

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

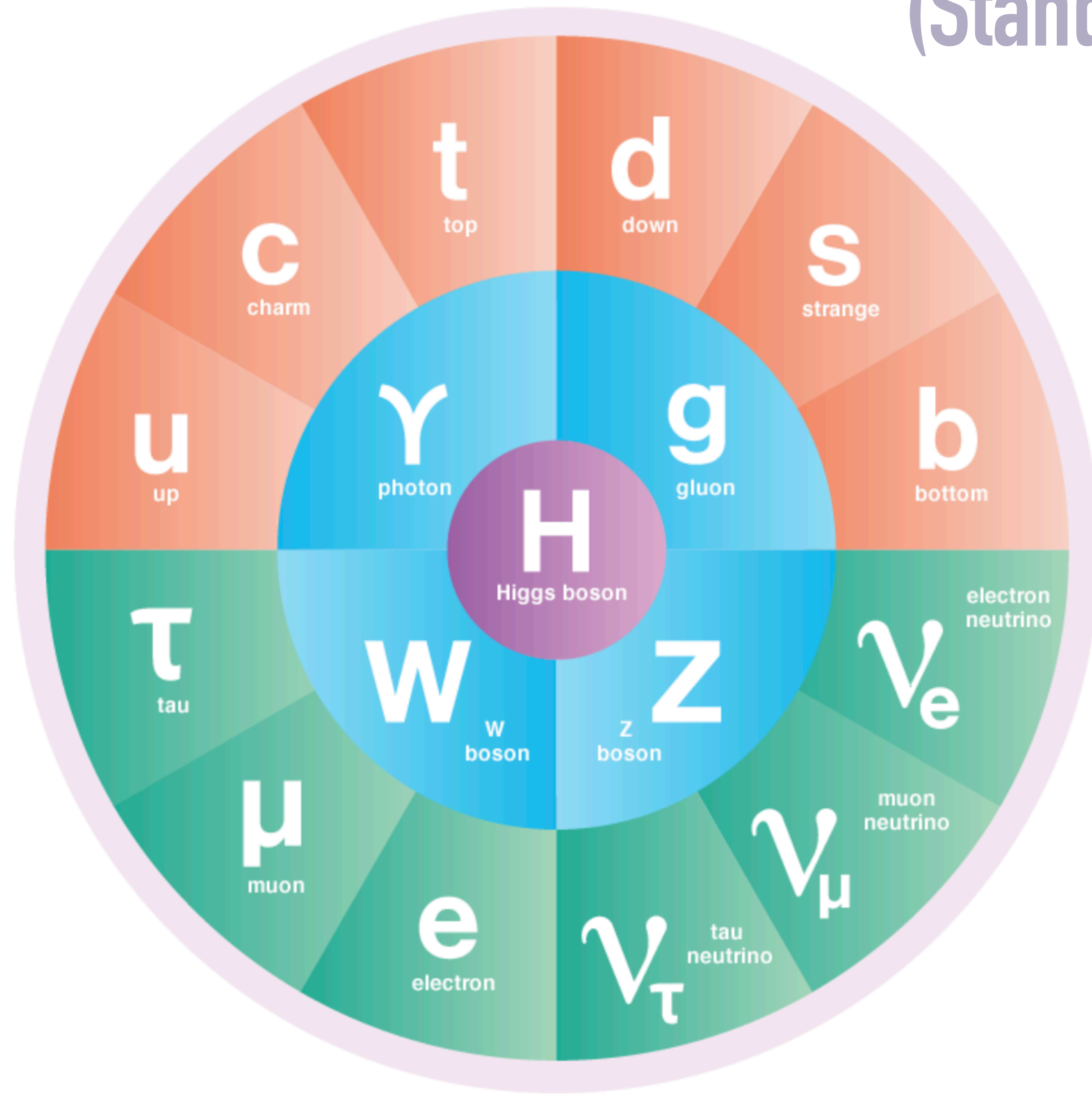


**Quelles sont les forces et composantes
fondamentales de l'univers ?**

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

Le modèle standard

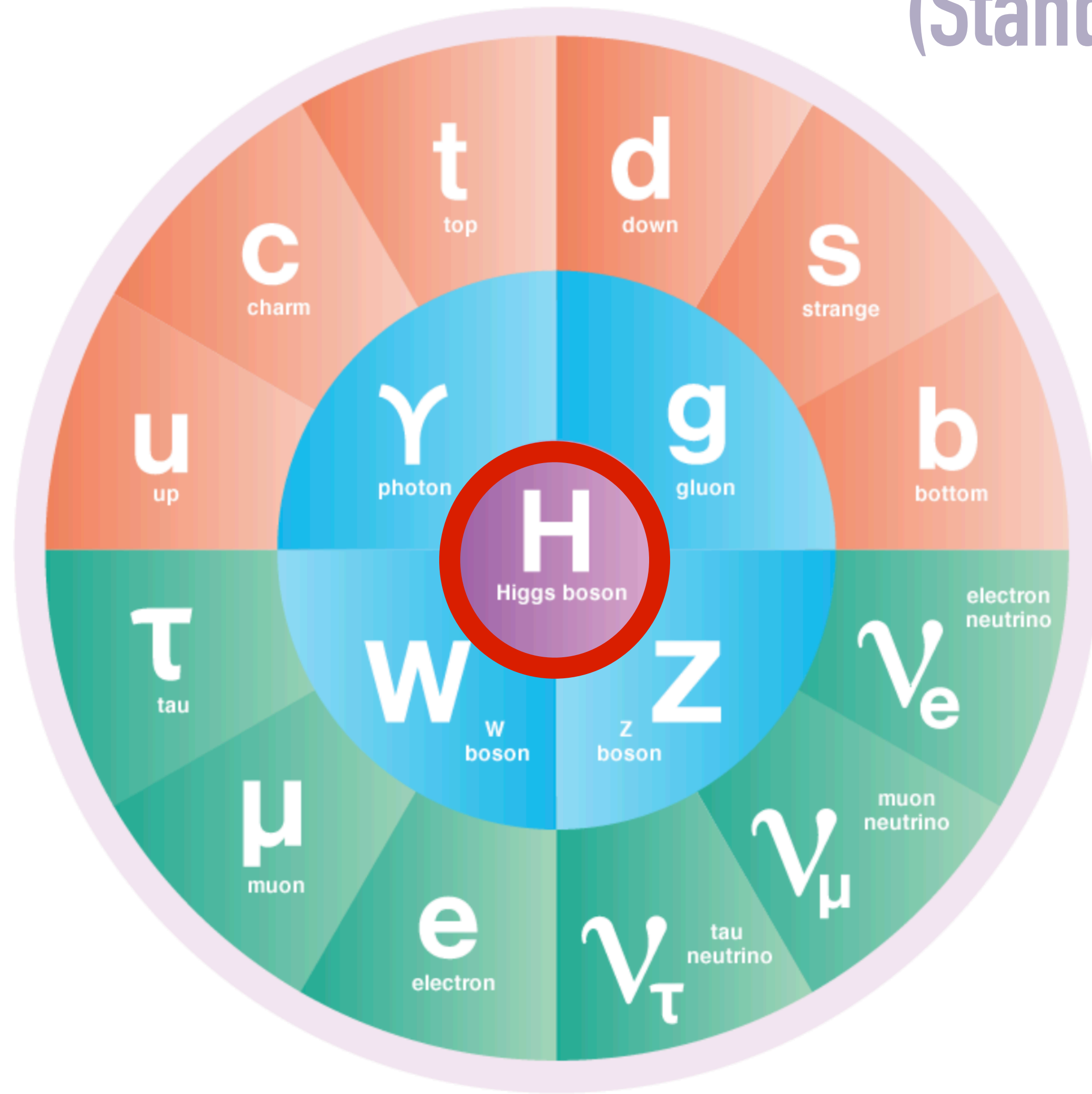
(Standard Model = SM)



particules

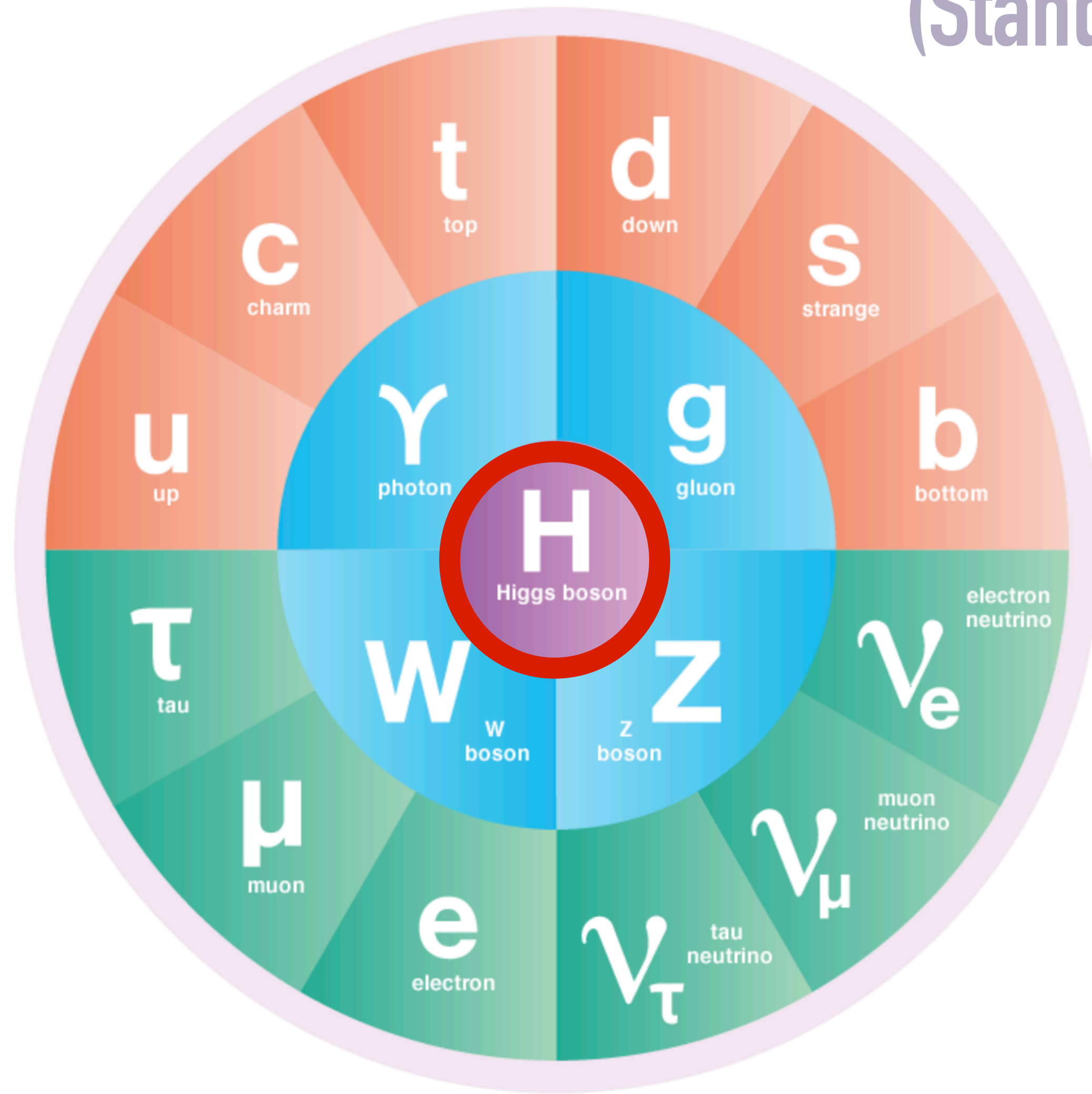
Le modèle standard (Standard Model = SM)

**“le modèle standard
est complet”**



particules

Le modèle standard (Standard Model = SM)

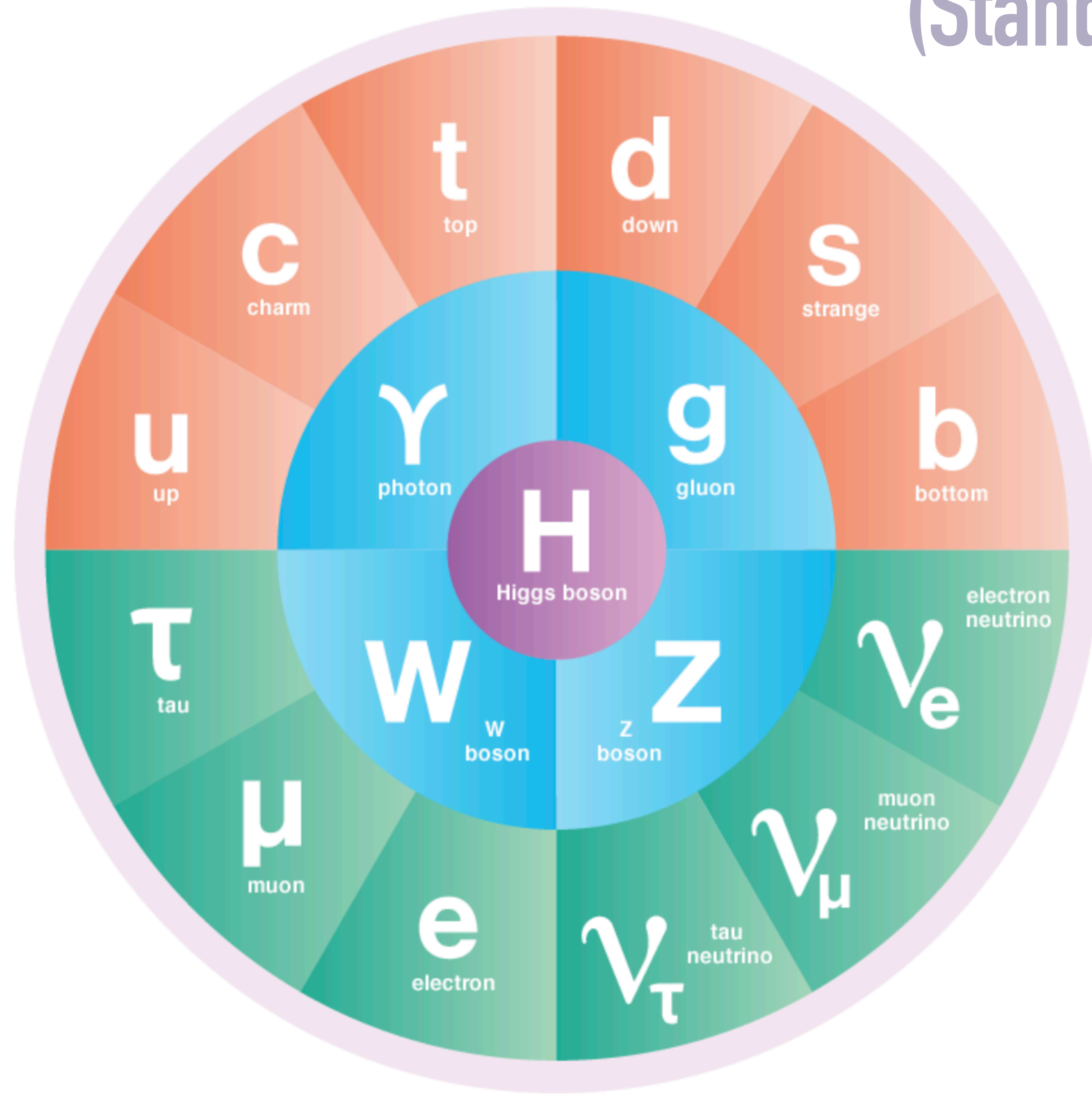


“le modèle standard
est complet”

