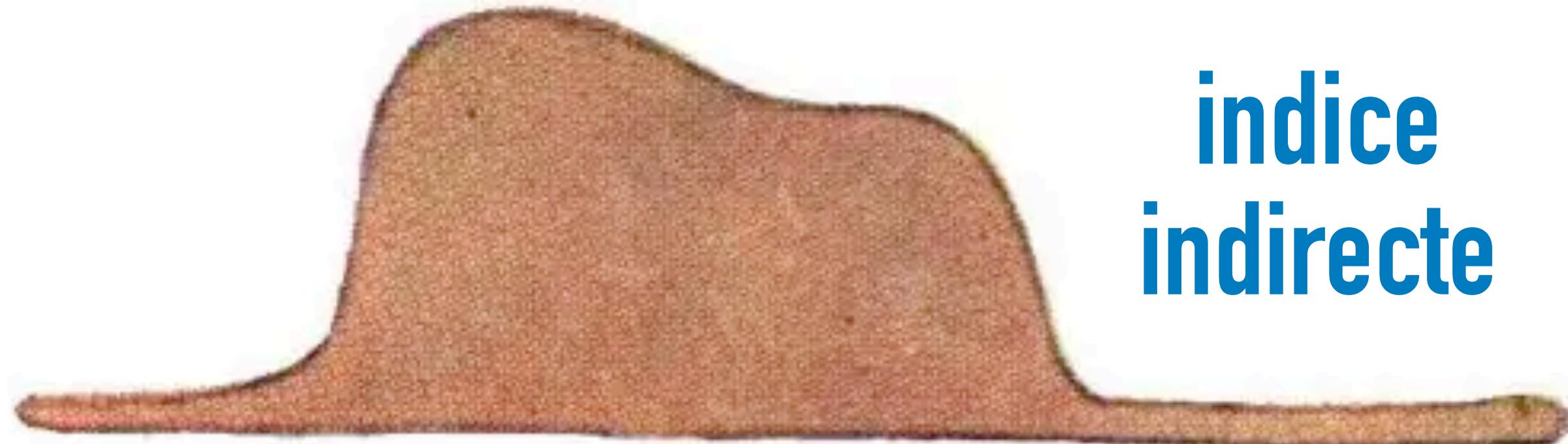
Le Petit Prince, Antoine de Saint-Exupéry

« Mon dessin ne représentait pas un chapeau. Il représentait un serpent boa qui digérait un éléphant. »



Mon dessin numéro 2

Mon dessin numéro 1

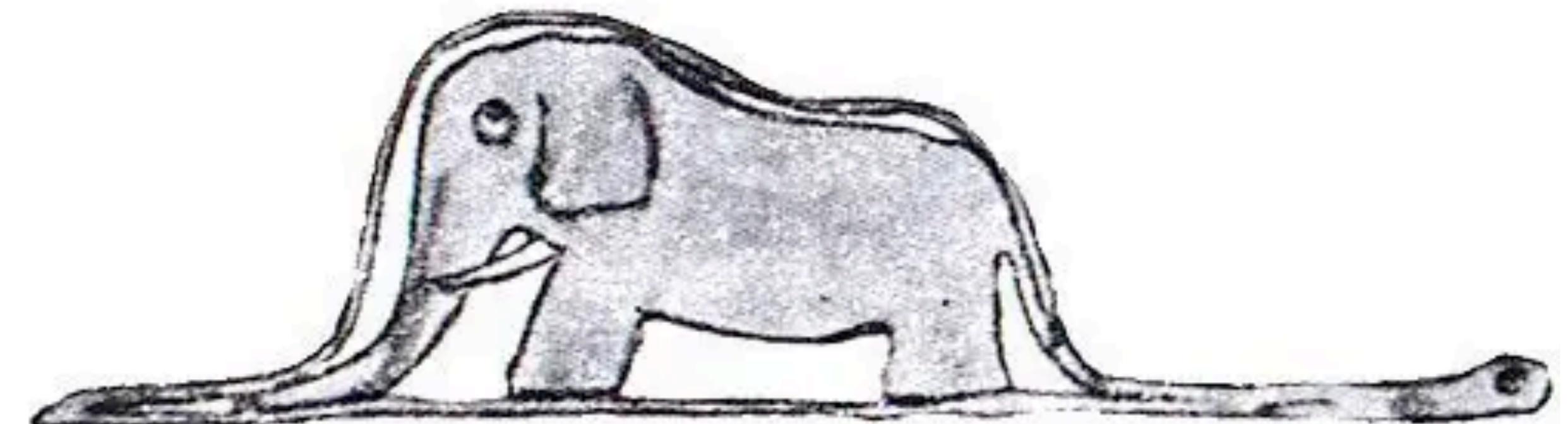


indice
indirecte

« Pourquoi un chapeau ferait-il peur ? »

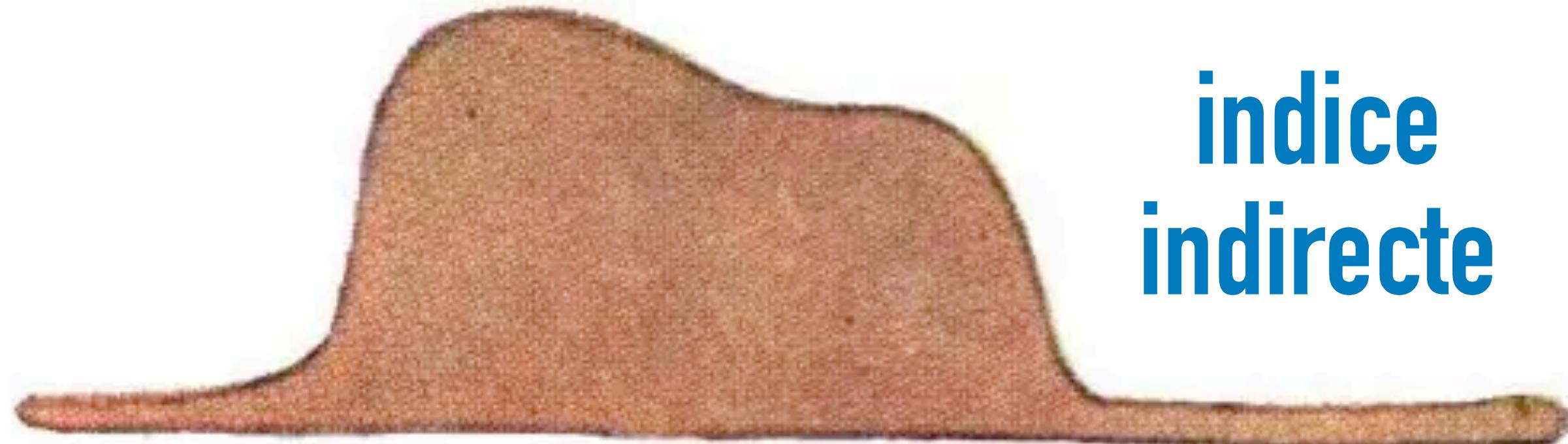
Le Petit Prince, Antoine de Saint-Exupéry

« Mon dessin ne représentait pas un chapeau. Il représentait un serpent boa qui digérait un éléphant. »



Mon dessin numéro 2

Mon dessin numéro 1

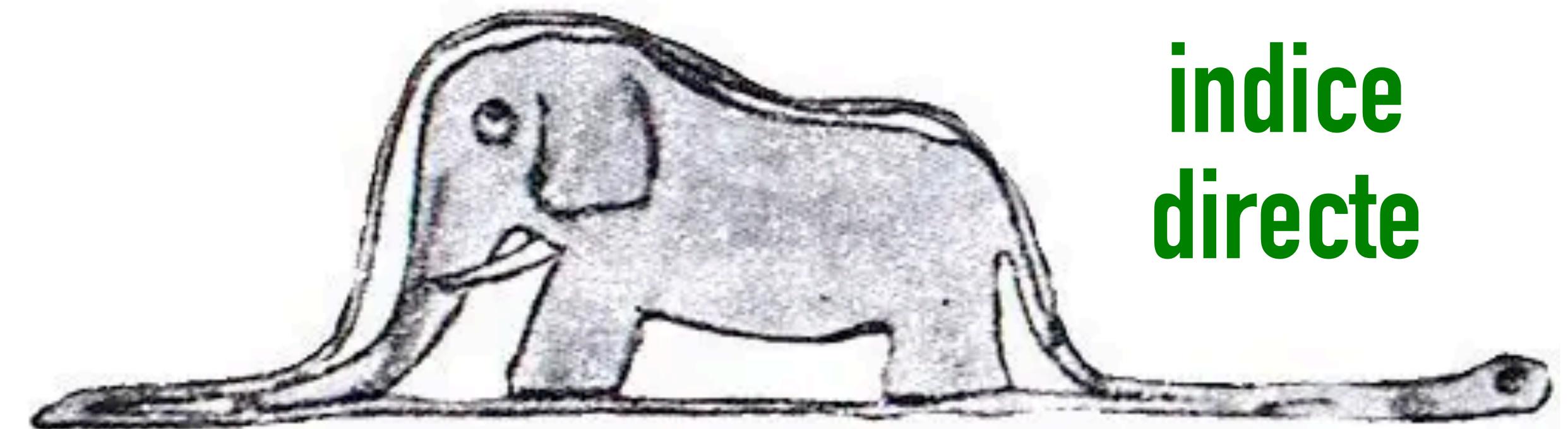


**indice
indirecte**

« Pourquoi un chapeau ferait-il peur ? »

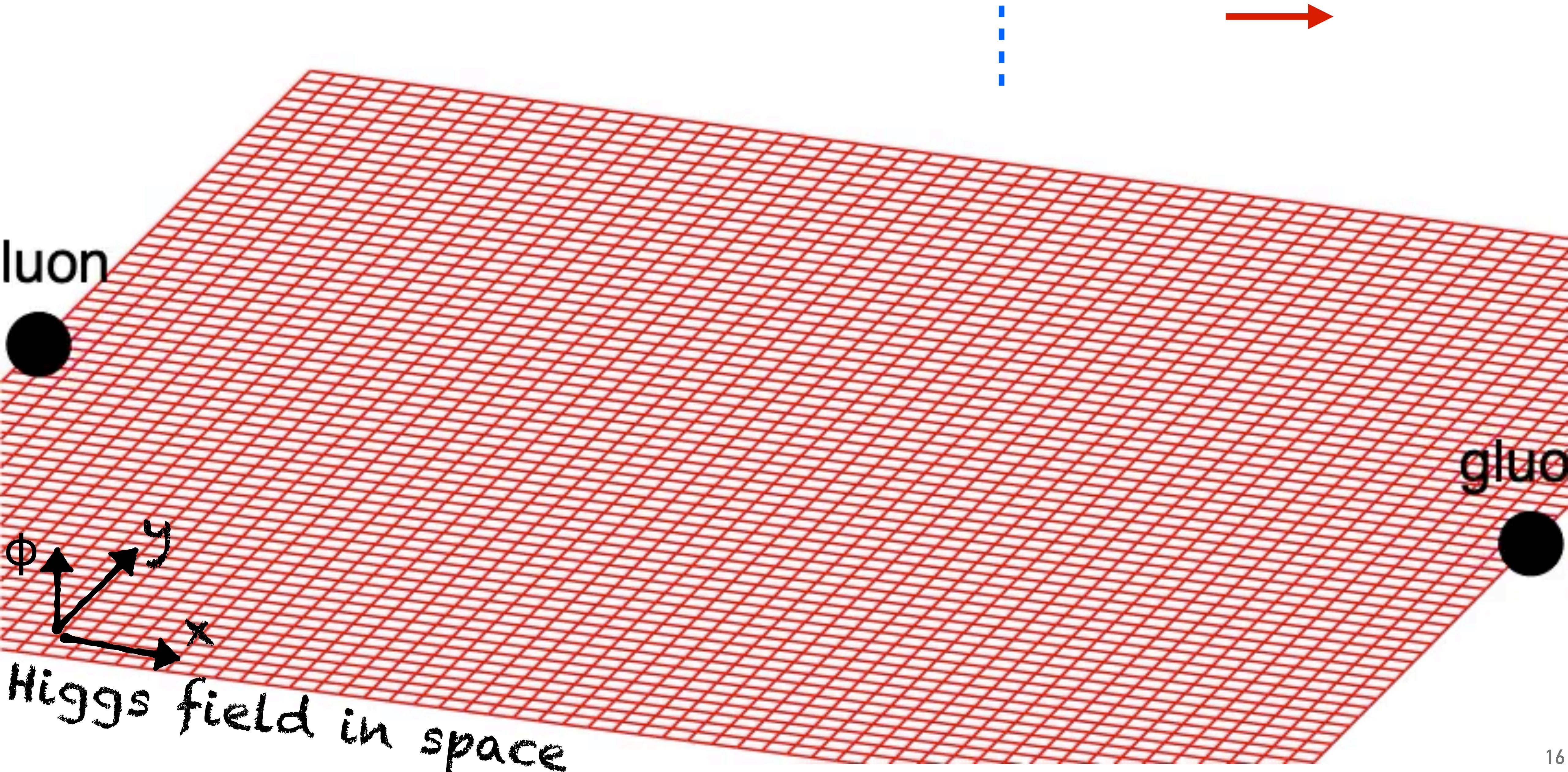
Le Petit Prince, Antoine de Saint-Exupéry

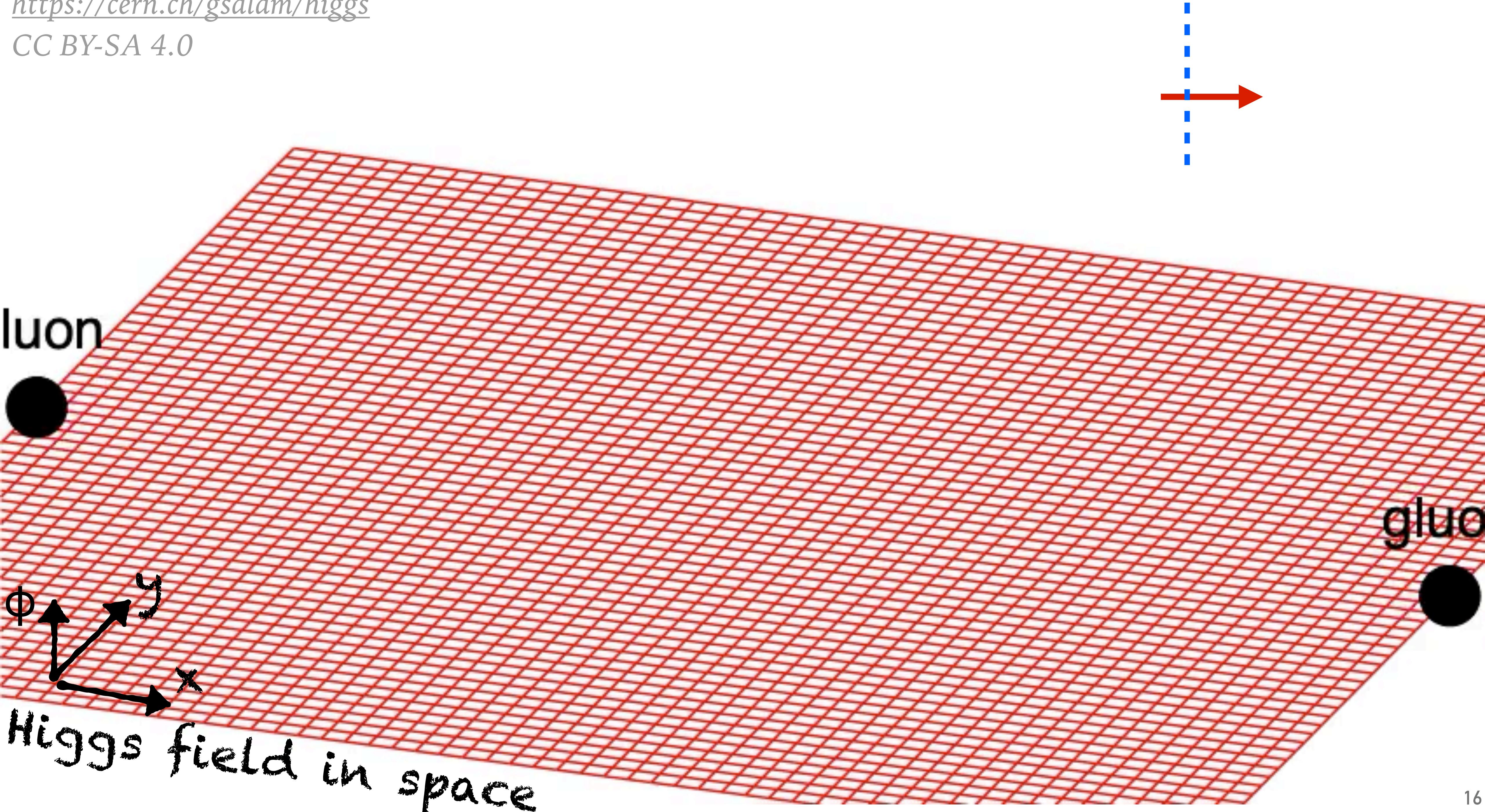
« Mon dessin ne représentait pas un chapeau. Il représentait un serpent boa qui digérait un élphant. »

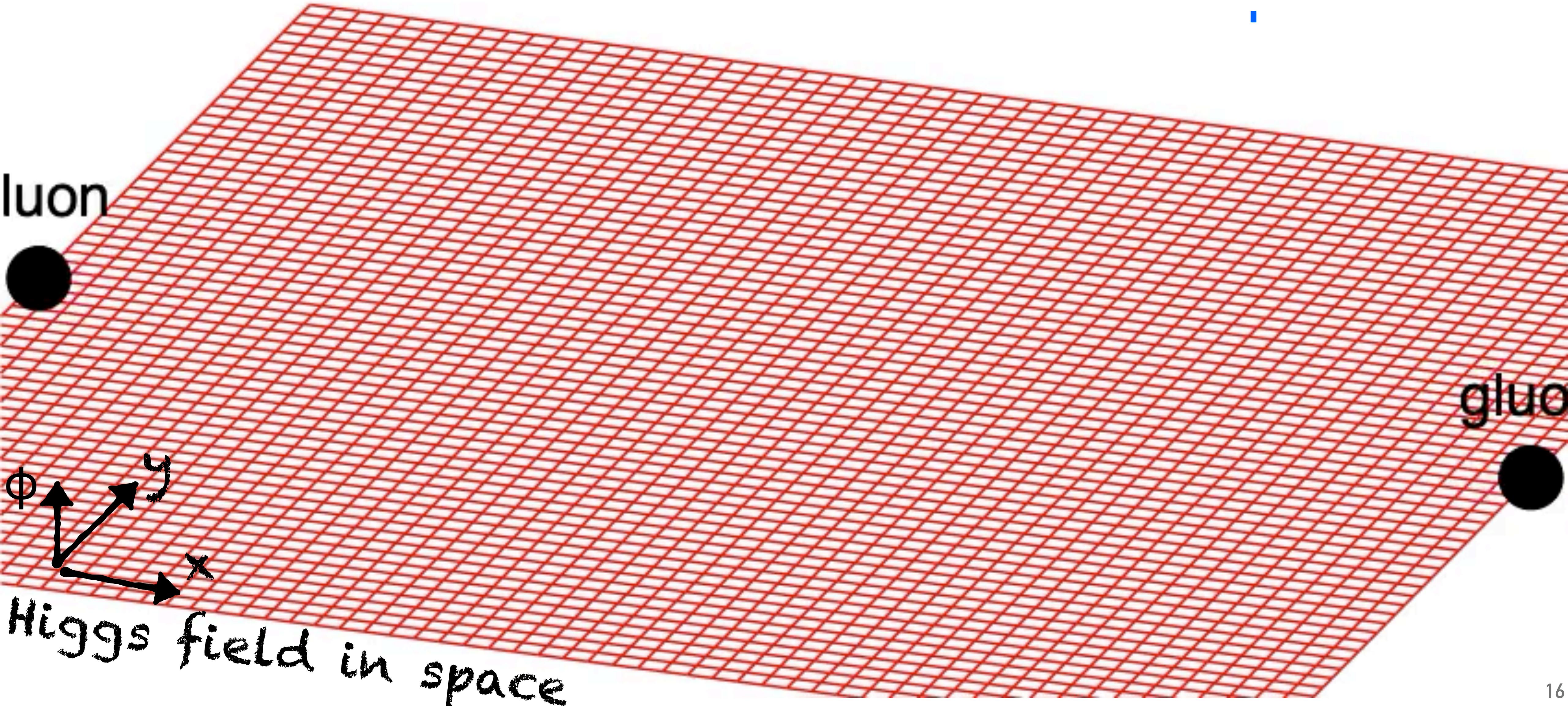


**indice
directe**

Mon dessin numéro 2





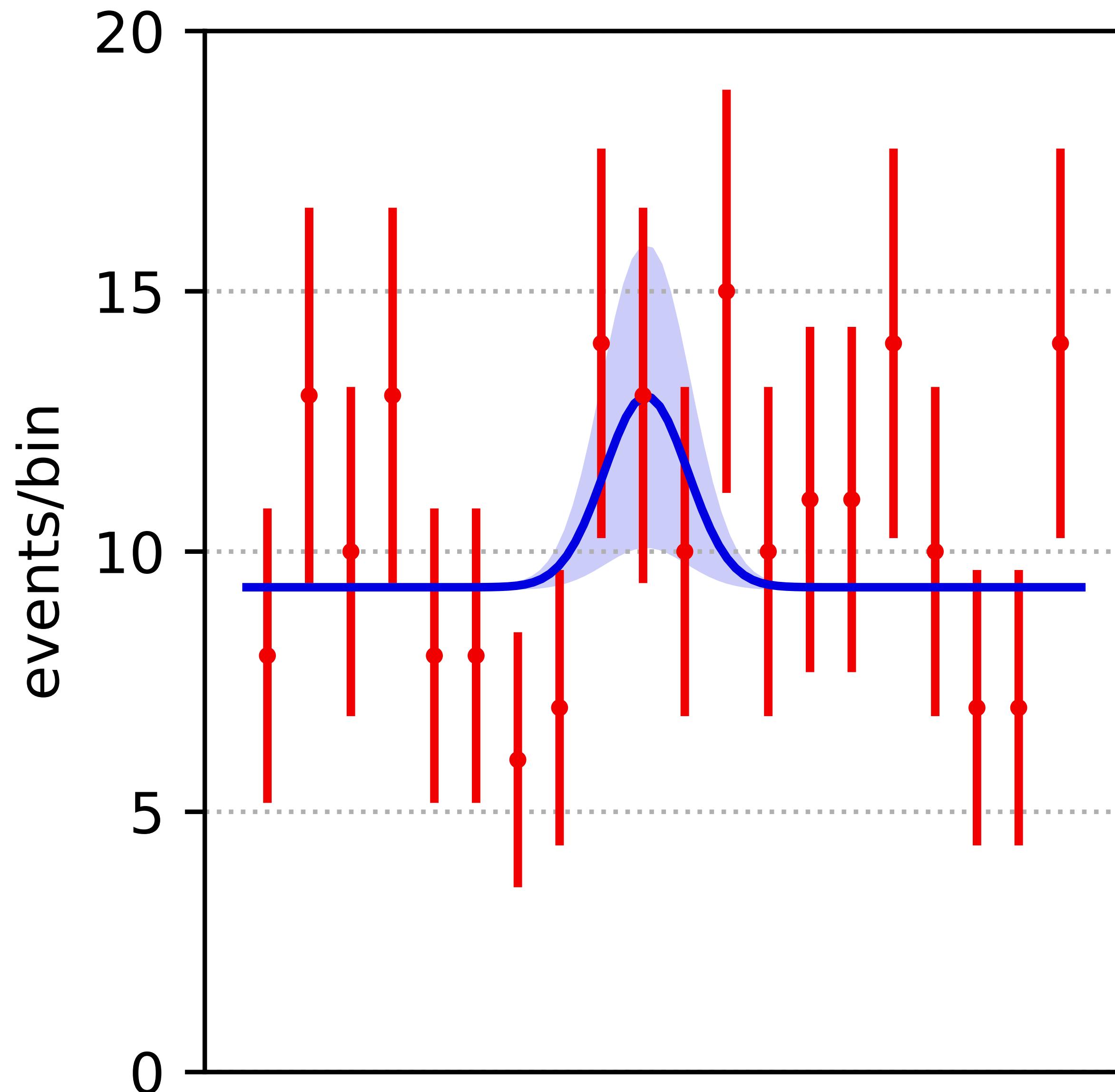


Situation au début du LHC (2009)

“Due to a (too) low signal-to-background ratio $S/B \sim 1/9$ [ttH] channel might not reach a 5σ significance for any luminosity.”

[from introduction to arXiv:0910.5472,
summarising ATLAS and CMS ttH($\rightarrow bb$) studies at that point]

1.3σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
(taille du signal) / incertitude

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

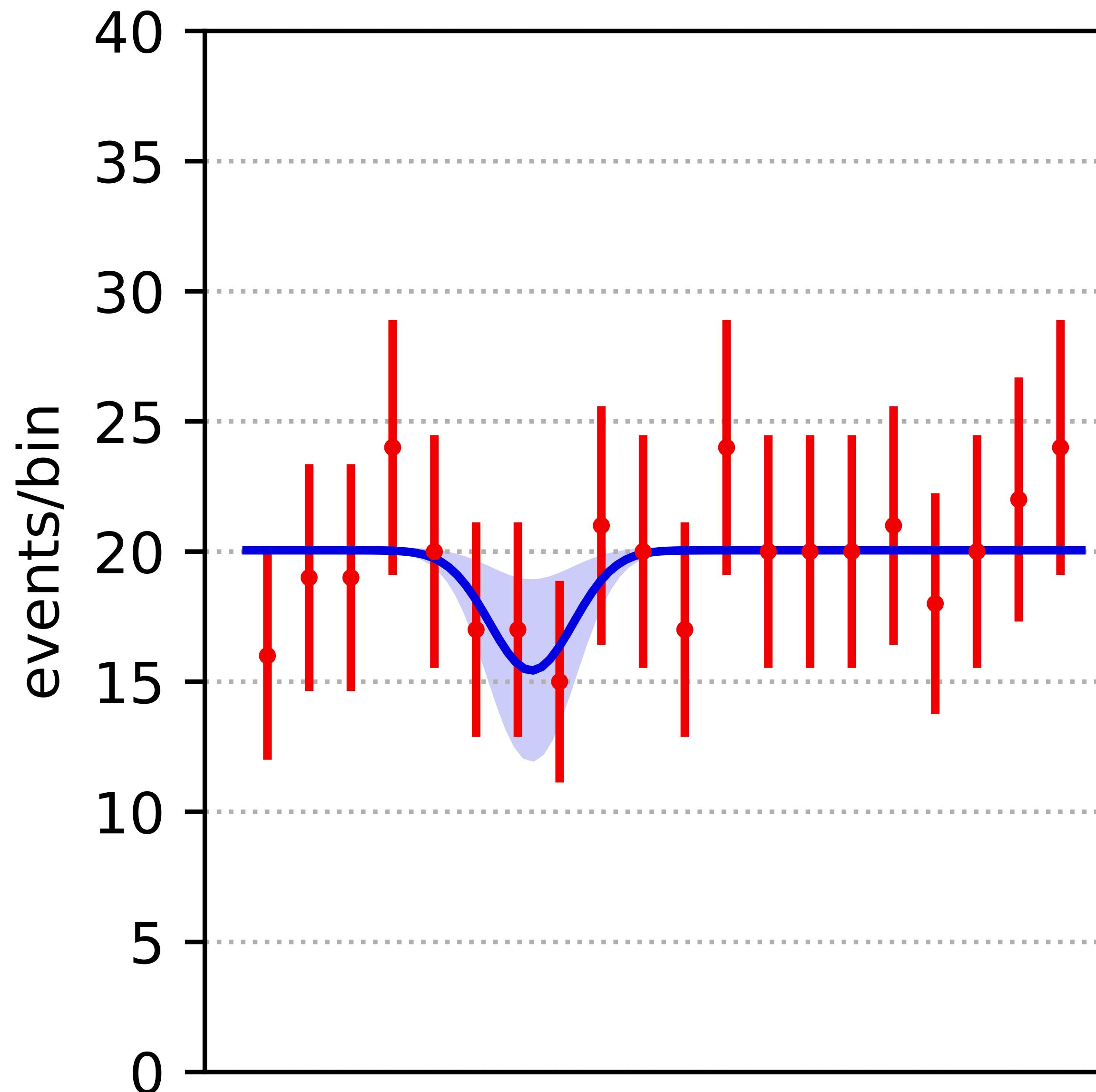
3 σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5 σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)

-1.4σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
(taille du signal) / incertitude

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

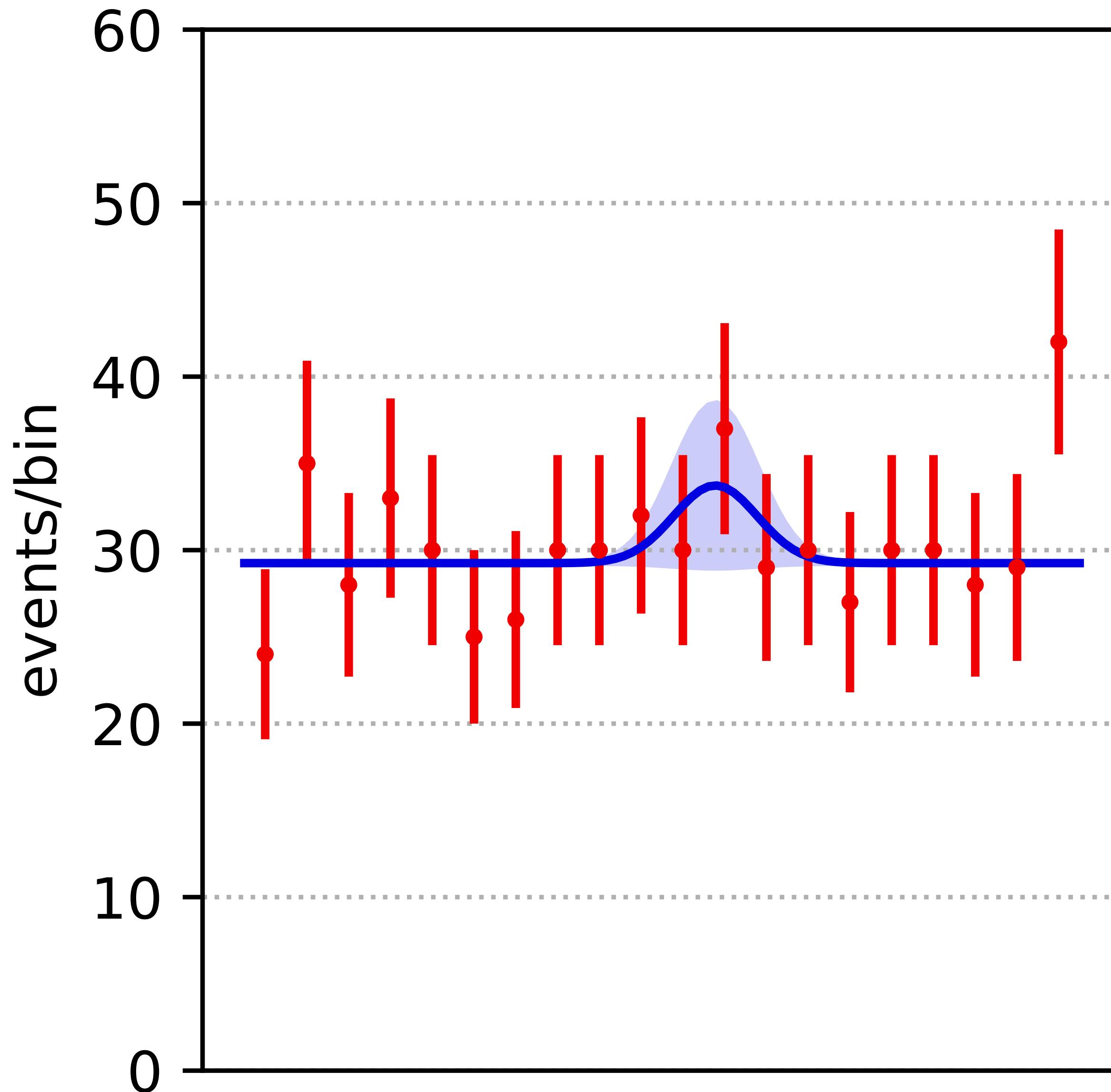
3σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)

0.9σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
(taille du signal) / incertitude

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

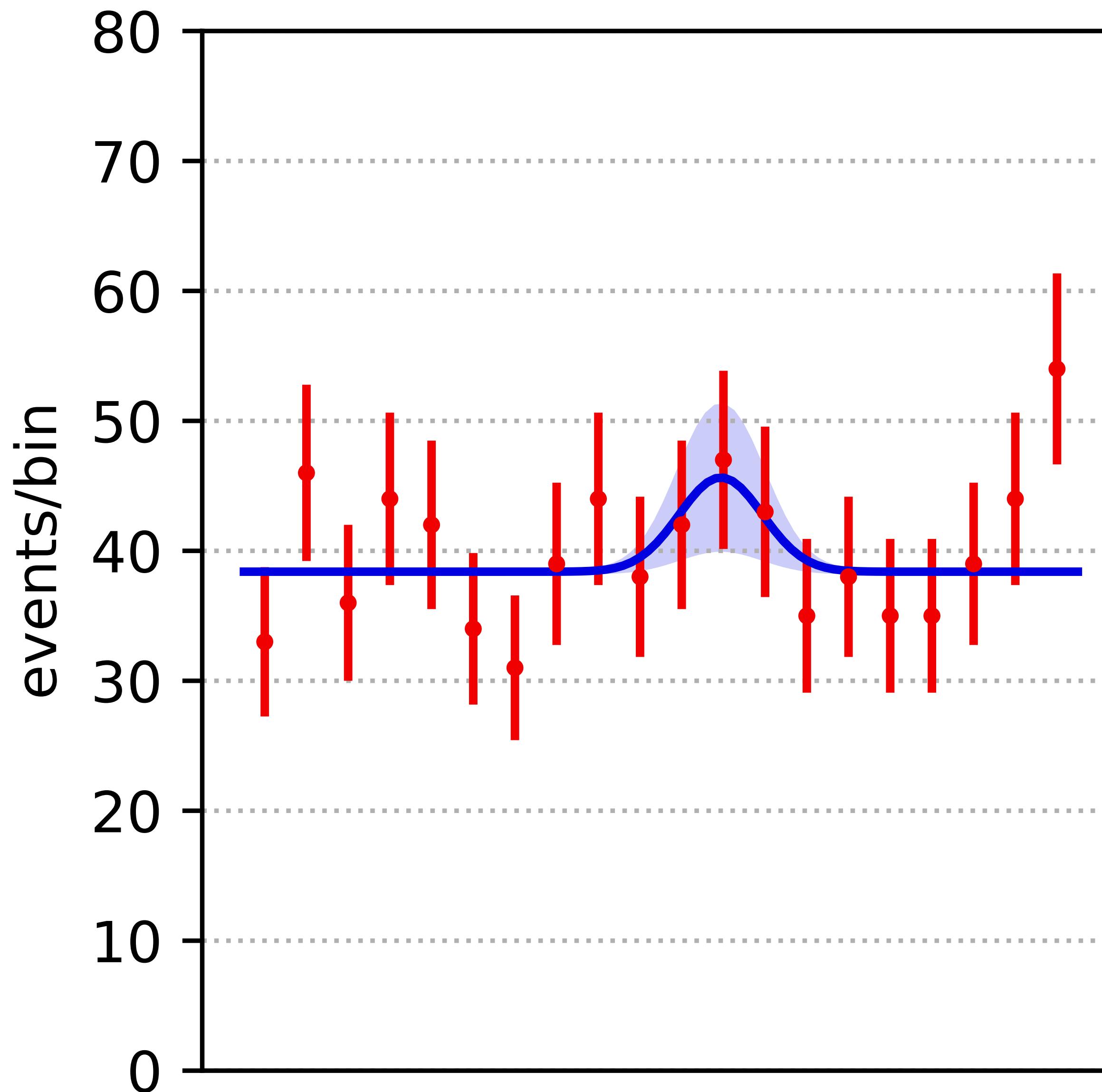
3 σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5 σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)

1.3σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
(taille du signal) / incertitude