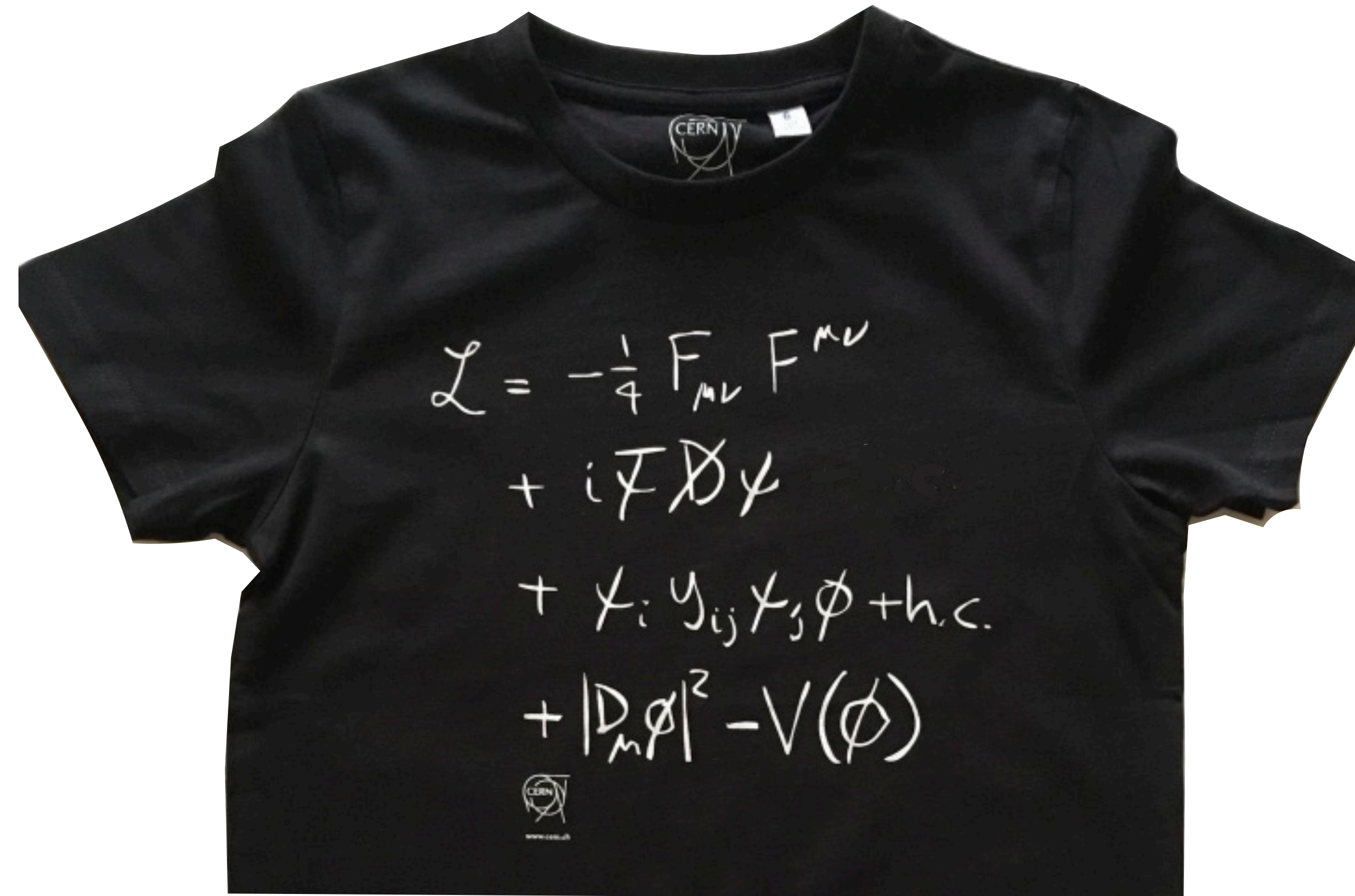
?

particules

Le modèle standard (Standard Model = SM)

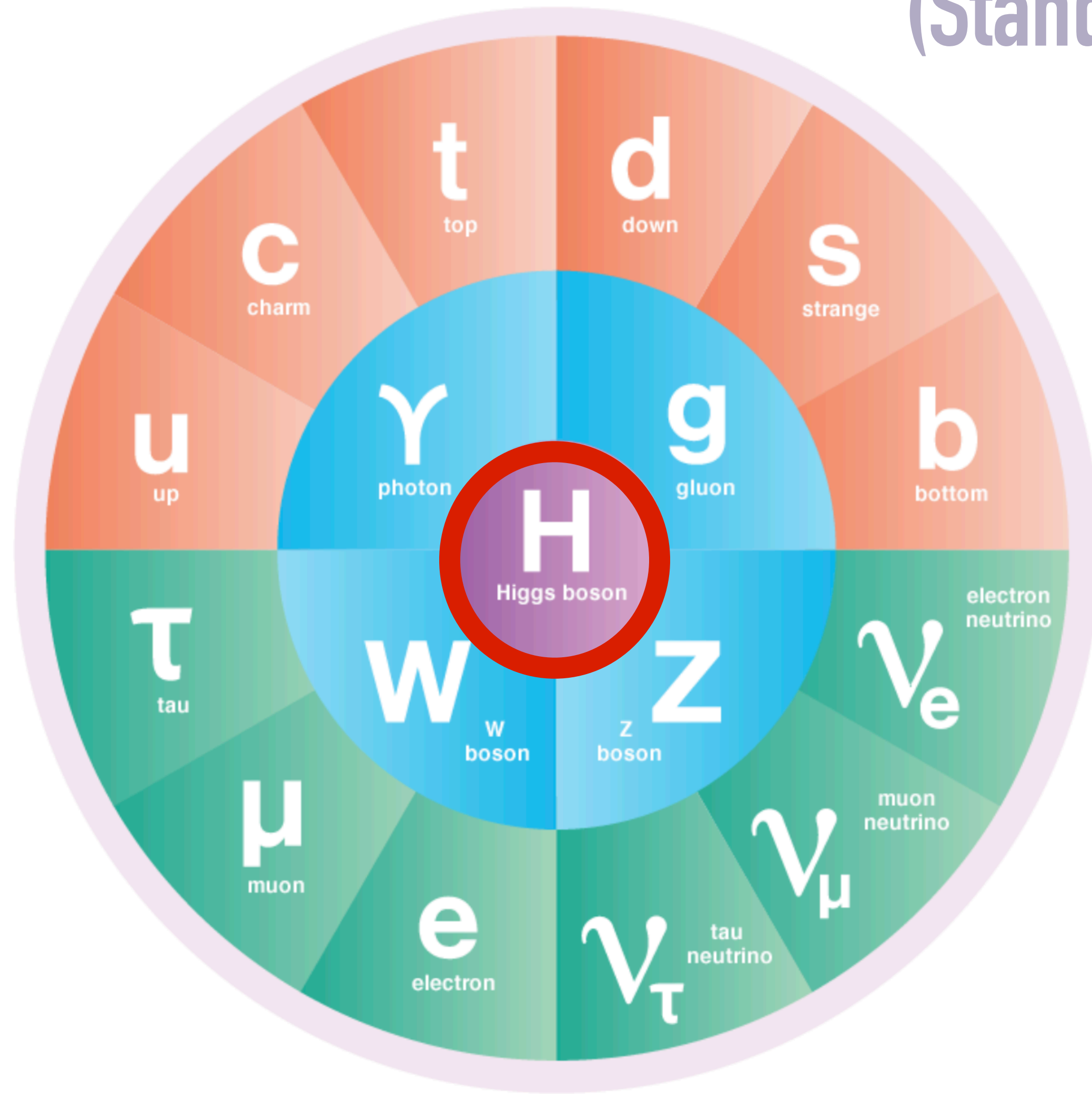


particules

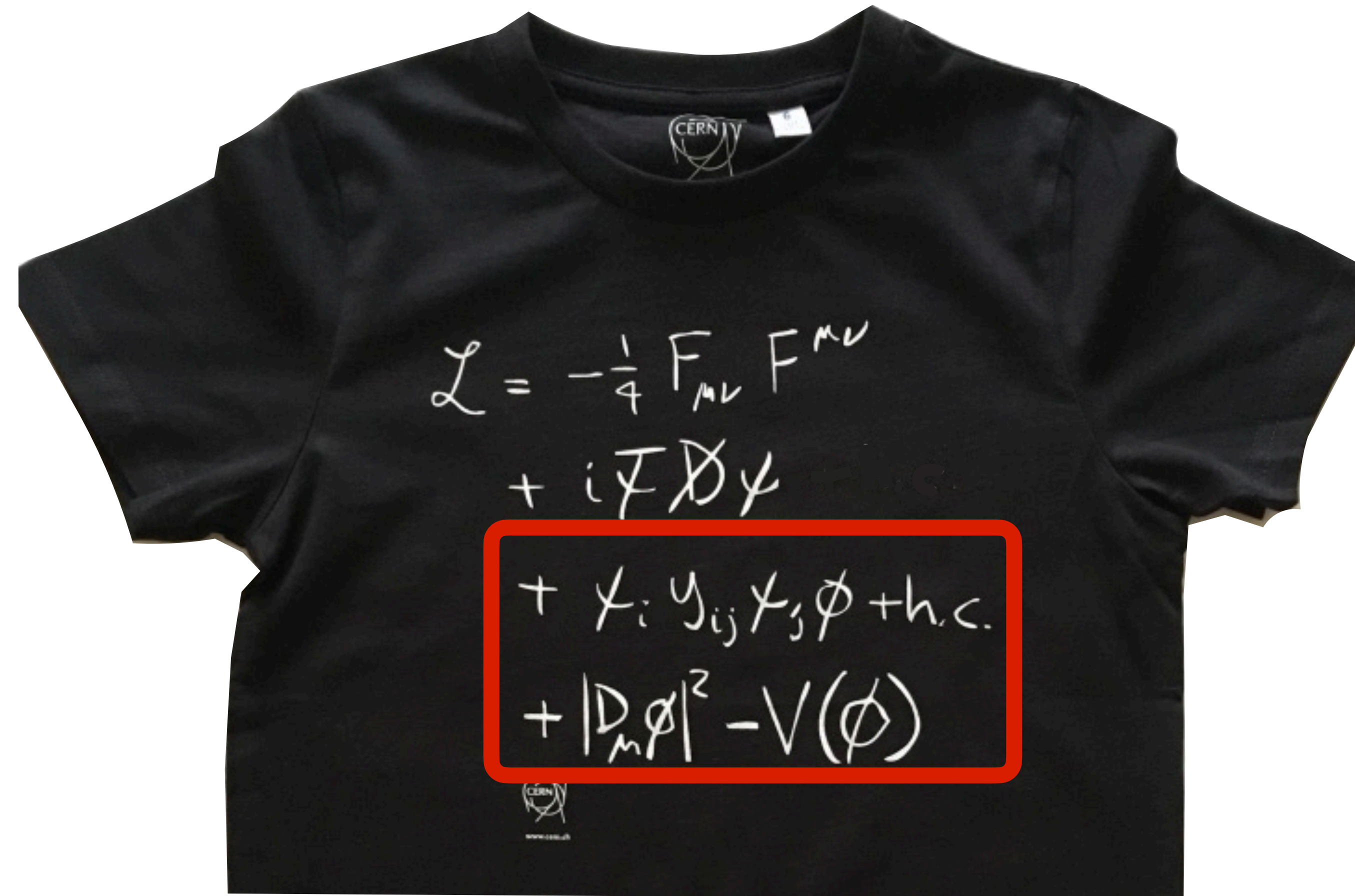


interactions

Le modèle standard (Standard Model = SM)



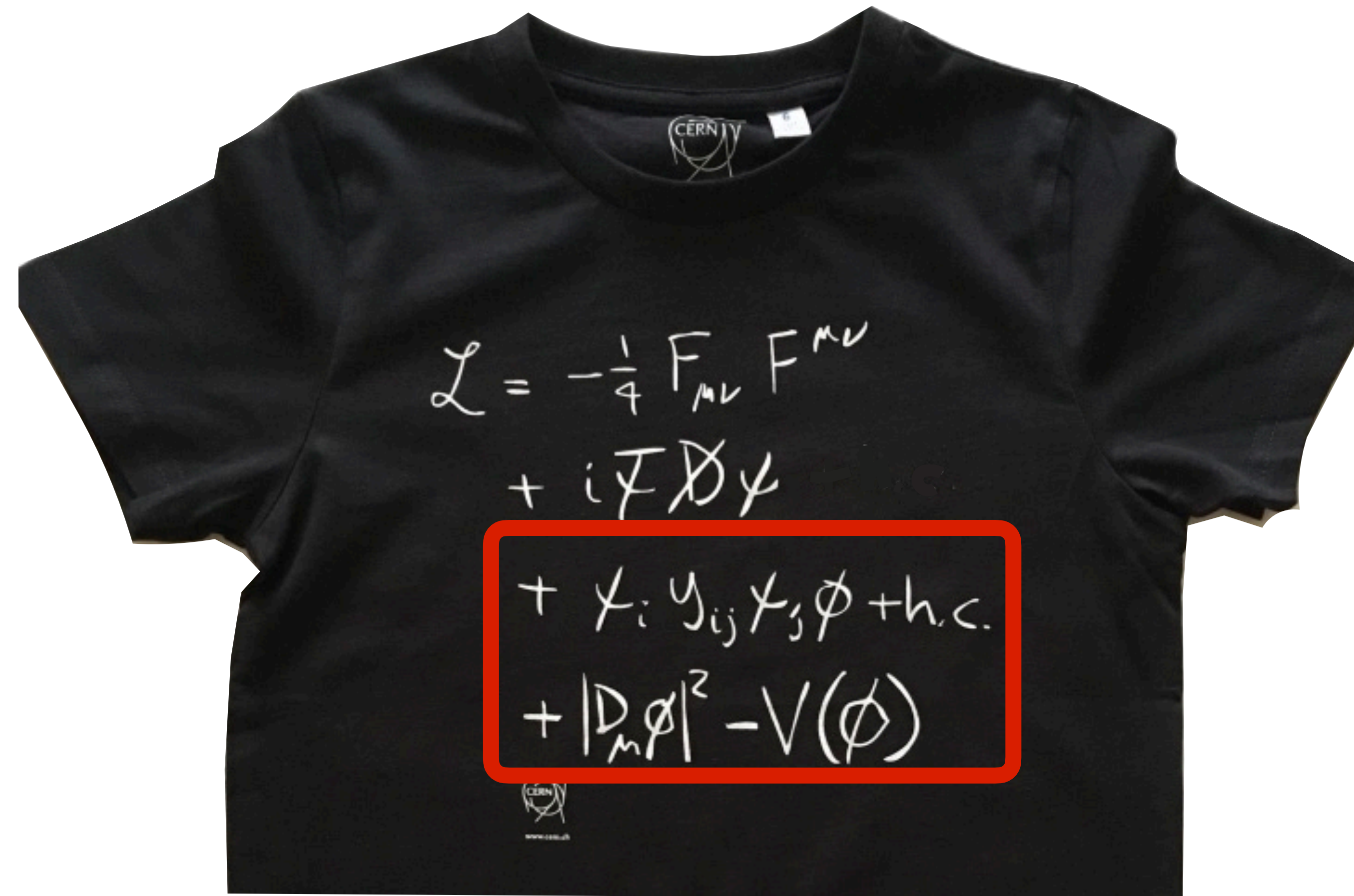
particules



interactions

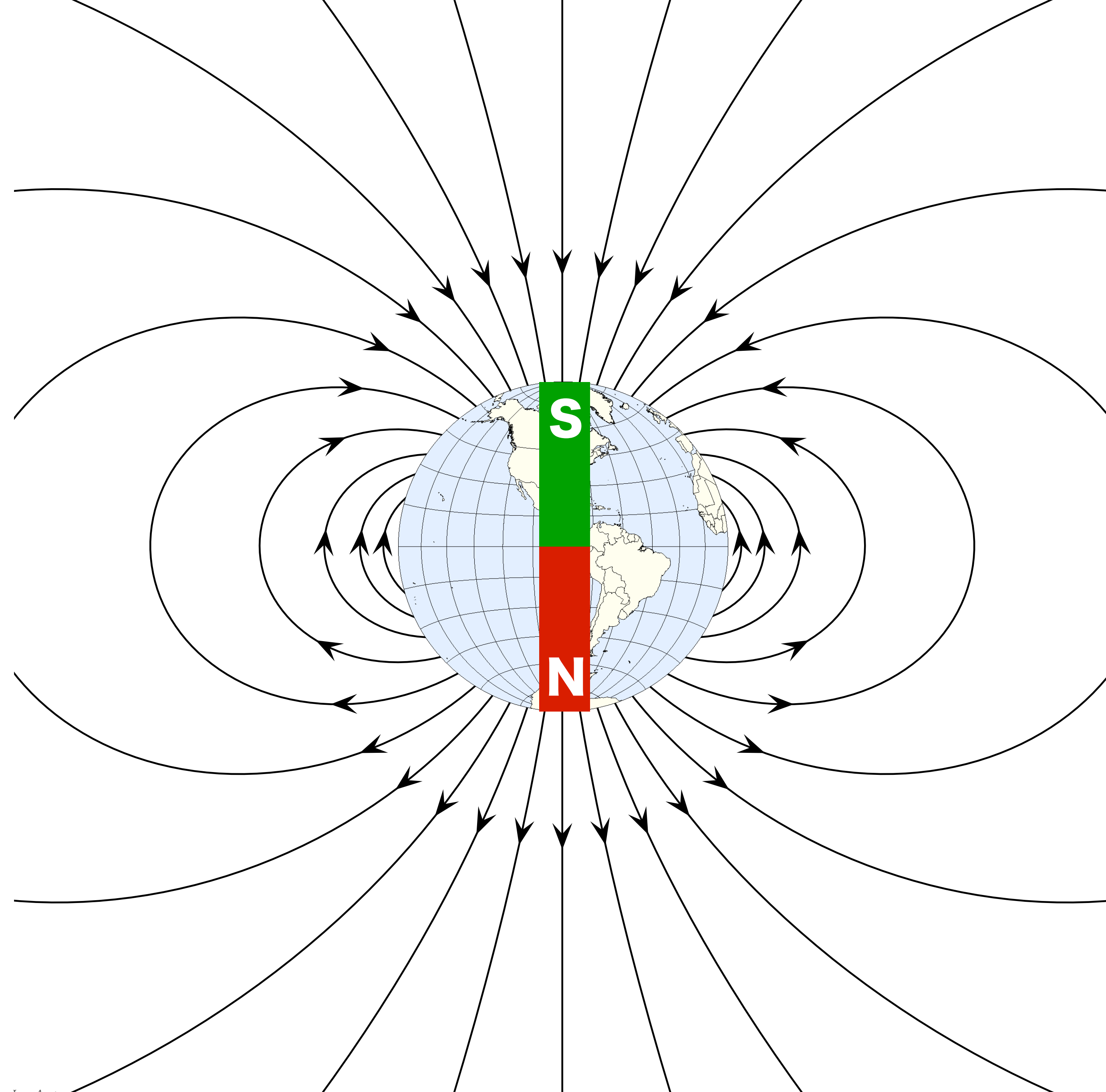
Le modèle standard (Standard Model = SM)

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

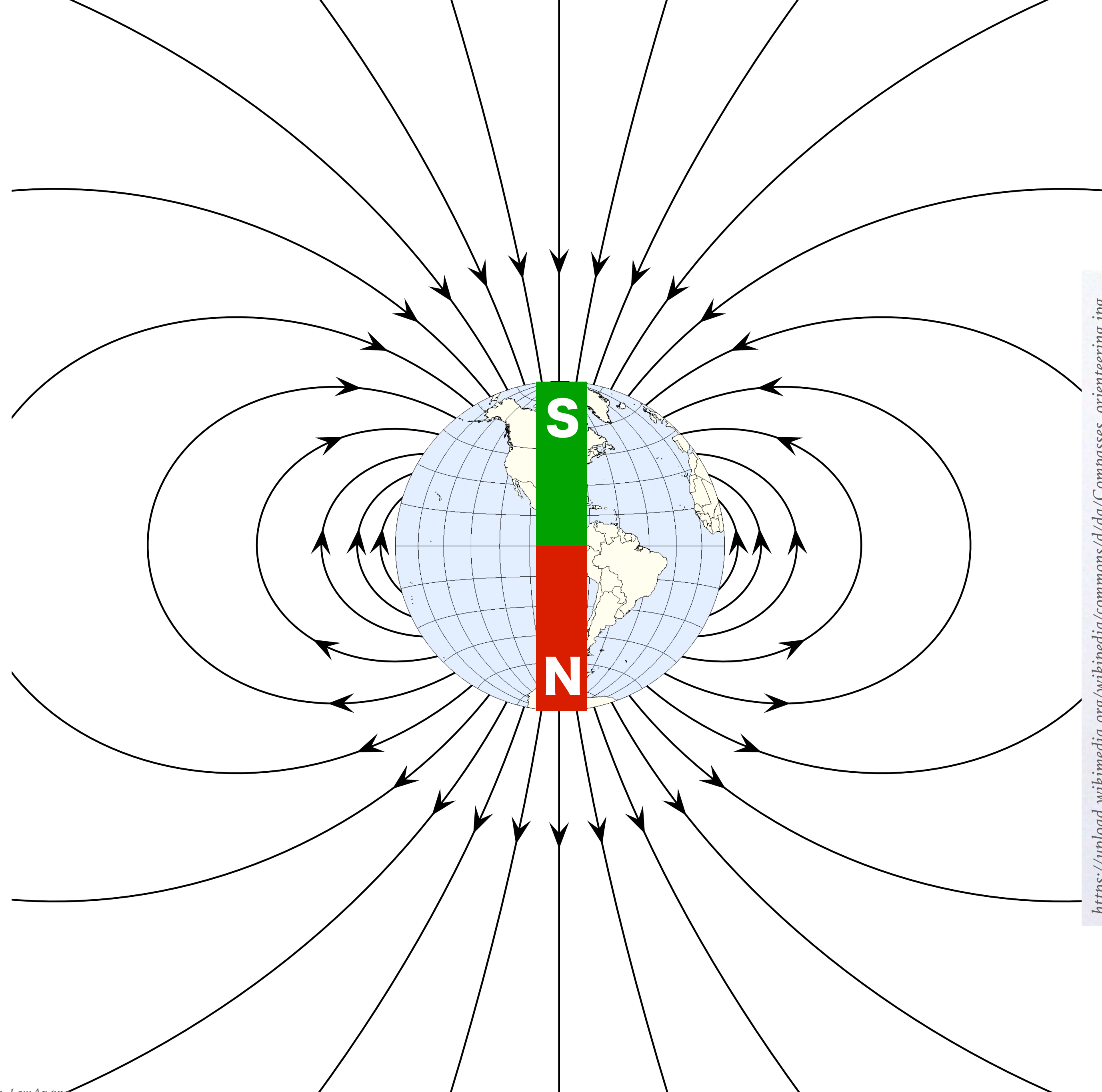


interactions

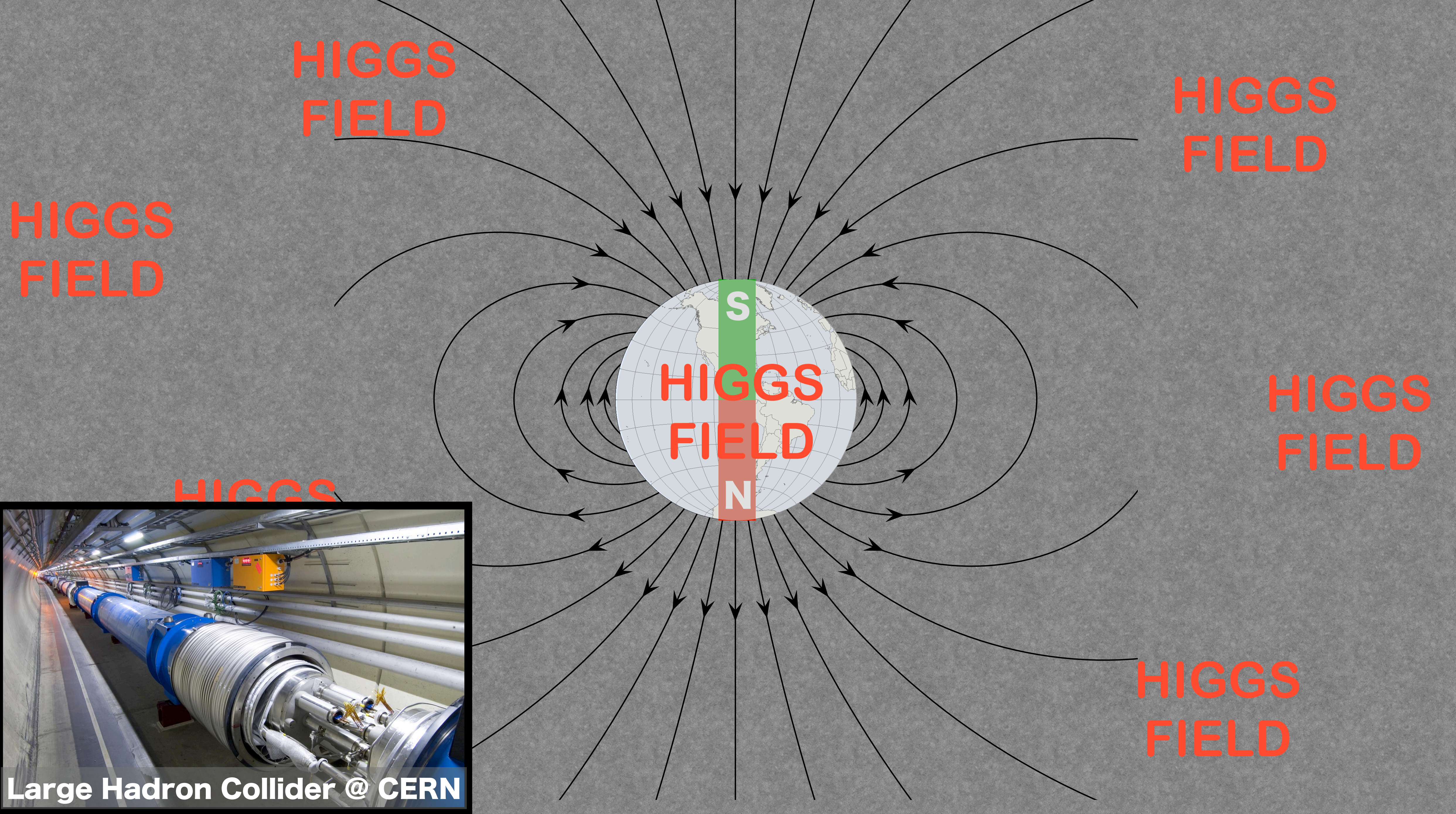
La physique du Higgs



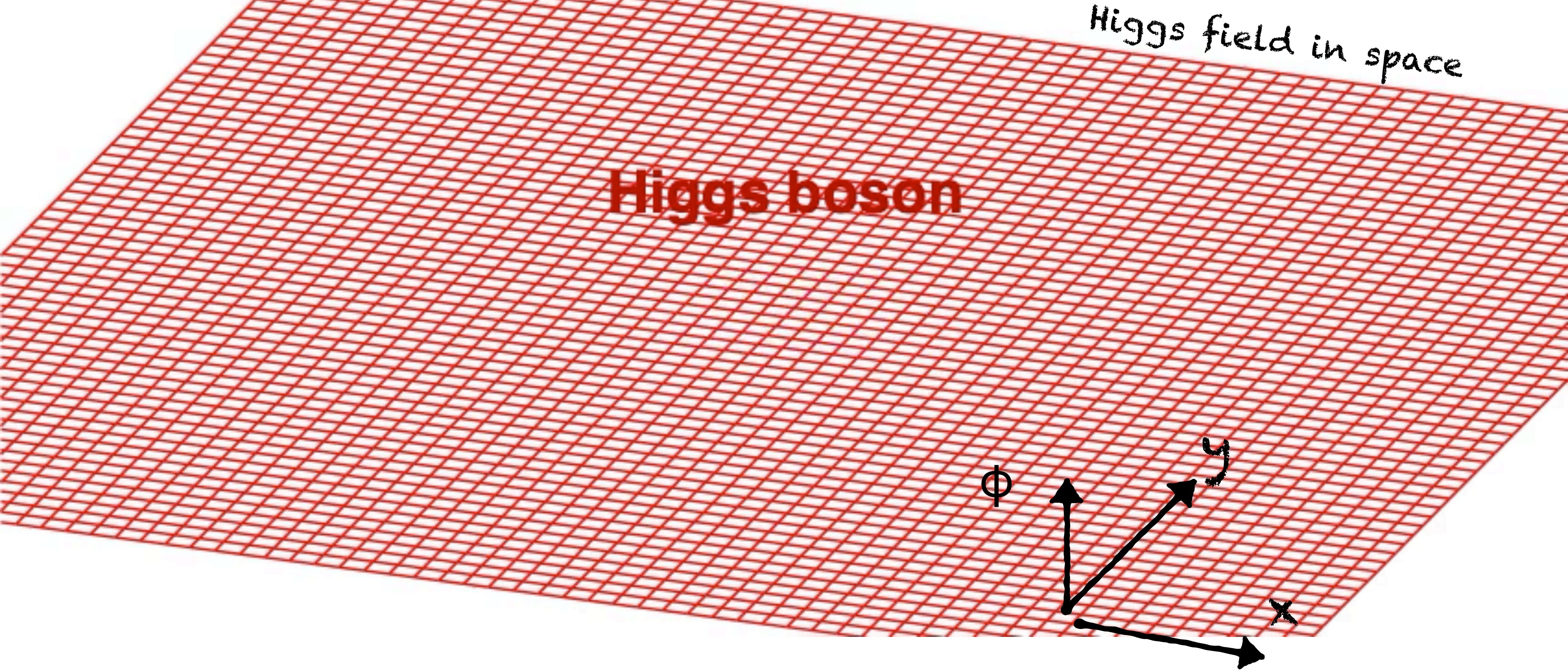
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFpt_Dipole_field.svg
https://en.wikipedia.org/wiki/Western_Hemisphere#/media/File:Western_Hemisphere_LamAz.png