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

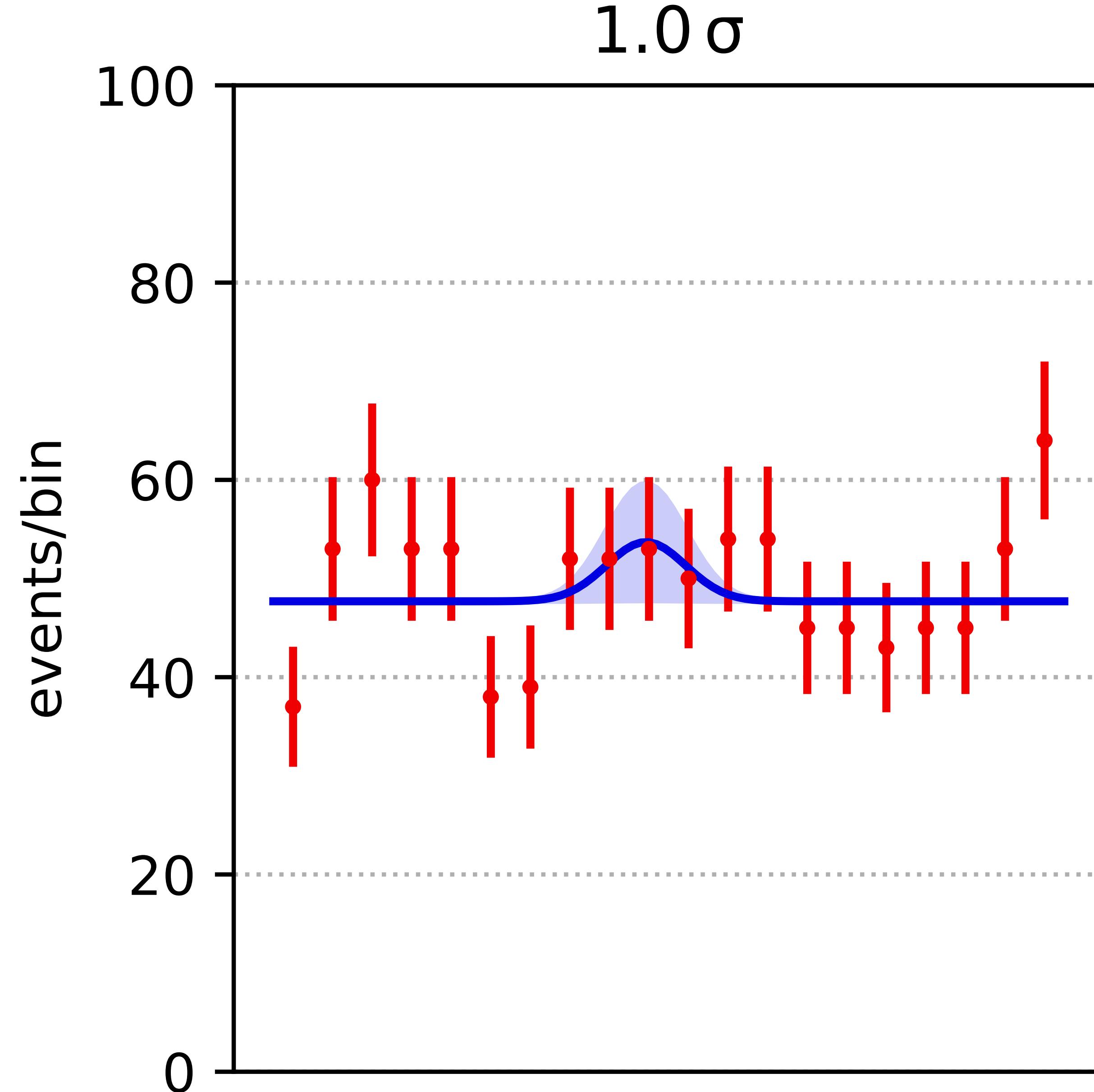
En physique des particules

3 σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5 σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
(taille du signal) / incertitude

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

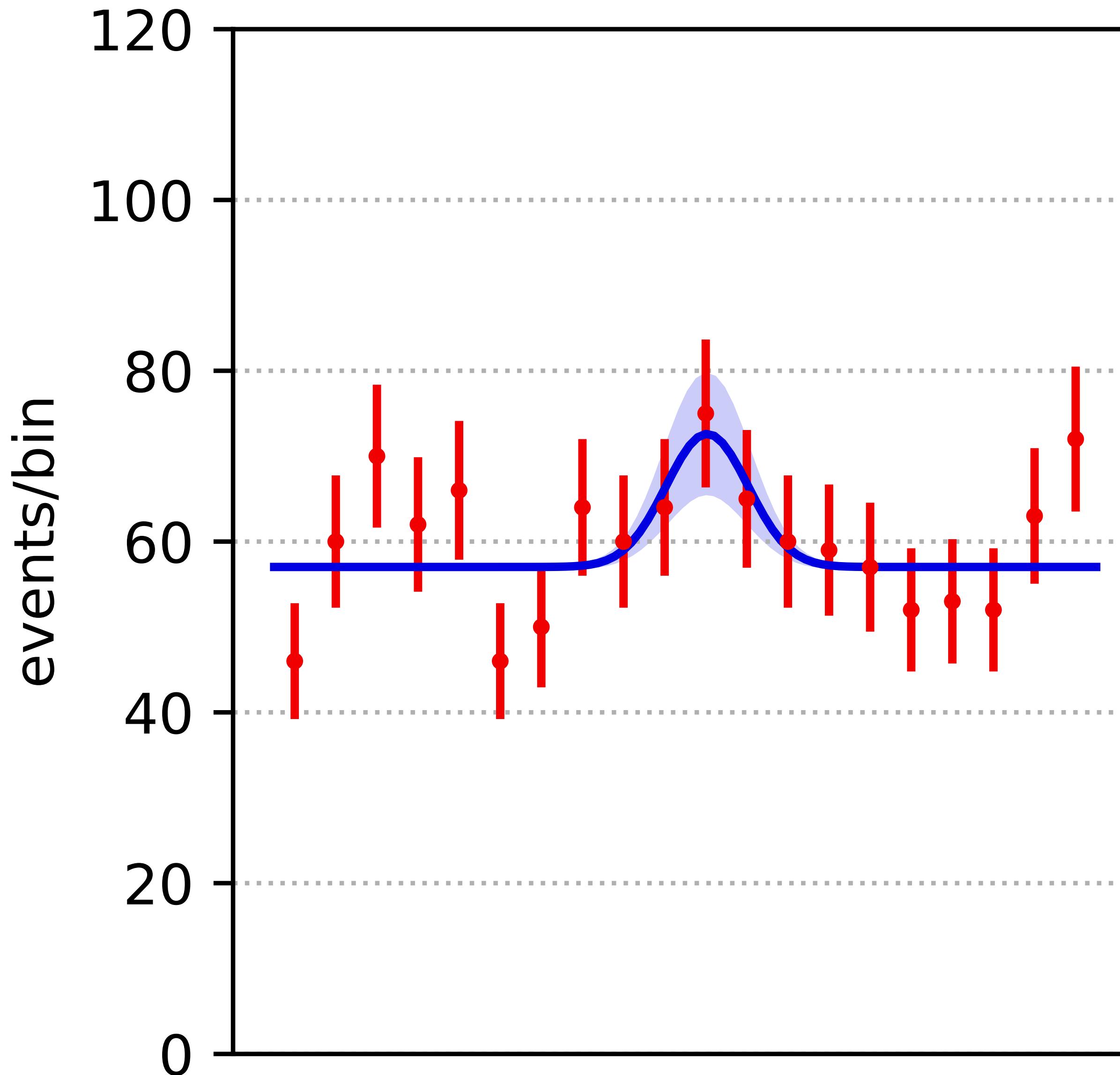
3 σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5 σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)

2.3σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
(taille du signal) / incertitude

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

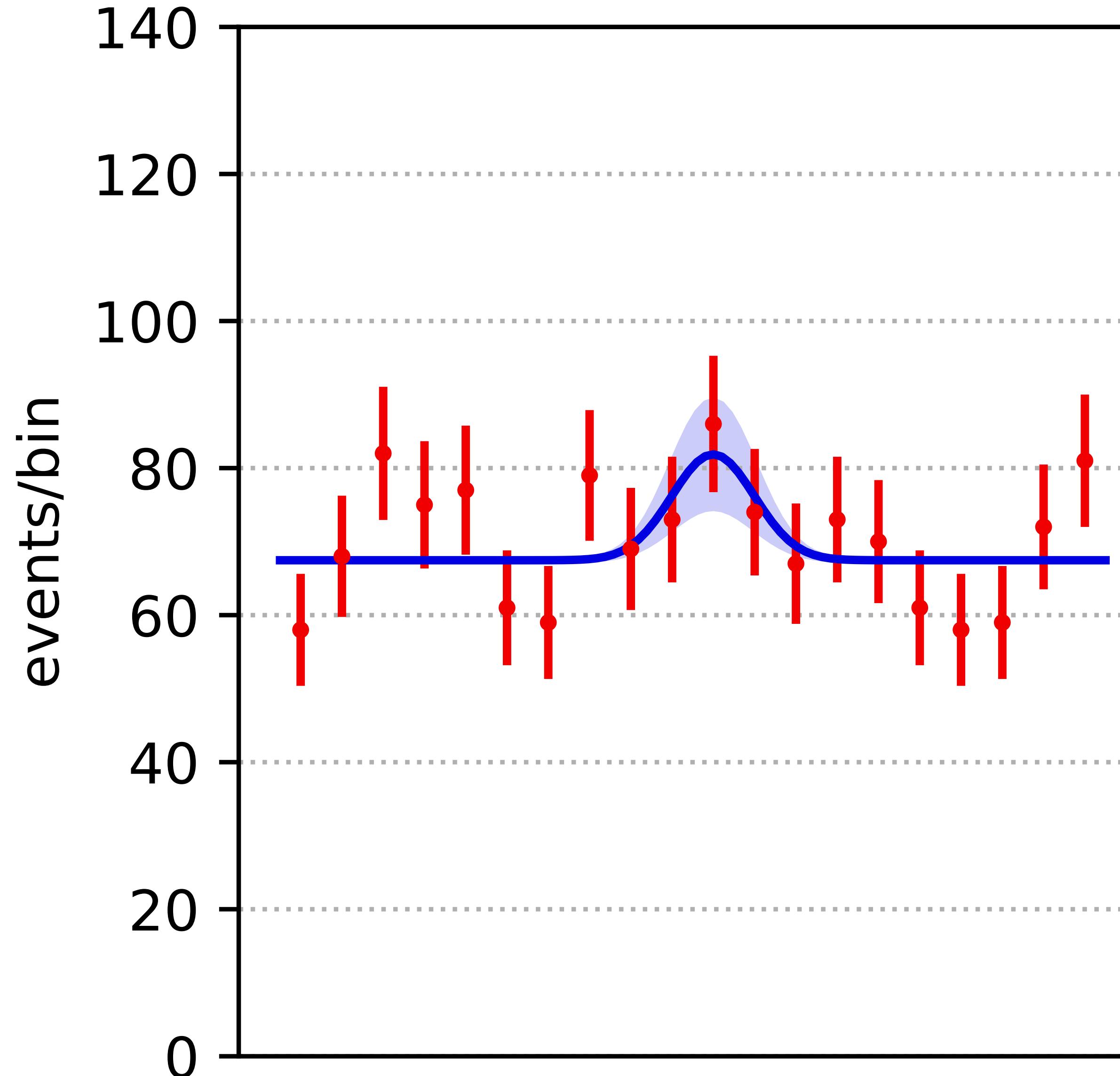
3 σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5 σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)

2.0σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
(taille du signal) / incertitude

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

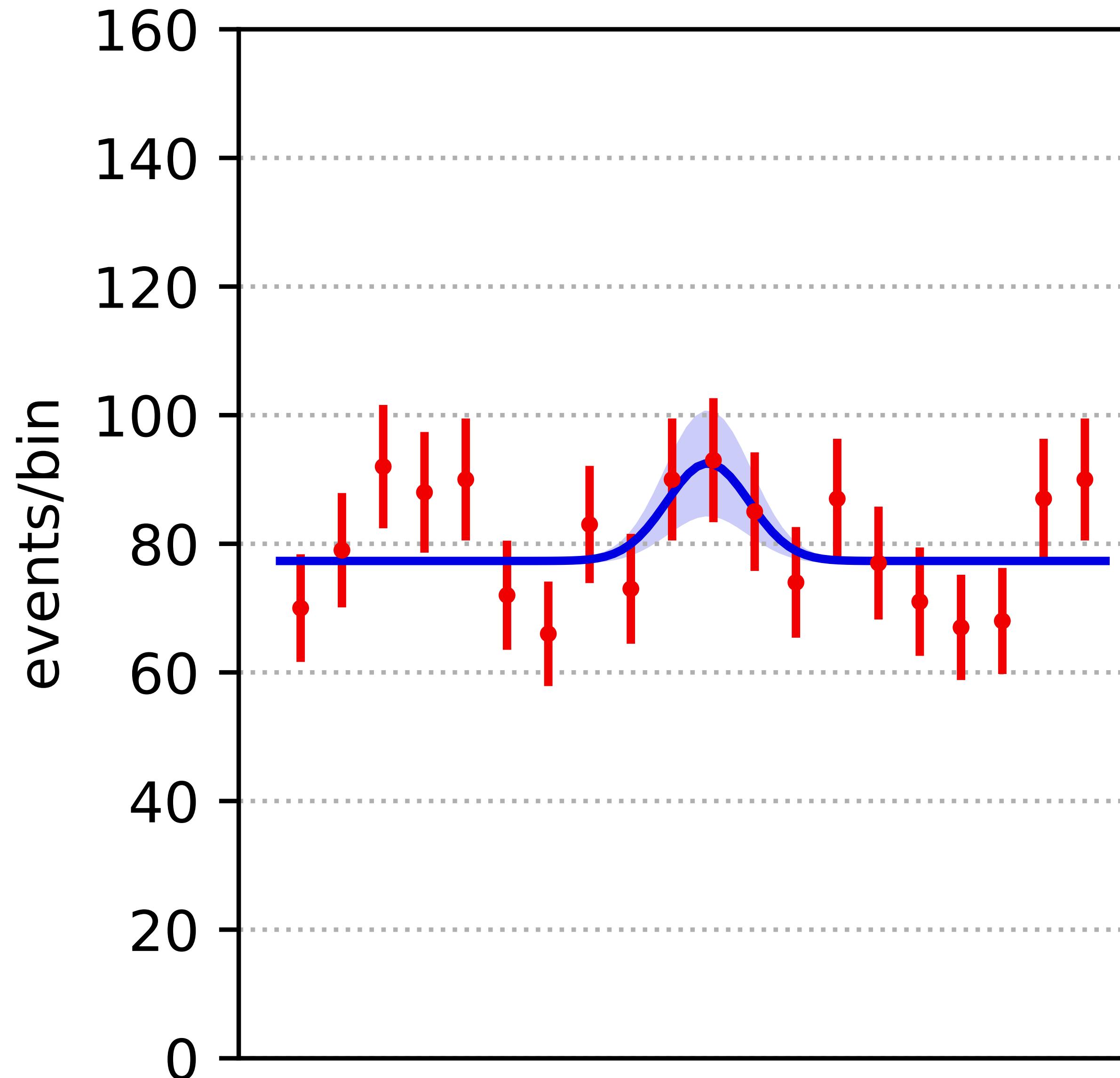
3 σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5 σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)

1.9σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
(taille du signal) / incertitude

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

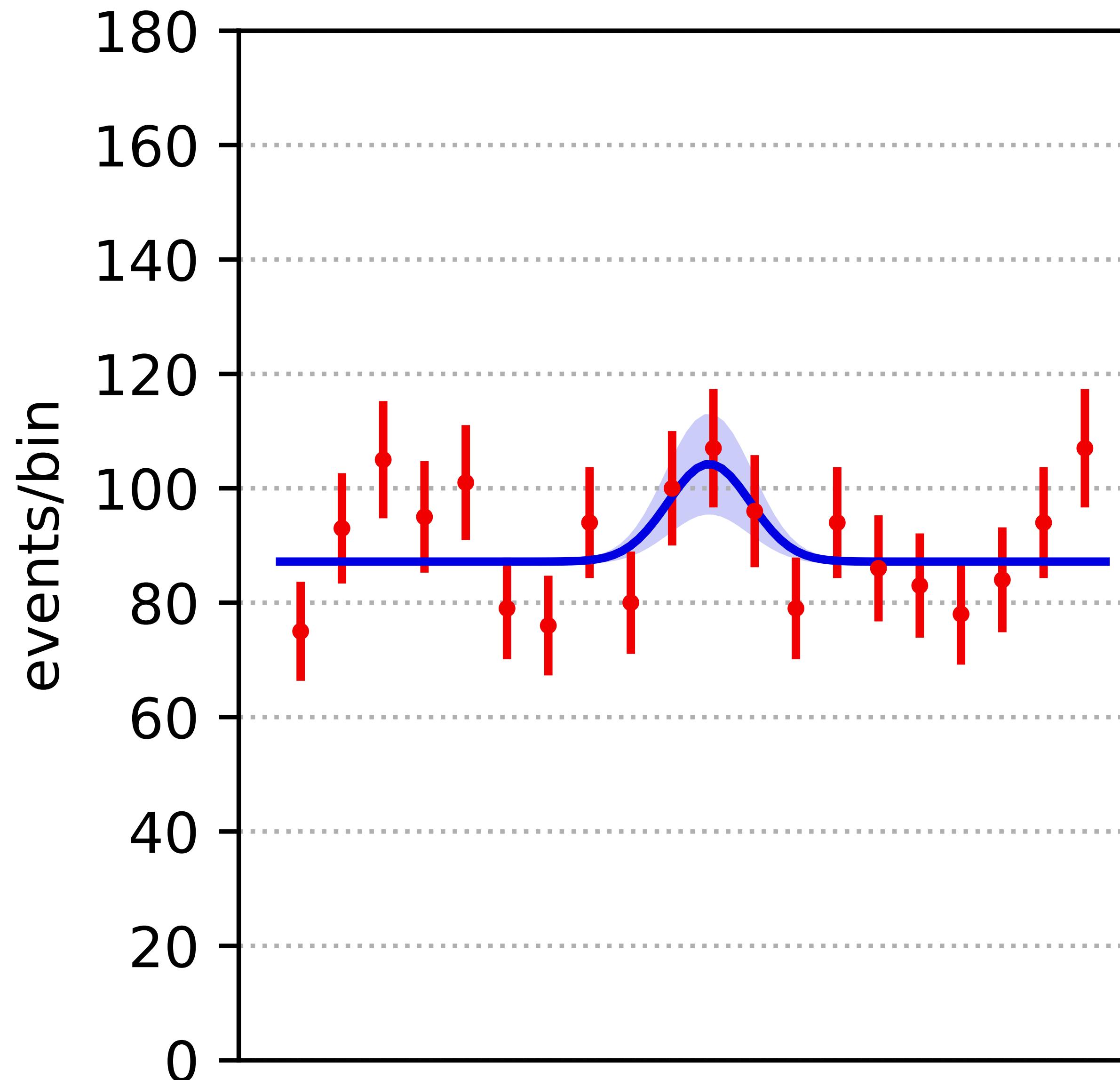
3 σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5 σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)

2.1σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
(taille du signal) / incertitude

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

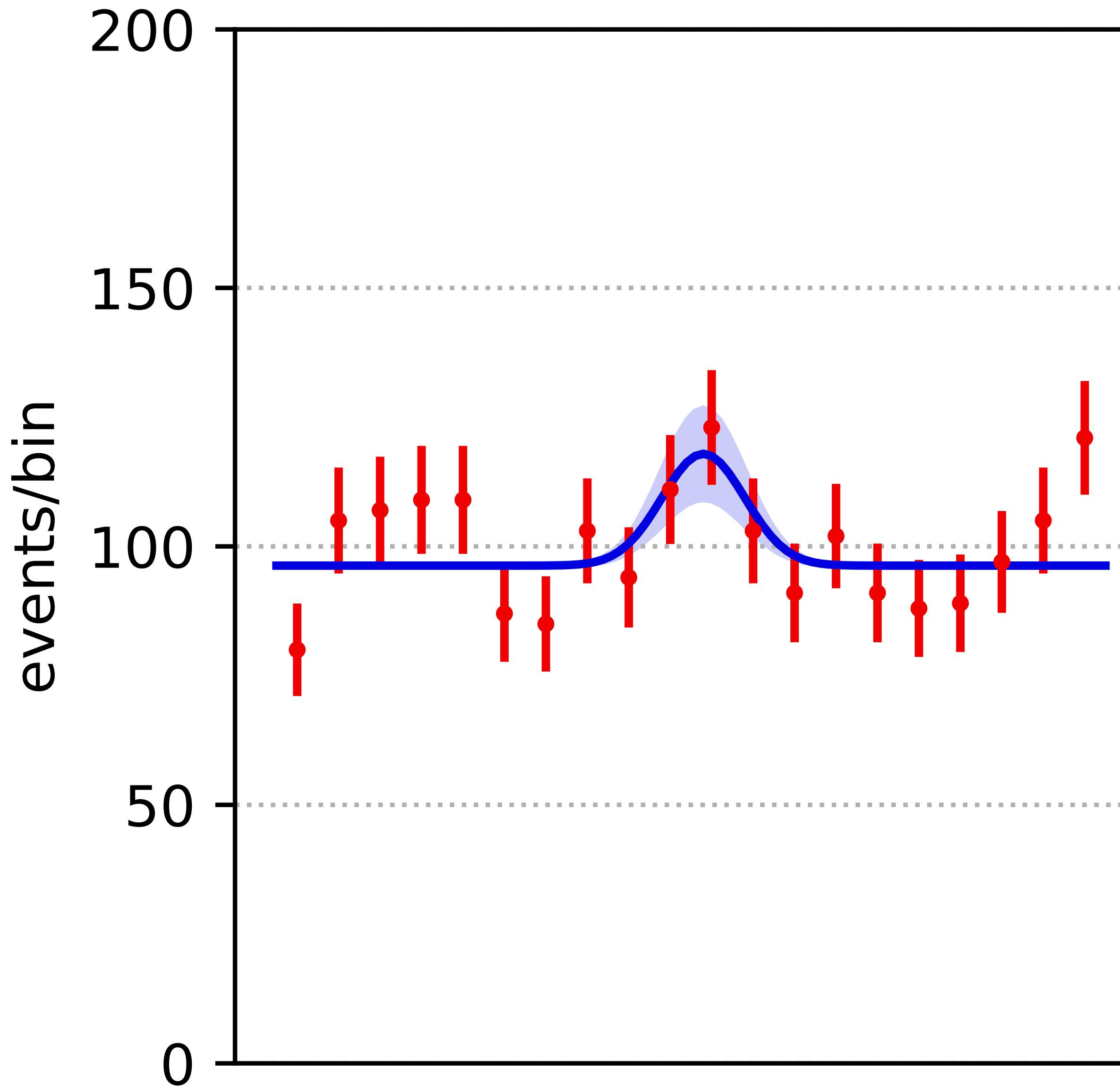
3 σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5 σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)

2.5σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
 $(\text{taille du signal}) / \text{incertitude}$

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

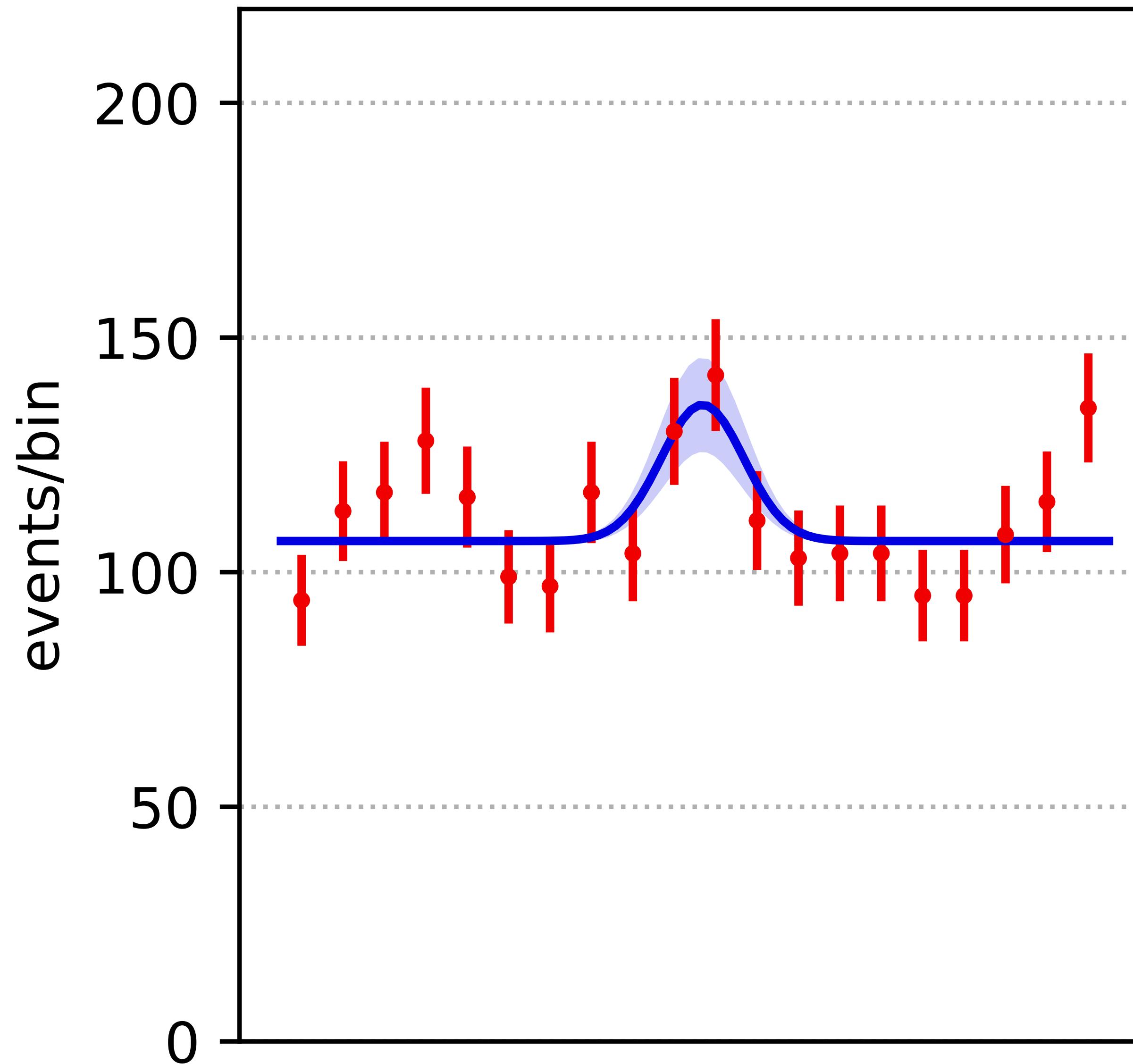
3 σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5 σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)

3.1σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
(taille du signal) / incertitude

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

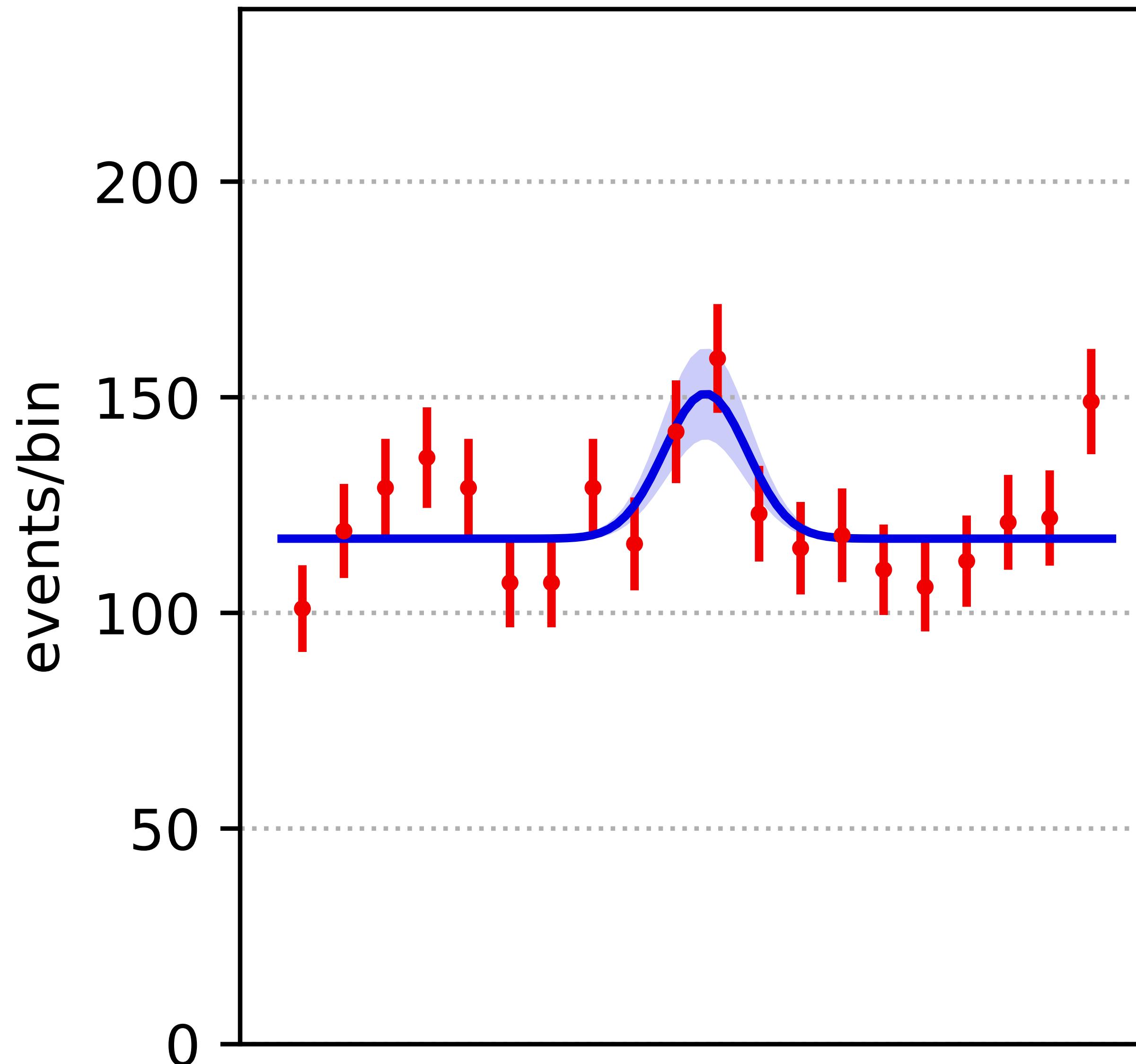
3 σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5 σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)

3.4σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
(taille du signal) / incertitude

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

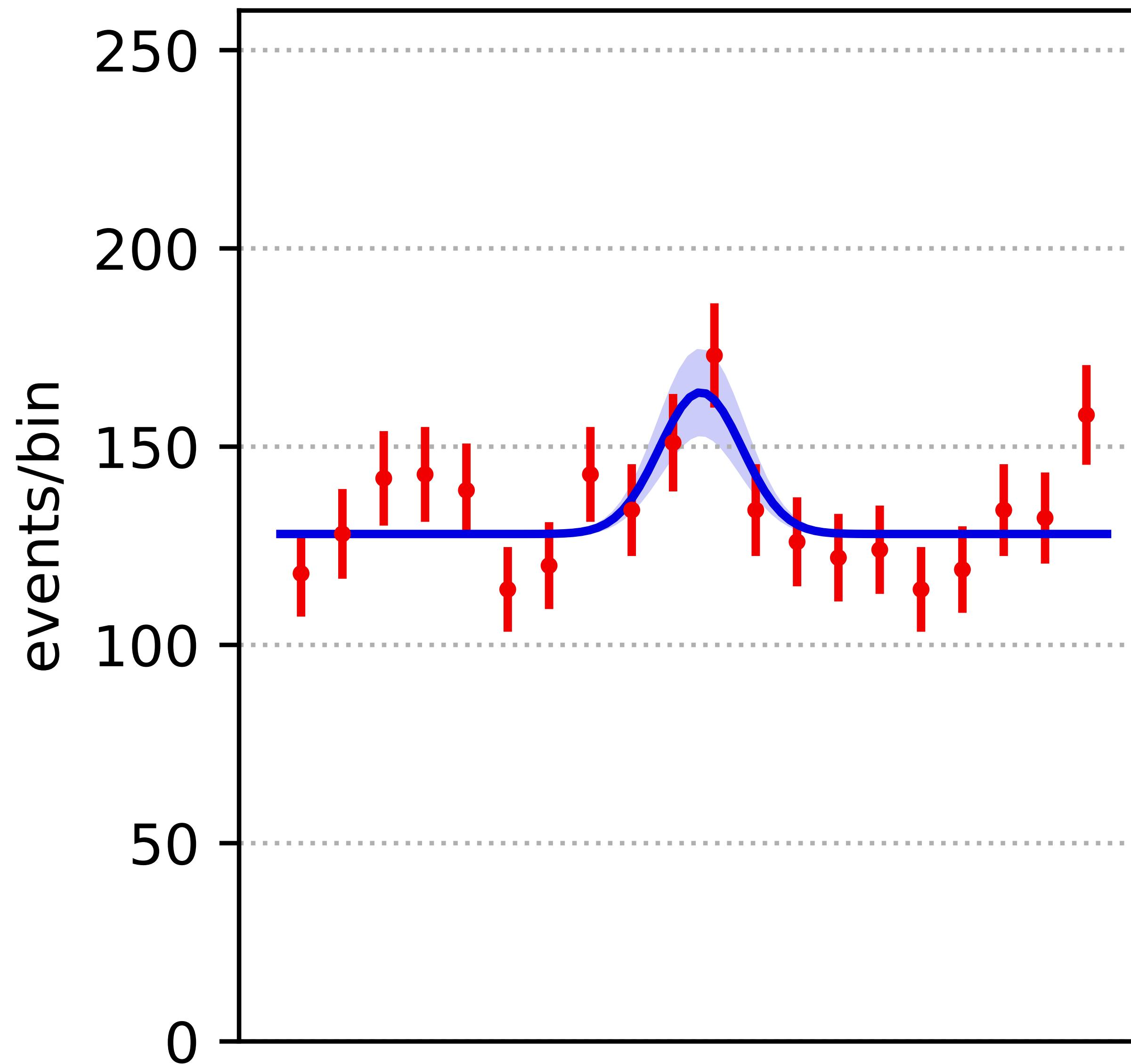
3 σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5 σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)

3.5σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
(taille du signal) / incertitude

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

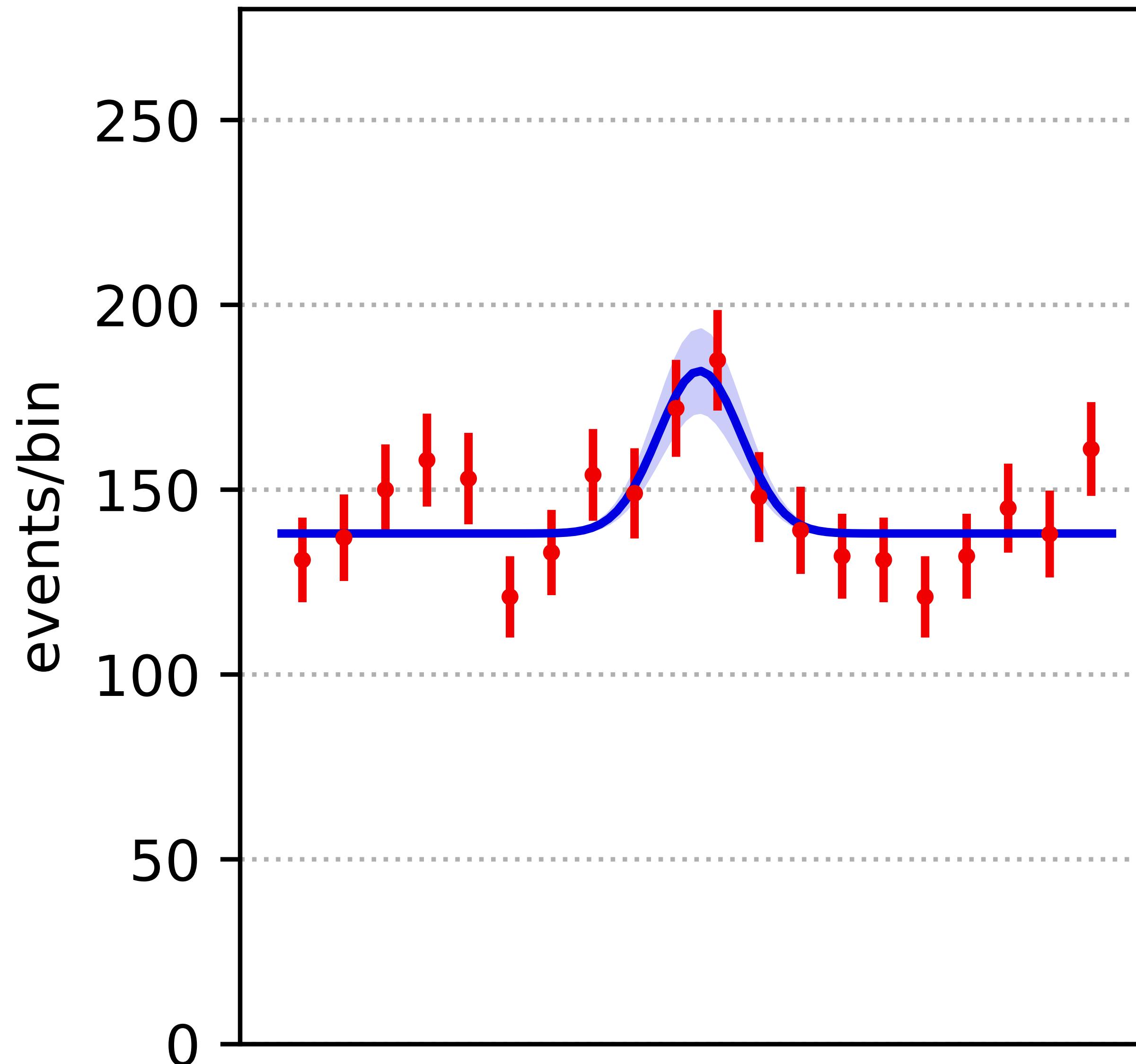
3 σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5 σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)