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

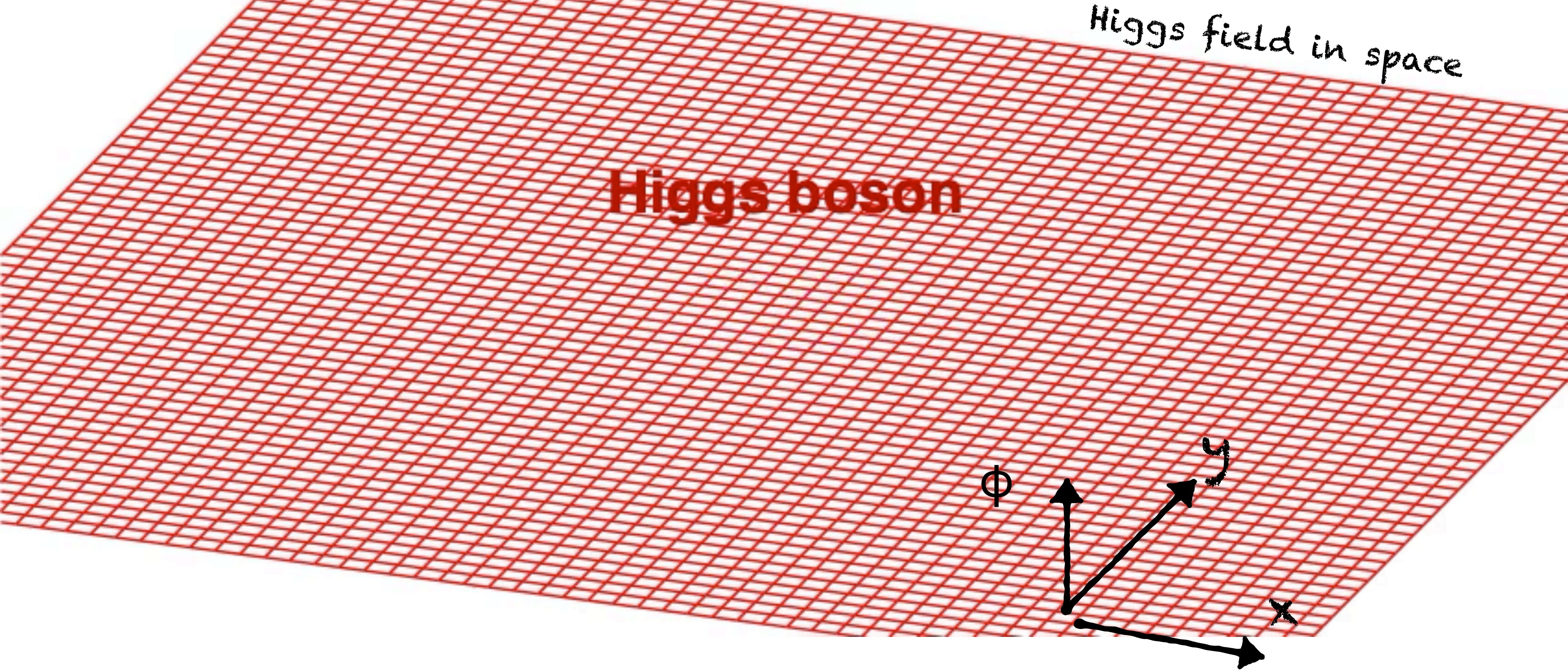


Large Hadron Collider @ CERN



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

Le boson de Higgs correspond à une fluctuation localisée du champ



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

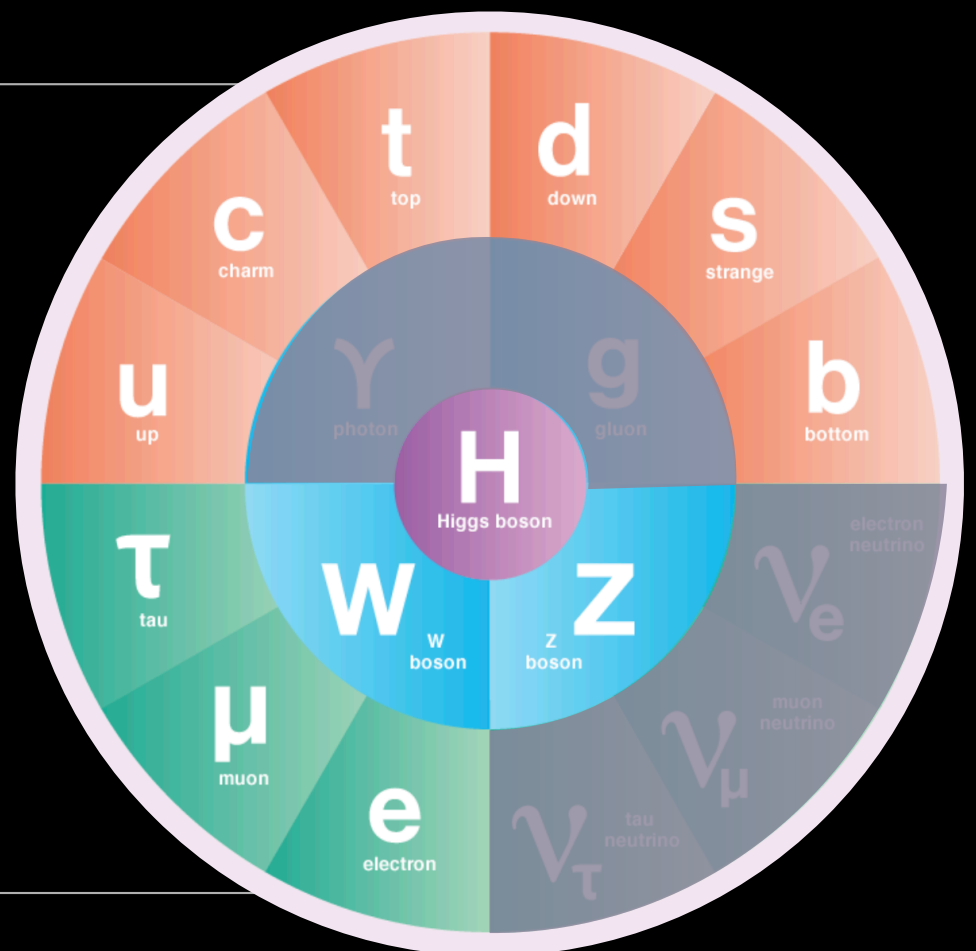
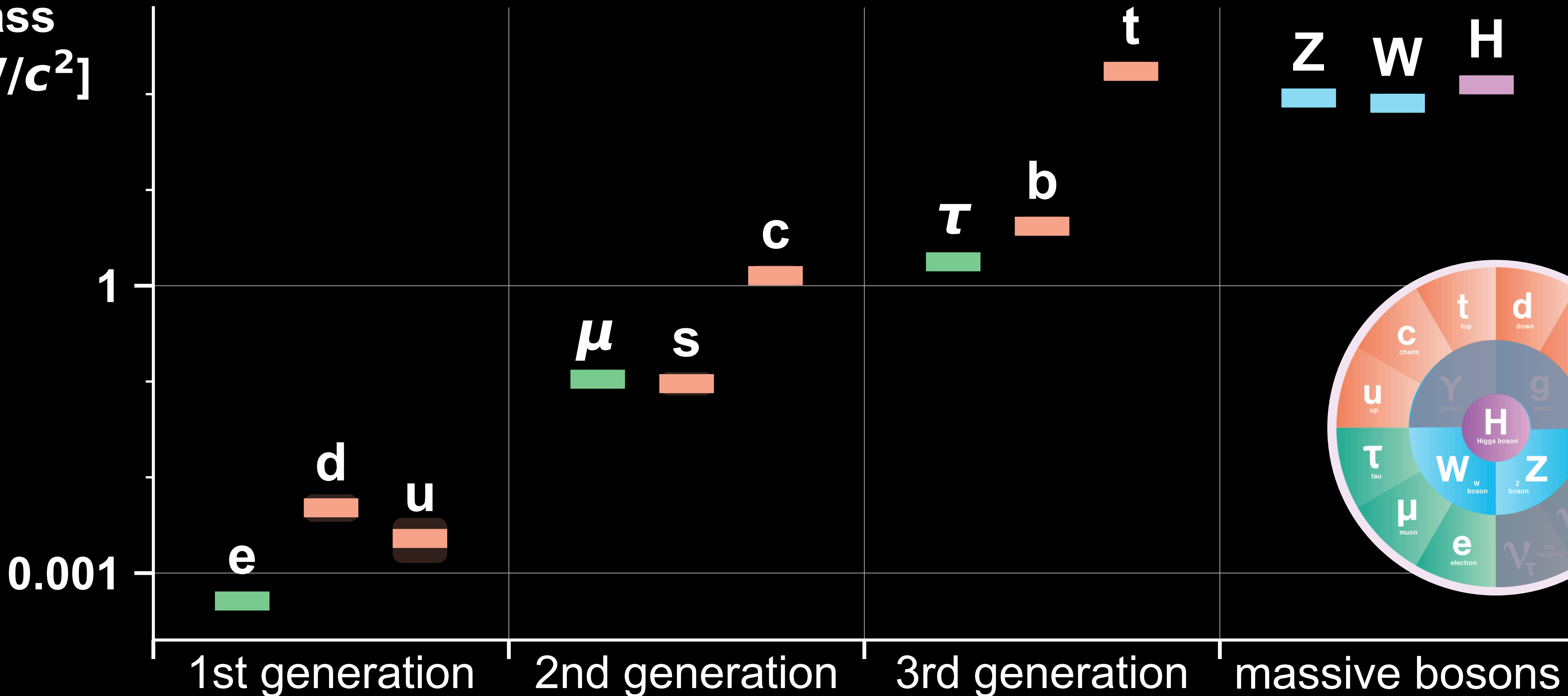
Le boson de Higgs correspond à une fluctuation localisée du champ

**une hypothèse au coeur du
modèle standard**

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

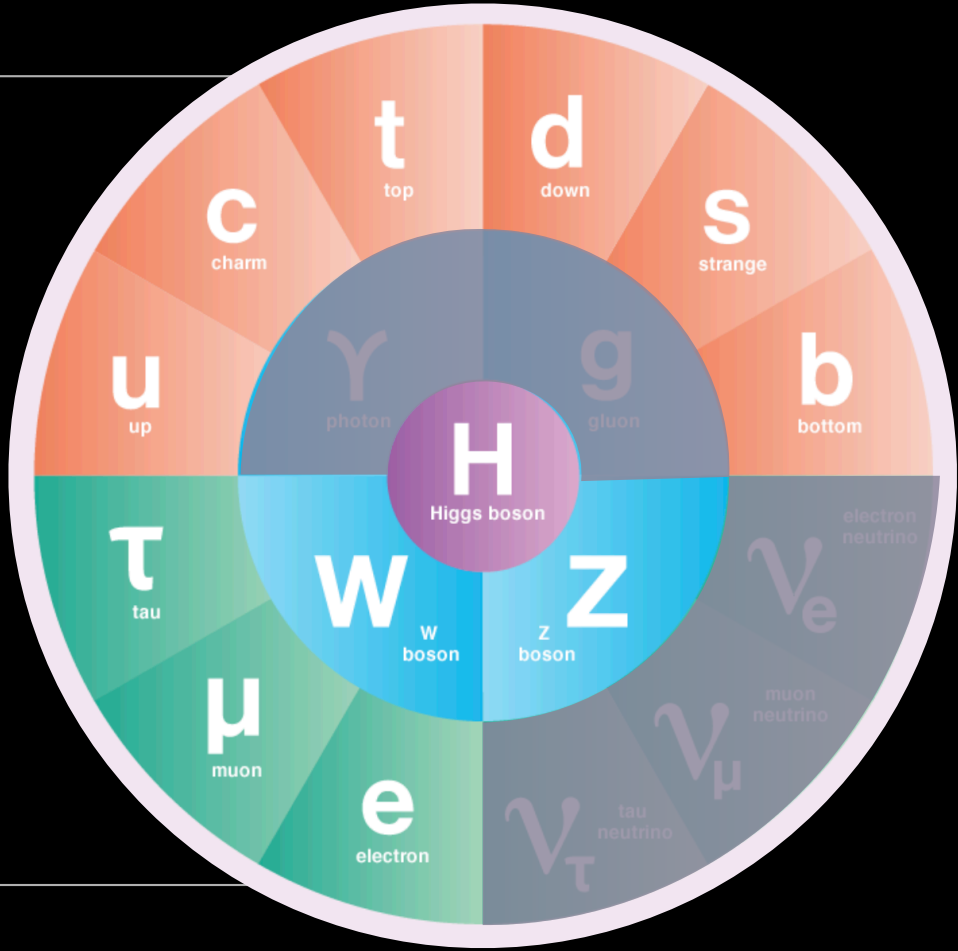
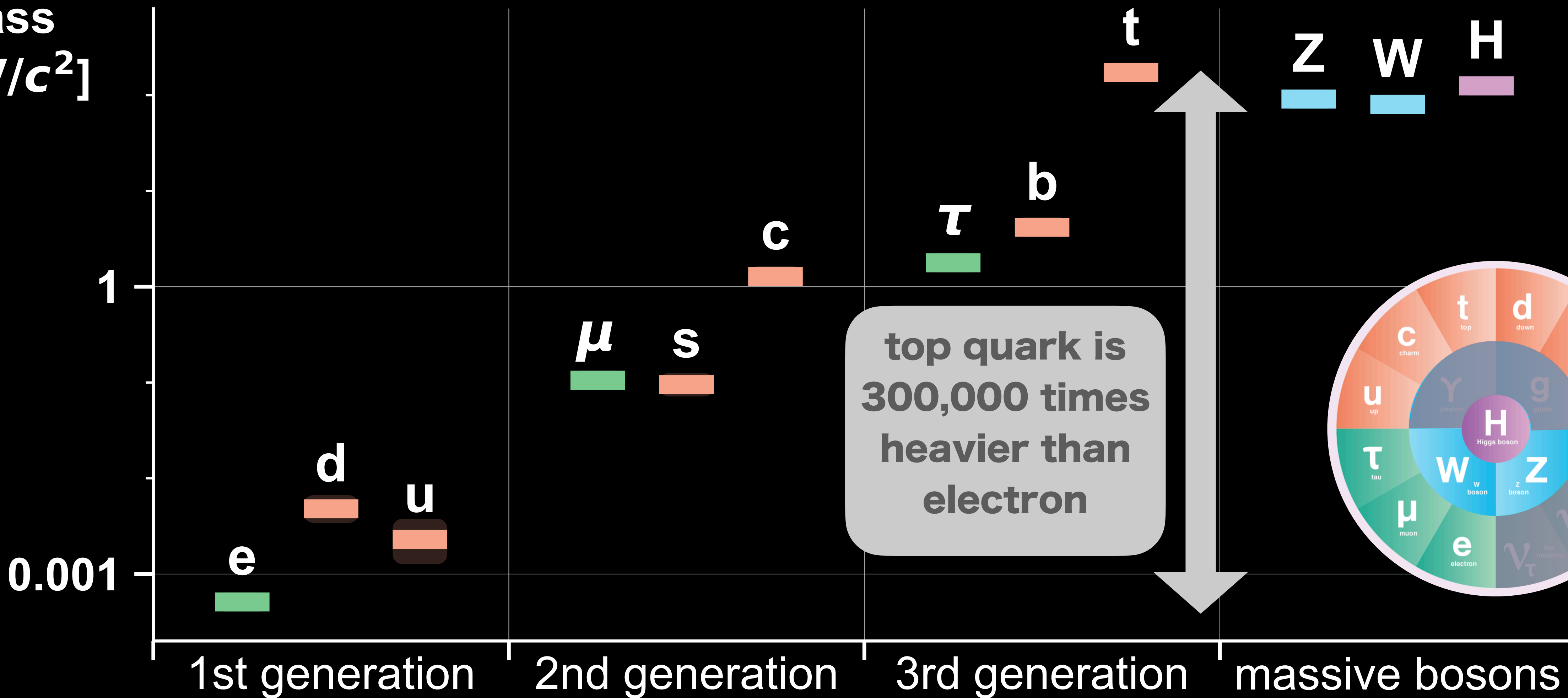
Standard Model massive particles (except ν)

mass
[GeV/c²]

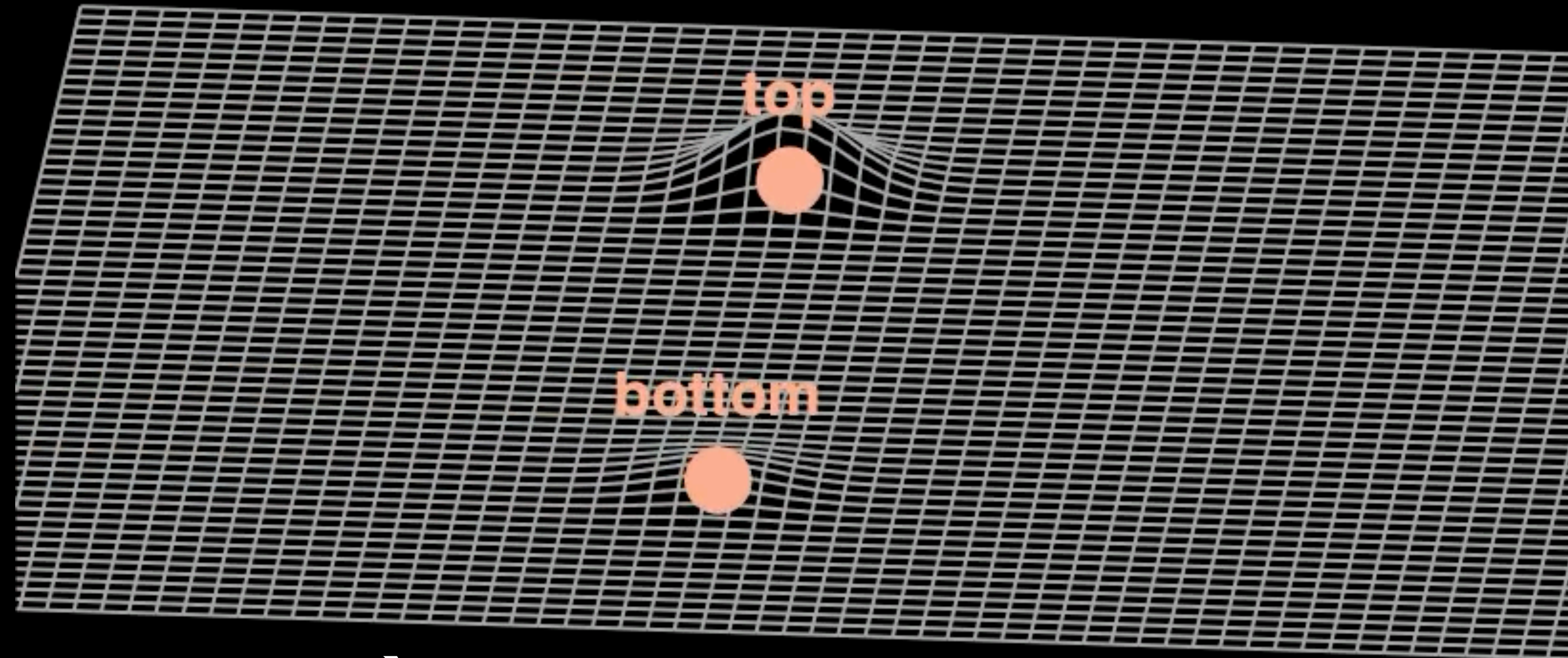


Standard Model massive particles (except ν)

mass
[GeV/c²]

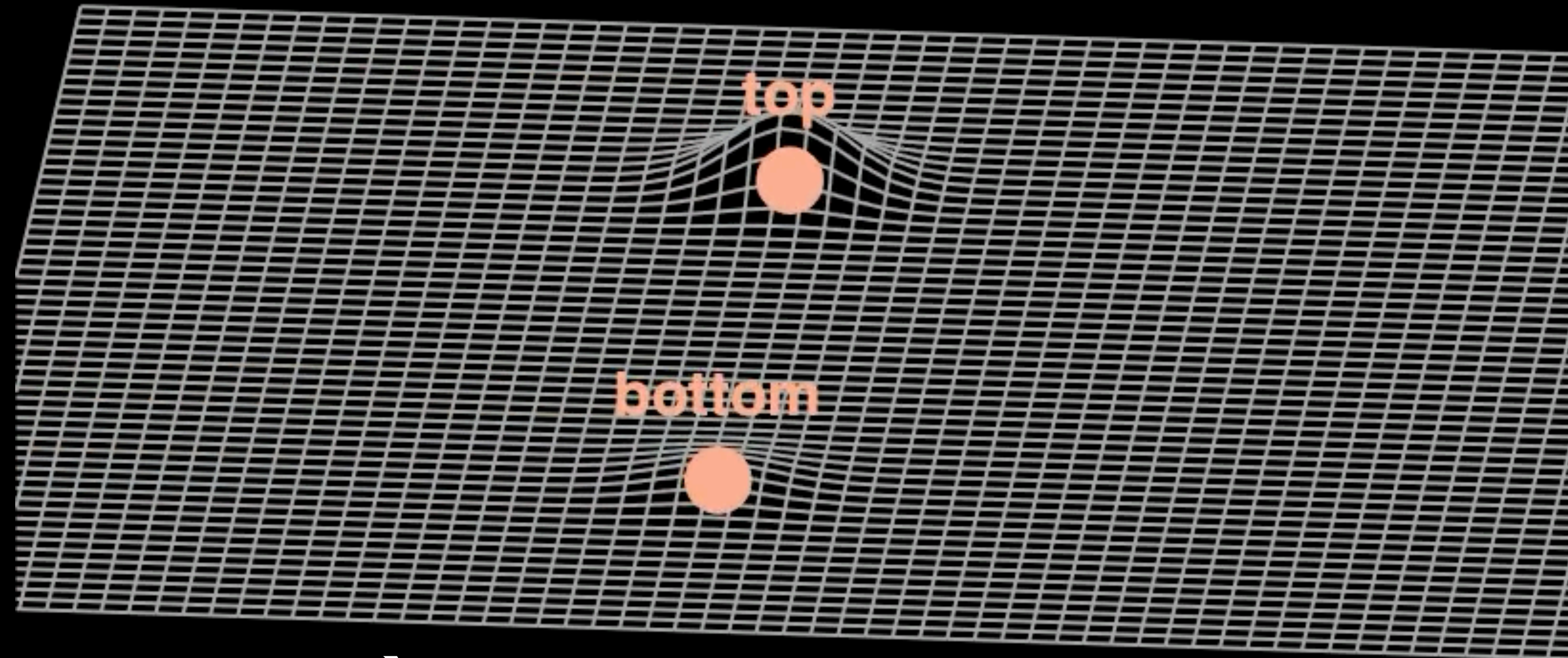


champ de Higgs



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 ?

A diagram illustrating the Higgs field potential. It shows a 3D grid representing the field's energy landscape. Two orange spheres are positioned at different heights on the grid: the top sphere is labeled 'top' and the bottom sphere is labeled 'bottom'. The 'top' sphere is at a higher peak of the potential, while the 'bottom' sphere is at a lower valley. This visualizes the concept that the top quark has a stronger interaction with the Higgs field, leading to its higher mass.

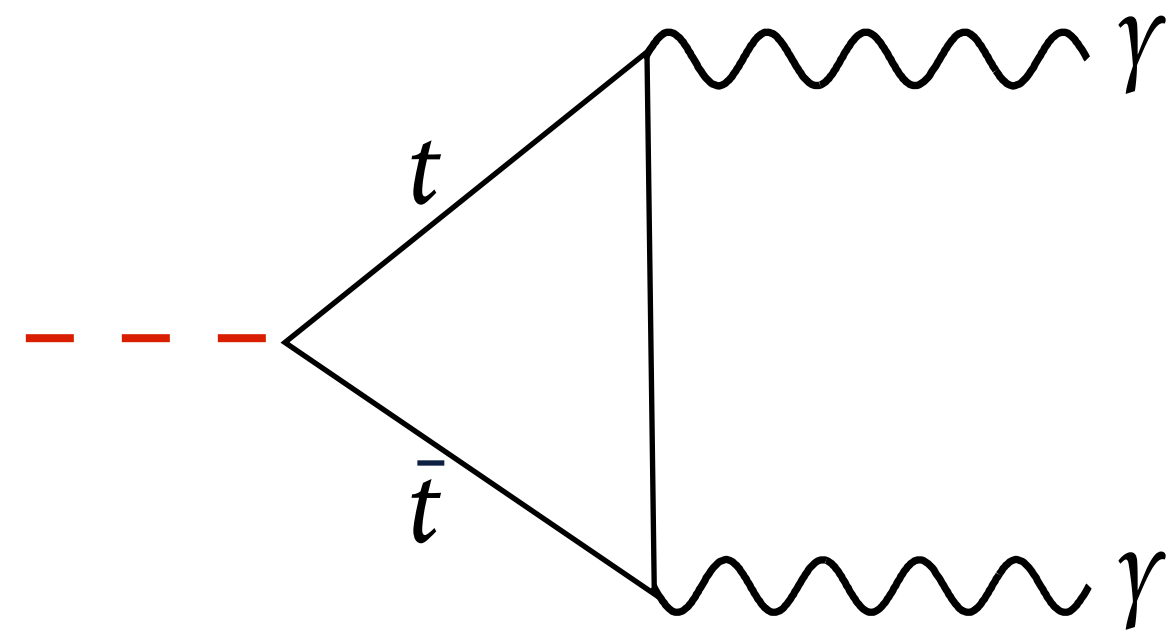
Modèle standard: la masse plus élevée du top vient d'une interaction plus forte avec le champ de Higgs

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



t

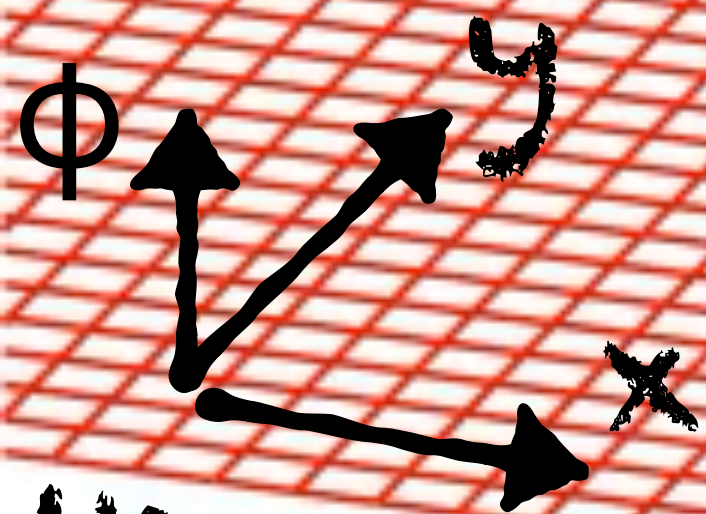
\bar{t}



luon

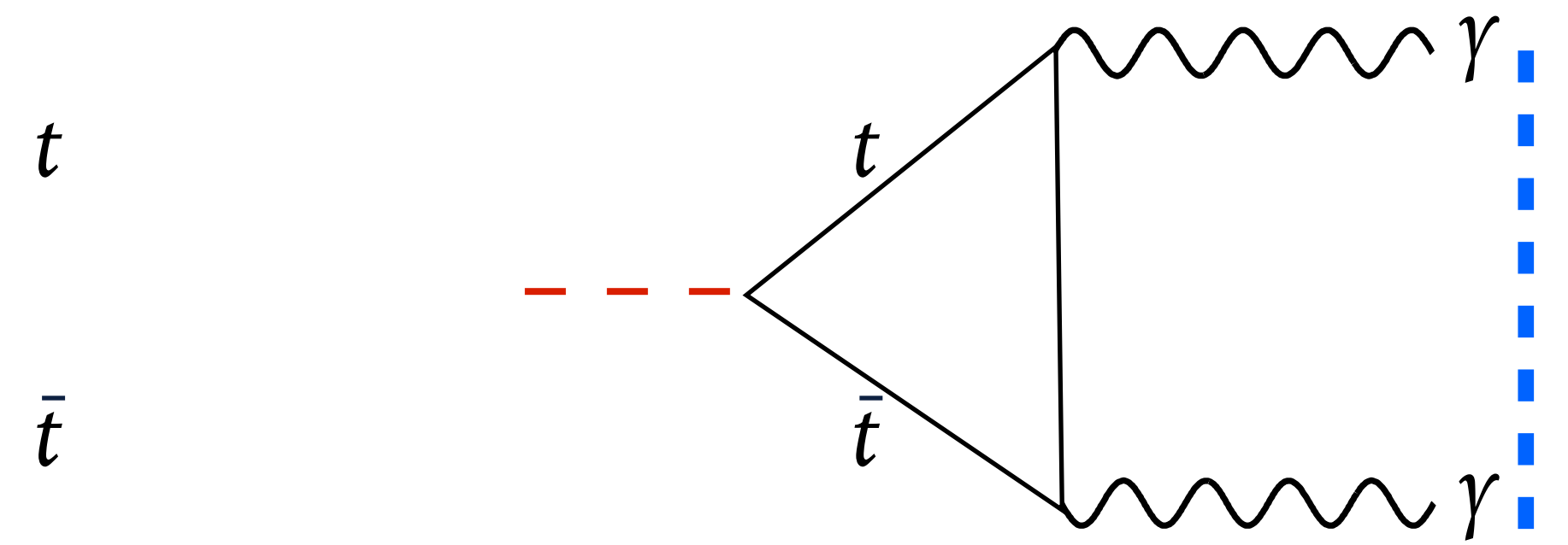


gluo



Higgs field in space

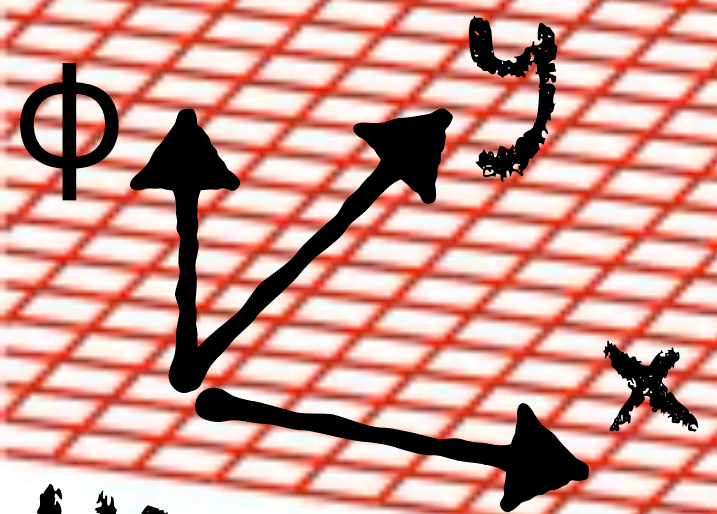
Une collision au LHC comme celles ayant révélé le boson de Higgs