4.1σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
 $(\text{taille du signal}) / \text{incertitude}$

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

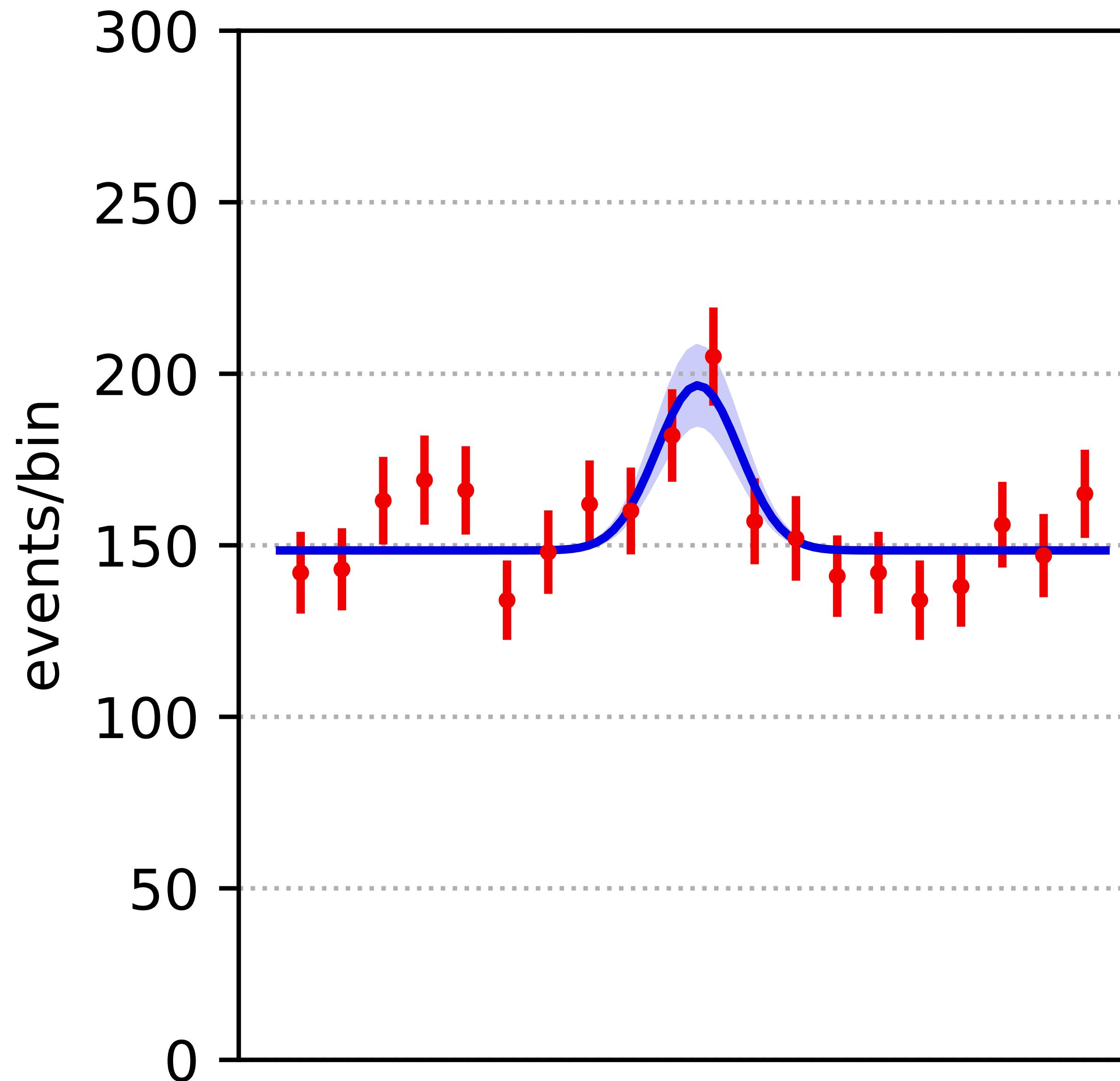
3 σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5 σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)

4.3σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
(taille du signal) / incertitude

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

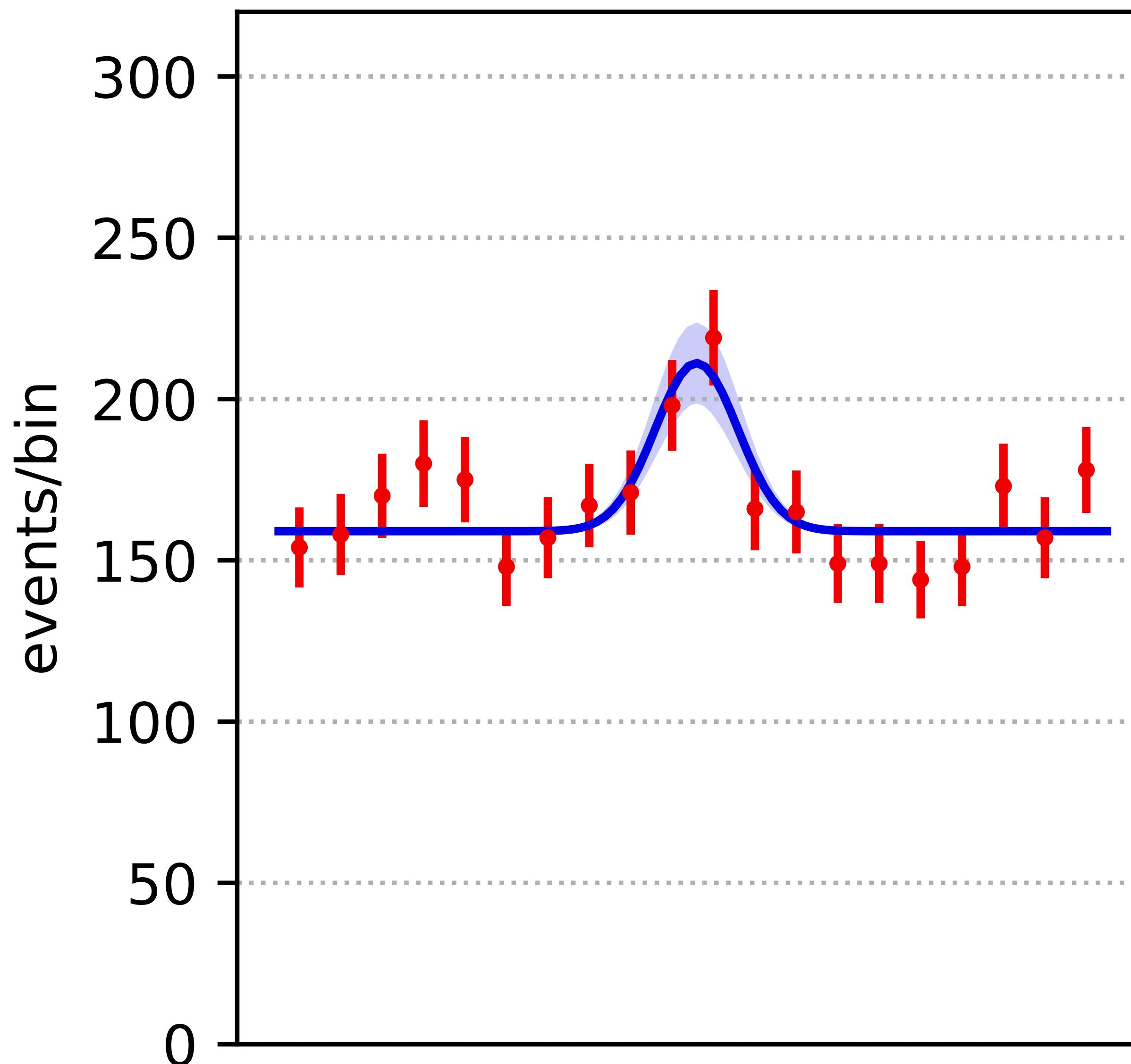
3 σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5 σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)

4.5σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
(taille du signal) / incertitude

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

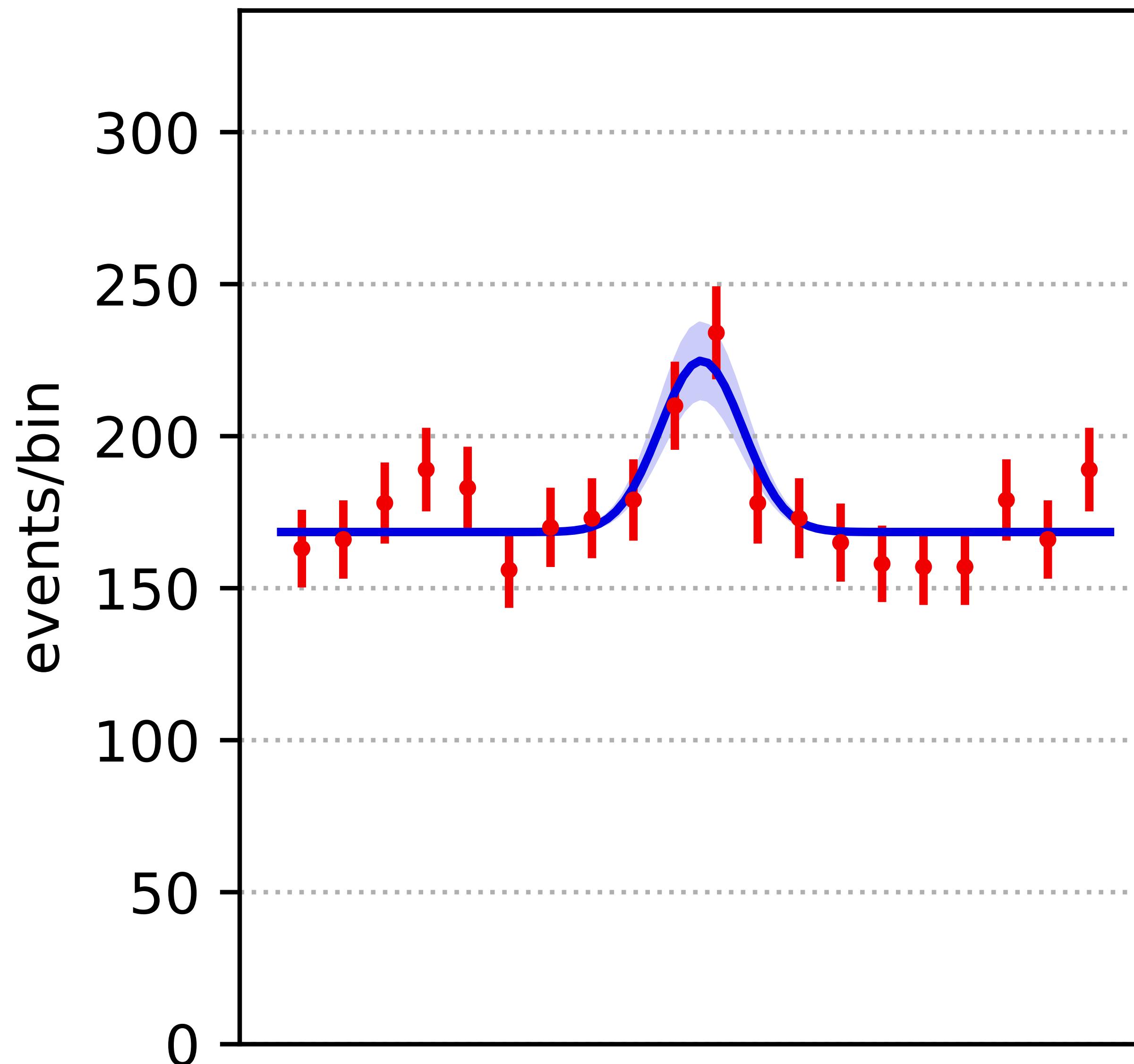
3 σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5 σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)

4.7σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
(taille du signal) / incertitude

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

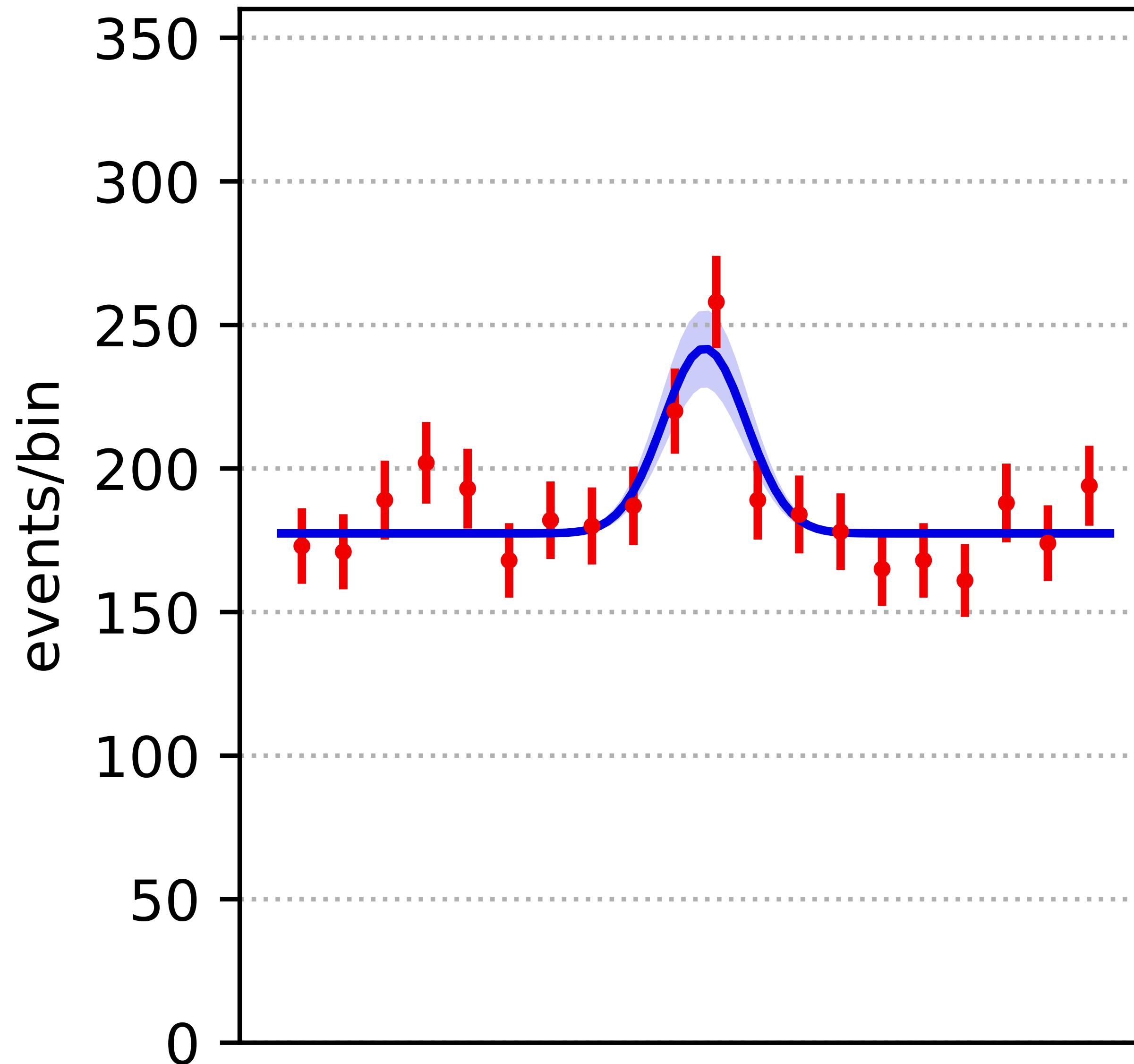
3 σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5 σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)

5.2σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
(taille du signal) / incertitude

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

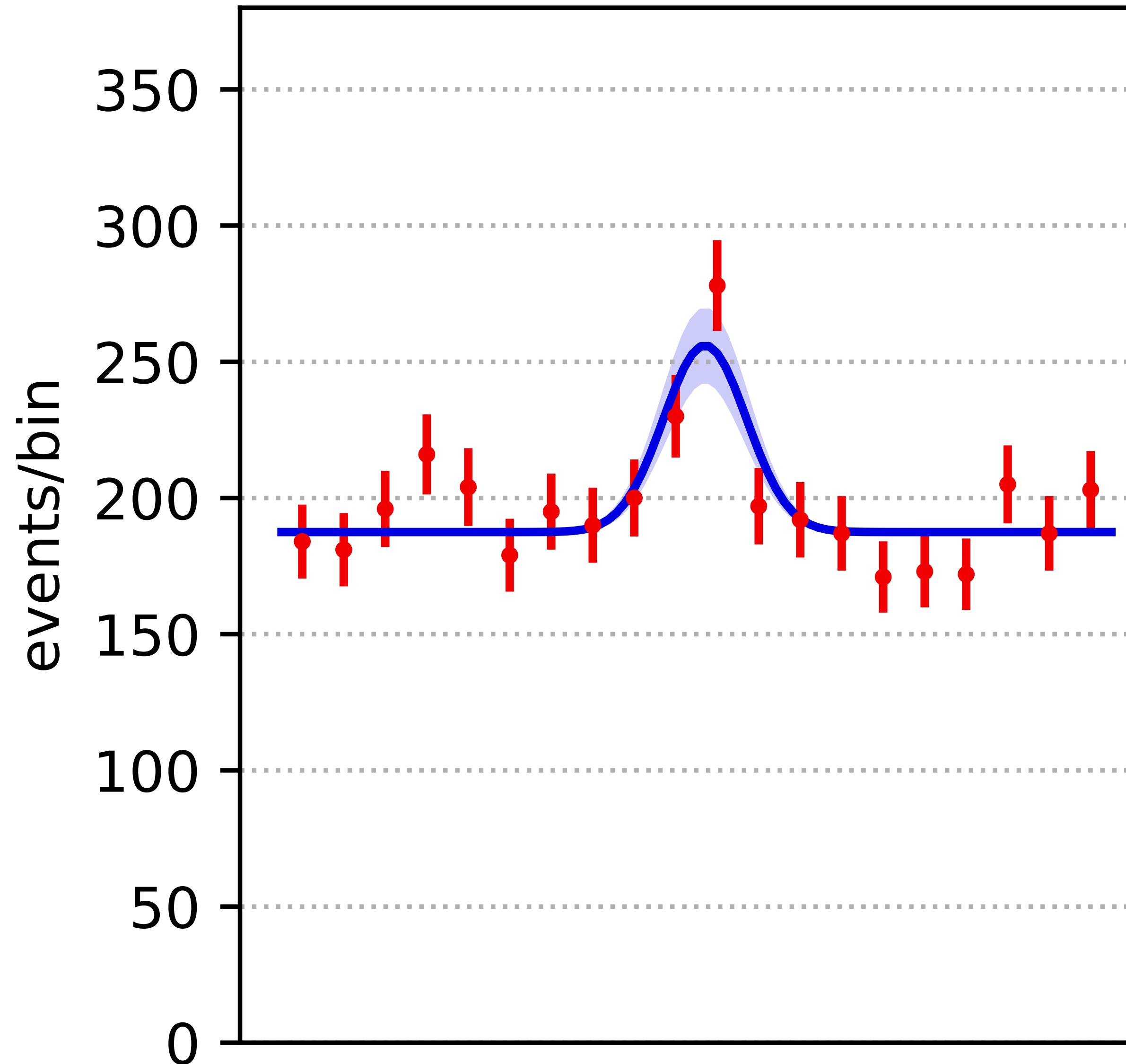
3 σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5 σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)

5.3σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
(taille du signal) / incertitude

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

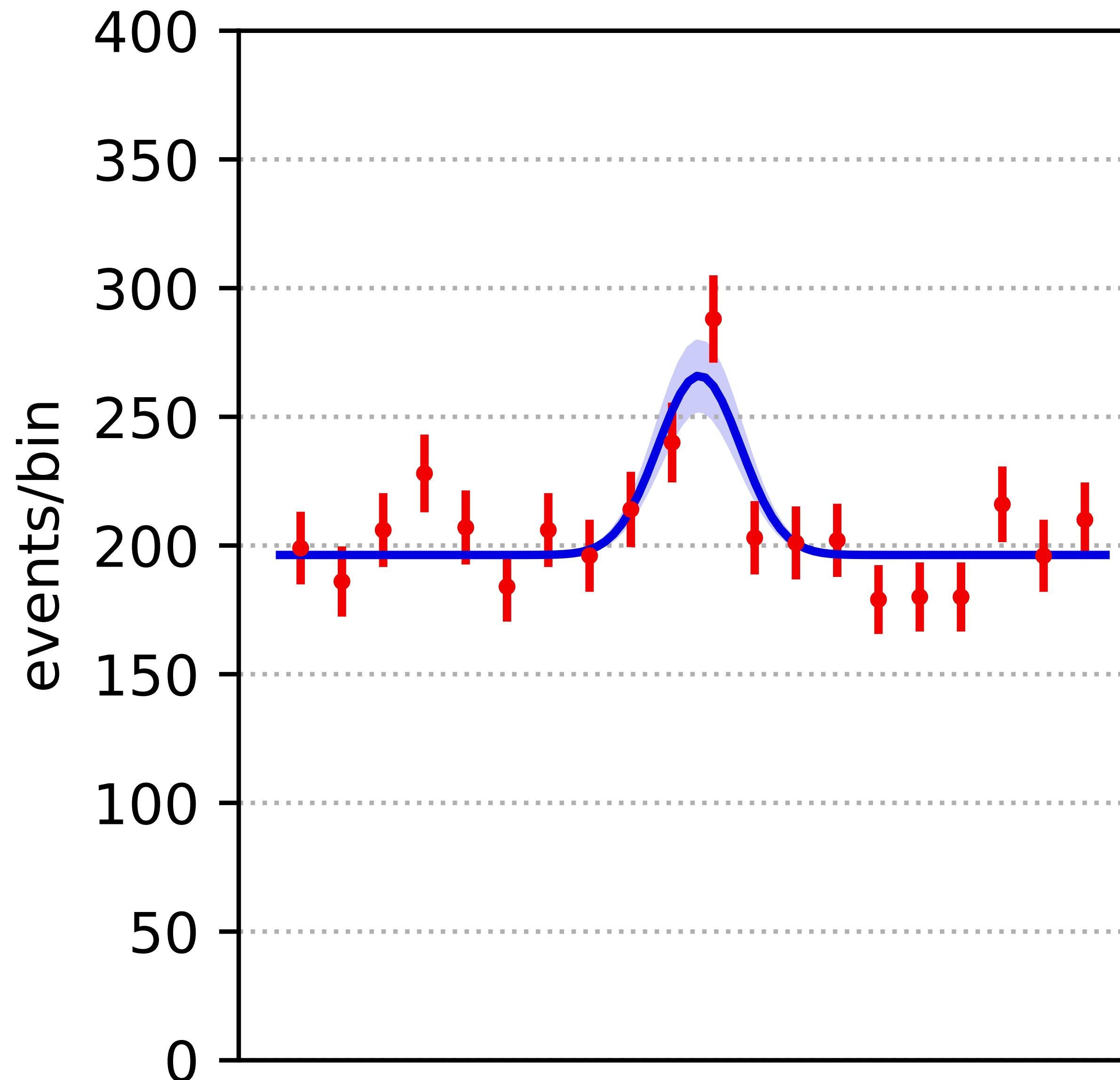
3σ: “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5σ: “observation”

(le signal devrait être robuste)

5.3σ



Nombre de σ mesure la signification statistique d'un signal:
(taille du signal) / incertitude

Indicateur du degré de confiance que c'est un vrai signal plutôt qu'une fluctuation statistique

En physique des particules

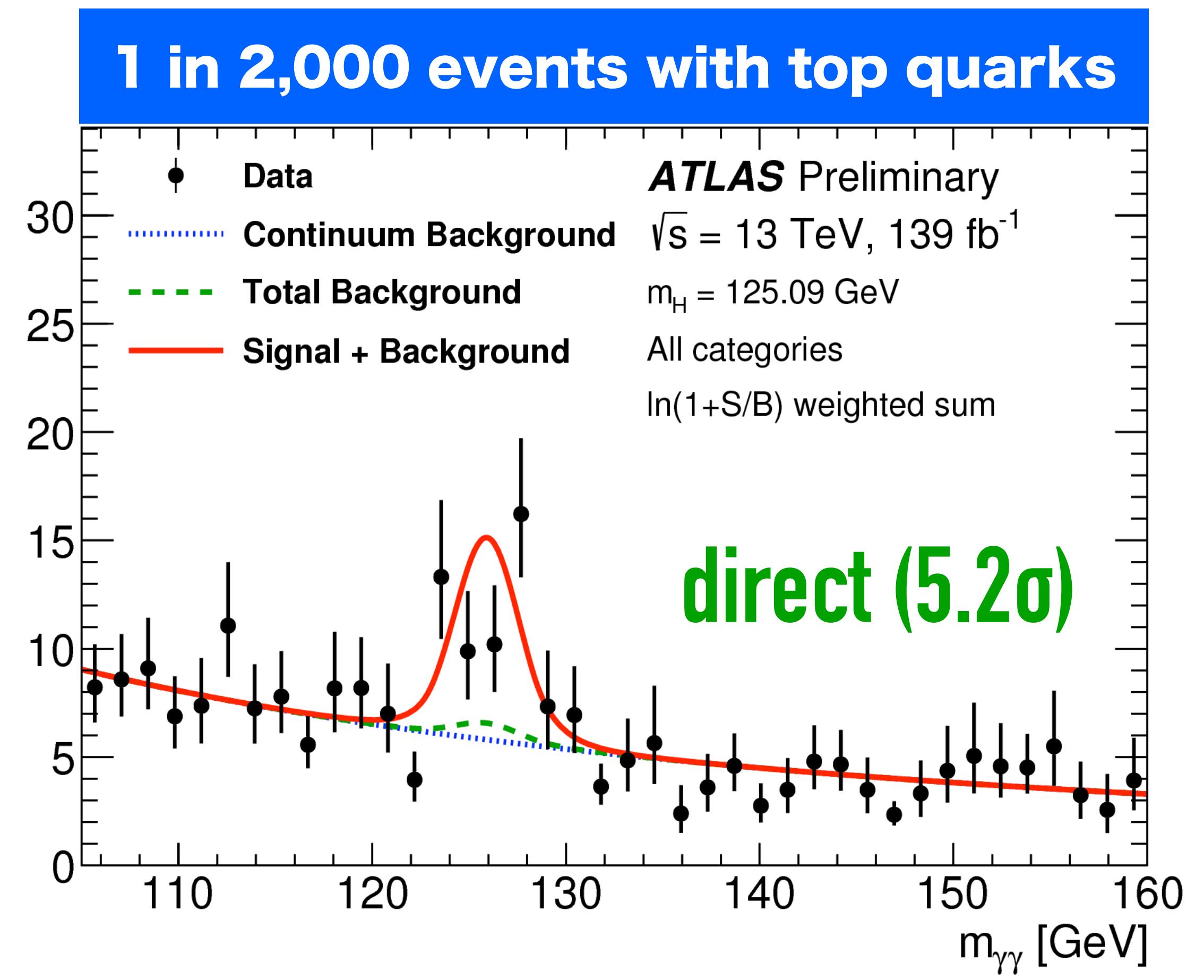
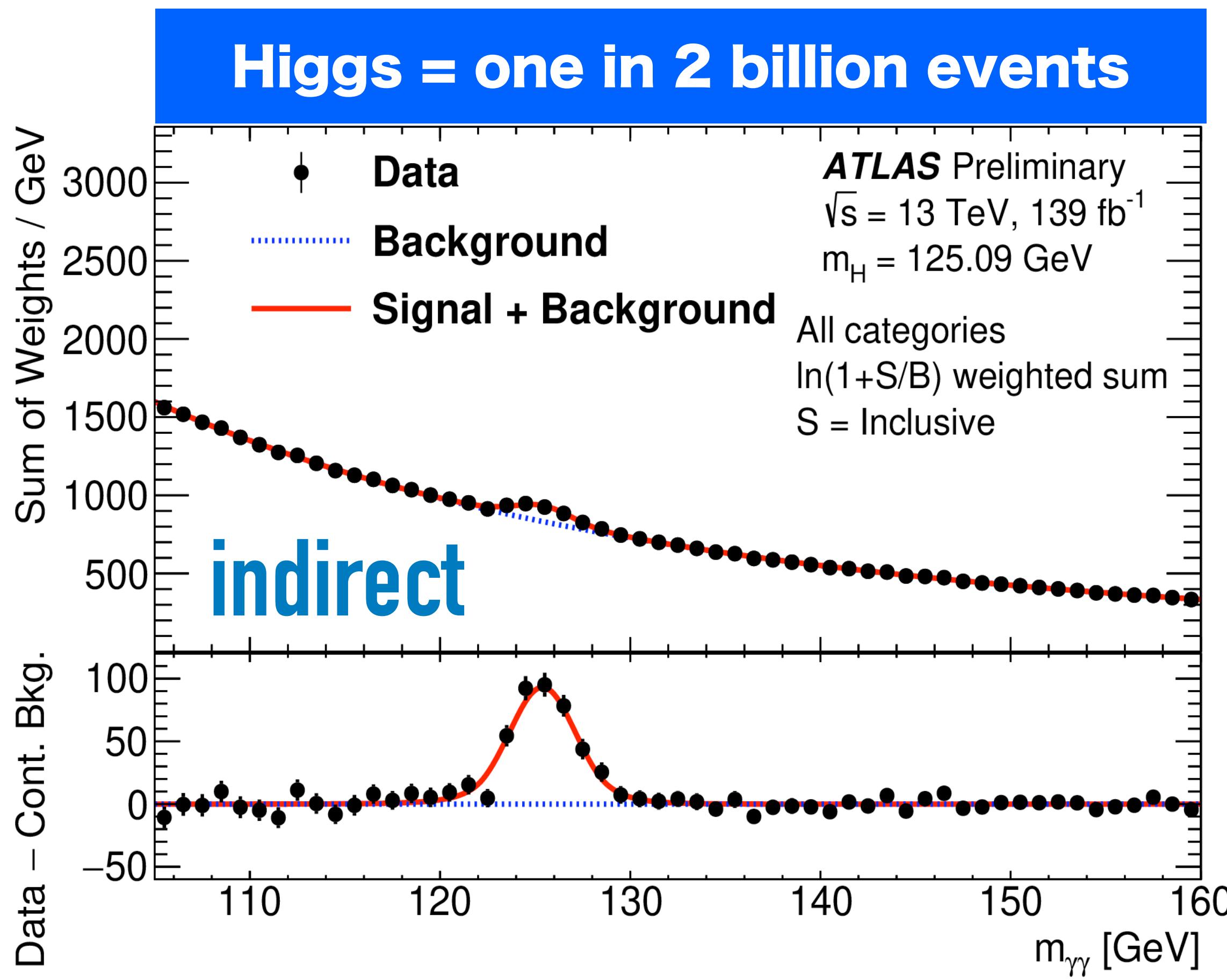
3 σ : “indice” (“evidence”)

(si on ne s'y attend pas, il ne faut pas être surpris si le signal disparaît avec des données supplémentaires)

5 σ : “observation”

(le signal devrait être robuste)

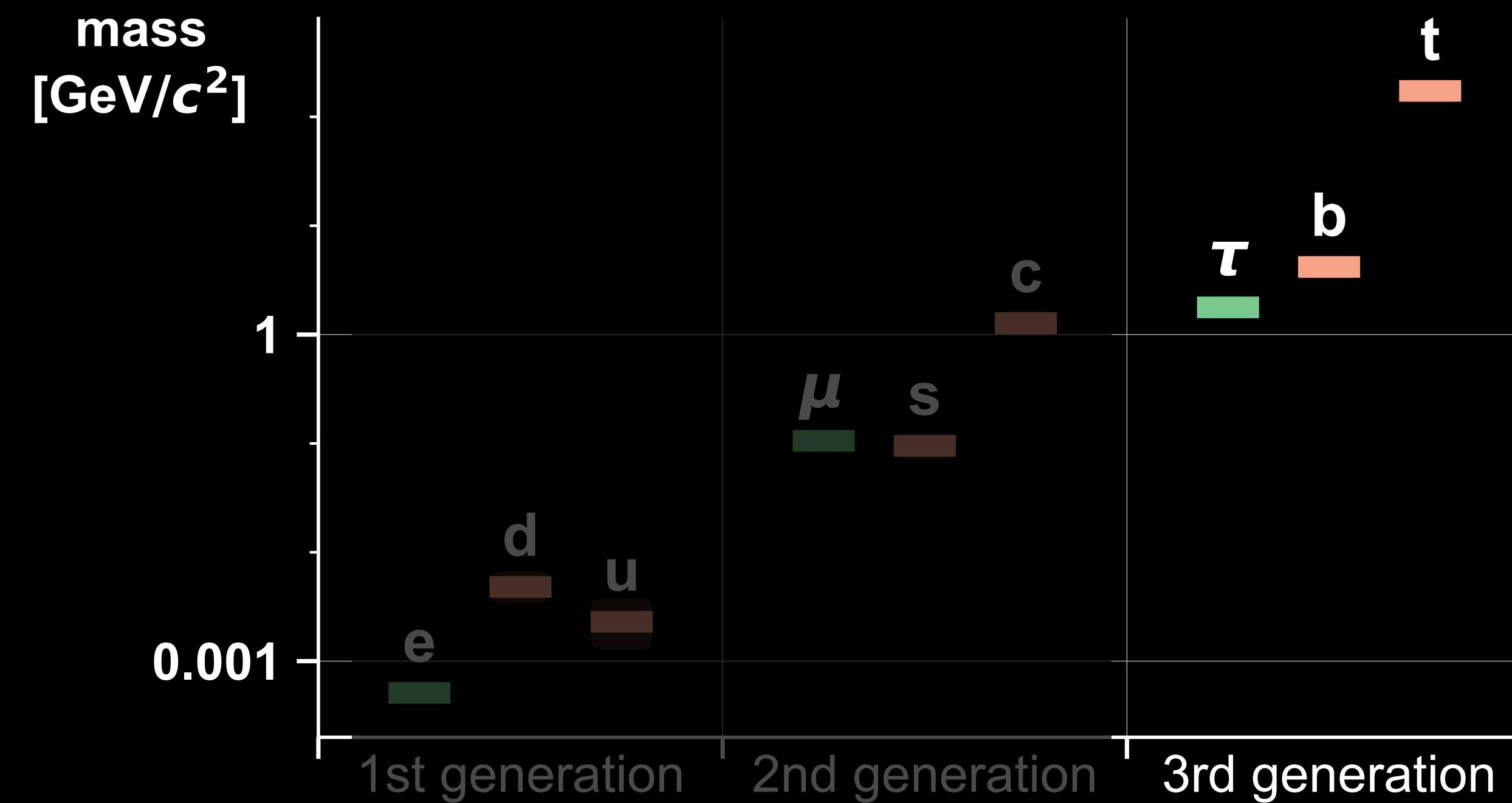
depuis 2018: ATLAS & CMS observent ($>5\sigma$) des évènements avec simultanément des quarks top & un Higgs