luon

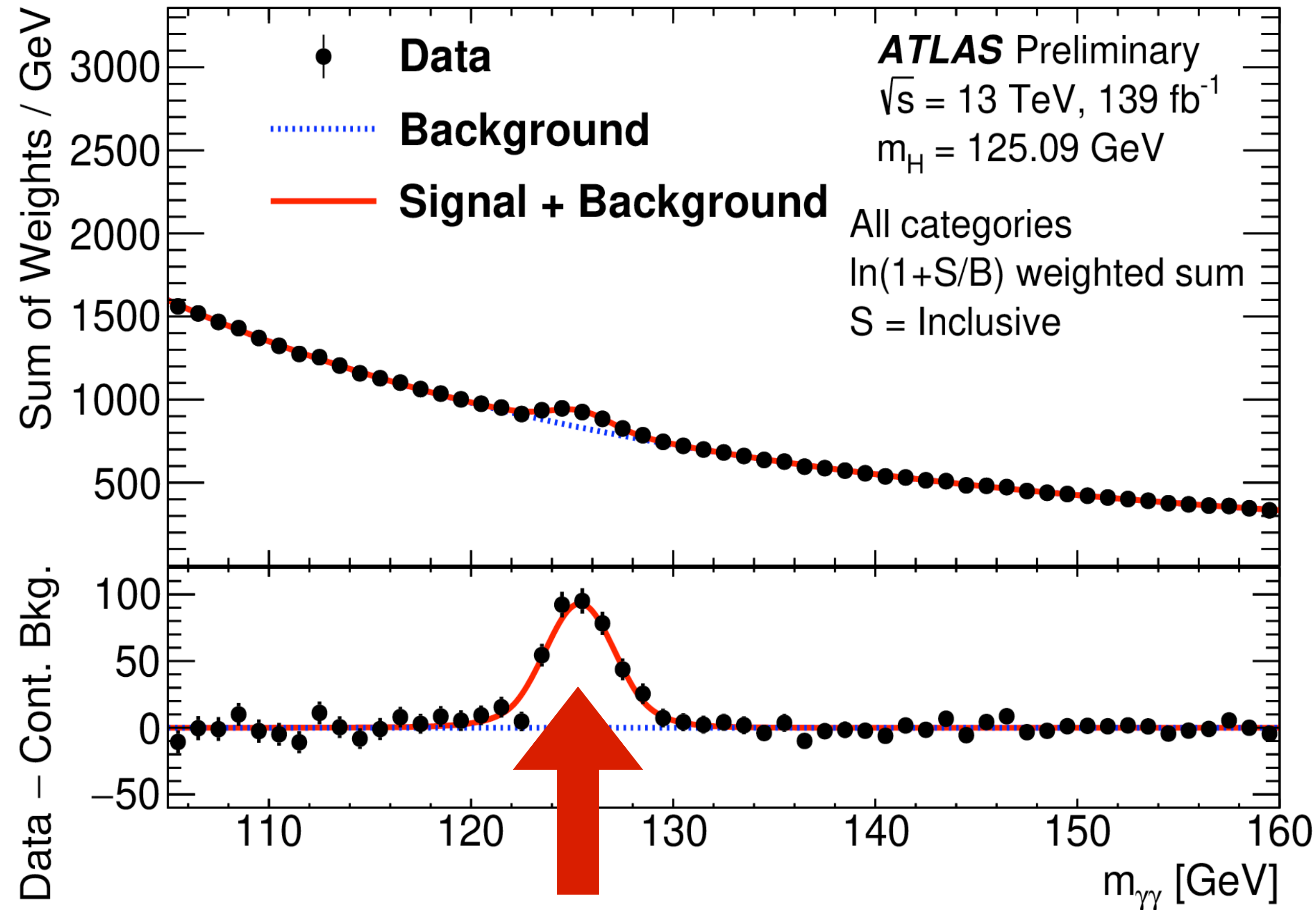


gluo



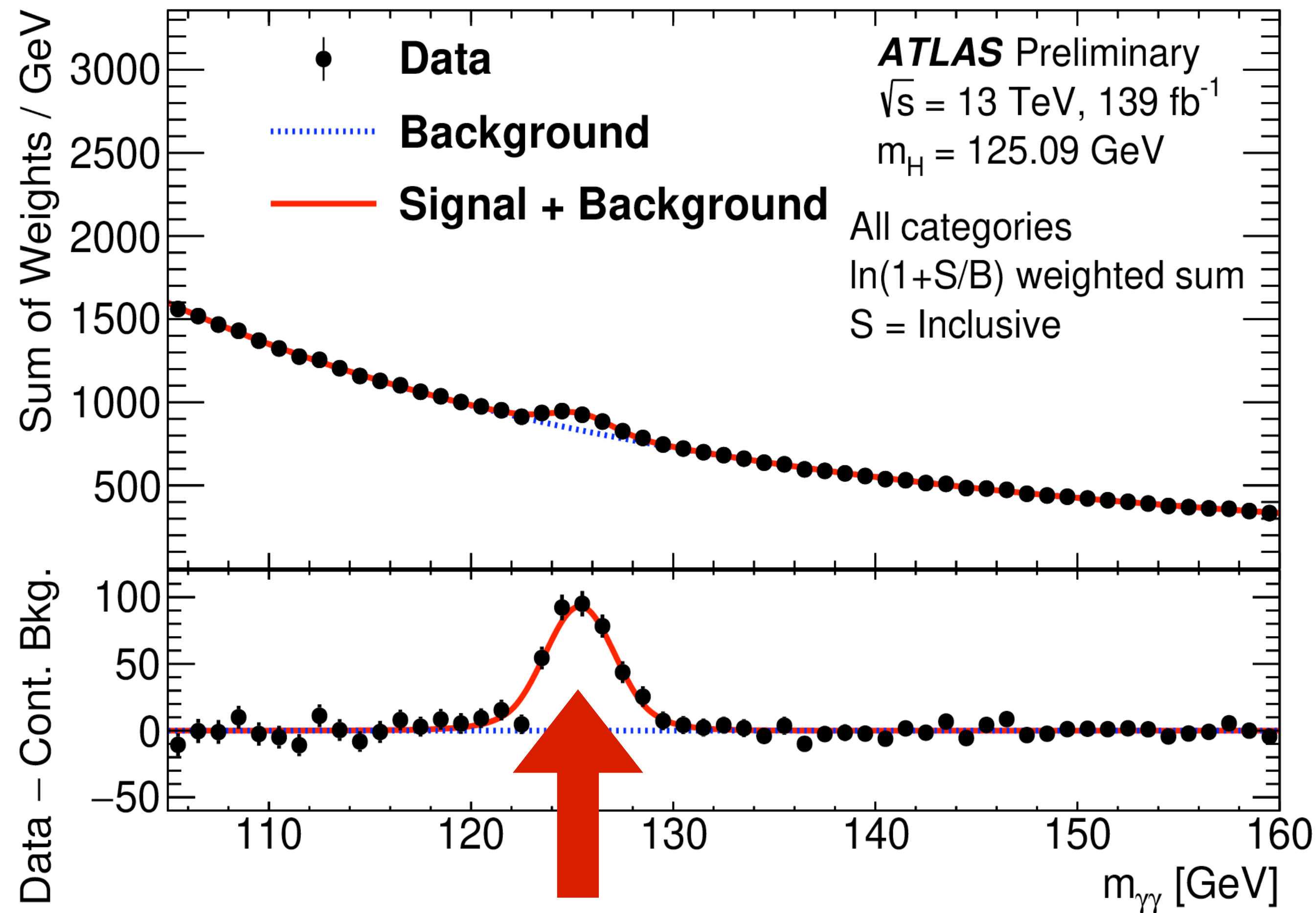
Higgs field in space

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

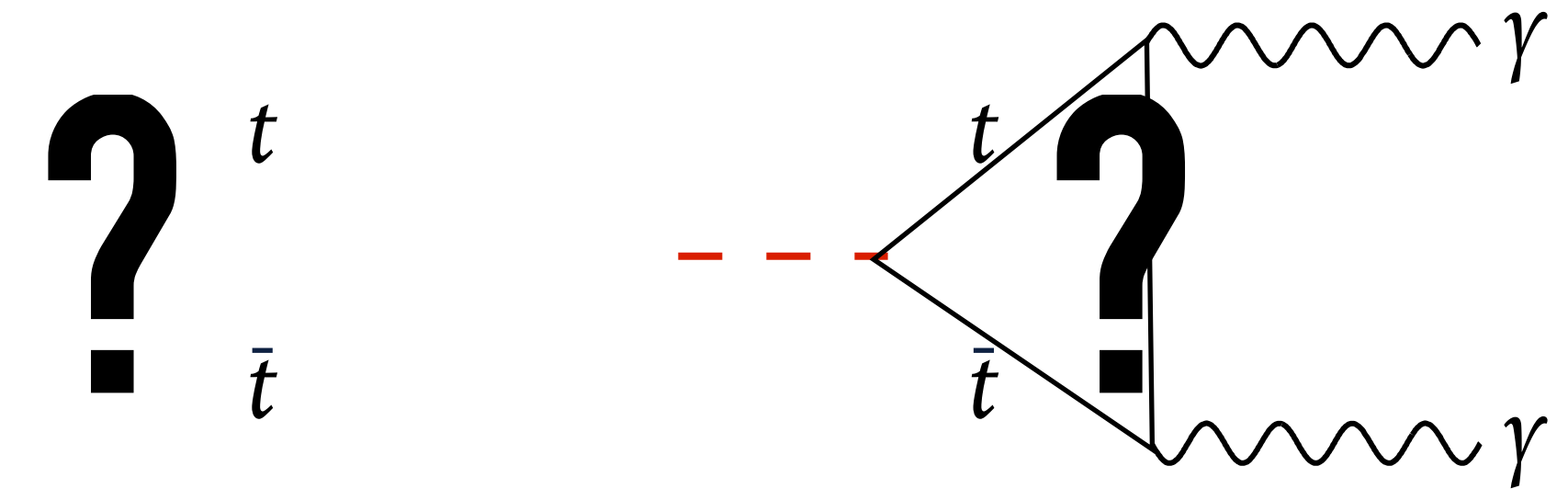


**surplus de collisions avec une
 énergie spécifique
 = boson de Higgs**

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

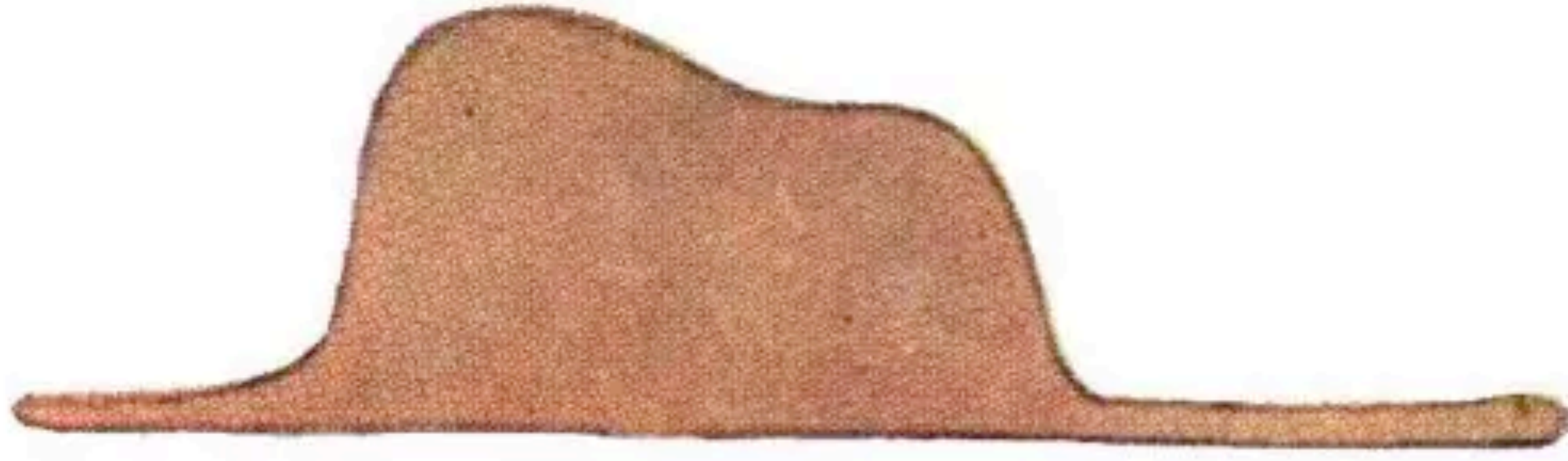


**surplus de collisions avec une
 énergie spécifique
 = boson de Higgs**



**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 ?**

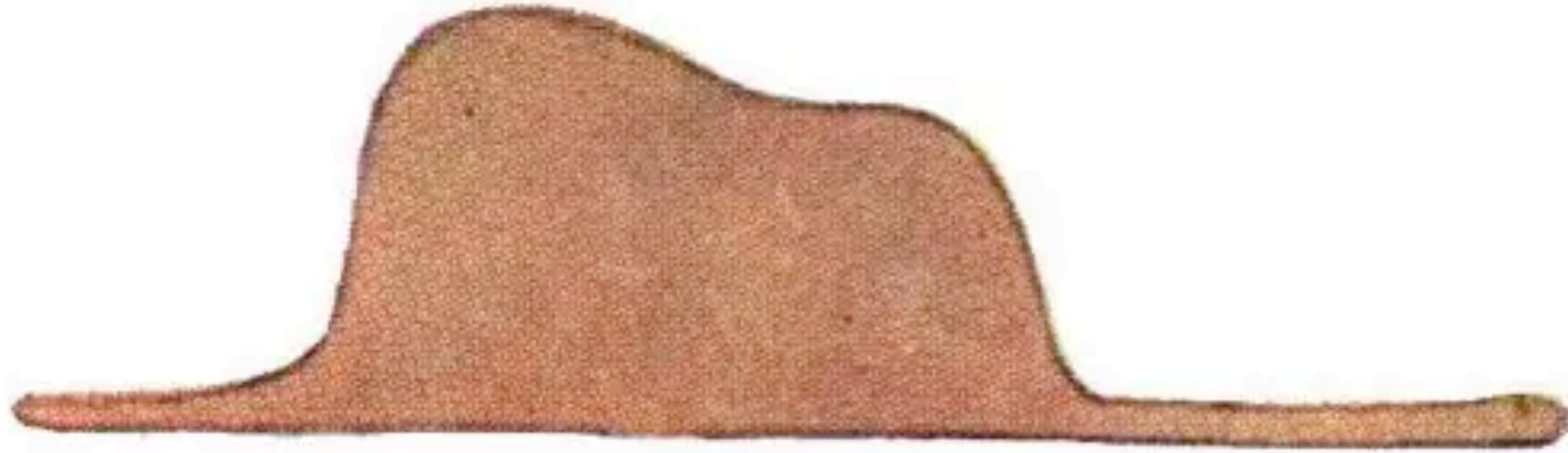
Mon dessin numéro 1



« Pourquoi un chapeau ferait-il peur ? »