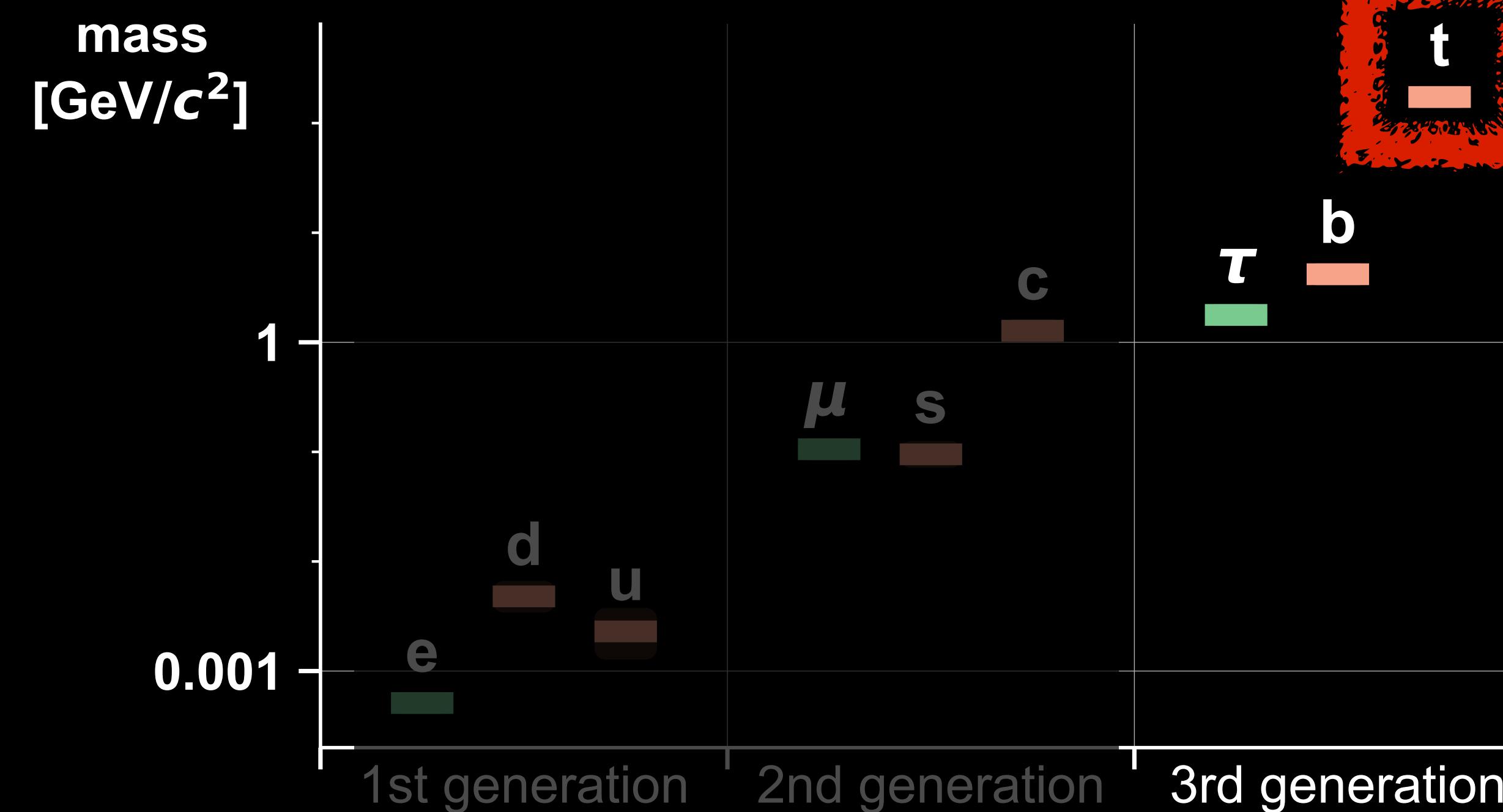
mass → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	charge → $2/3$	spin → $1/2$	quarks
u	c	t	
up	charm	top	
d	s	b	
down	strange	bottom	
mass → $0.511 \text{ MeV}/c^2$	charge → -1	spin → $1/2$	leptons
e	μ	τ	
electron	muon	tau	

fraction accrue de Higgs dans les évènements avec quarks top
→ observation directe de l'interaction Higgs-top
(consistant avec le MS au niveau $\pm 25\%$)

Découverte des interactions 3^e génération–Higgs par ATLAS & CMS ~ 2018

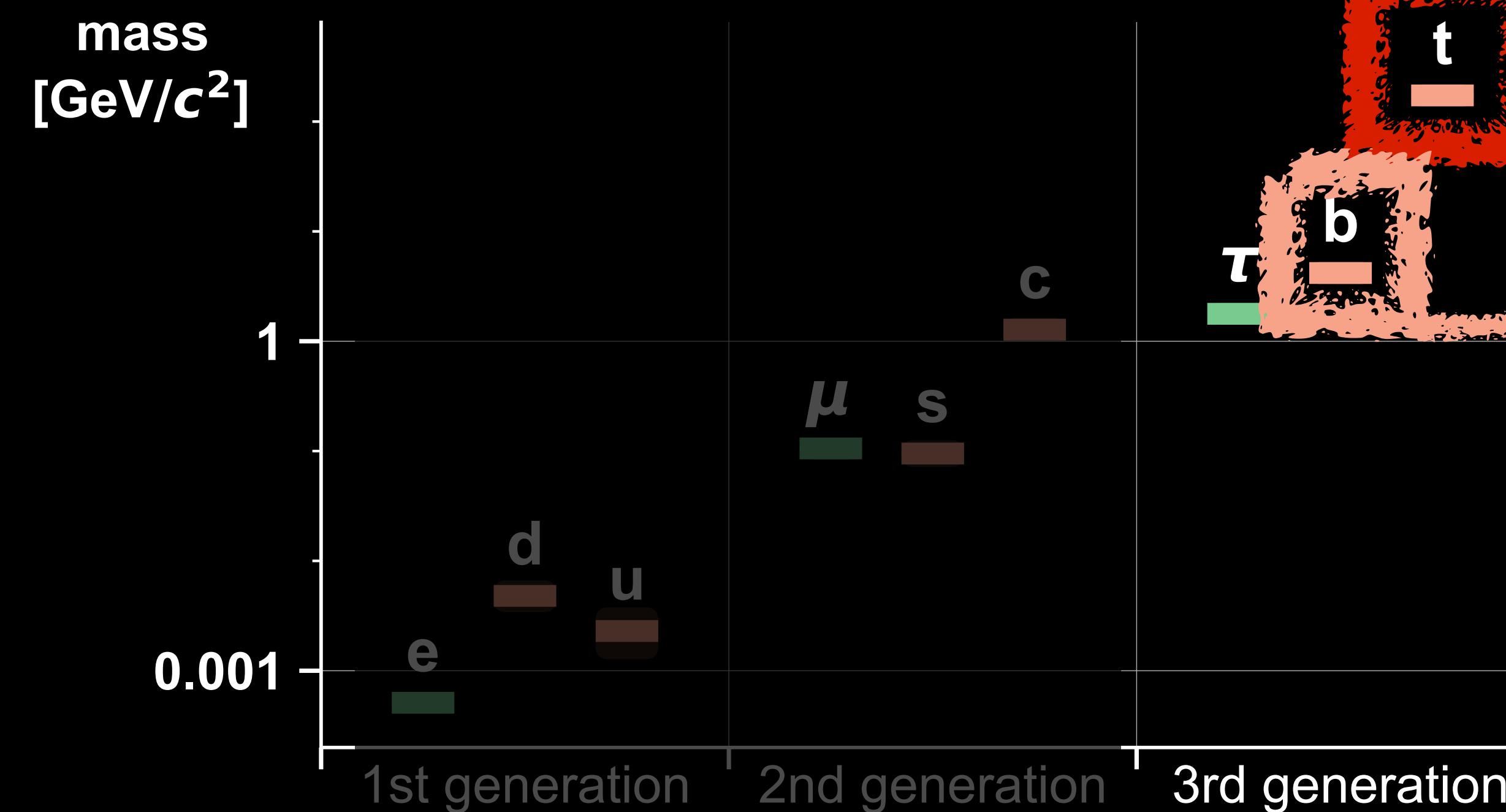


Découverte des interactions 3^e génération–Higgs par ATLAS & CMS ~ 2018



observation H en association
avec des quarks top

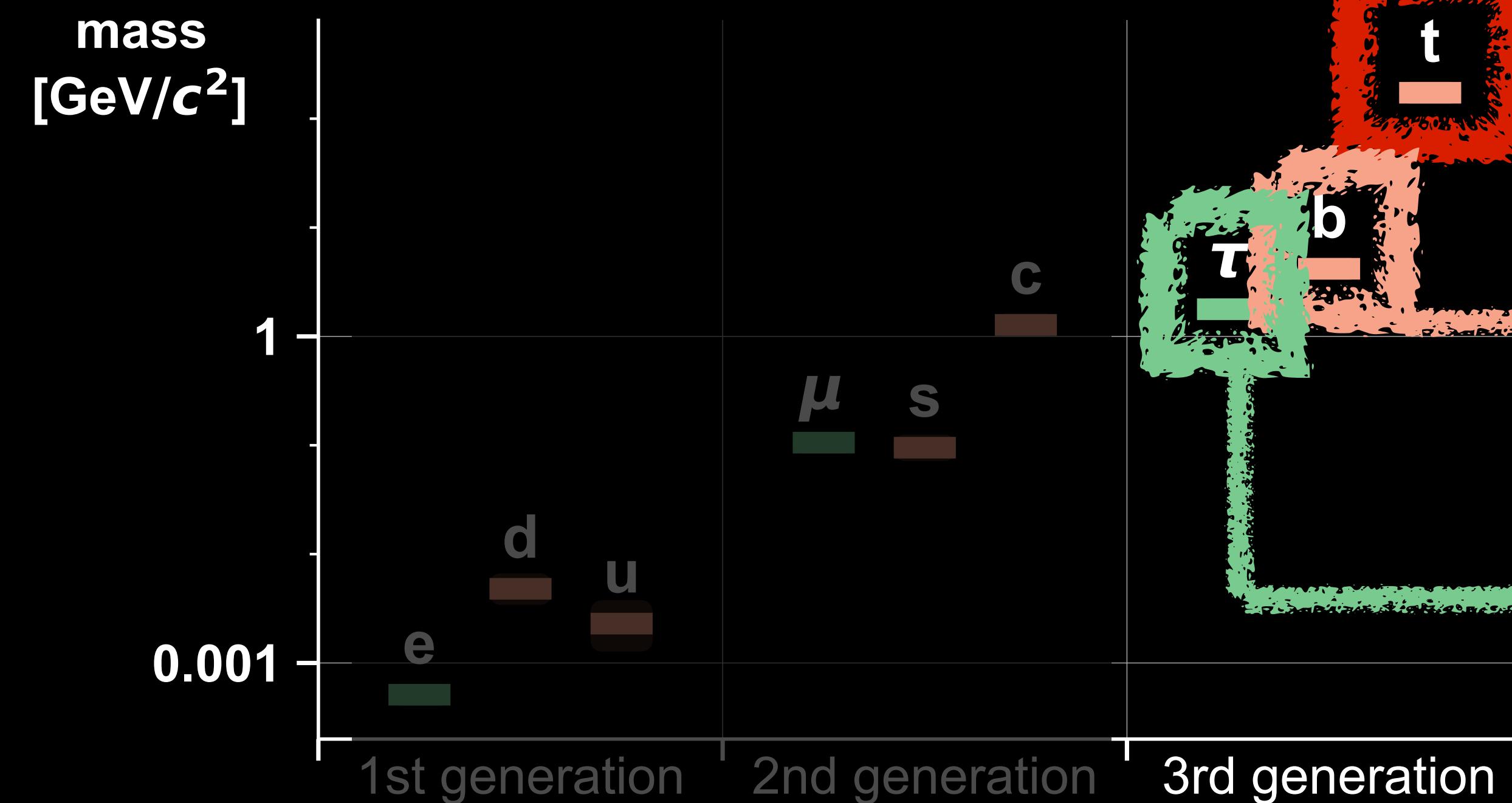
Découverte des interactions 3^e génération–Higgs par ATLAS & CMS ~ 2018



observation H en association
avec des quarks top

observation $H \rightarrow b\bar{b}$

Découverte des interactions 3^e génération–Higgs par ATLAS & CMS ~ 2018

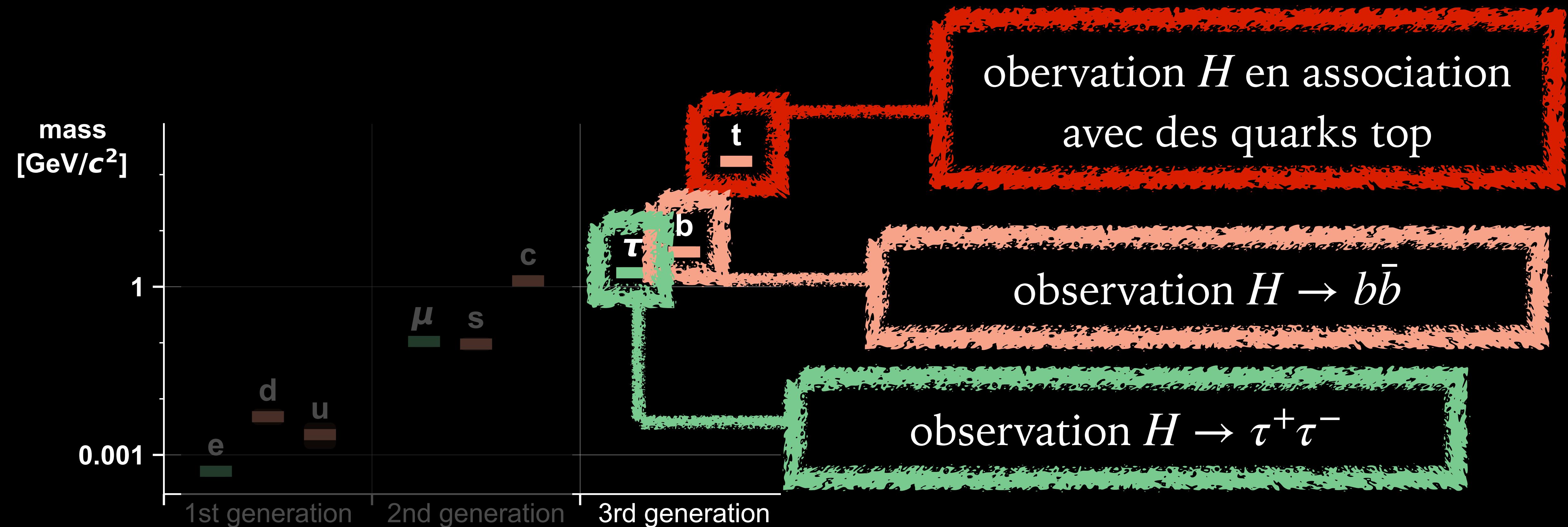


observation H en association
avec des quarks top

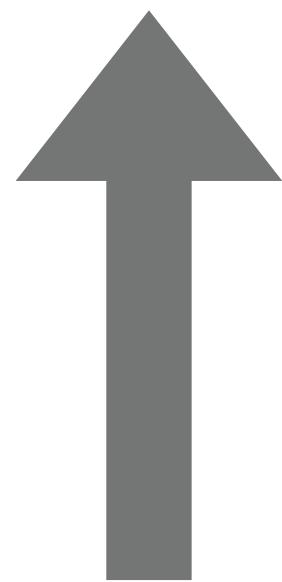
observation $H \rightarrow b\bar{b}$

observation $H \rightarrow \tau^+\tau^-$

Découverte des interactions 3^e génération–Higgs par ATLAS & CMS ~ 2018



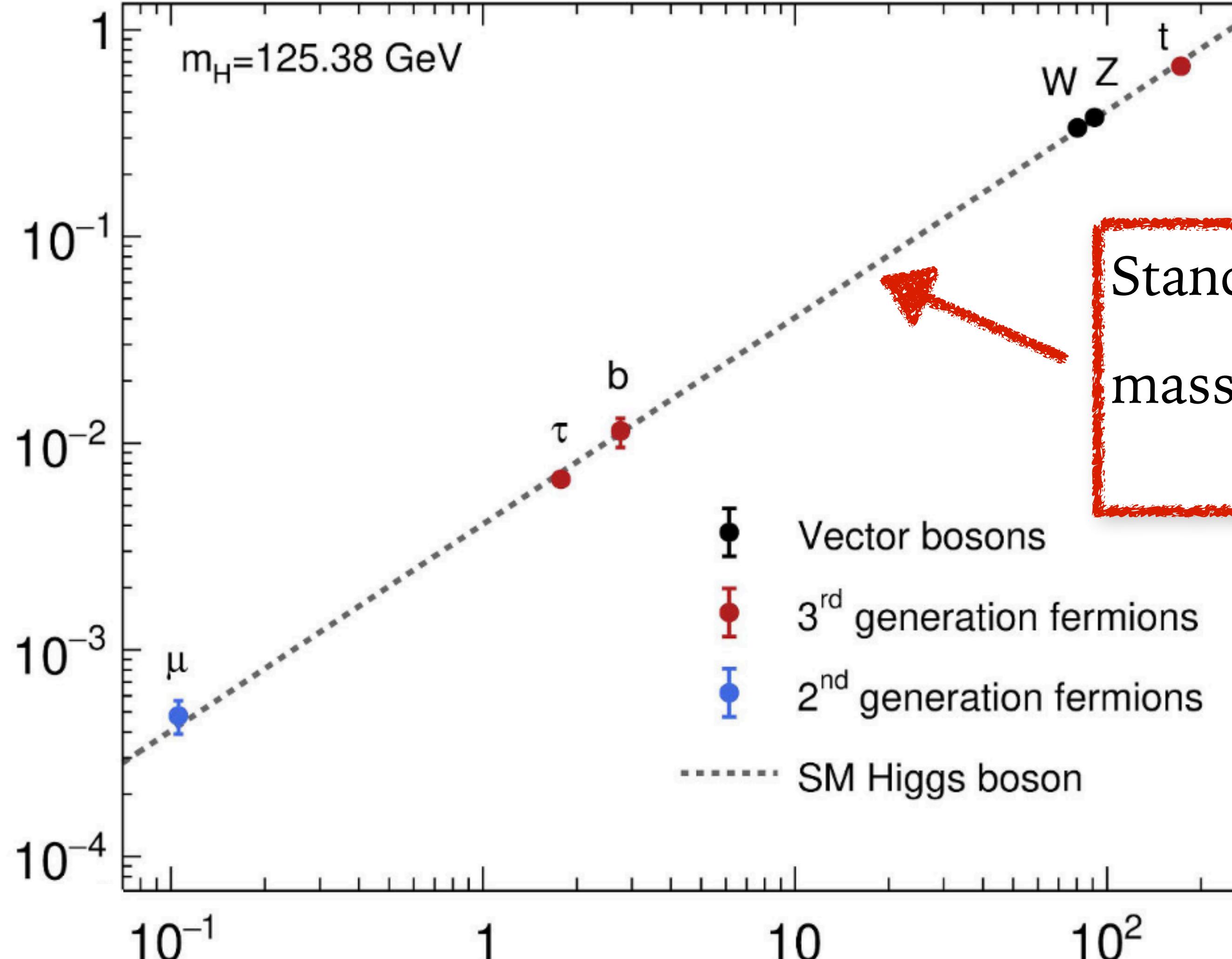
Les couplages de Yukawa de la 3^e génération n'étaient pas prévus dans la conception du LHC. Un exploit majeur de les avoir observés directement !



Particle's
strength of
interaction
with Higgs
field

CMS

138 fb^{-1} (13 TeV)



Standard Model prediction:
mass = higgs-field-value
× interaction-strength

Particle's mass
[GeV]

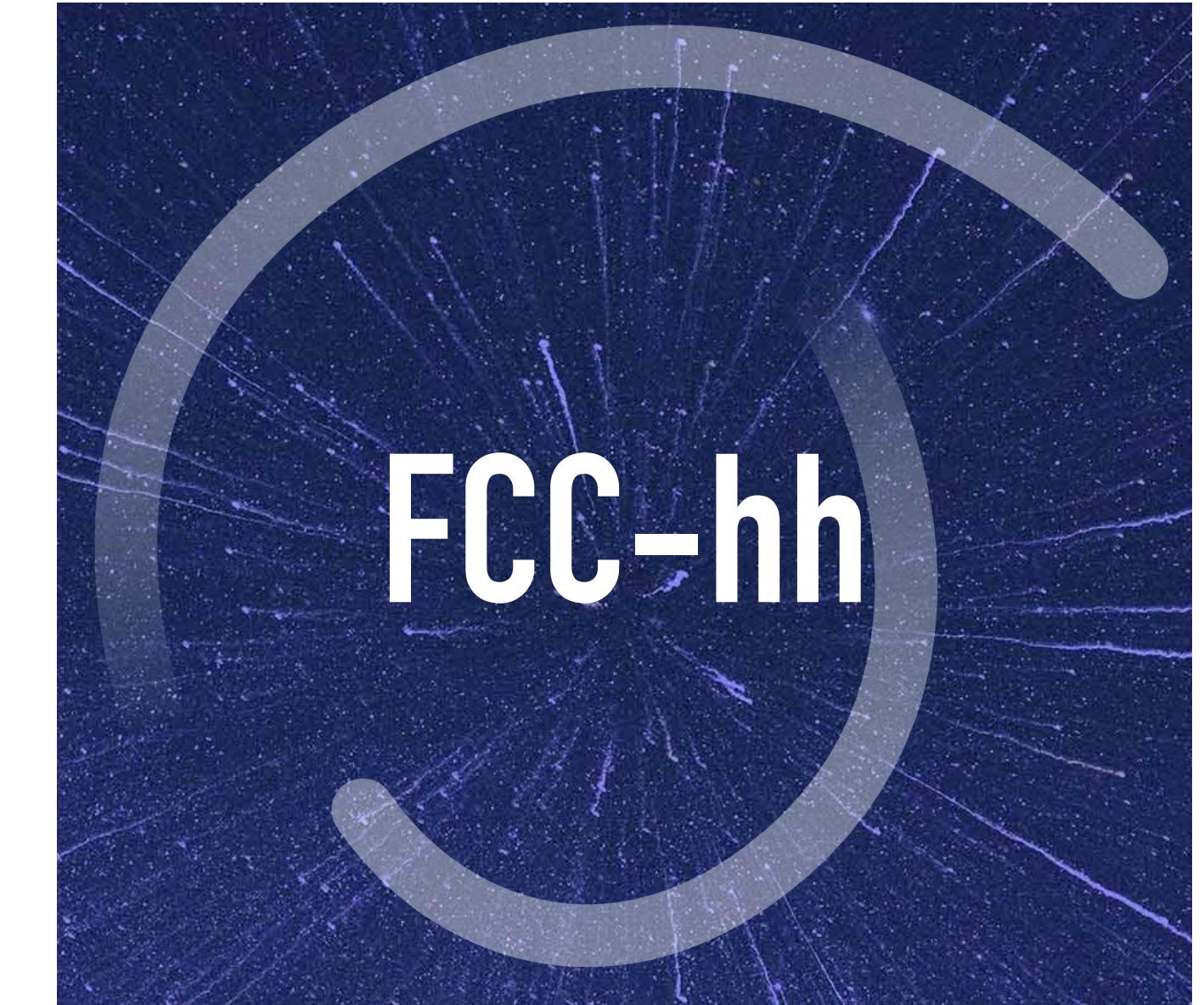
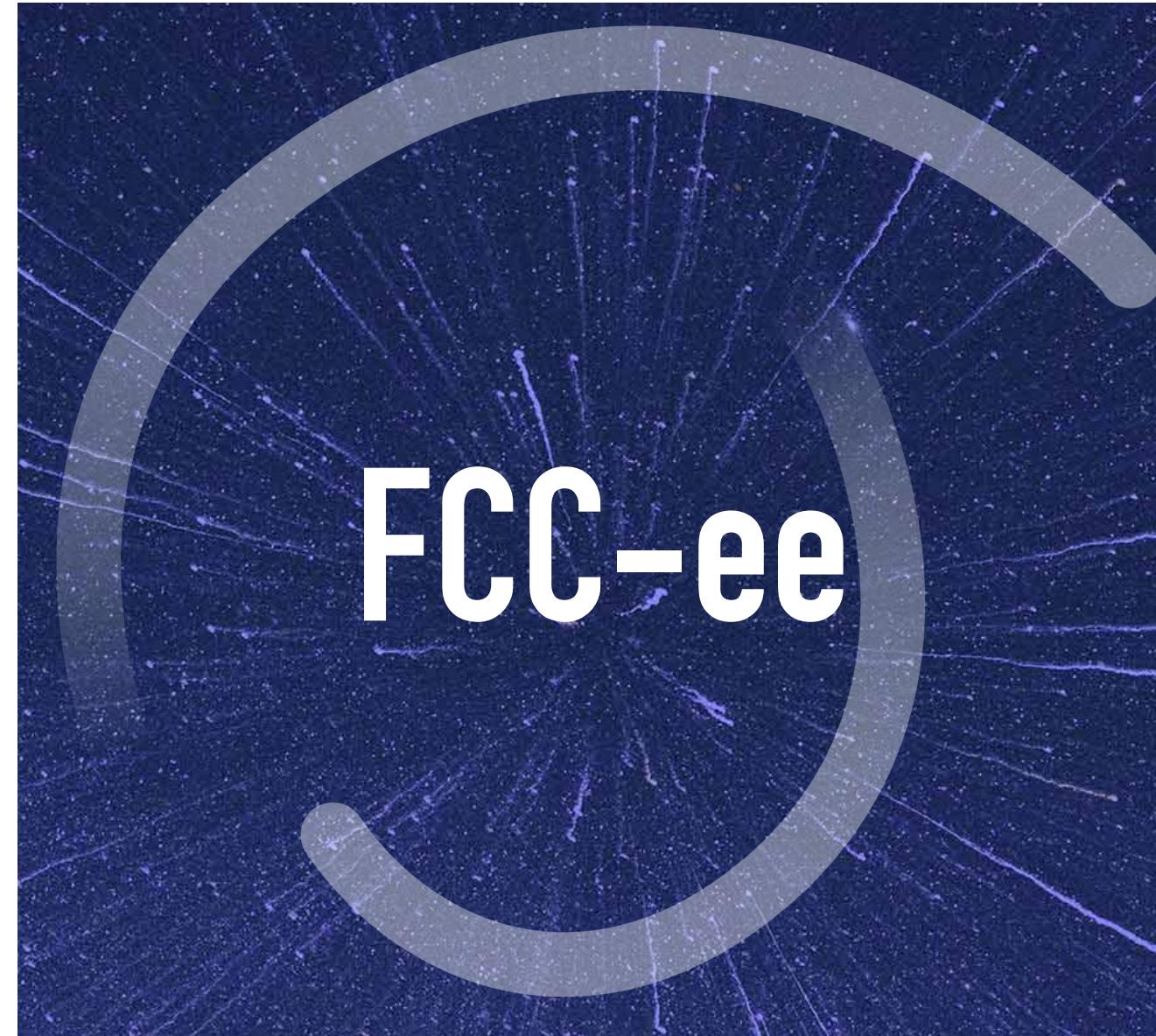
quelle est l'importance de cette découverte ?

Pour une série entière de particules (3^{ème} génération), comme celles dont nous sommes composés, le LHC a démontré que leur masse n'est pas une propriété intrinsèque, mais plutôt le résultat d'une interaction avec un champ de Higgs $\neq 0$.

Un champ peut en principe être modifié. Ainsi les masses des particules pourraient, en principe, être modifiés

Est-ce moins important que la découverte du boson de Higgs ?
À mon avis : non

“Après Newton et Einstein, les expériences du LHC établissent un nouveau concept de masse” [E. Laenen]



2029–2041

proton–proton
14,000 GeV energy
10× more collisions
than LHC

2045–2060(c.)

electron–positron
91–365 GeV energy
300,000× more
collisions than LEP

[or CEPC@China,
ILC, CLIC]

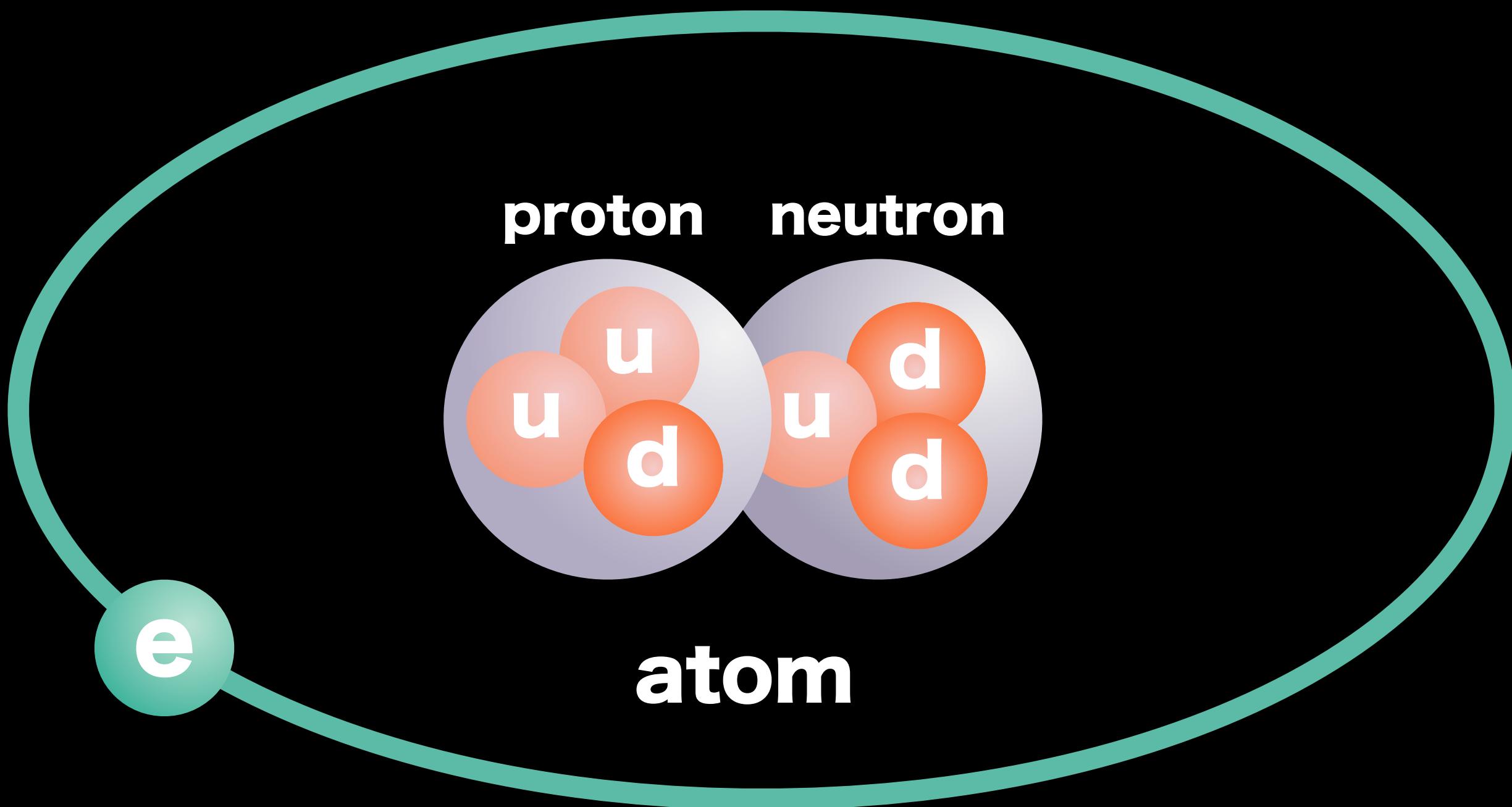
2070–2090(c.)

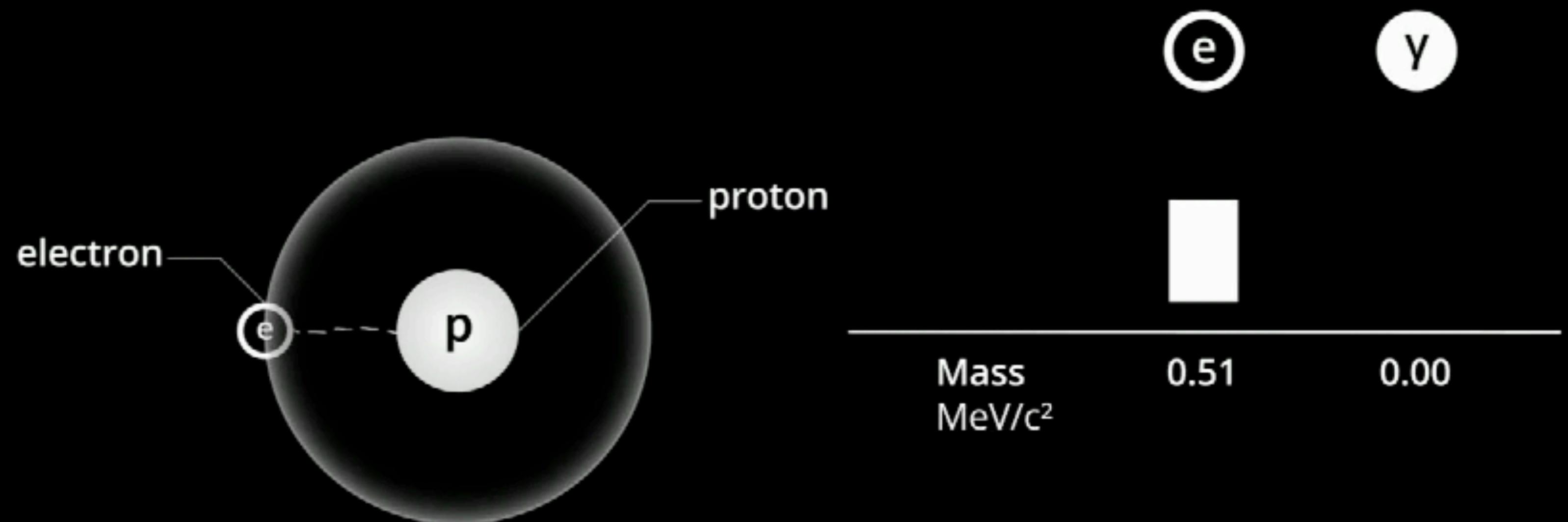
proton–proton
~100,000 TeV energy
10× more collisions
than HL-LHC