Le Petit Prince, Antoine de Saint-Exupéry

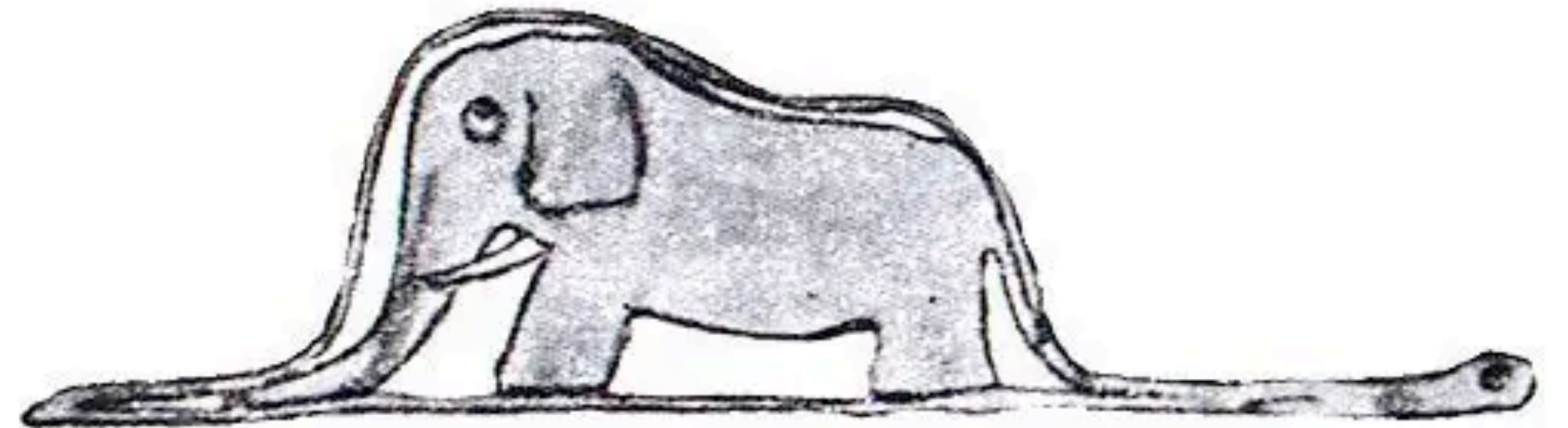
Mon dessin numéro 1



« Pourquoi un chapeau ferait-il peur ? »

Le Petit Prince, Antoine de Saint-Exupéry

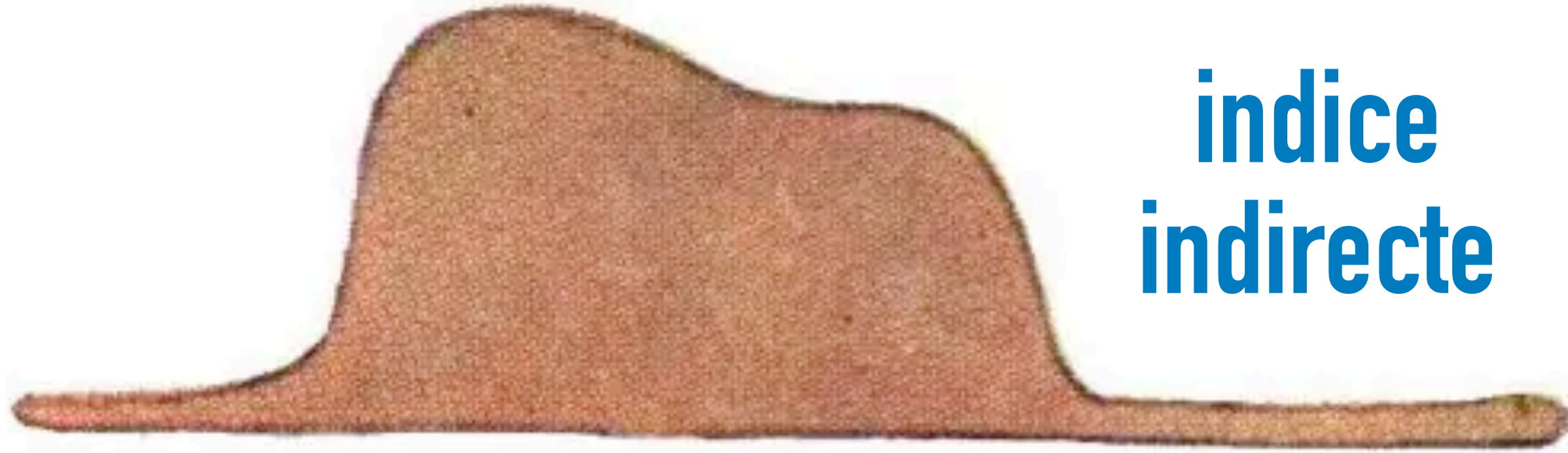
« Mon dessin ne représentait pas un chapeau. Il représentait un serpent boa qui digérait un éléphant. »



Mon dessin numéro 2

Mon dessin numéro 1

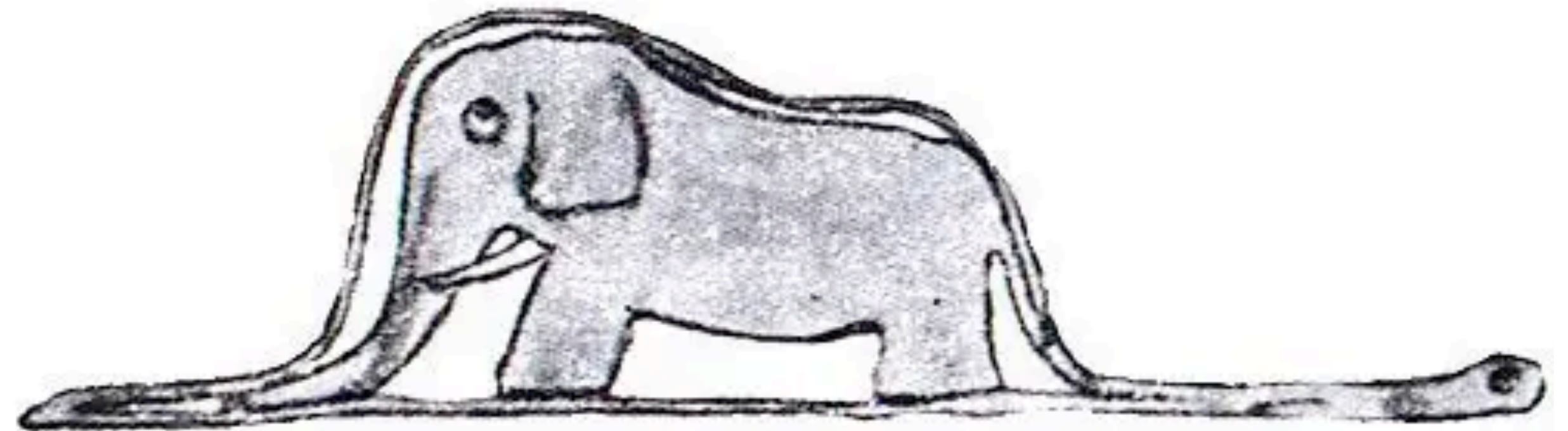
**indice
indirecte**



« Pourquoi un chapeau ferait-il peur ? »

Le Petit Prince, Antoine de Saint-Exupéry

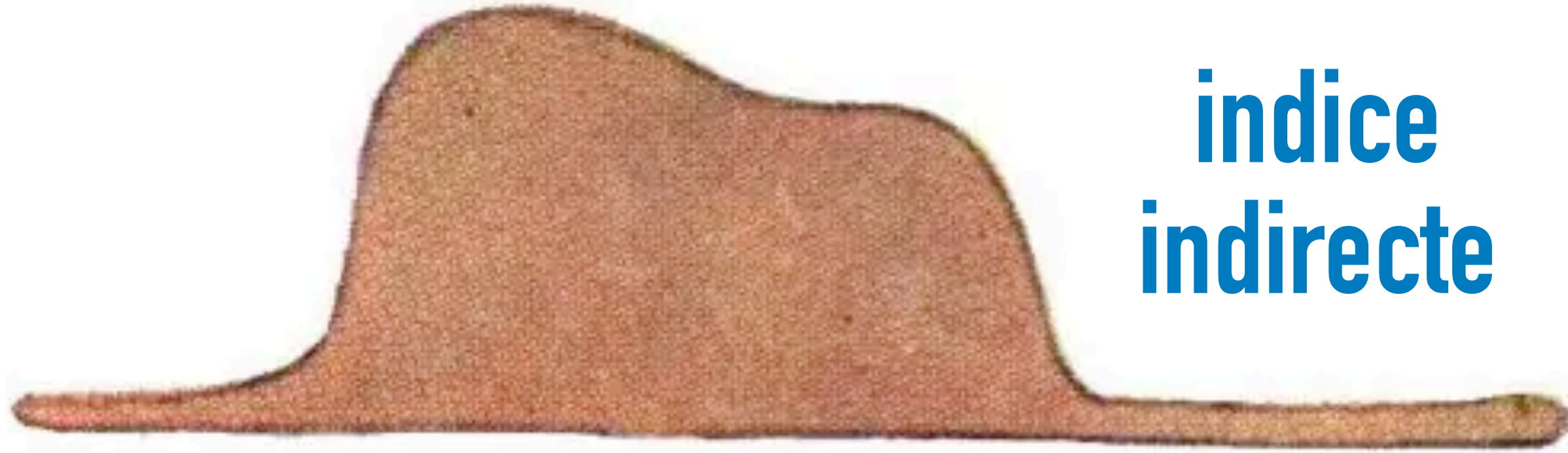
« Mon dessin ne représentait pas un chapeau. Il représentait un serpent boa qui digérait un éléphant. »



Mon dessin numéro 2

Mon dessin numéro 1

**indice
indirecte**

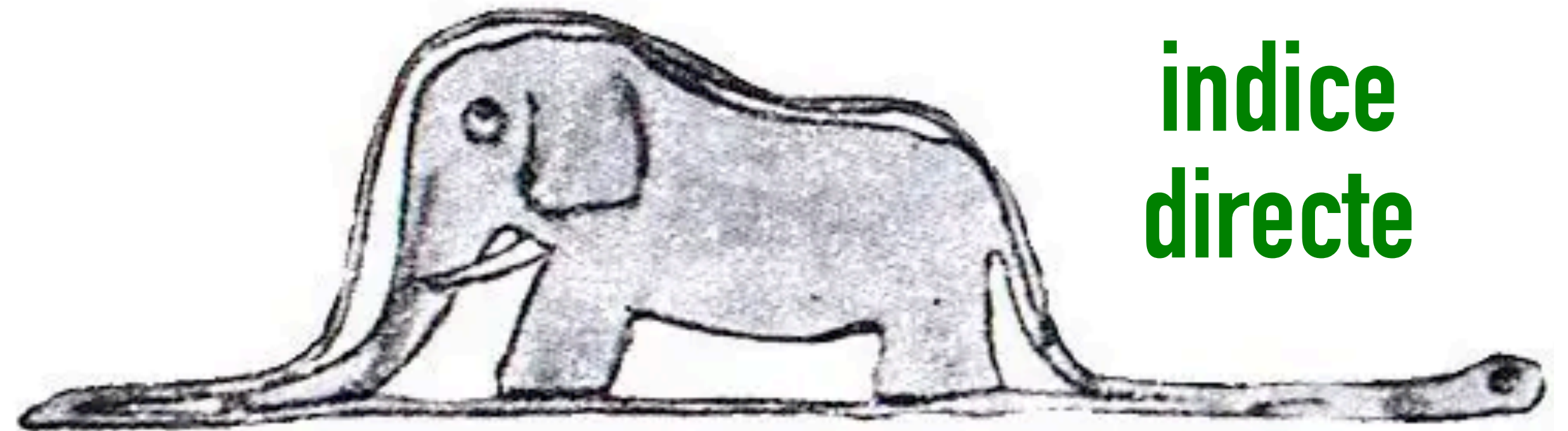


« Pourquoi un chapeau ferait-il peur ? »

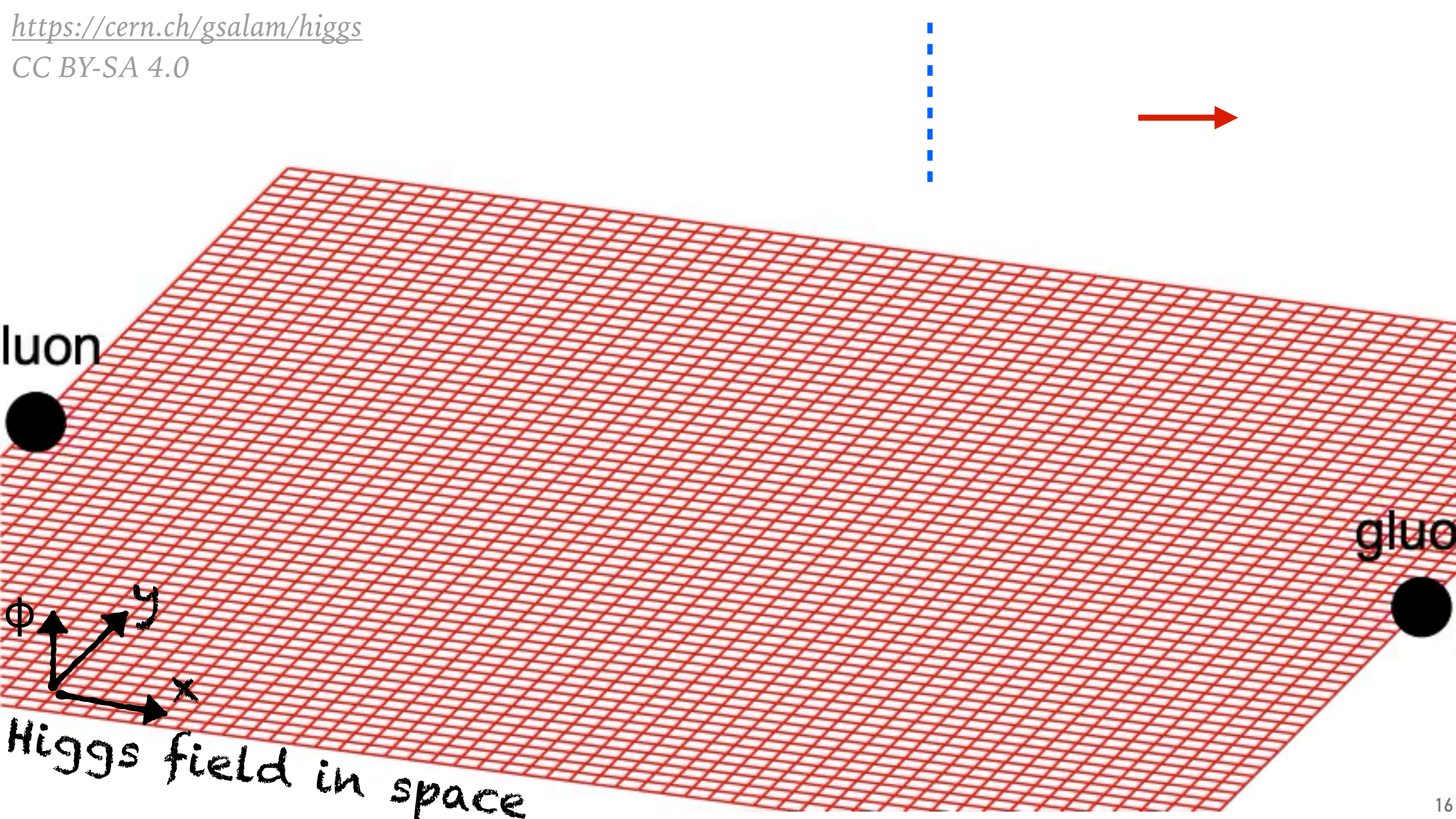
Le Petit Prince, Antoine de Saint-Exupéry