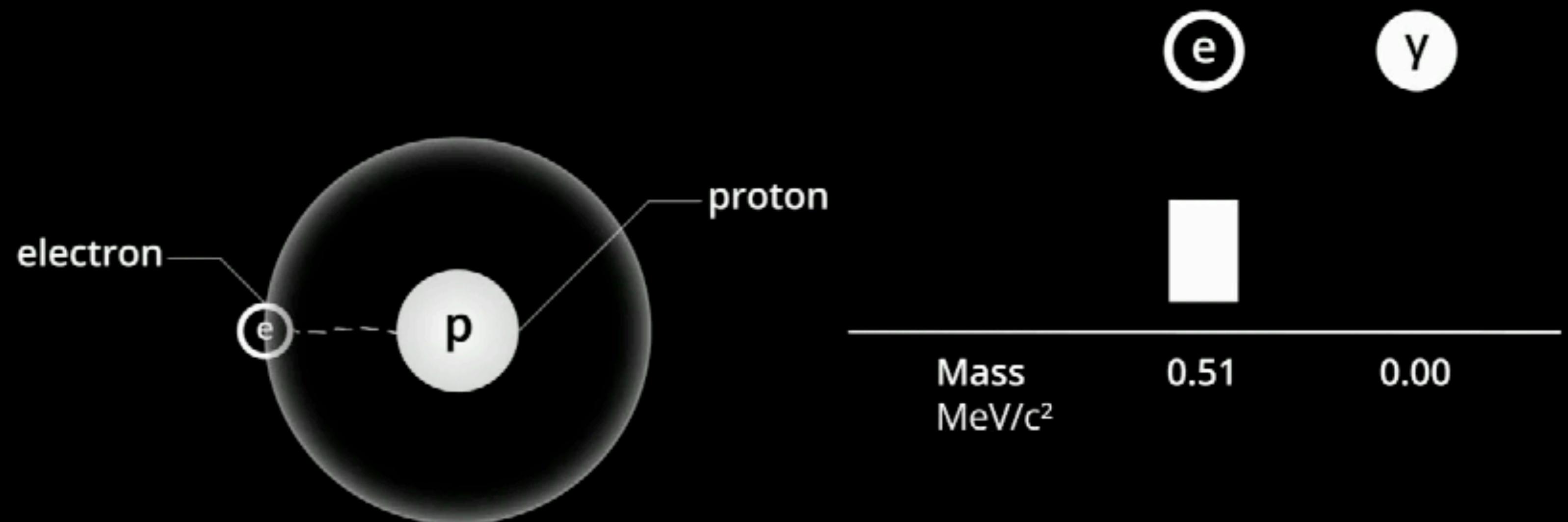
or SppS@China
or muon collider

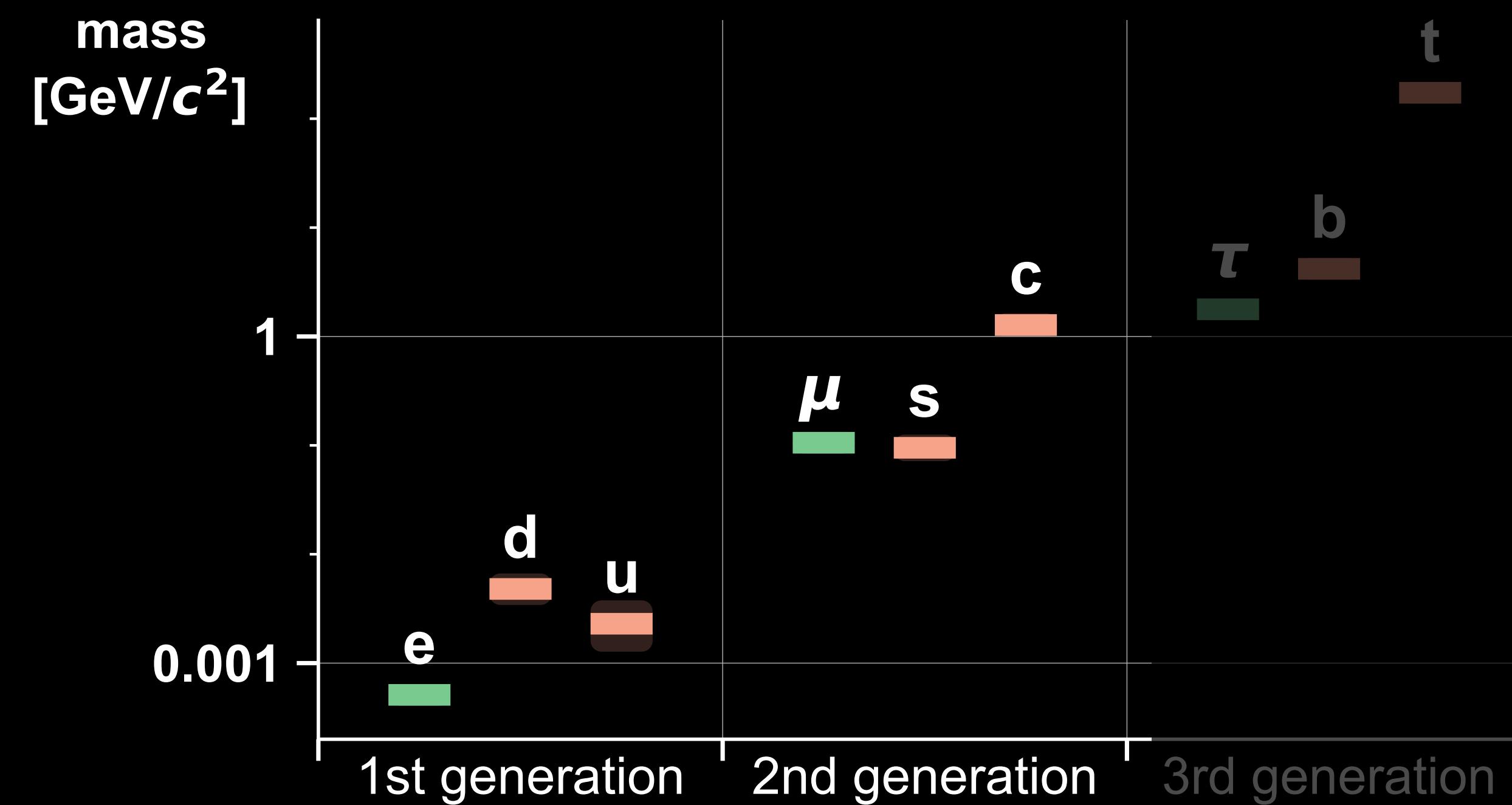
NB: la grande majorité de la masse des protons et neutrons vient d'autres sources

Les particules fondamentales dont sont composés les atomes



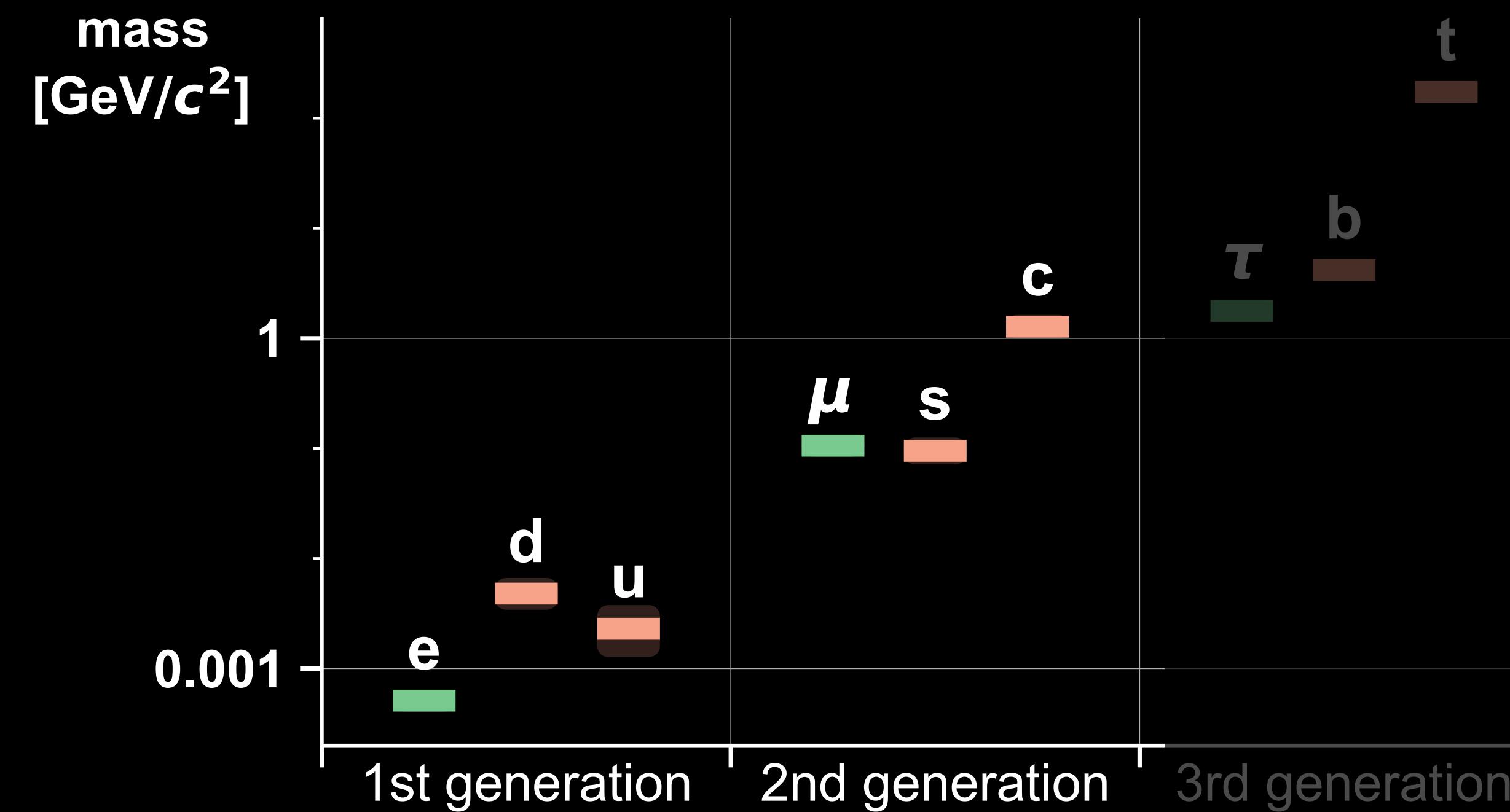




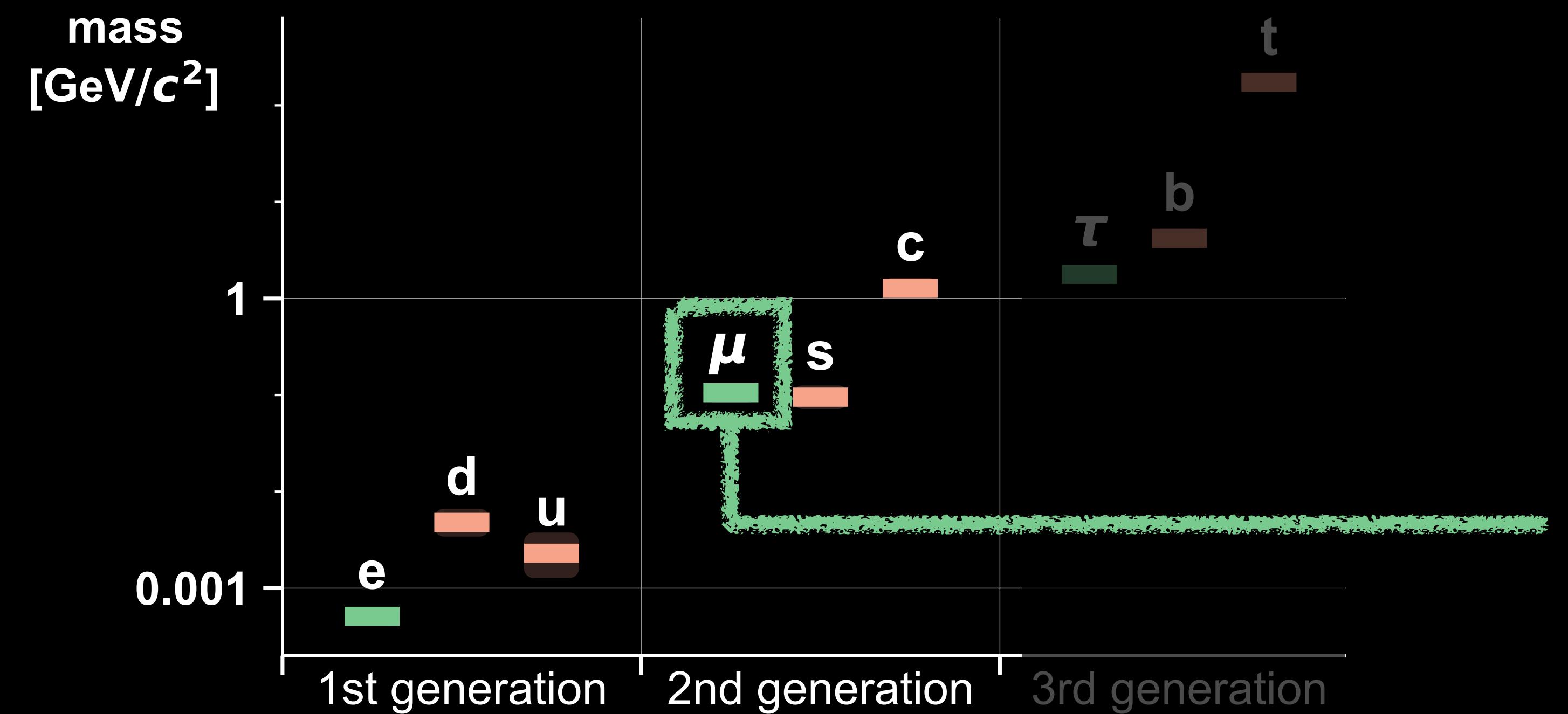


est-ce que TOUTES les particules obtiennent leur masse de la même façon ?

L'hypothèse du MS : plus une particule est légère, moins elle interagit avec le champ de Higgs
→ il est plus difficile d'établir si sa masse vient effectivement (et à 100%) de ces interactions



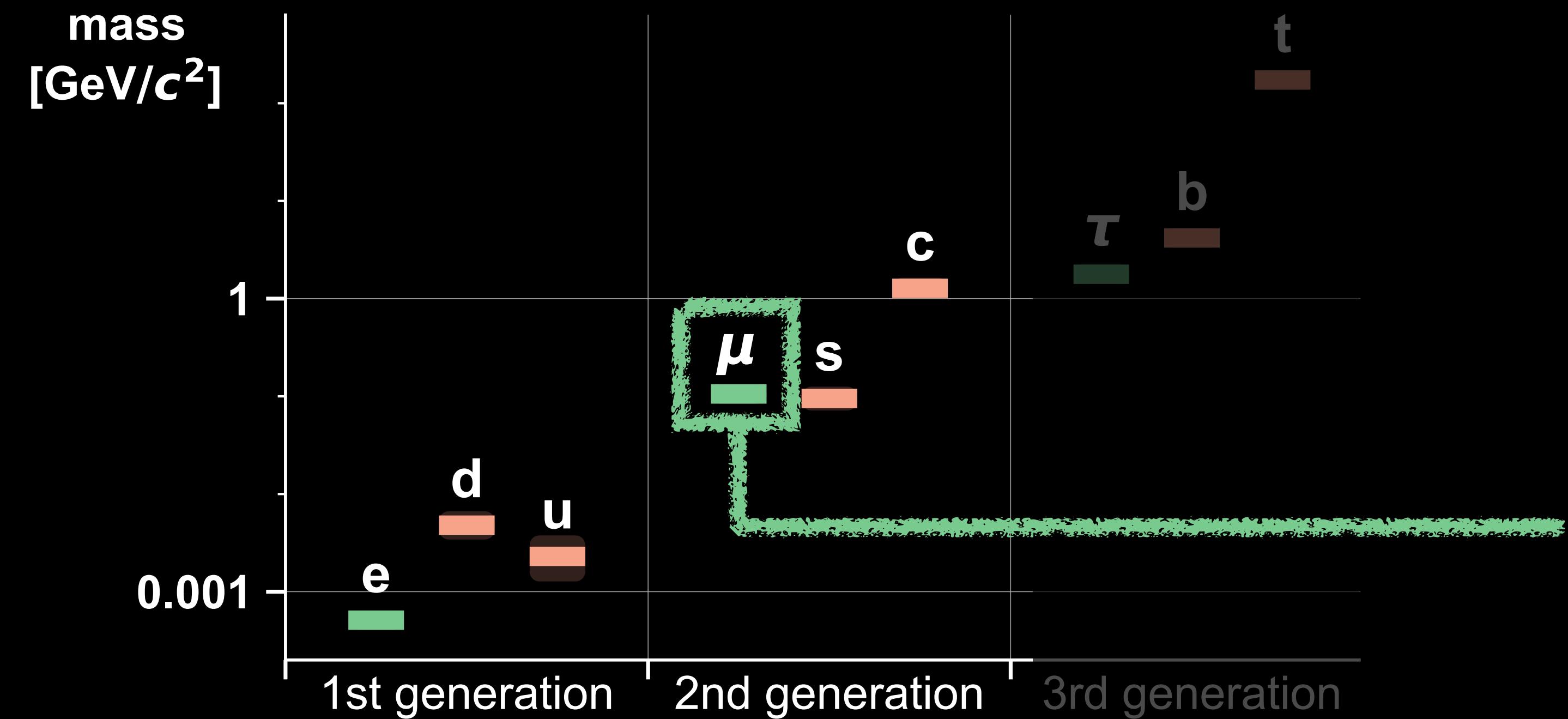
est-ce que TOUTES les particules obtiennent leur masse de la même façon ?



un principal objectif des prochaines années du LHC (Run-3 ou HL-LHC) sera d'établir, pour la première fois, si une particule de la 2^e génération obtient sa masse de la même façon

[ATLAS/CMS ont de premières indications, mais pas encore 5 σ]

L'hypothèse du MS : plus une particule est légère, moins elle interagit avec le champ de Higgs
→ il est plus difficile d'établir si sa masse vient effectivement (et à 100%) de ces interactions

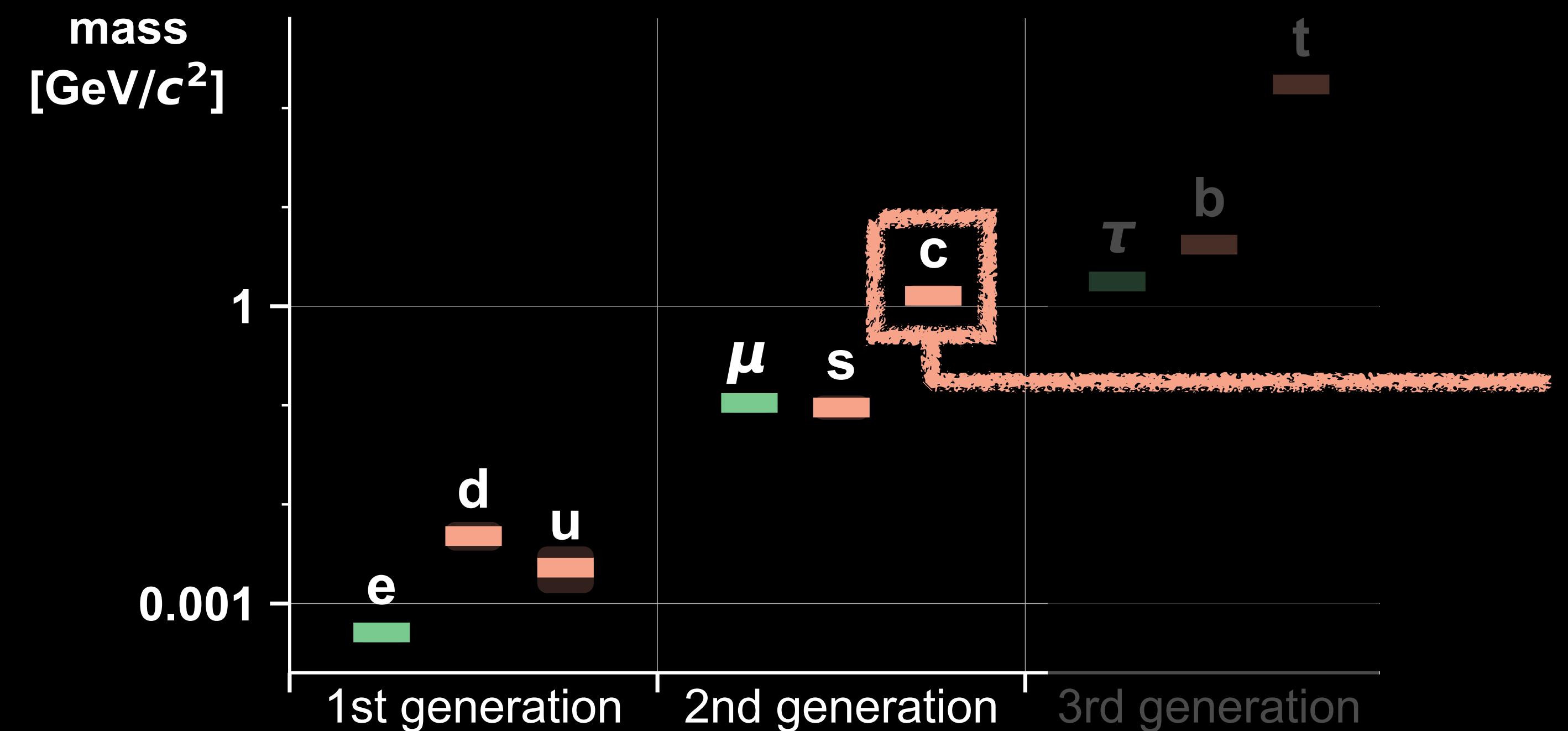


un principal objectif des prochaines années du LHC (Run-3 ou HL-LHC) sera d'établir, pour la première fois, si une particule de la 2^e génération obtient sa masse de la même façon

[ATLAS/CMS ont de premières indications, mais pas encore 5 σ]

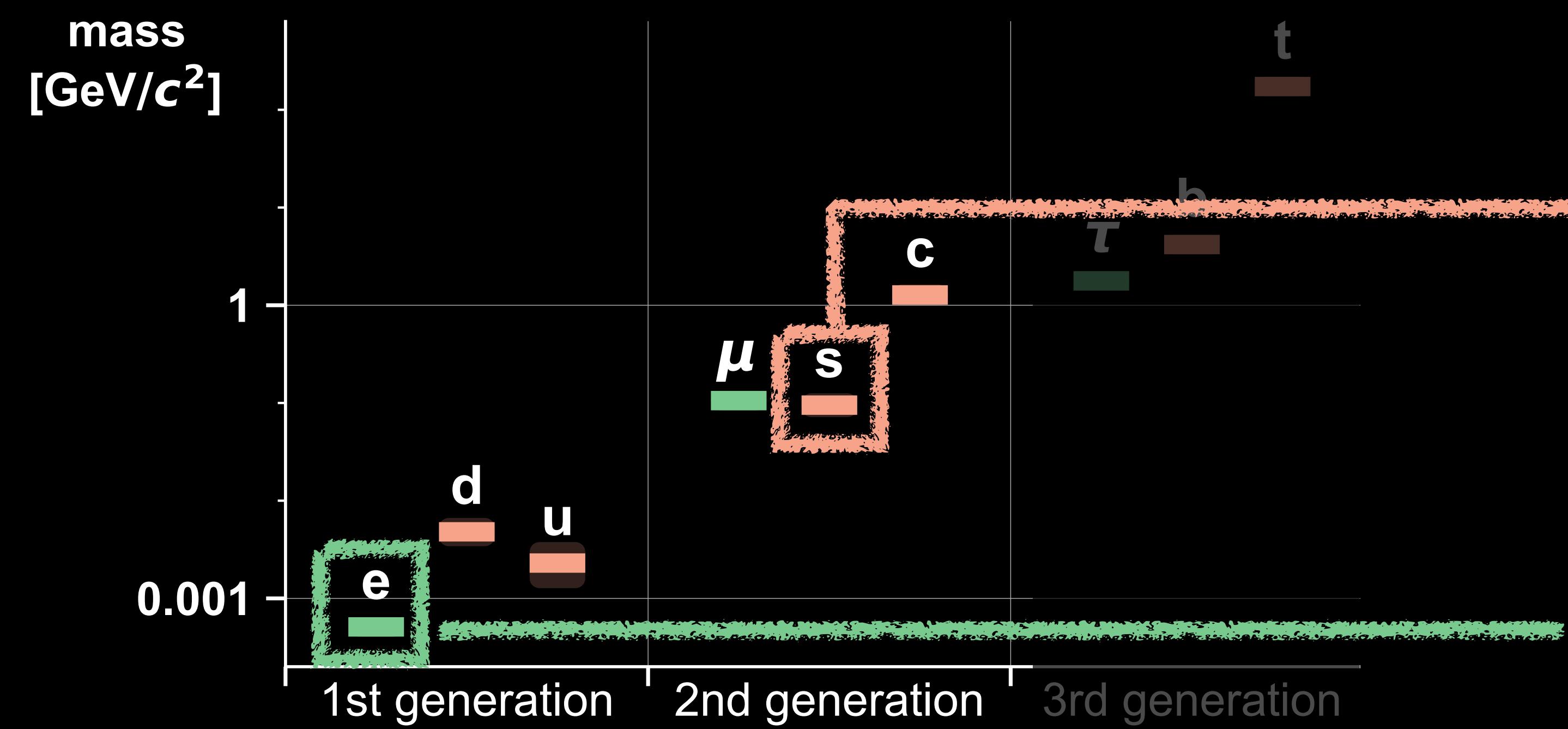
Qu'en est-il du FCC-ee?

pour les quarks et autres particules encore plus légères, c'est bien plus difficile



un futur collisionneur e^+e^- établirait si les quarks charm obtiennent leur masse par les interactions avec le champ de Higgs

Qu'en est-il du FCC-ee?



L'étude du FCC-ee montre que les couplages de Yukawa du quark strange et de l'électron sont à peine au-delà de ce qui est accessible.

La découverte de l'origine de la masse de l'électron serait un exploit énorme

atouts pour un futur grand projet en physique des particules

un objectif important à atteindre ~ découverte garantie

élargissement de l'exploration par un facteur significatif en énergie

progrès majeurs sur une gamme de sujets en physique des particules

probabilité de succès, robustesse (ex : plusieurs expériences)

bon rapport coûts/physique pour la construction et l'exploitation,
empreinte carbone limitée, nouvelles technologies

atouts pour un futur grand projet en physique des particules

un objectif important à atteindre ~ découverte garantie

?

élargissement de l'exploration par un facteur significatif en énergie

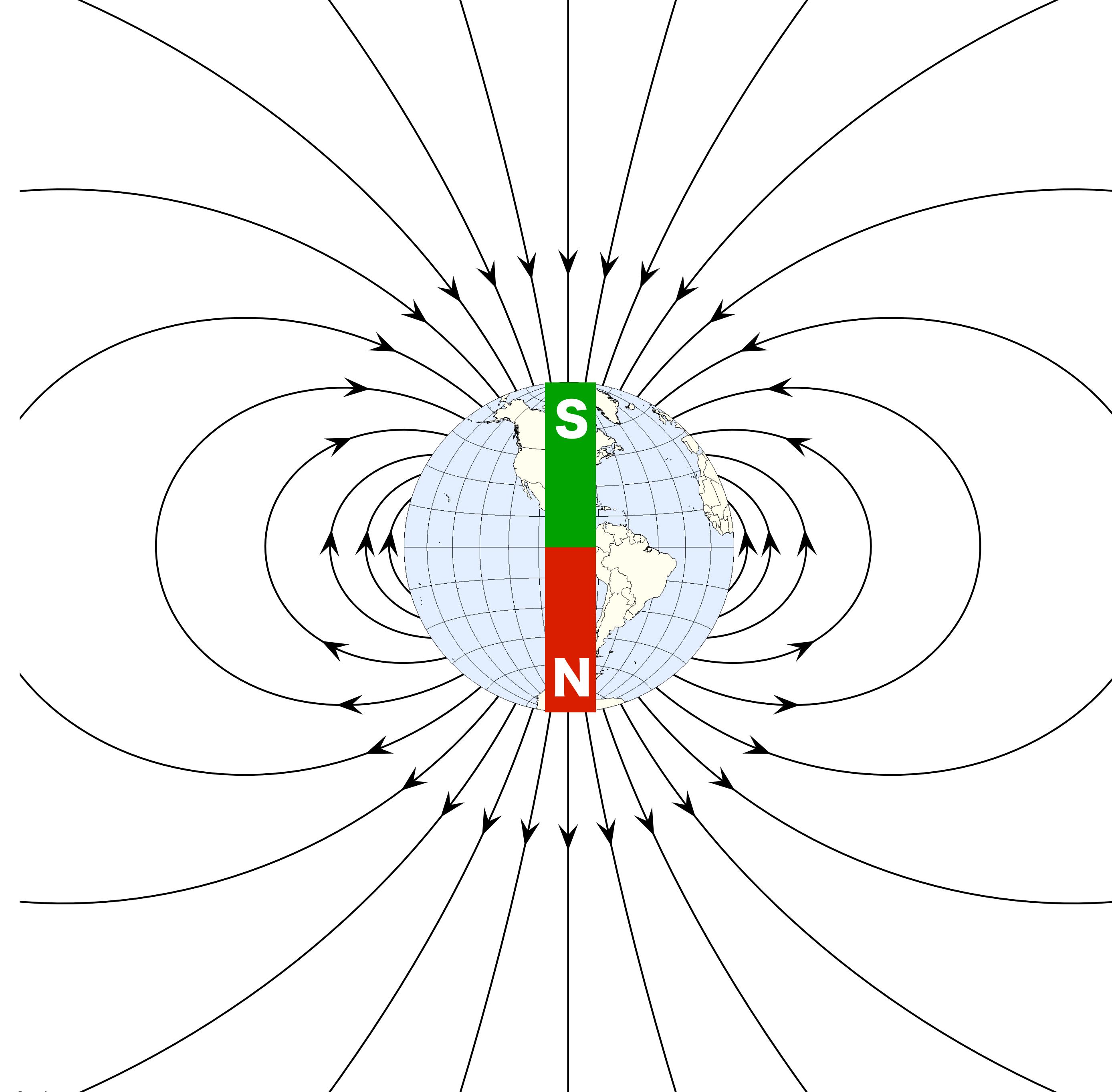
progrès majeurs sur une gamme de sujets en physique des particules

probabilité de succès, robustesse (ex : plusieurs expériences)

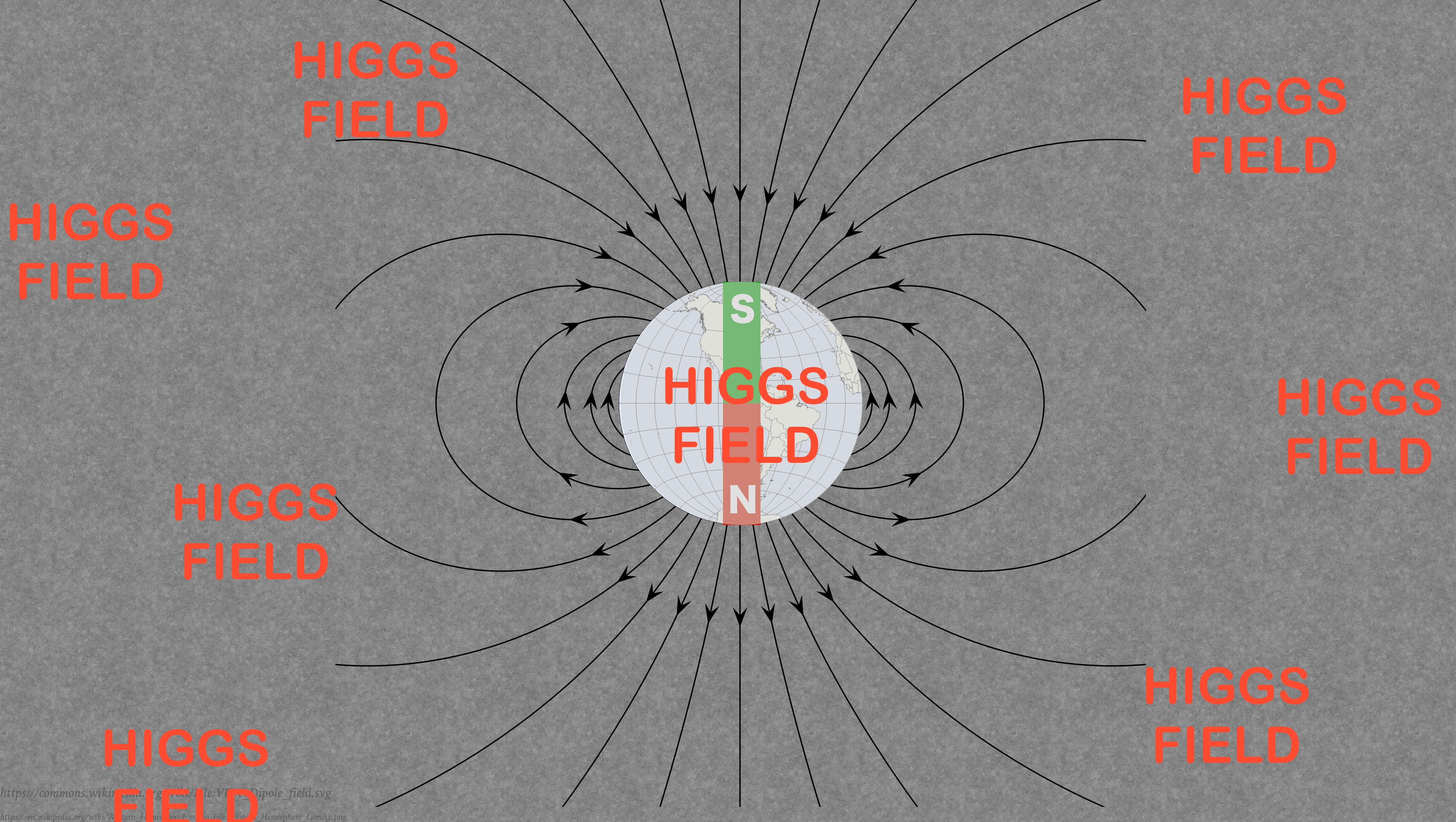
bon rapport coûts/physique pour la construction et l'exploitation,
empreinte carbone limitée, nouvelles technologies

les particules fondamentales
n'obtiennent une masse que si le
champ de Higgs a une valeur non-nulle

Pourquoi serait-ce le cas ?

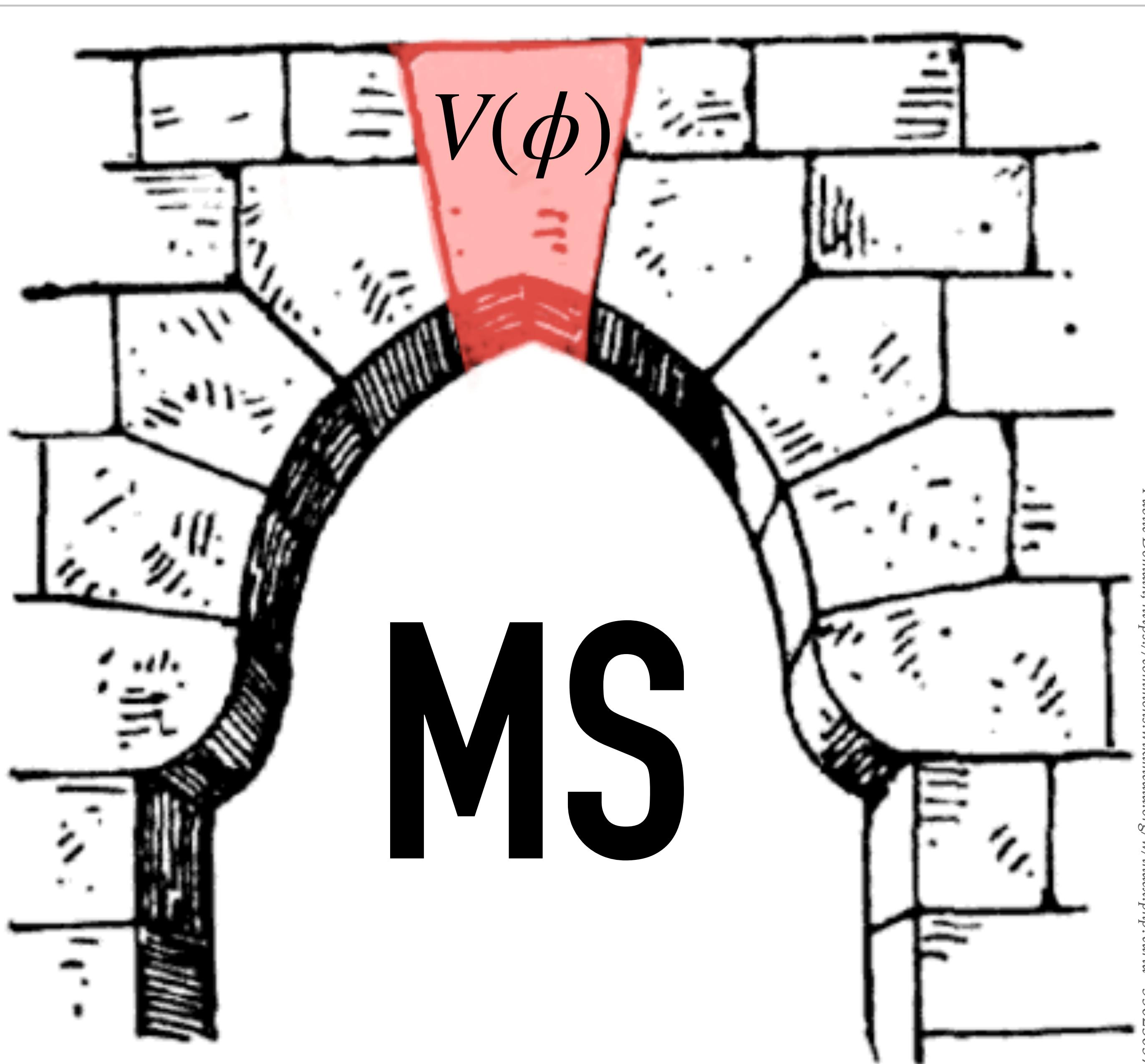


https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFPt_Dipole_field.svg
https://en.wikipedia.org/wiki/Western_Hemisphere#/media/File:Western_Hemisphere_LamAz.png



https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:VTPR_Dipole_field.svg

https://en.wikipedia.org/wiki/Werner_Herzen#/media/File:Western_Hemisphere_LamAz.png



parmi tous les champs que nous connaissons, le champ de Higgs est unique: le seul à être non-nul au niveau “classique”

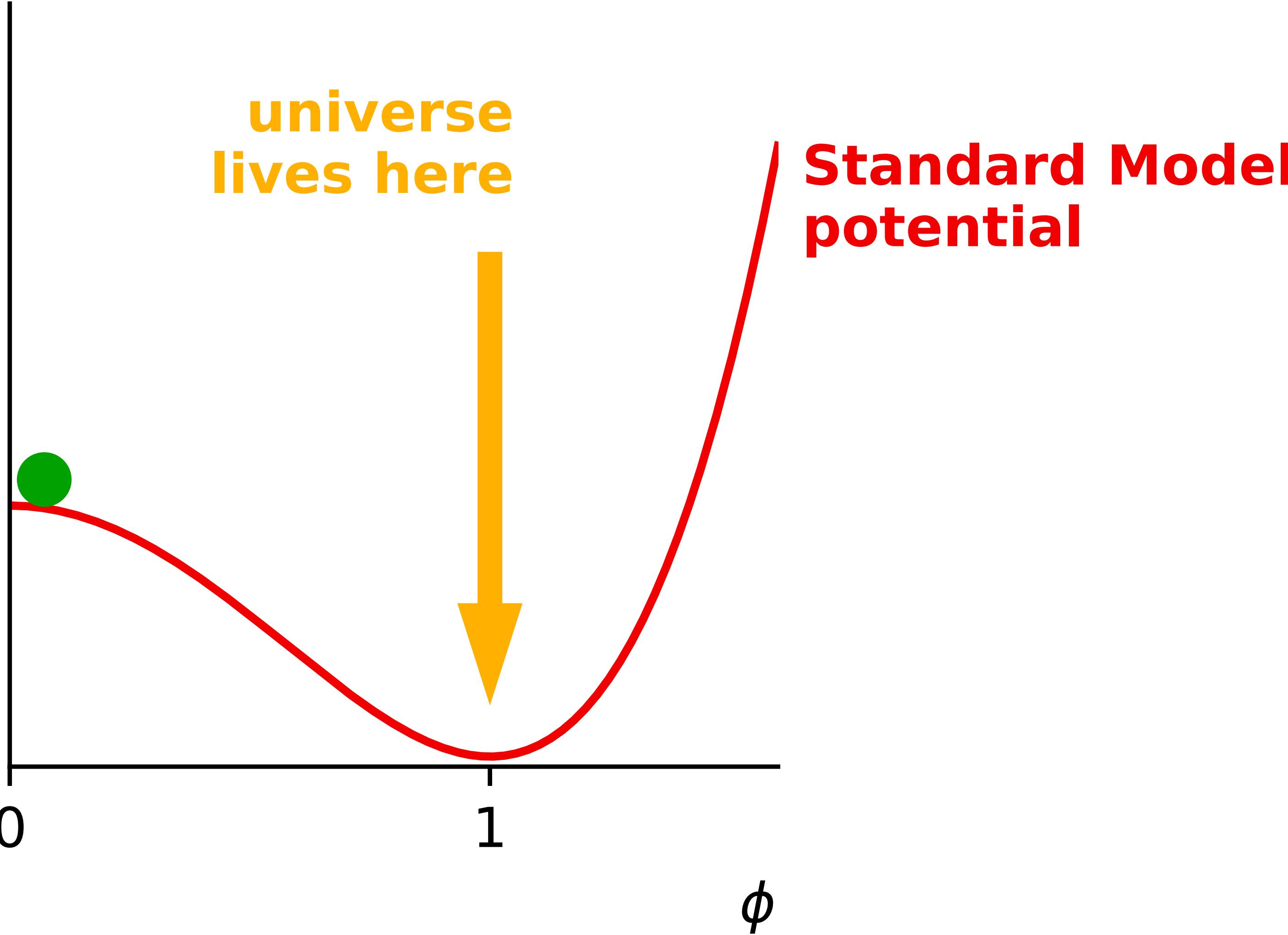
Pourquoi?
Potential de Higgs?

Clé de voûte du MS

Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=95023097>

Potentiel de Higgs

$V(\phi)$, SM

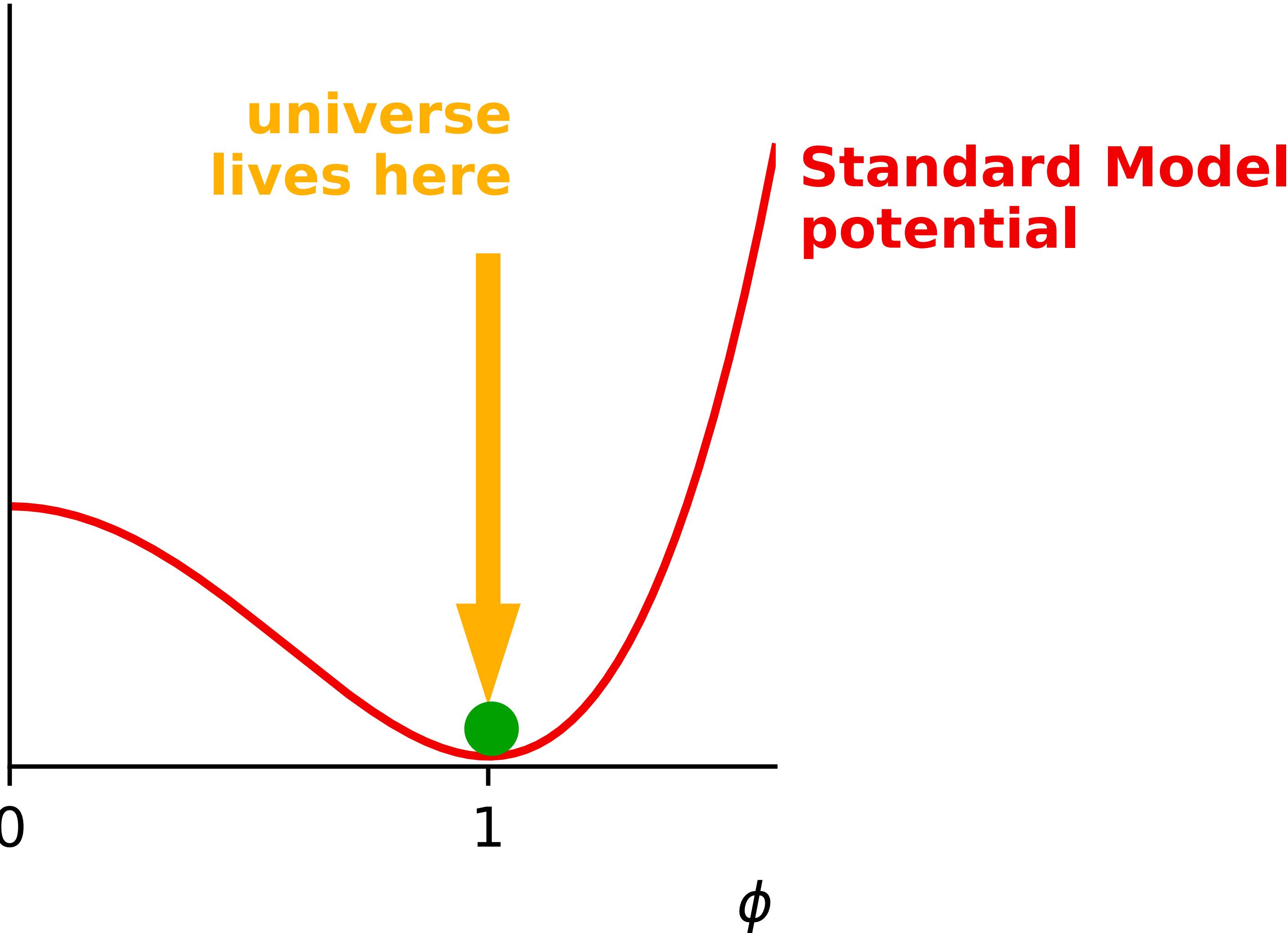


Le champ de Higgs serait non-nul parce que ça correspond au minimum de l'énergie potentielle

Le MS propose une forme très spécifique du potentiel en fonction de la valeur du champ de Higgs

Potentiel de Higgs

$V(\phi)$, SM

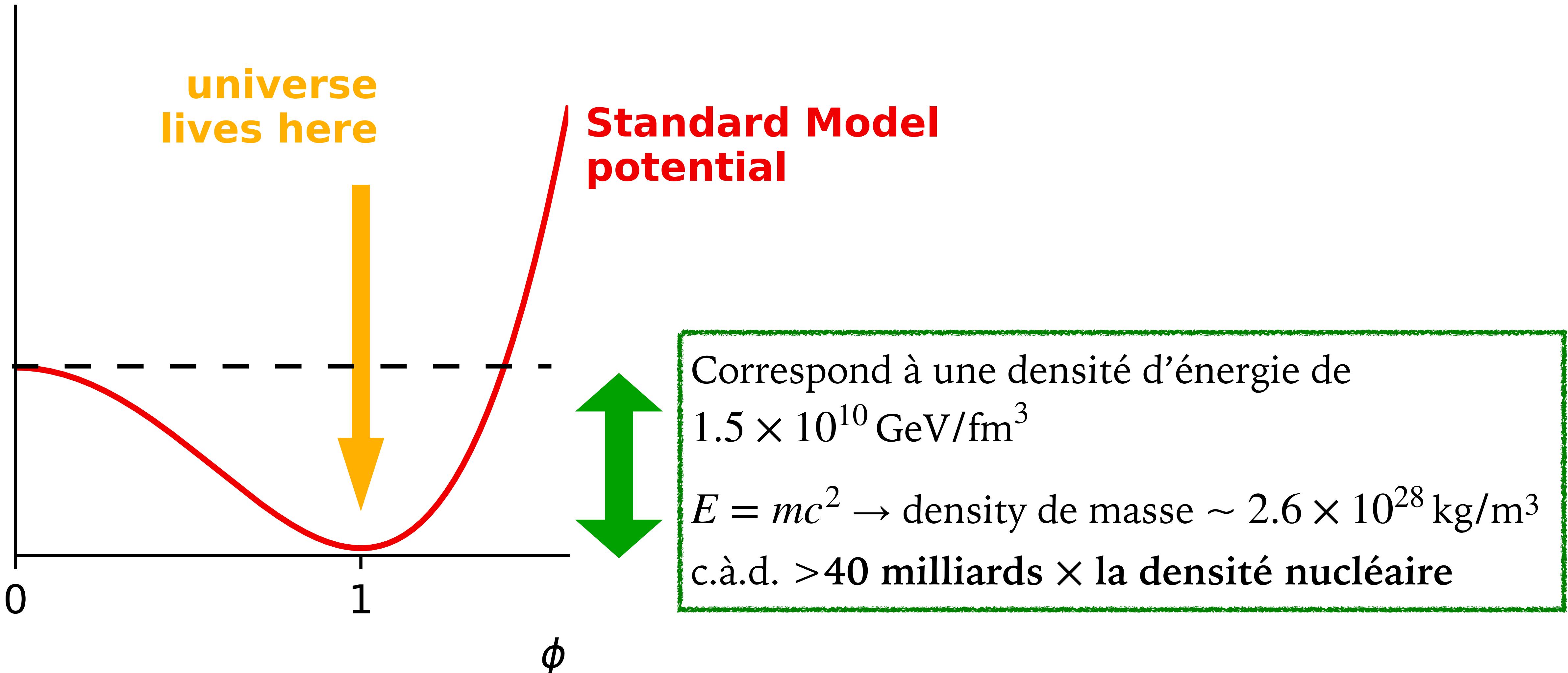


Le champ de Higgs serait non-nul parce que ça correspond au minimum de l'énergie potentielle

Le MS propose une forme très spécifique du potentiel en fonction de la valeur du champ de Higgs

Potentiel de Higgs – une densité d'énergie

$V(\phi)$, SM







Stade Charléty, Par Arne Müseler / www.arne-mueseler.com, CC BY-SA 3.0 de,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=124382137>

https://en.wikipedia.org/wiki/Old_fashioned_glass#/media/File:Old_Fashioned_Glass.jpg

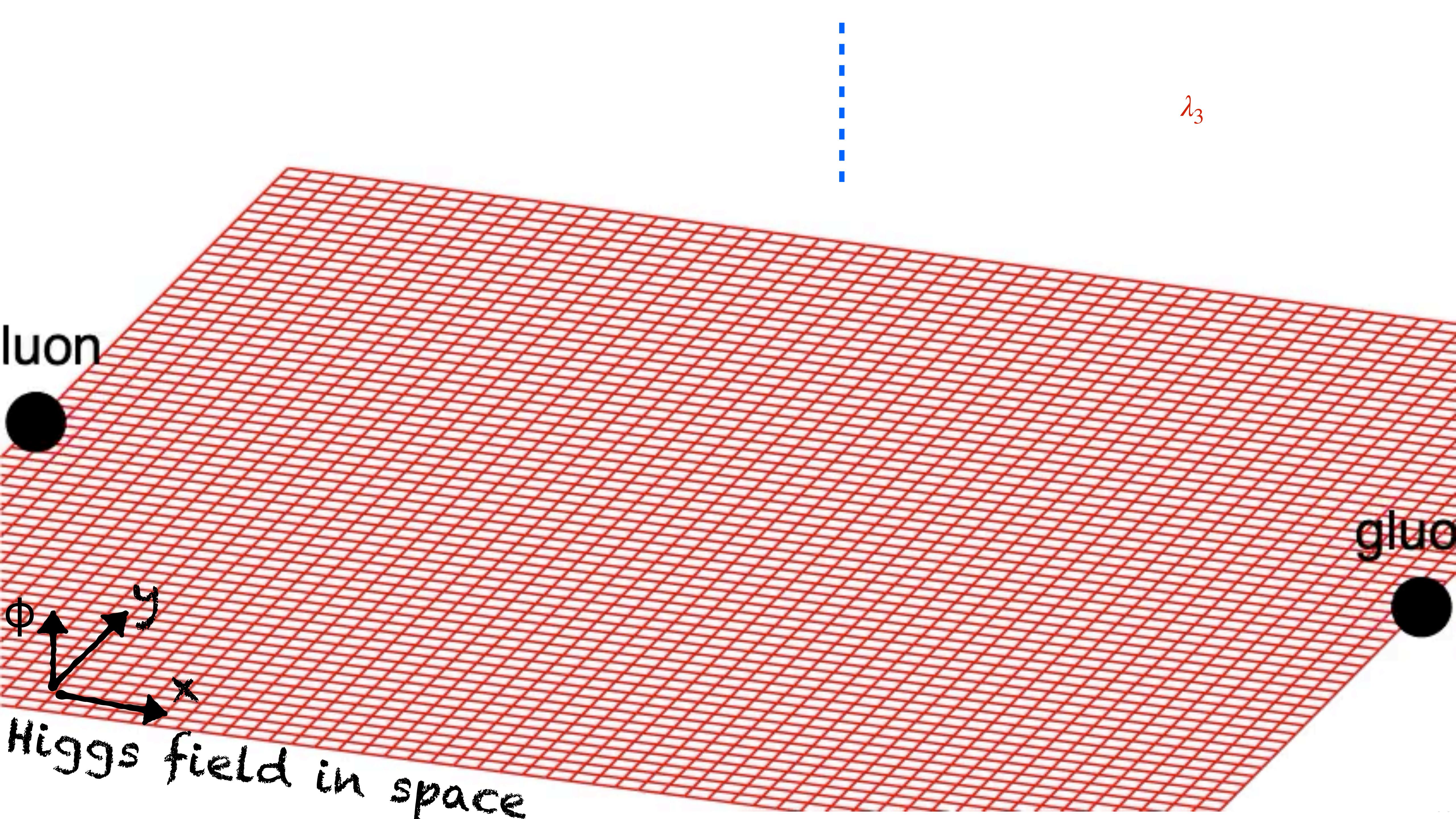
la terre, à la densité d'une
étoile de neutrons



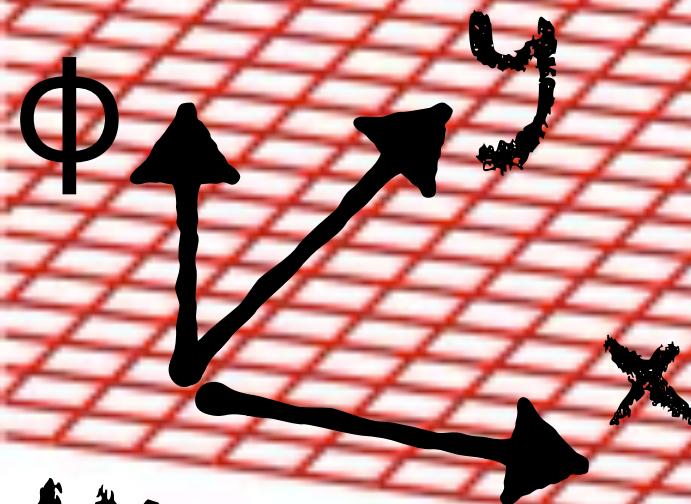
la terre, à la densité d'une
étoile de neutrons



la terre, à la densité du
potentiel de Higgs



luon



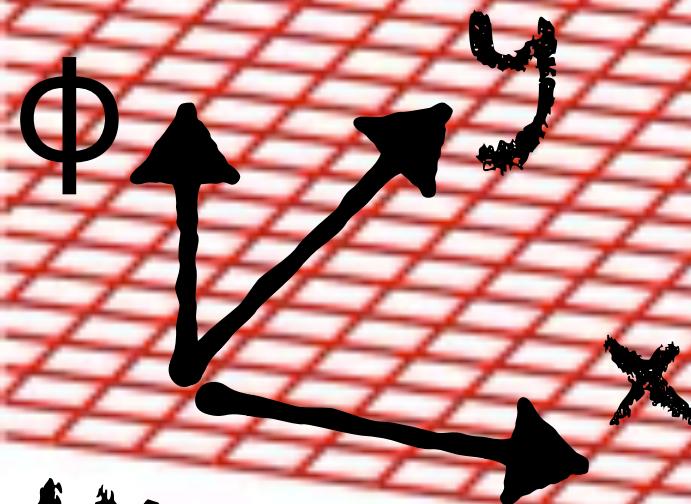
Higgs field in space

λ_3

gluo



luon



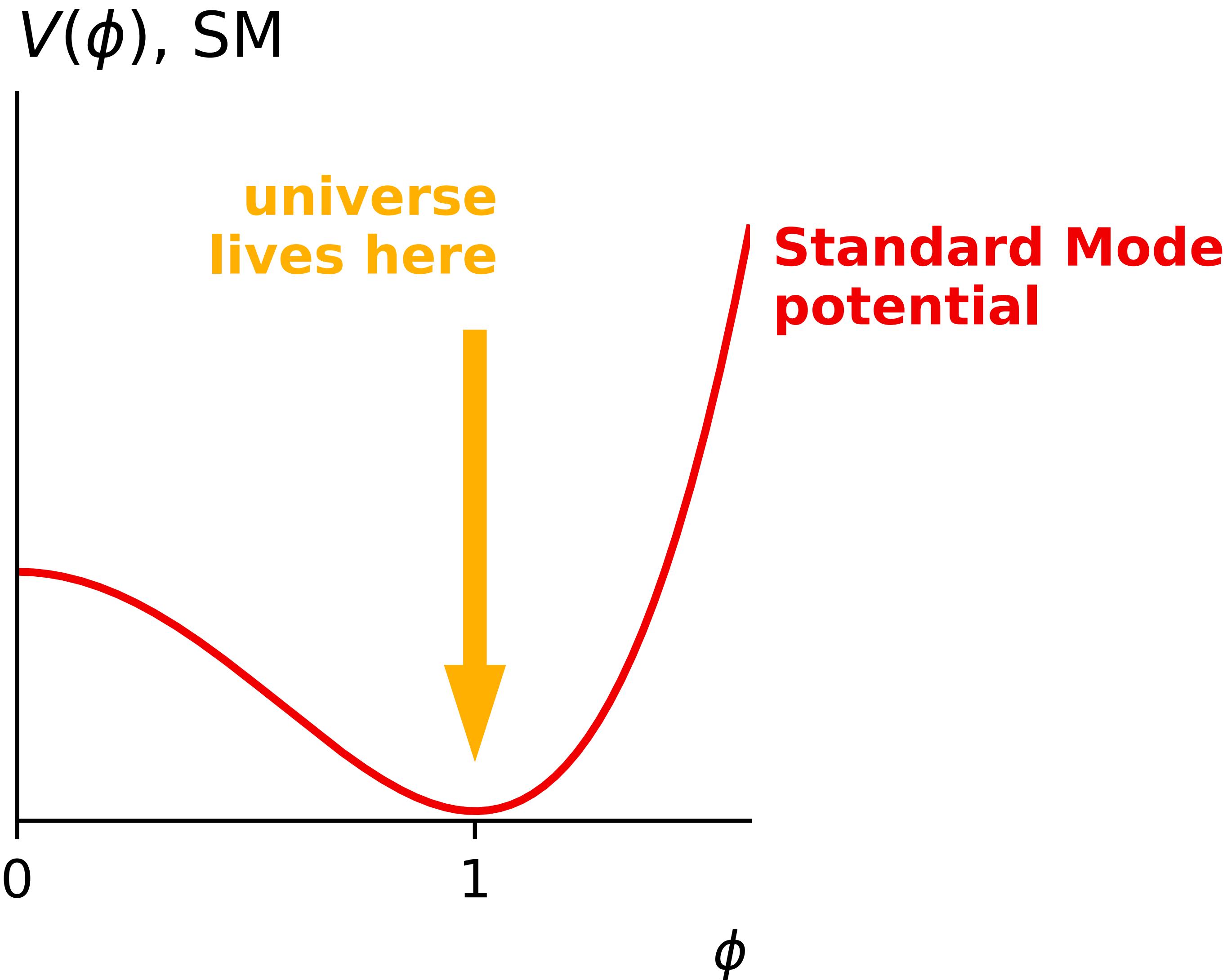
Higgs field in space

λ_3

gluo



Potentiel de Higgs



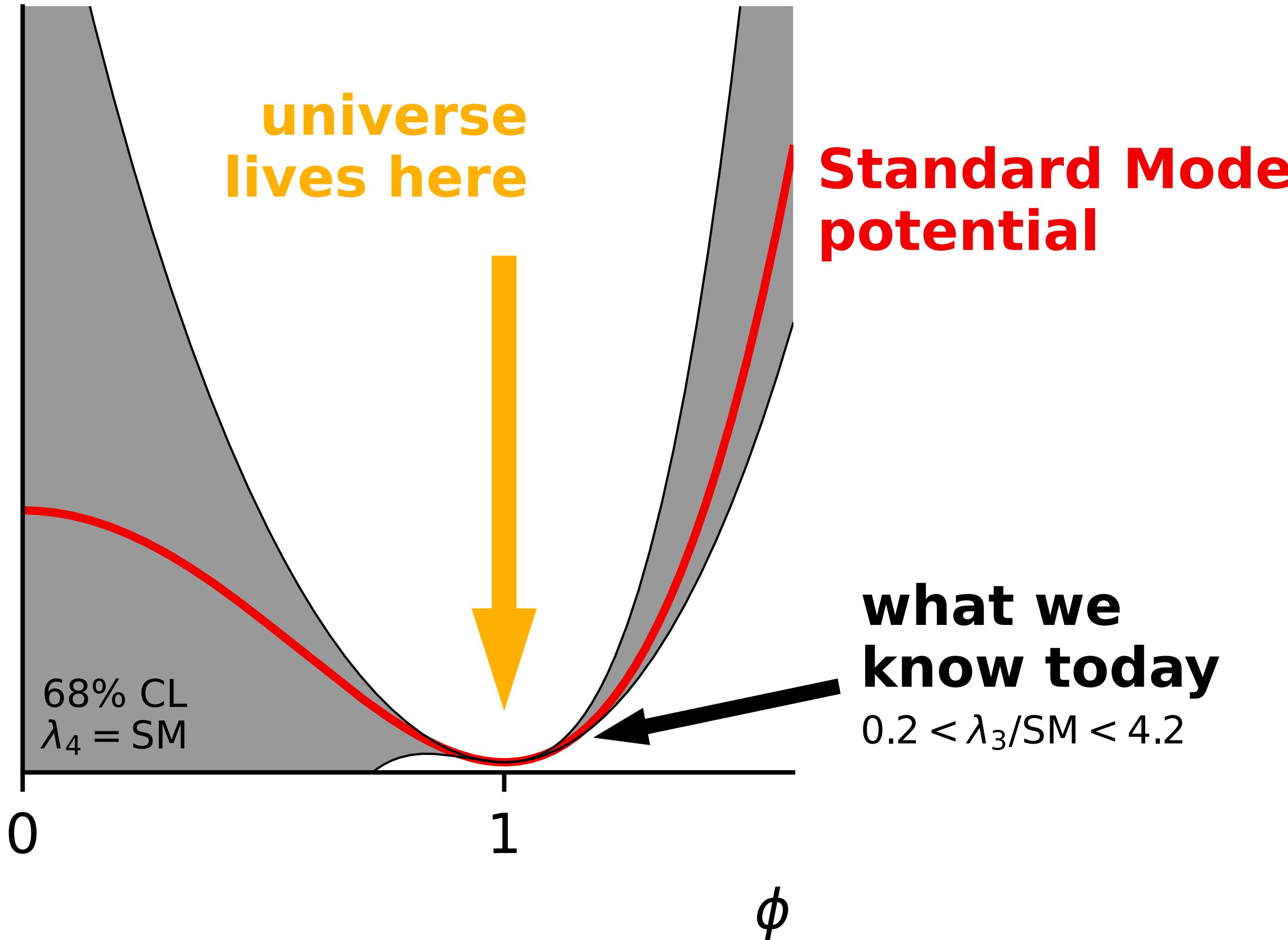
L'étude de $H \rightarrow HH$ sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

sa troisième dérivée (λ_3),
c.à.d. son asymétrie
au minimum

[la reconstruction du graphique
suppose des dérivées ≥ 4
comme dans le MS]

Potentiel de Higgs

$V(\phi)$, today



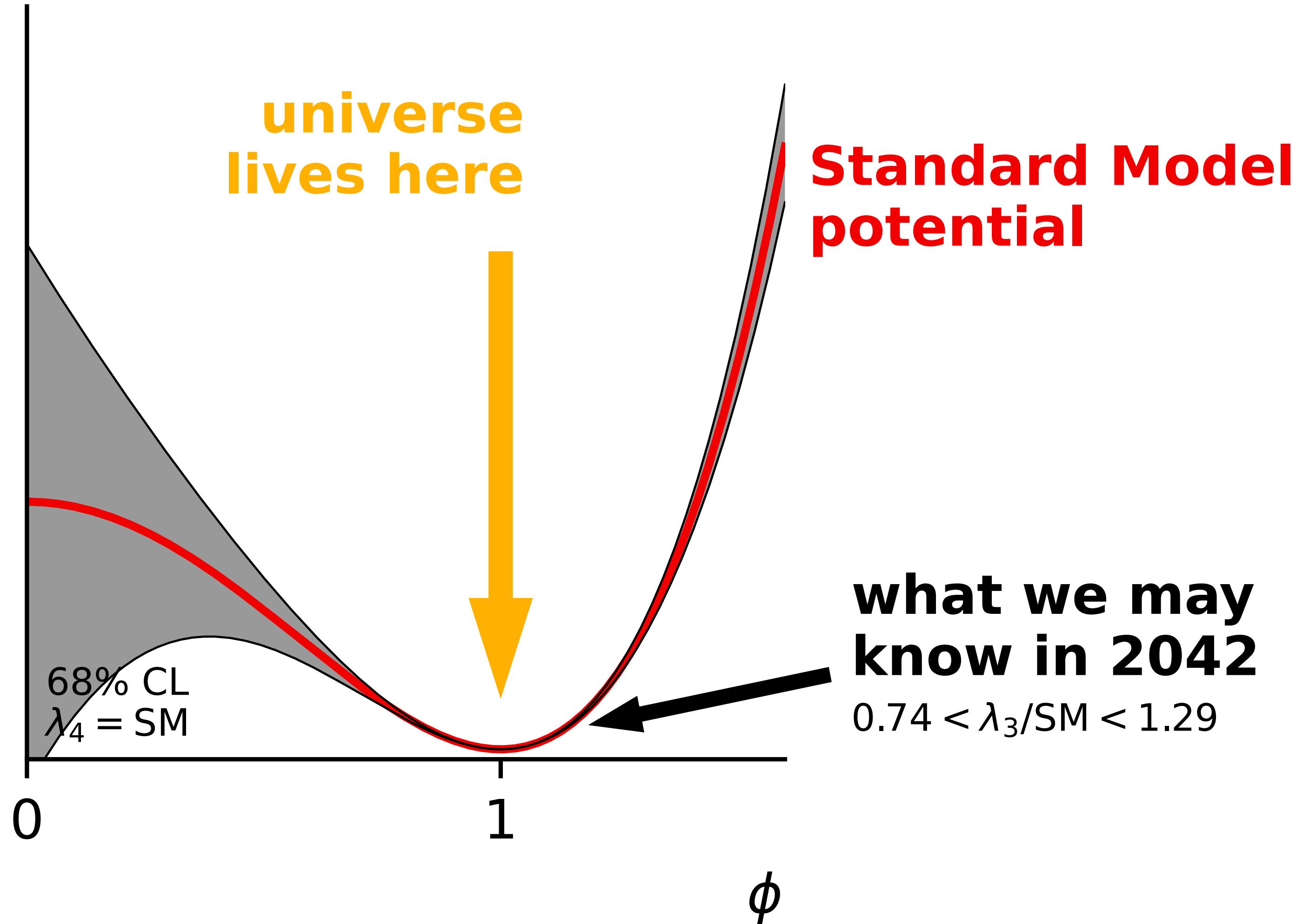
L'étude de $H \rightarrow HH$ sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

sa troisième dérivée (λ_3),
c.à.d. son asymétrie
au minimum

[la reconstruction du graphique
suppose des dérivées ≥ 4
comme dans le MS]

Potentiel de Higgs

$V(\phi)$, 2042 (HL-LHC)



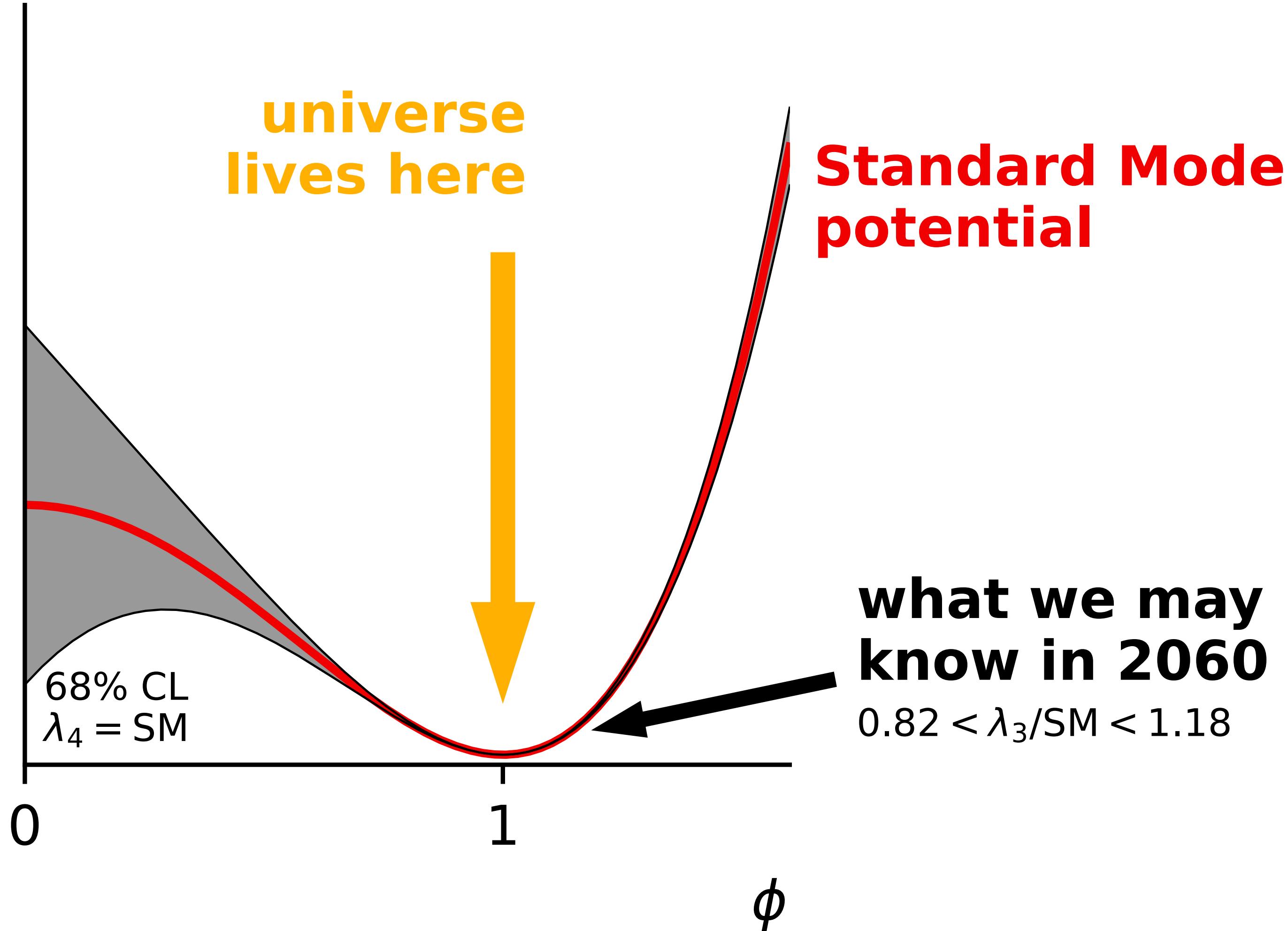
L'étude de $H \rightarrow HH$ sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

sa troisième dérivée (λ_3),
c.à.d. son asymétrie
au minimum

[la reconstruction du graphique
suppose des dérivées ≥ 4
comme dans le MS]

Potentiel de Higgs

$V(\phi)$, 2060 (FCC-ee, 4IP)



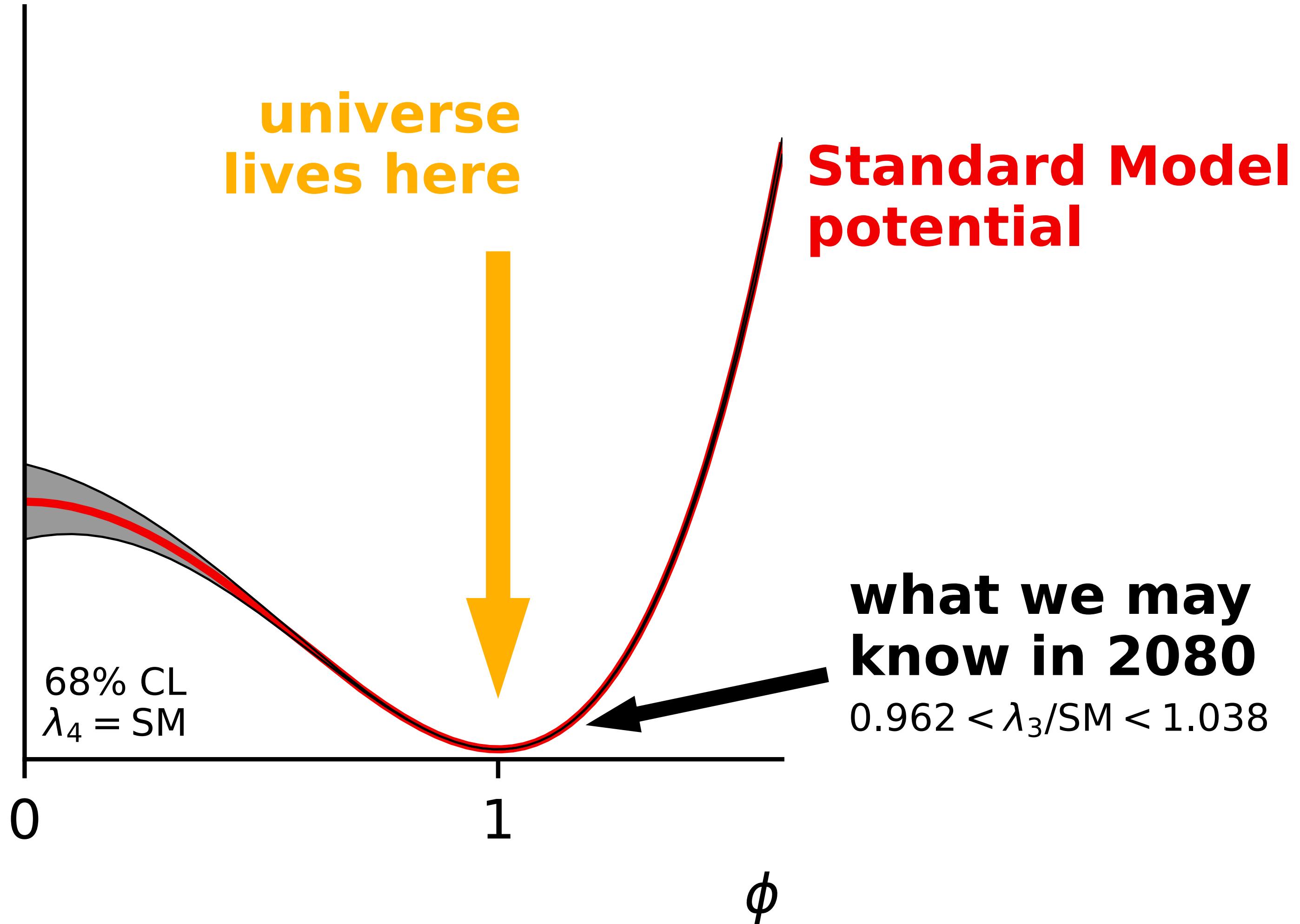
L'étude de $H \rightarrow HH$ sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

sa troisième dérivée (λ_3),
c.à.d. son asymétrie
au minimum

[la reconstruction du graphique
suppose des dérivées ≥ 4
comme dans le MS]

Potentiel de Higgs

$V(\phi)$, 2080 (FCC-hh)



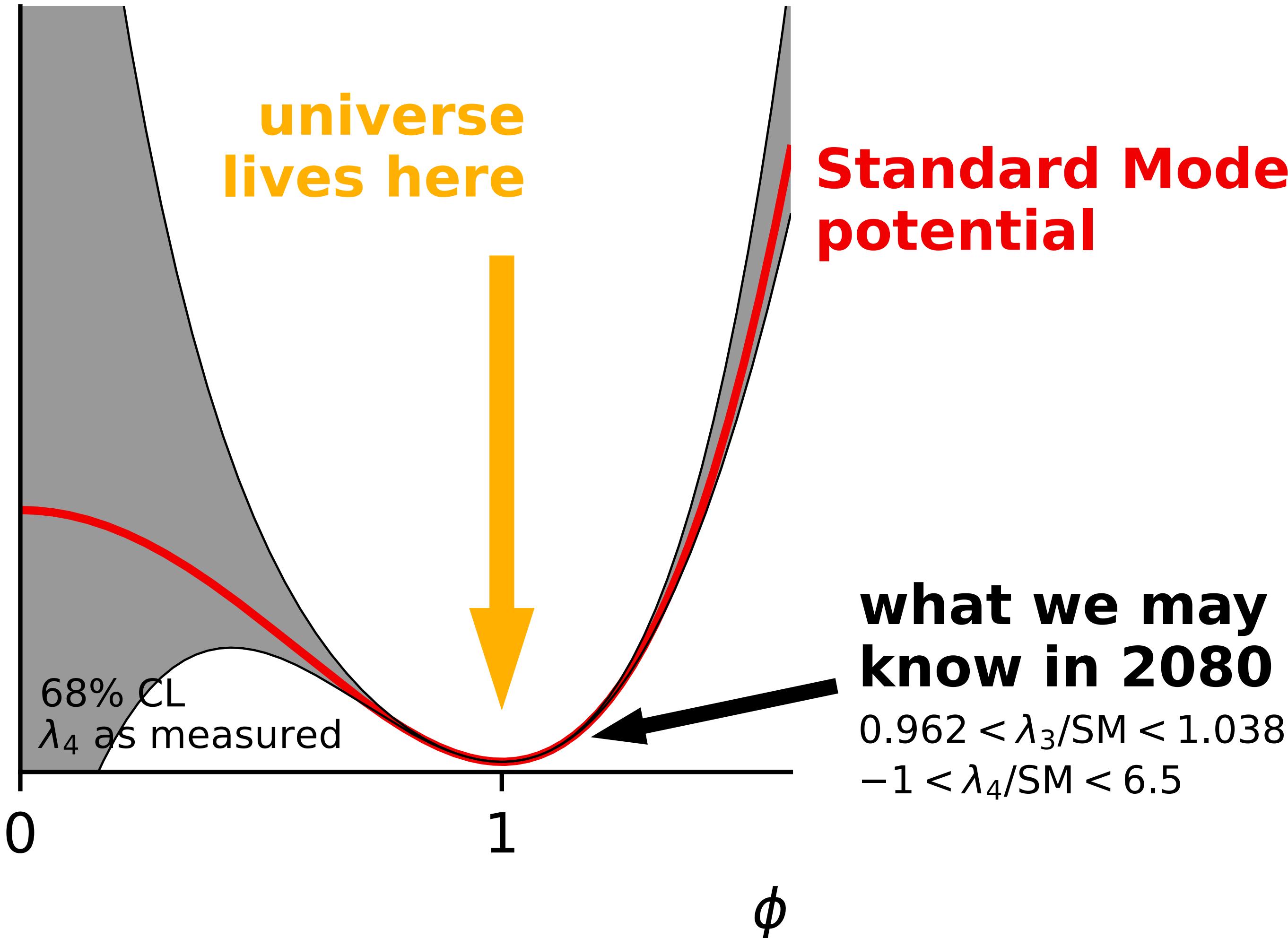
L'étude de $H \rightarrow HH$ sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

sa troisième dérivée (λ_3),
c.à.d. son asymétrie
au minimum

[la reconstruction du graphique
suppose des dérivées ≥ 4
comme dans le MS]

Potentiel de Higgs

$V(\phi)$, 2080 (FCC-hh)+ λ_4 (direct)



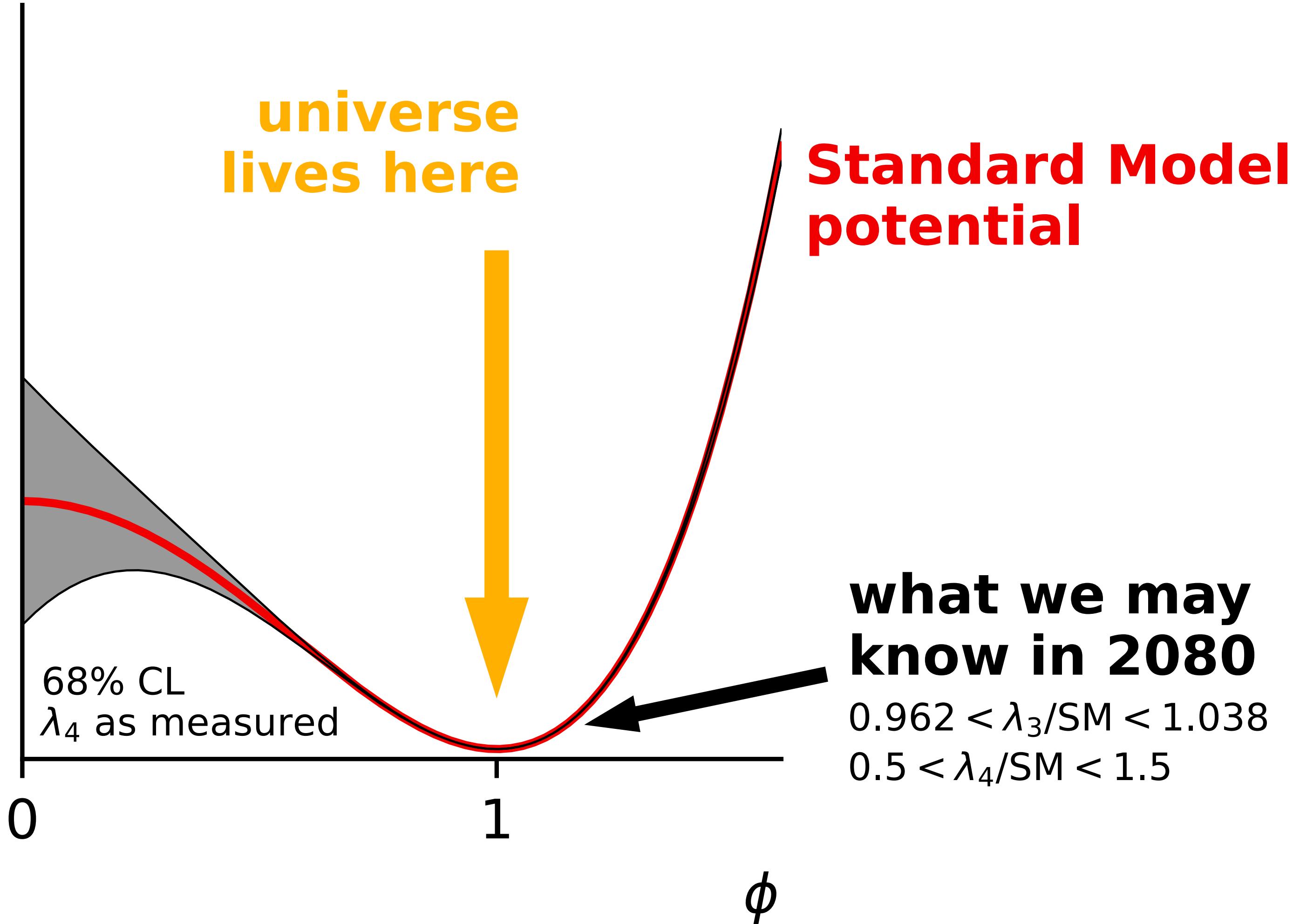
L'étude de $H \rightarrow HH$ sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

sa troisième dérivée (λ_3),
c.à.d. son asymétrie
au minimum

[la reconstruction du graphique suppose des dérivées ≥ 4 comme dans le MS]

Potentiel de Higgs

$V(\phi)$, 2080 (FCC-hh)+ λ_4 (muon coll.)



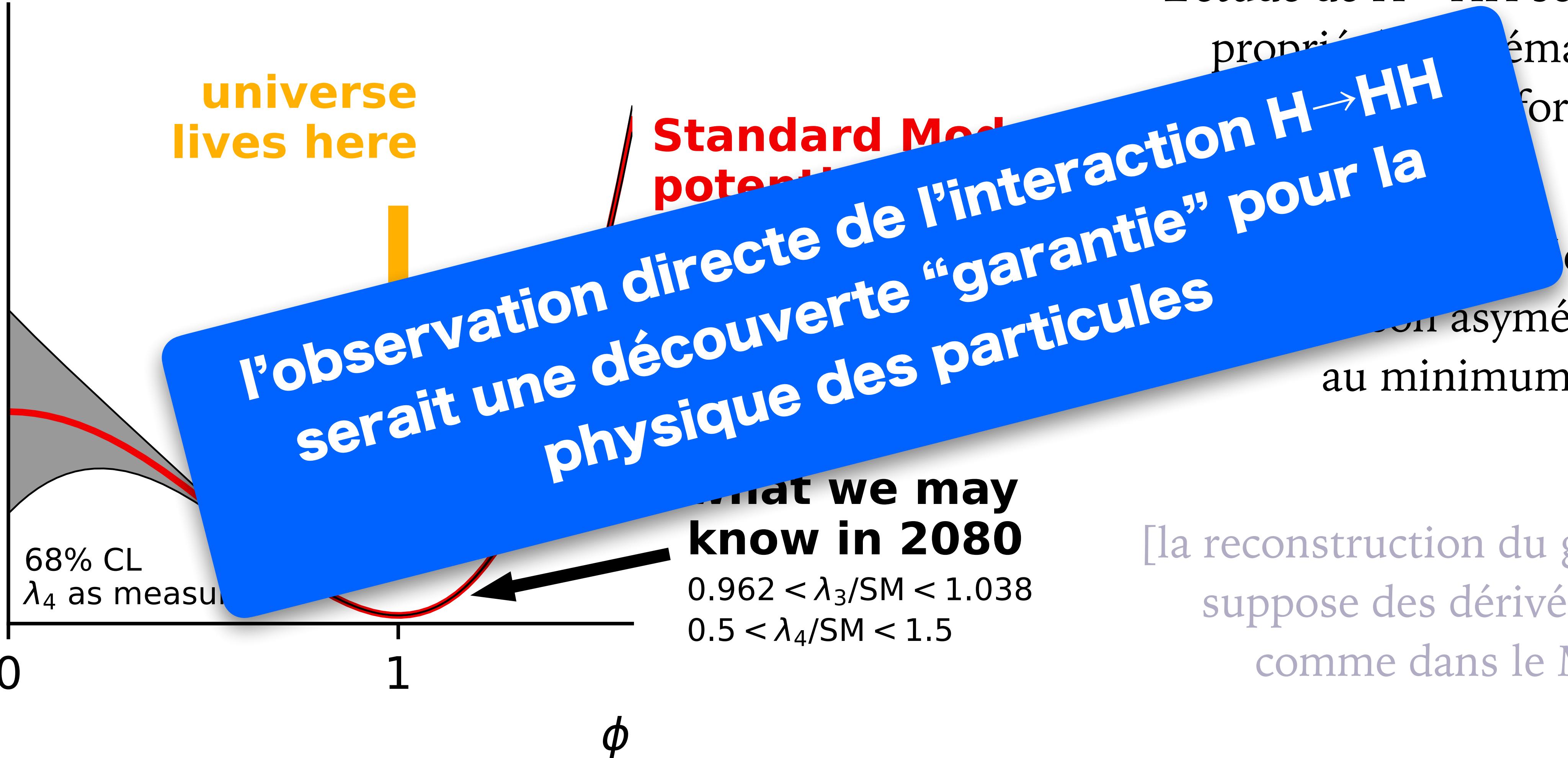
L'étude de $H \rightarrow HH$ sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

sa troisième dérivée (λ_3), c.à.d. son asymétrie au minimum

[la reconstruction du graphique suppose des dérivées ≥ 4 comme dans le MS]

Potentiel de Higgs

$V(\phi)$, 2080 (FCC-hh) + λ_4 (muon coll.)



L'étude de $H \rightarrow HH$ sonde une propriété géométrique de la forme du

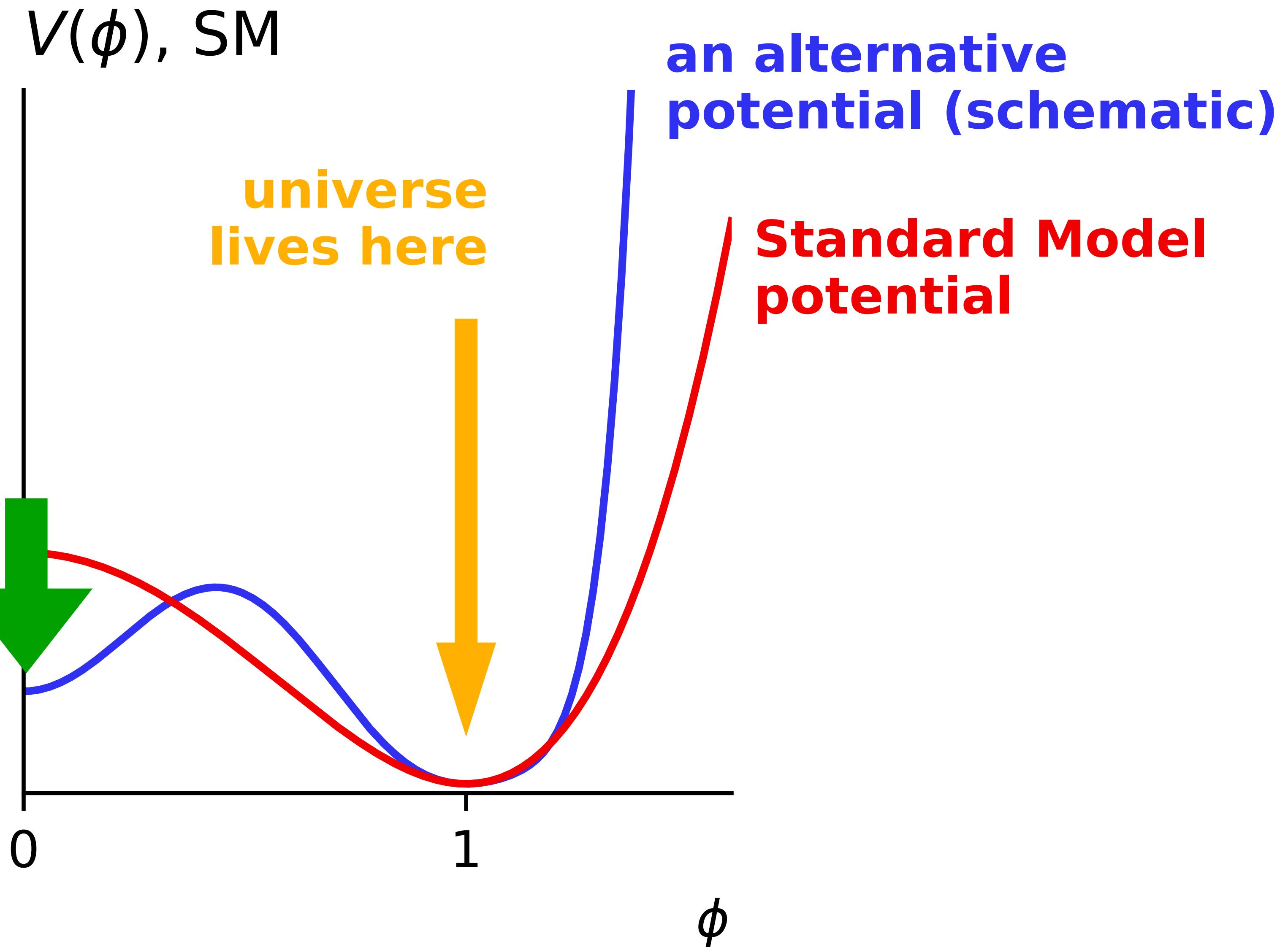
potentiel (λ₃),
et une asymétrie
au minimum

[la reconstruction du graphique
suppose des dérivées ≥ 4
comme dans le MS]

Science fiction

pourrions nous faire un bulle du vide où le champ de Higgs est nul?

dans cette bulle, les propriétés de la matière seraient radicalement différentes



Science fiction

$V(\phi)$, SM

universe
lives here

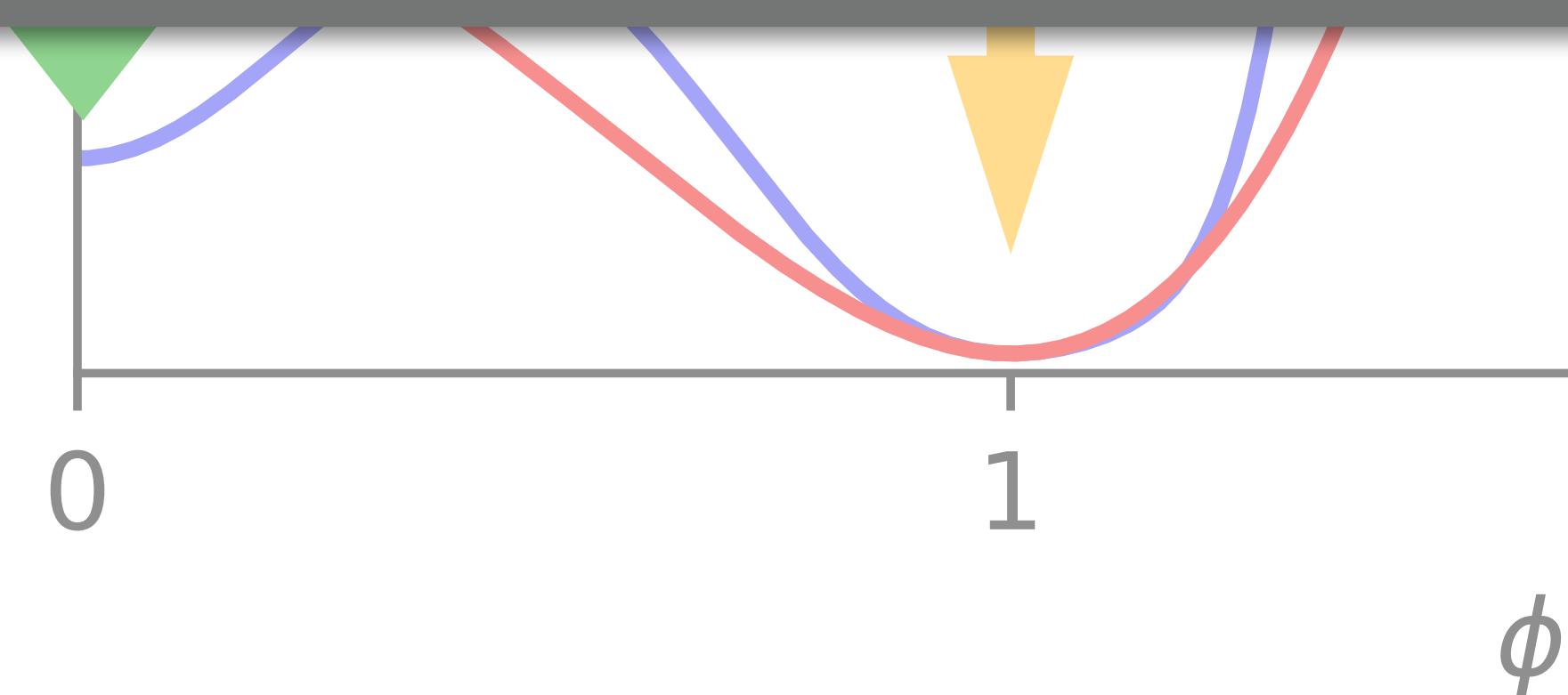
an alternative
potential (schematic)

/ Standard Model

rien de suggère que ce serait possible

mais nos savons si peu sur le potentiel du champ de Higgs, et sur ses interactions avec les particules dont nous sommes composés, qu'il serait presque irresponsable de ne pas en poursuivre l'étude

dans celle bulle, les propriétés de la matière seraient radicalement différentes



atouts pour un futur grand projet en physique des particules

un objectif important à atteindre ~ découverte garantie

élargissement de l'exploration par un facteur significatif en énergie

progrès majeurs sur une gamme de sujets en physique des particules

probabilité de succès, robustesse (ex : plusieurs expériences)

bon rapport coûts/physique pour la construction et l'exploitation,
empreinte carbone limitée, nouvelles technologies



Cher Père Noël

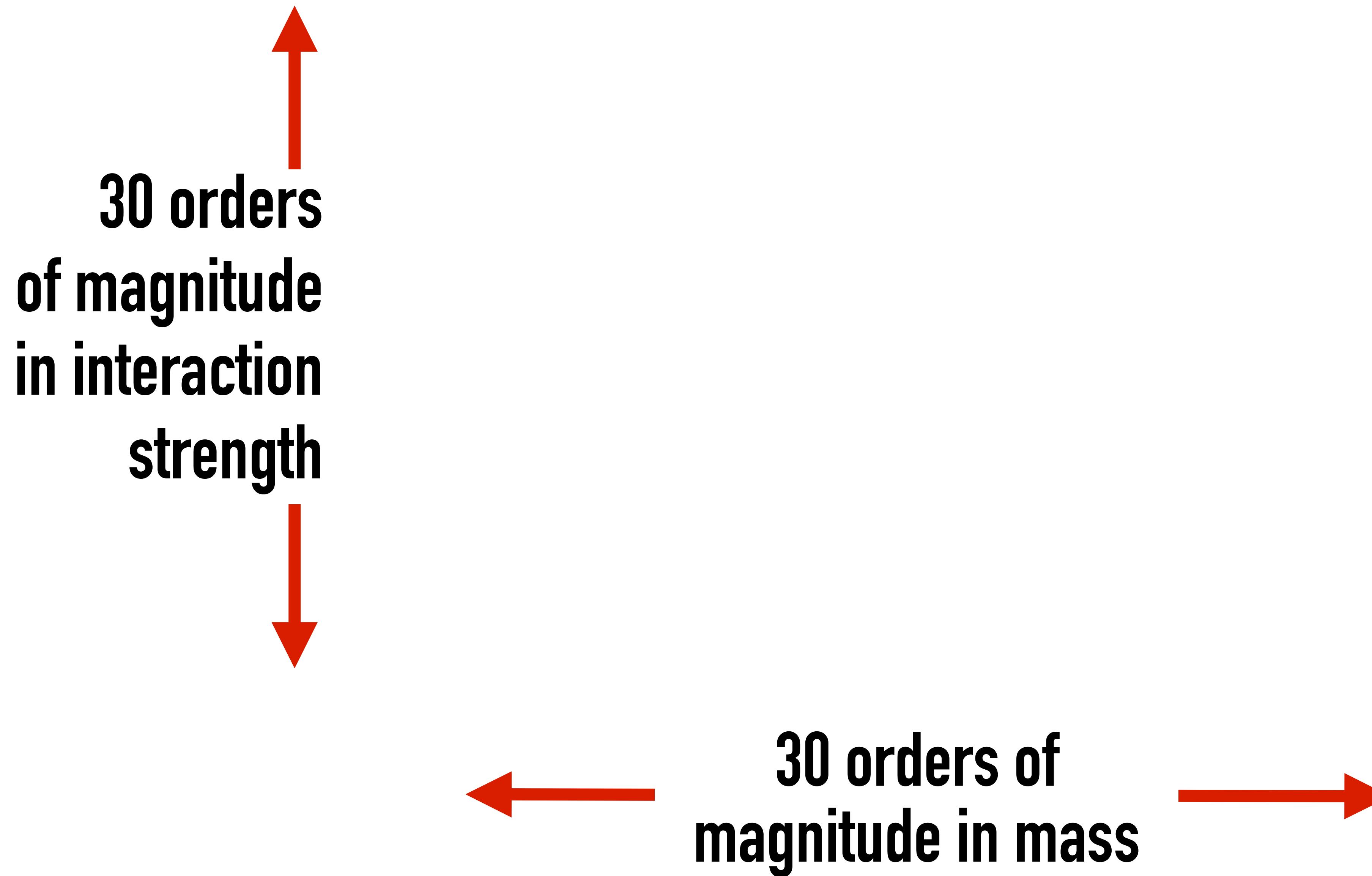
*Nous avons été sage
ces dernières décennies.
Voici quelques idées de
cadeaux :*

- *candidat pour la matière noire*
- *explication des masses des fermions*
- *explication de l'asymétrie matière-anti-matière*
- *résolution du problème CP-fort (axion)*
- *origine de l'échelle électrofaible*
- *origine de la valeur minuscule de la constante cosmologique*

Merci, les physiciens des particules

ps: svp, pas de solutions anthropiques

ces questions restent profondément mystérieuses, et nous en poursuivons l'exploration



Almost every problem of the Standard Model originates from Higgs interactions

$$\mathcal{L} = y H \psi \bar{\psi} + \mu^2 |H|^2 - \lambda |H|^4 - V_0$$

The diagram illustrates the four main issues associated with the Higgs sector of the Standard Model. Four black arrows point upwards from the descriptive text below to the specific terms in the Lagrangian equation above them:

- An arrow points from the word "flavour" to the term $y H \psi \bar{\psi}$.
- An arrow points from the word "naturalness" to the term $\mu^2 |H|^2$.
- An arrow points from the word "stability" to the term $\lambda |H|^4$.
- An arrow points from the words "cosmological constant" to the term V_0 .

Almost every problem of the Standard Model originates from Higgs interactions

Almost every problem of the Standard Model originates from Higgs interactions

$$\mathcal{L} = y H \psi \bar{\psi} + \mu^2 |H|^2 - \lambda |H|^4 - V_0$$

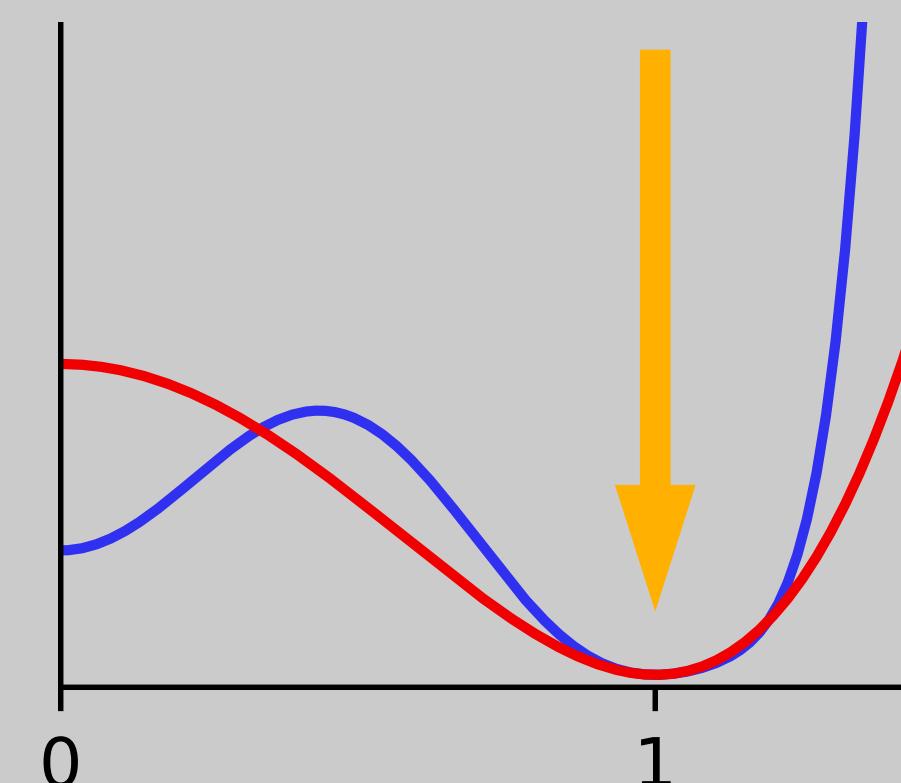
The diagram consists of a mathematical equation for the Standard Model Lagrangian, \mathcal{L} , followed by four arrows pointing upwards from descriptive text below each term. The equation is $\mathcal{L} = y H \psi \bar{\psi} + \mu^2 |H|^2 - \lambda |H|^4 - V_0$. The arrows point from the text "flavour" to the $y H \psi \bar{\psi}$ term, from "naturalness" to the $\mu^2 |H|^2$ term, from "stability" to the $-\lambda |H|^4$ term, and from "cosmological constant" to the $-V_0$ term.

flavour naturalness stability cosmological constant

Almost every problem of the Standard Model originates from Higgs interactions

$$\mathcal{L} = y H \psi \bar{\psi} + \mu^2 |H|^2 - \lambda |H|^4 - V_0$$

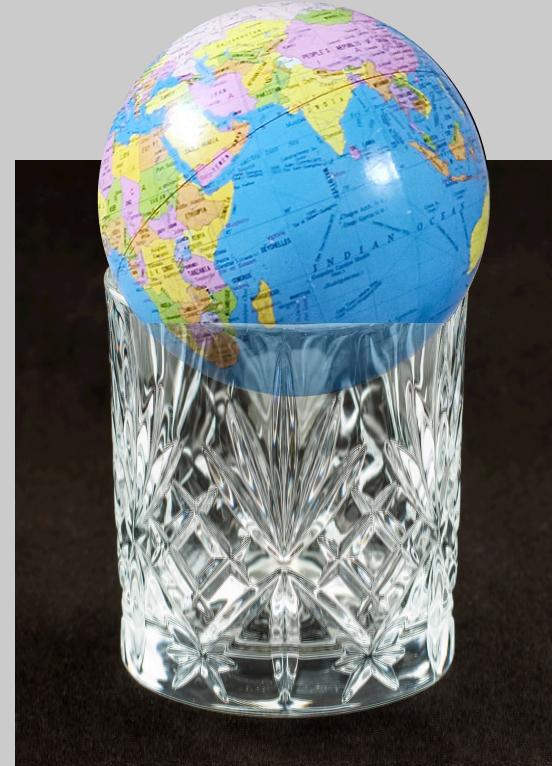
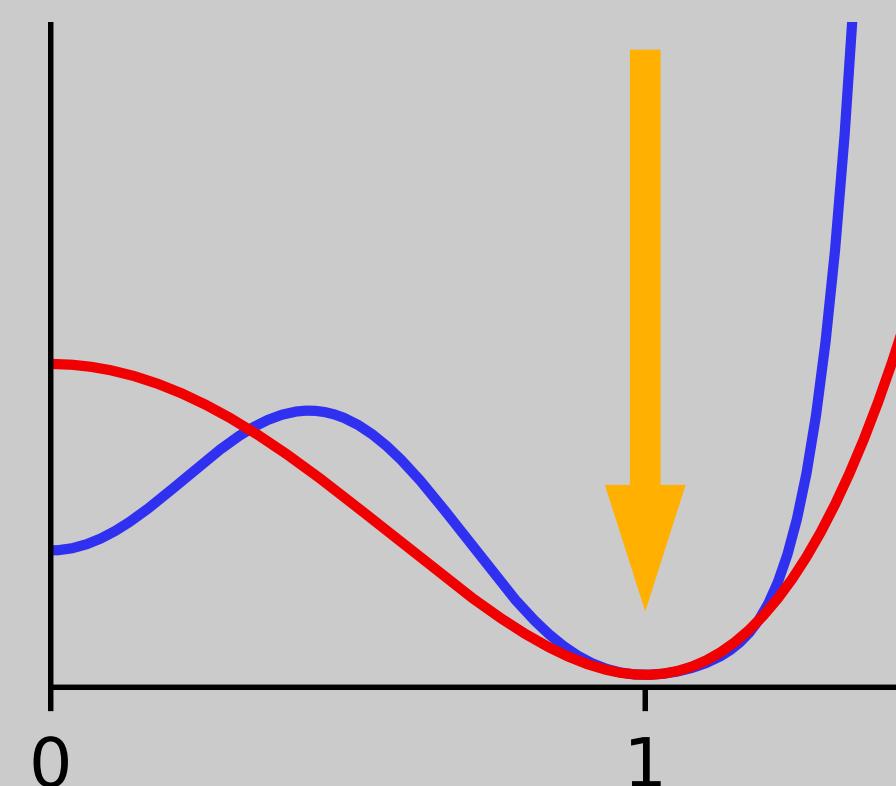
↑ ↑ ↑ ↑
flavour *naturalness* *stability* *cosmological constant*



Almost every problem of the Standard Model originates from Higgs interactions

$$\mathcal{L} = y H \psi \bar{\psi} + \mu^2 |H|^2 - \lambda |H|^4 - V_0$$

↑ ↑ ↑ ↑
flavour *naturalness* *stability* *cosmological constant*

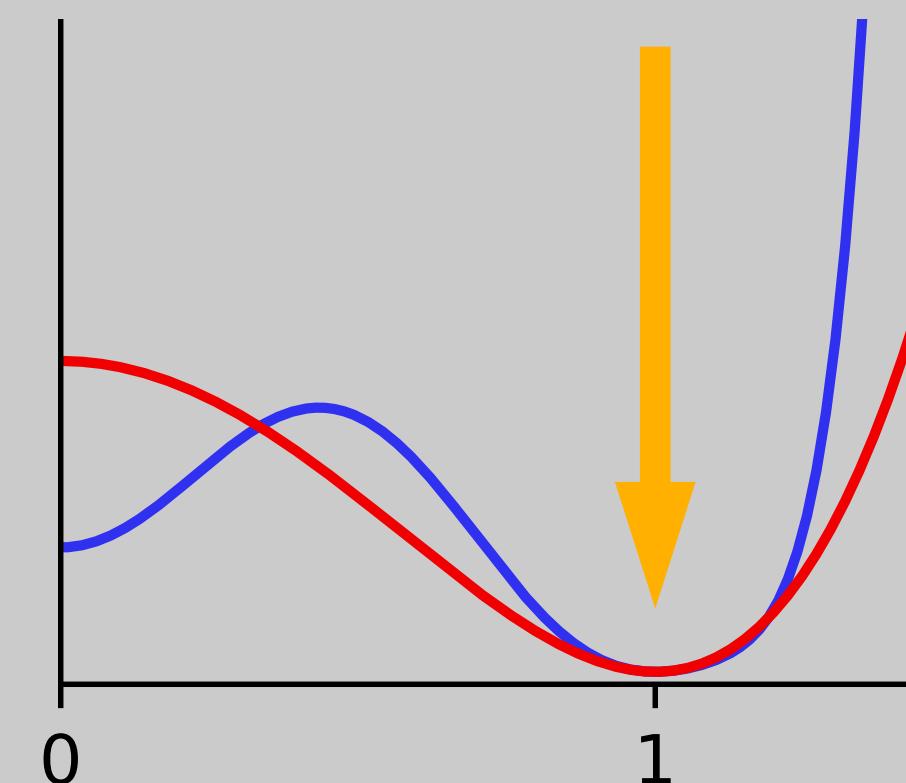


Almost every problem of the Standard Model originates from Higgs interactions

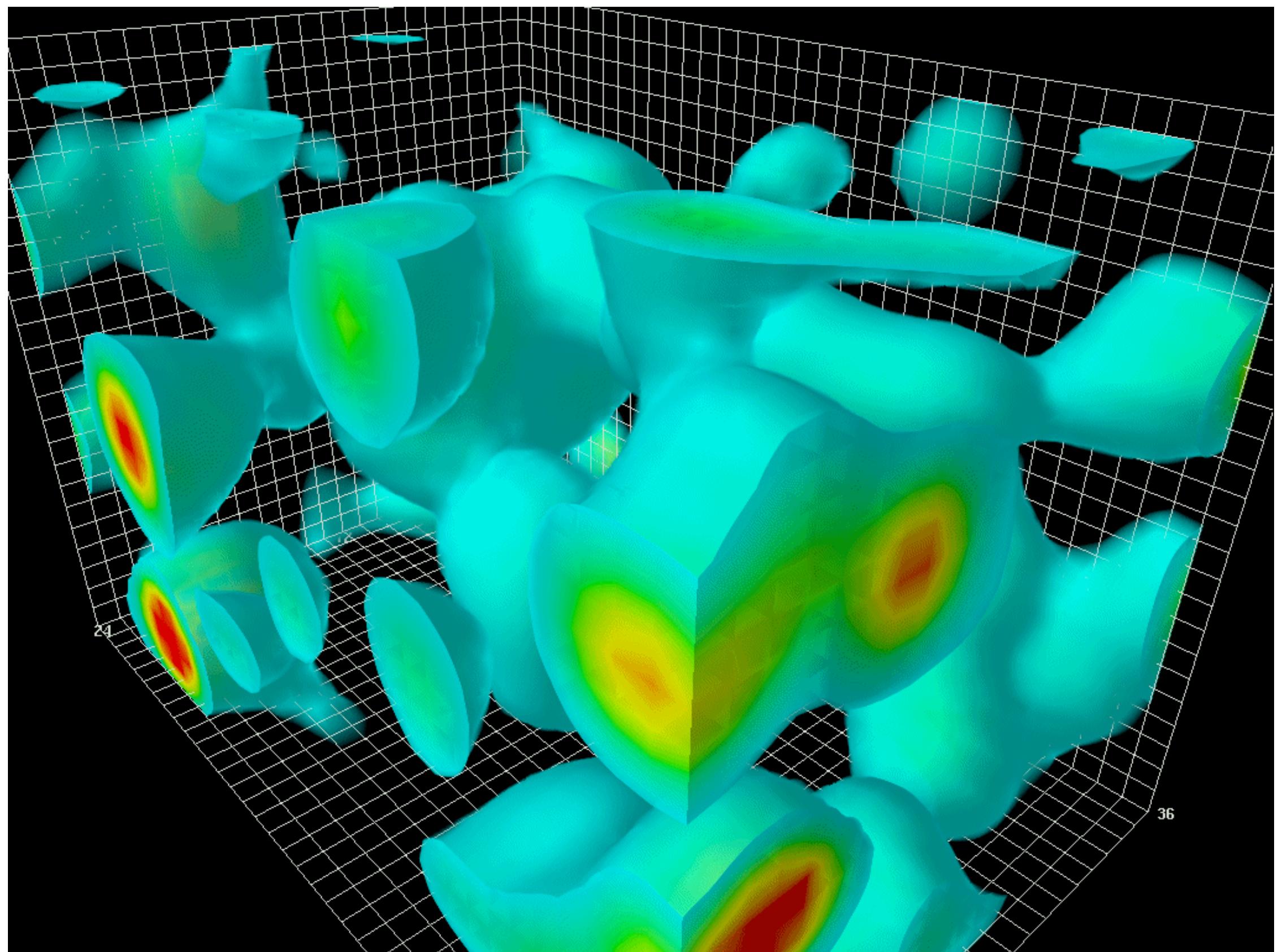
$$\mathcal{L} = y H \psi \bar{\psi} + \mu^2 |H|^2 - \lambda |H|^4 - V_0$$

↑ ↑ ↑ ↑
flavour *naturalness* *stability* *cosmological constant*

?



Naturalité en physique des particules

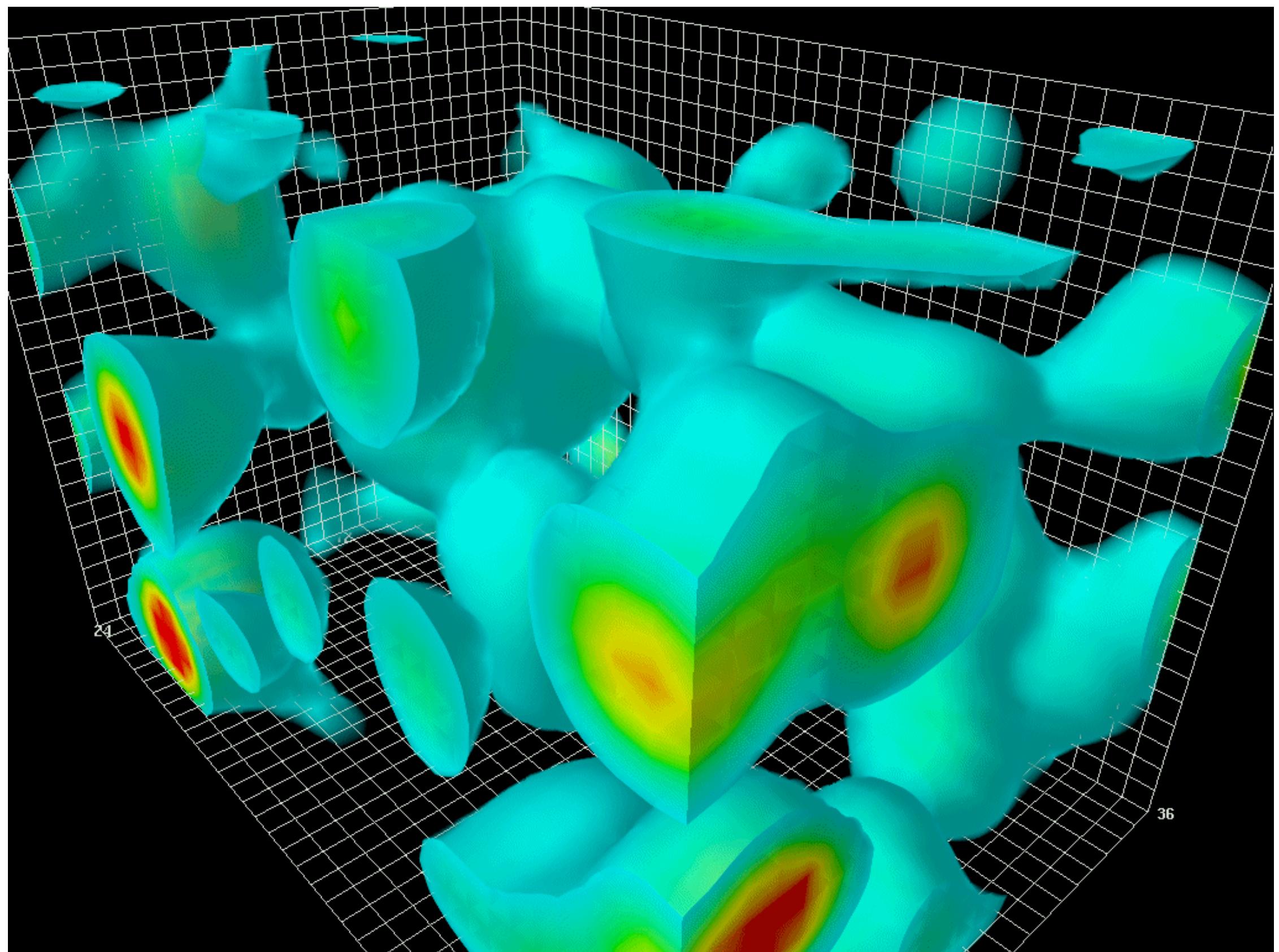


<http://www.physics.adelaide.edu.au/theory/staff/leinweber/VisualQCD/Nobel/index.html>
NB: shows QCD quantum fluctuations, so not directly those connected with the Higgs mass

- des fluctuations quantiques agissent sur le secteur Higgs, augmentant la masse du boson de Higgs, sans limite
- la plupart des théoriciens croient que seule de la nouvelle physique pourrait introduire une limite supérieure
- cette nouvelle physique ne serait pas bien plus lourde que la masse du Higgs (c.à.d. accessible au LHC ou aux prochains accélérateurs)

[des alternatives : une énorme coïncidence cosmique; ou une profonde erreur de compréhension de la physique sous-jacente]

Naturalité en physique des particules

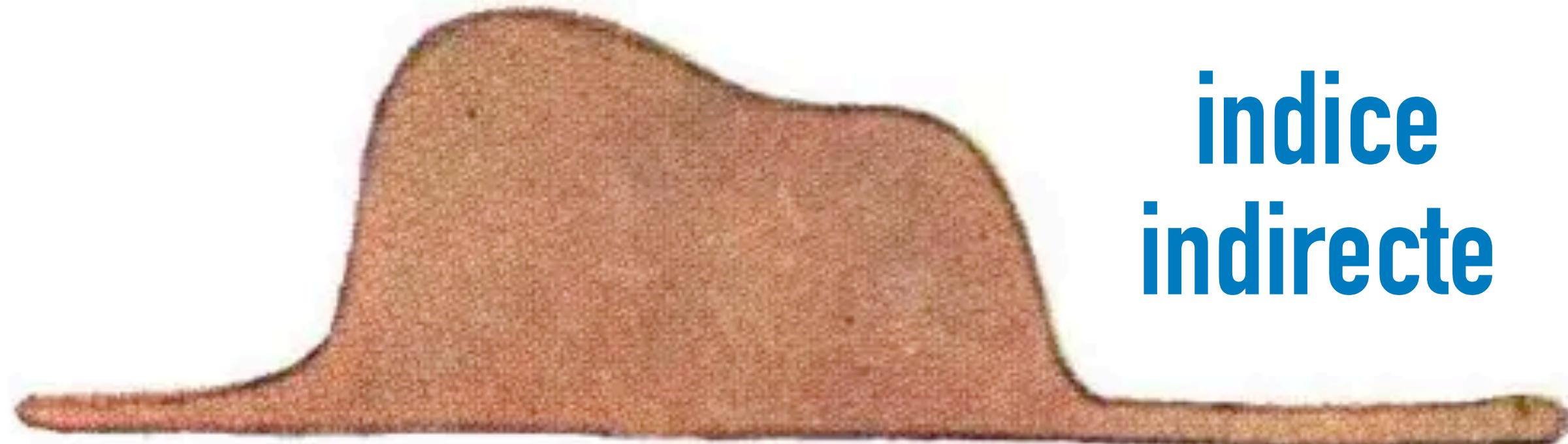


<http://www.physics.adelaide.edu.au/theory/staff/leinweber/VisualQCD/Nobel/index.html>
NB: shows QCD quantum fluctuations, so not directly those connected with the Higgs mass

- des fluctuations quantiques agissent sur le secteur Higgs, augmentant la masse du boson de Higgs, sans limite
- la plupart des théoriciens croient que seule de la nouvelle physique pourrait introduire une limite supérieure
- cette nouvelle physique ne serait pas bien plus lourde que la masse du Higgs (c.à.d. accessible au LHC ou aux prochains accélérateurs)

[des alternatives : une énorme coïncidence cosmique; ou une profonde erreur de compréhension de la physique sous-jacente]

Mon dessin numéro 1

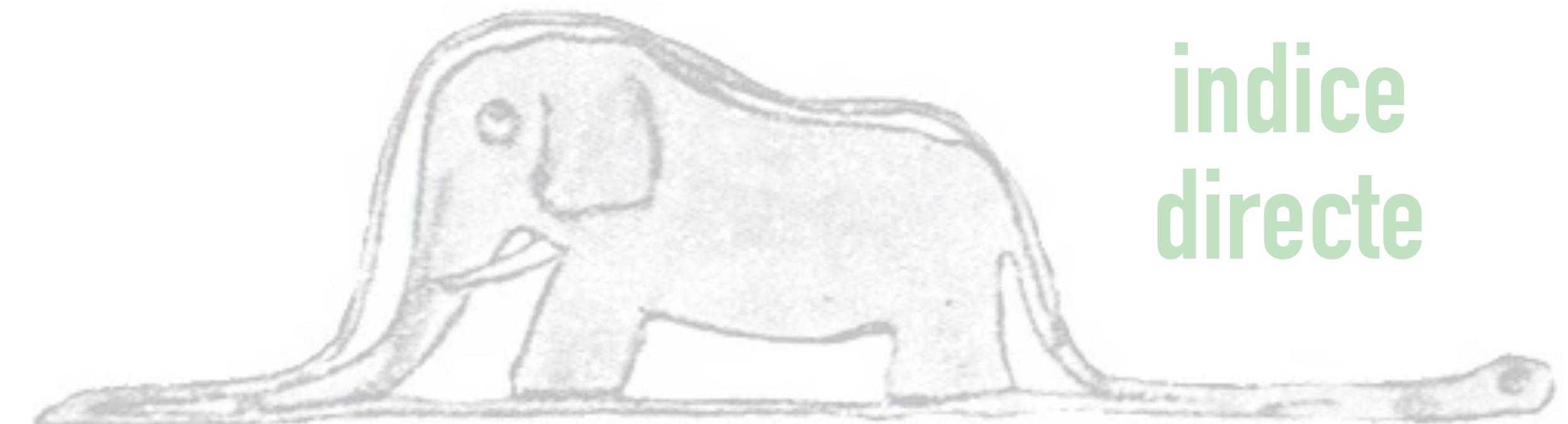


indice
indirecte

« Pourquoi un chapeau ferait-il peur ? »

Le Petit Prince, Antoine de Saint-Exupéry

« Mon dessin ne représentait pas un chapeau. Il représentait un serpent boa qui digérait un élphant. »



indice
directe

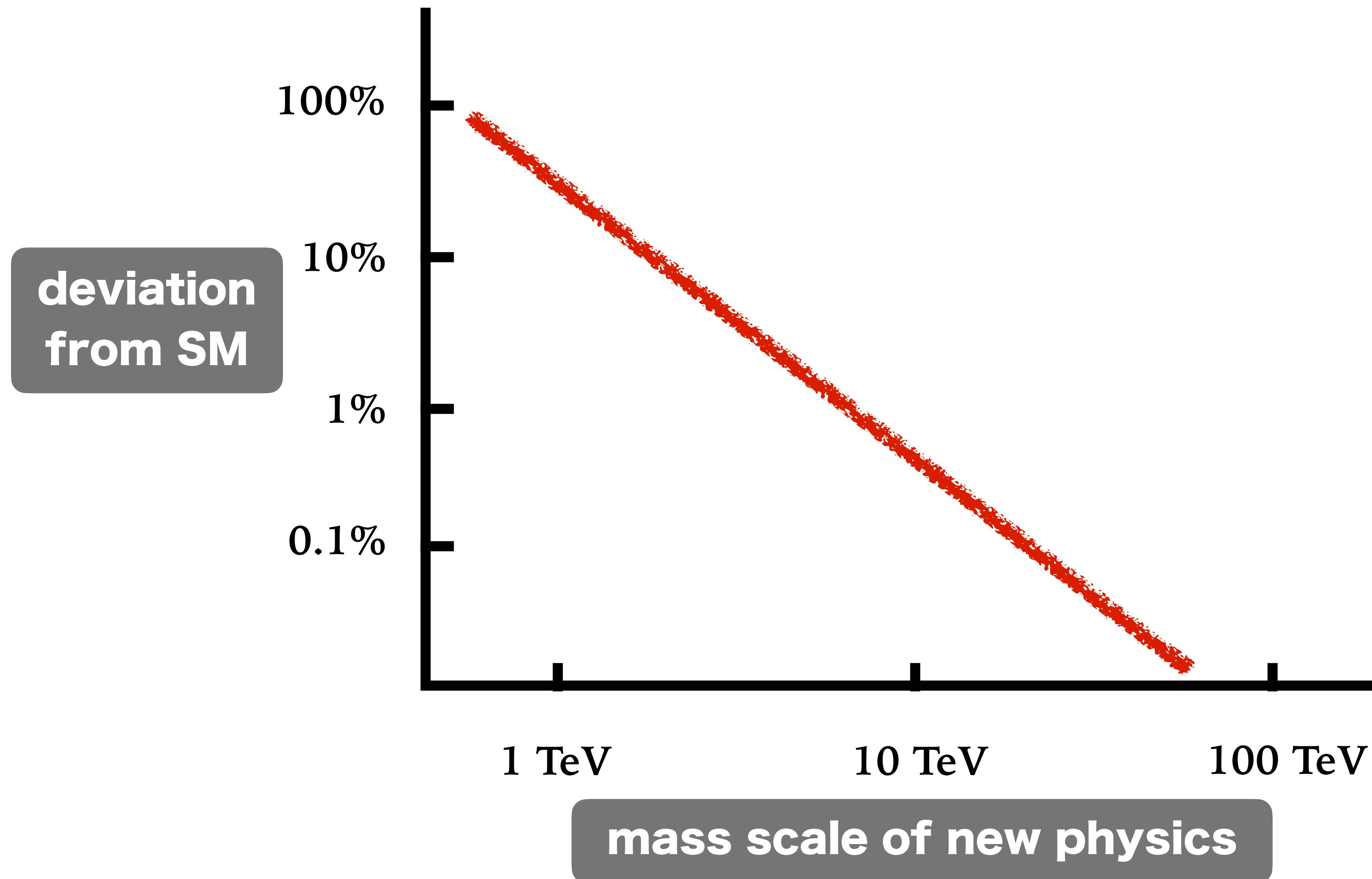
Mon dessin numéro 2

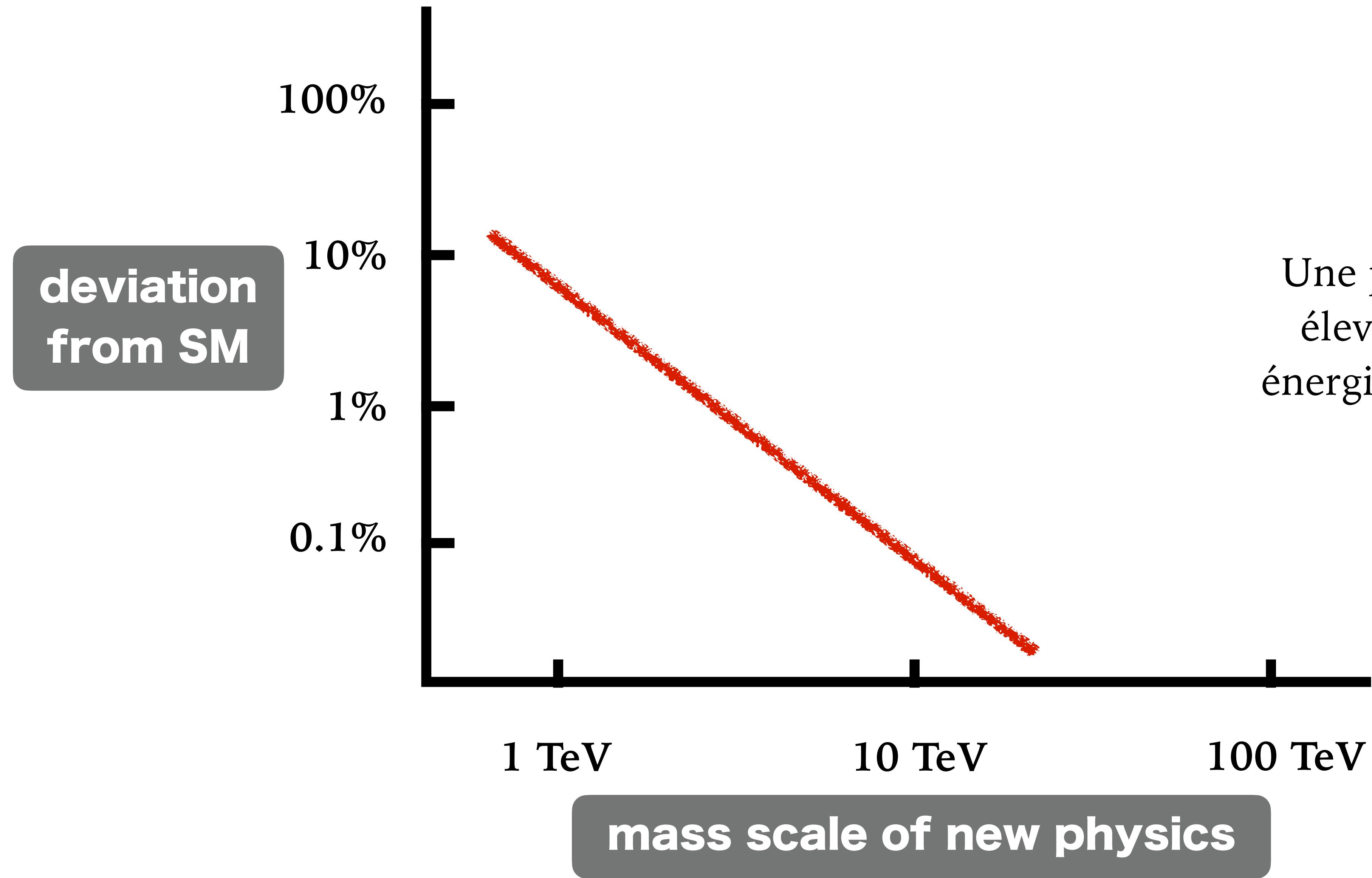
la mesure d'une multiplicité de signaux pourrait être crucial dans les recherches indirectes

scénario de déviations par rapport au SM [%]

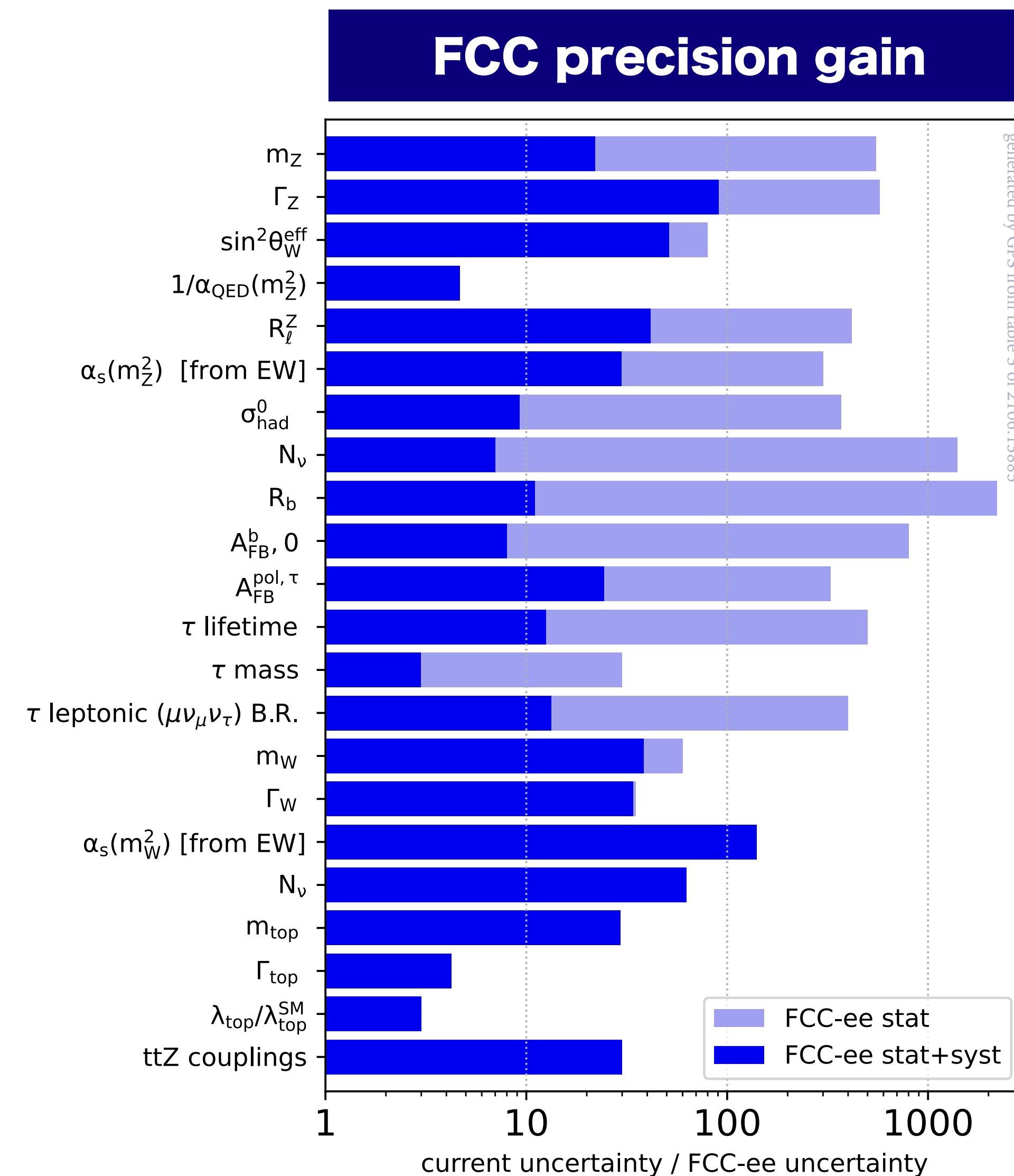
chaque variante de
nouvelle physique
aurait une empreinte
distincte

Illustration from ILC studies
(linear electron-positron collider)
& slide by D. Jeans @ICHEP 2020

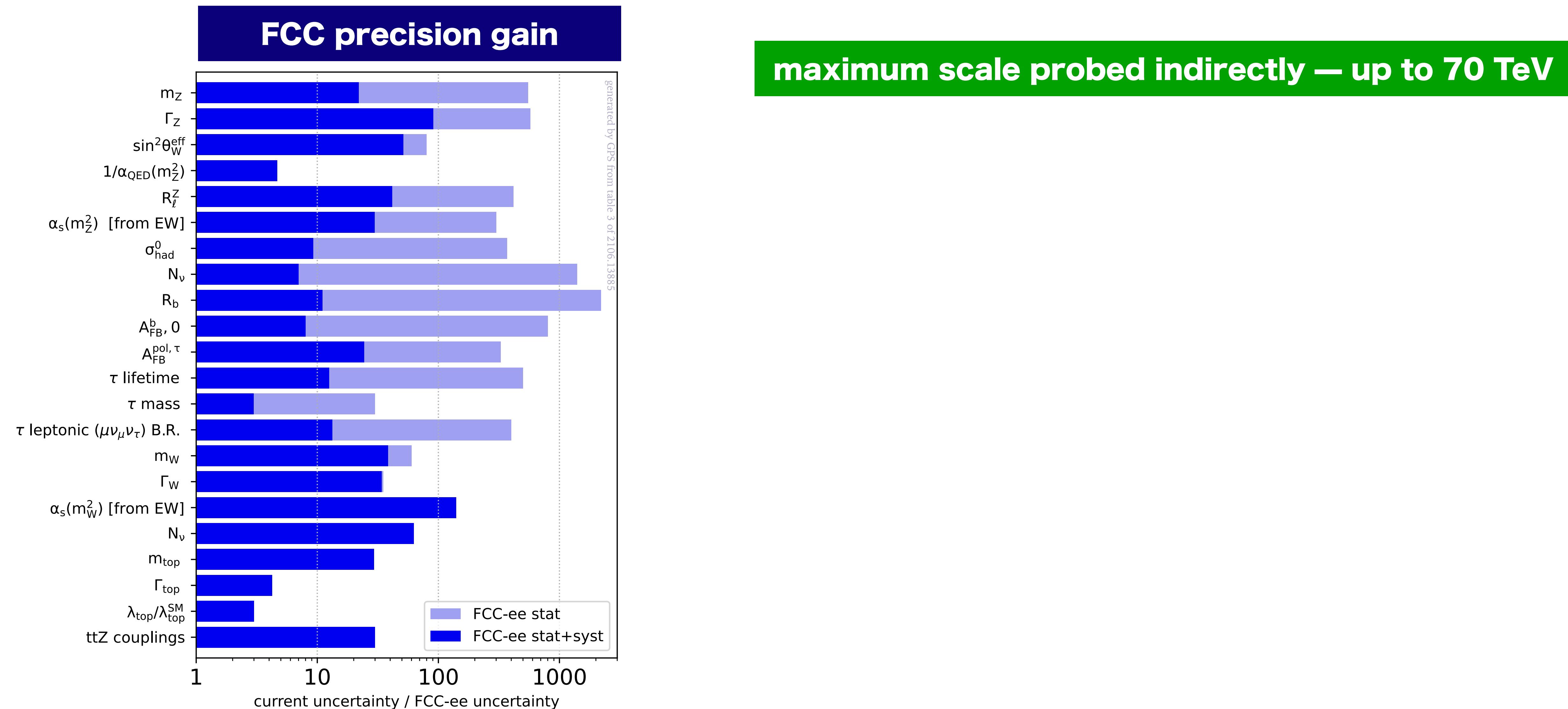




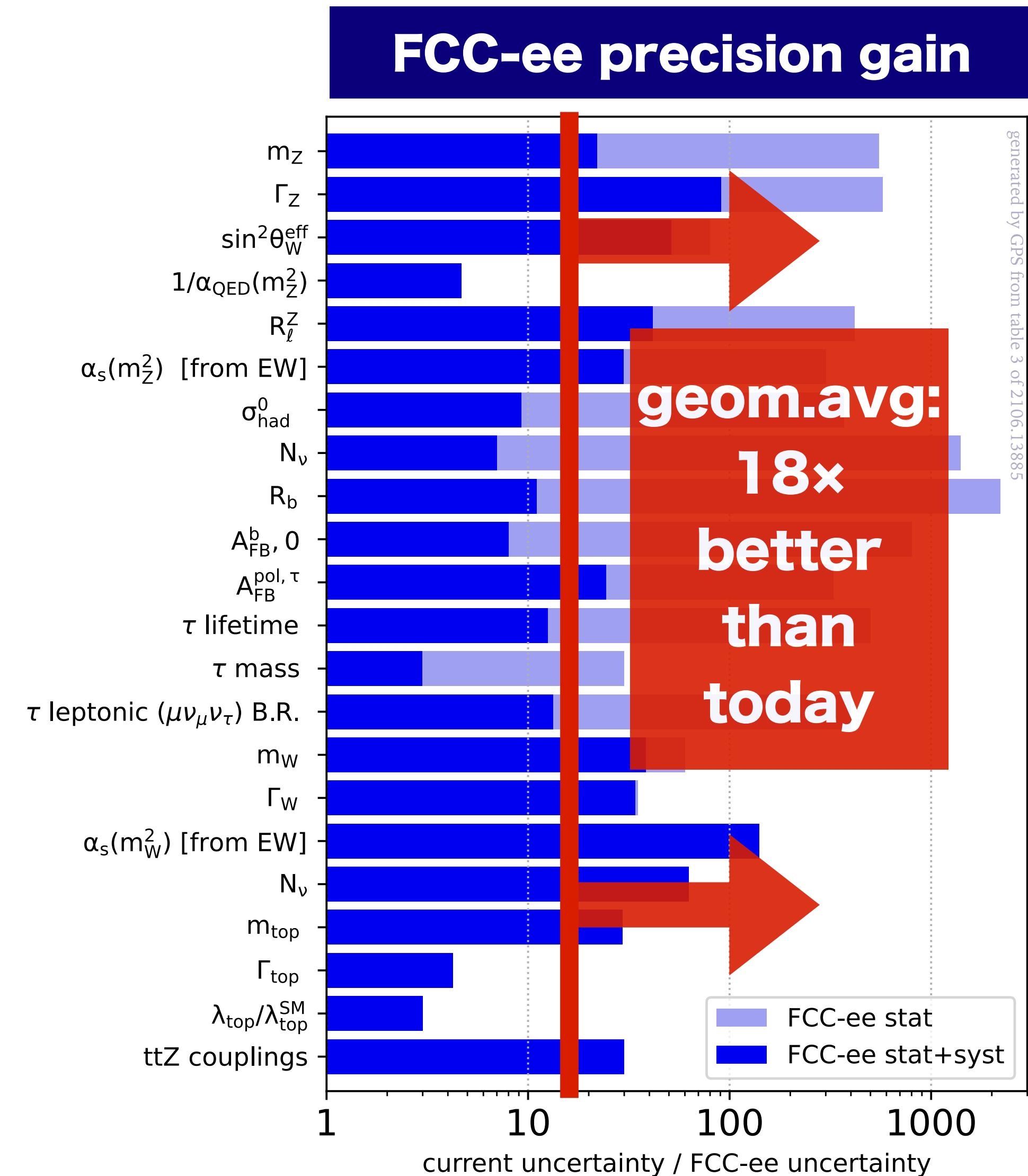
la précision au FCC-ee vaut une augmentation de $\times 4 - 5$ en énergie



la précision au FCC-ee vaut une augmentation de $\times 4 - 5$ en énergie



la précision au FCC-ee vaut une augmentation de $\times 4 - 5$ en énergie

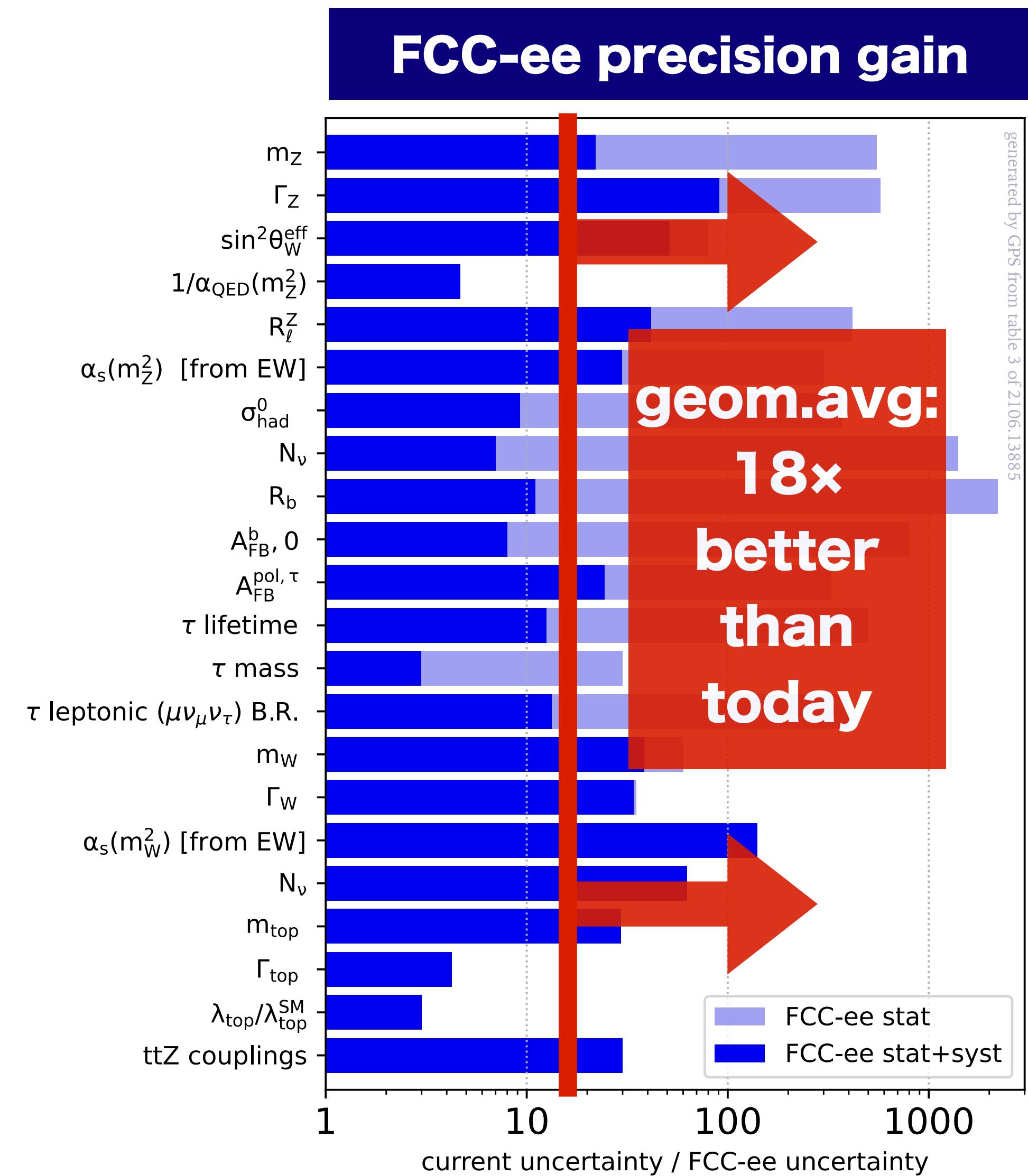


deux messages

- il est déjà clair que le FCC-ee apporterait un grand pas en avant (geom.avg. = $\times 18$, across $\gtrsim 20$ observables)
- un grand potentiel encore à réaliser pour améliorer le contrôle des effects systematics (gain de $\times 100$ dans certains cas)

C'est la partie intéressante pour les physiciens!
qui demandera des efforts coordonnés
des expérimentateurs, théoriciens et physiciens des
accélérateurs

la précision a de la valeur intrinsèque



elle fournit les fondations pour la continuation
de nos explorations

Conclusions

- Dans le modèle standard, d'importantes propriétés des particules dont nous sommes composés découlent d'interactions qui sont loin d'être établies
- Perspective de **découverte garantie**: établir (ou contredire) de façon directe l'auto-interaction du Higgs, et donc la forme du potentiel, fondement du modèle standard.
 - y aurait-t-il la possibilité d'établir (ou de contredire) l'origine MS de la masse de l'électron ?
- Sonder des énergies **4 – 5 × plus élevées**
 - aux accélérateurs e^+e^- (ex. FCC-ee) de façon indirecte, par une grande augmentation de la précision
 - Au FCC-hh, de façon directe, en explorant une énorme variété de directions
- **Diversité et robustesse du programme** = un atout essentiel