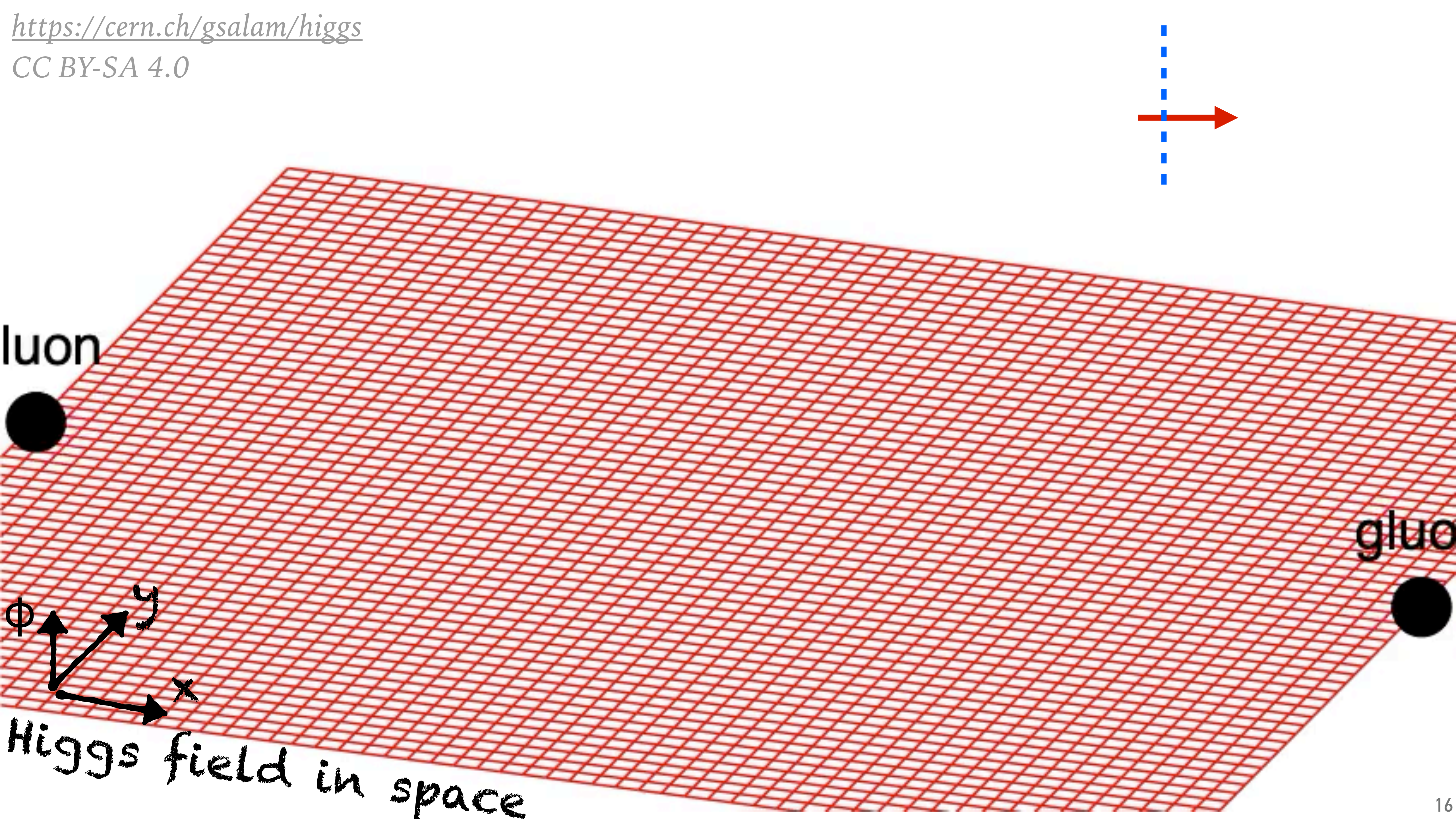
« Mon dessin ne représentait pas un chapeau. Il représentait un serpent boa qui digérait un éléphant. »

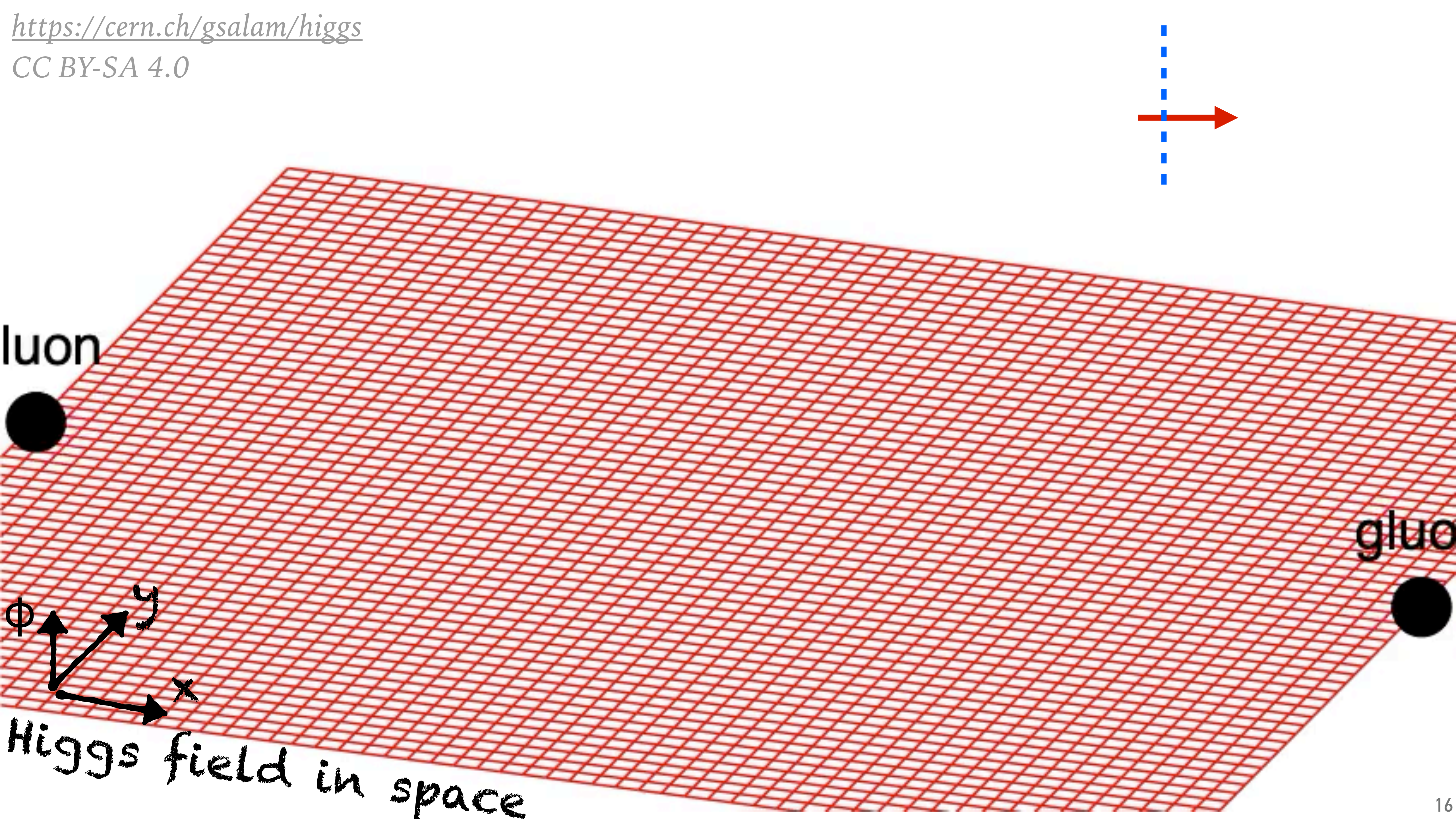
**indice
directe**



Mon dessin numéro 2



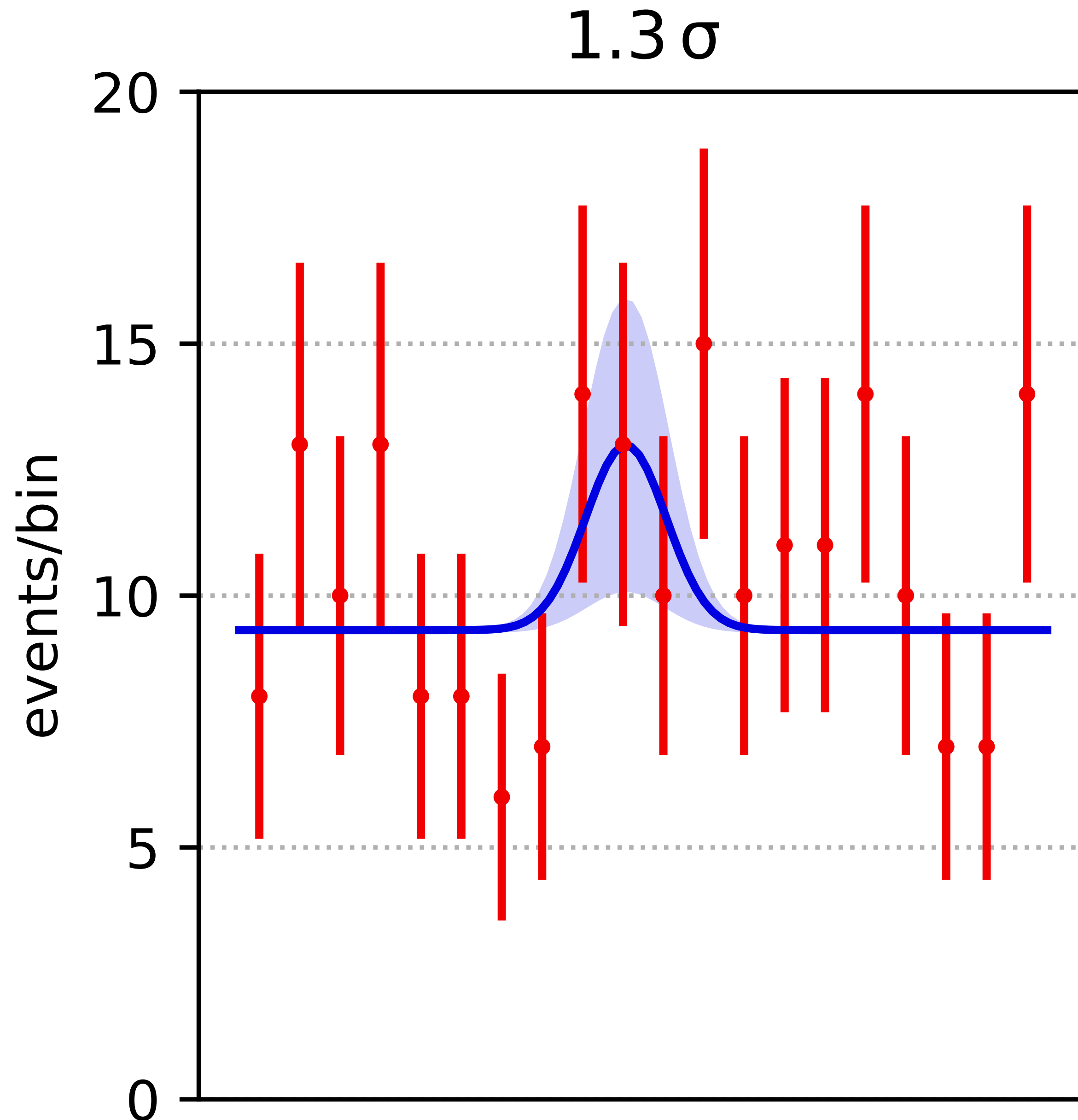




Situation au début du LHC (2009)

“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]



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

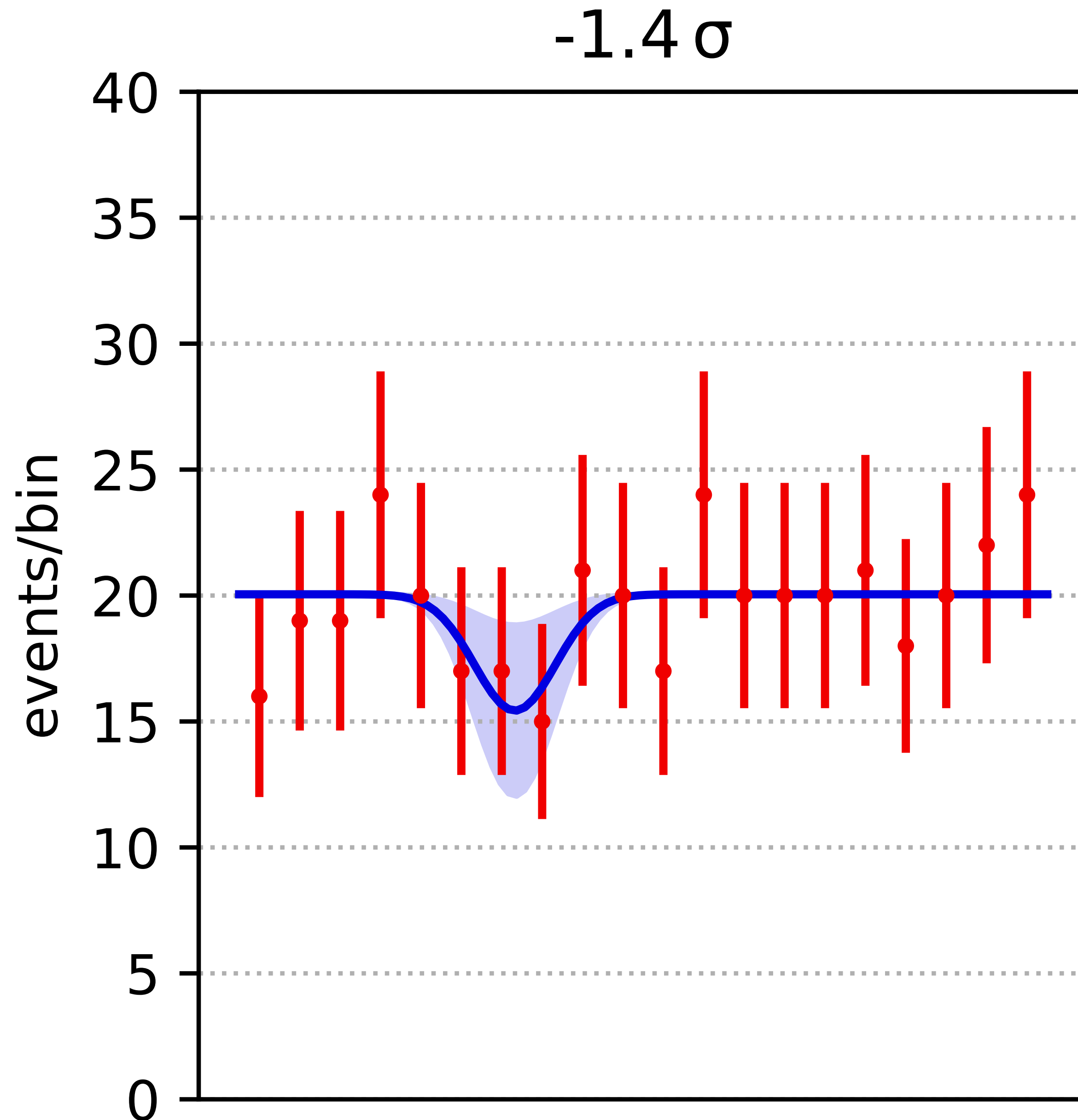
En physique des particules

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

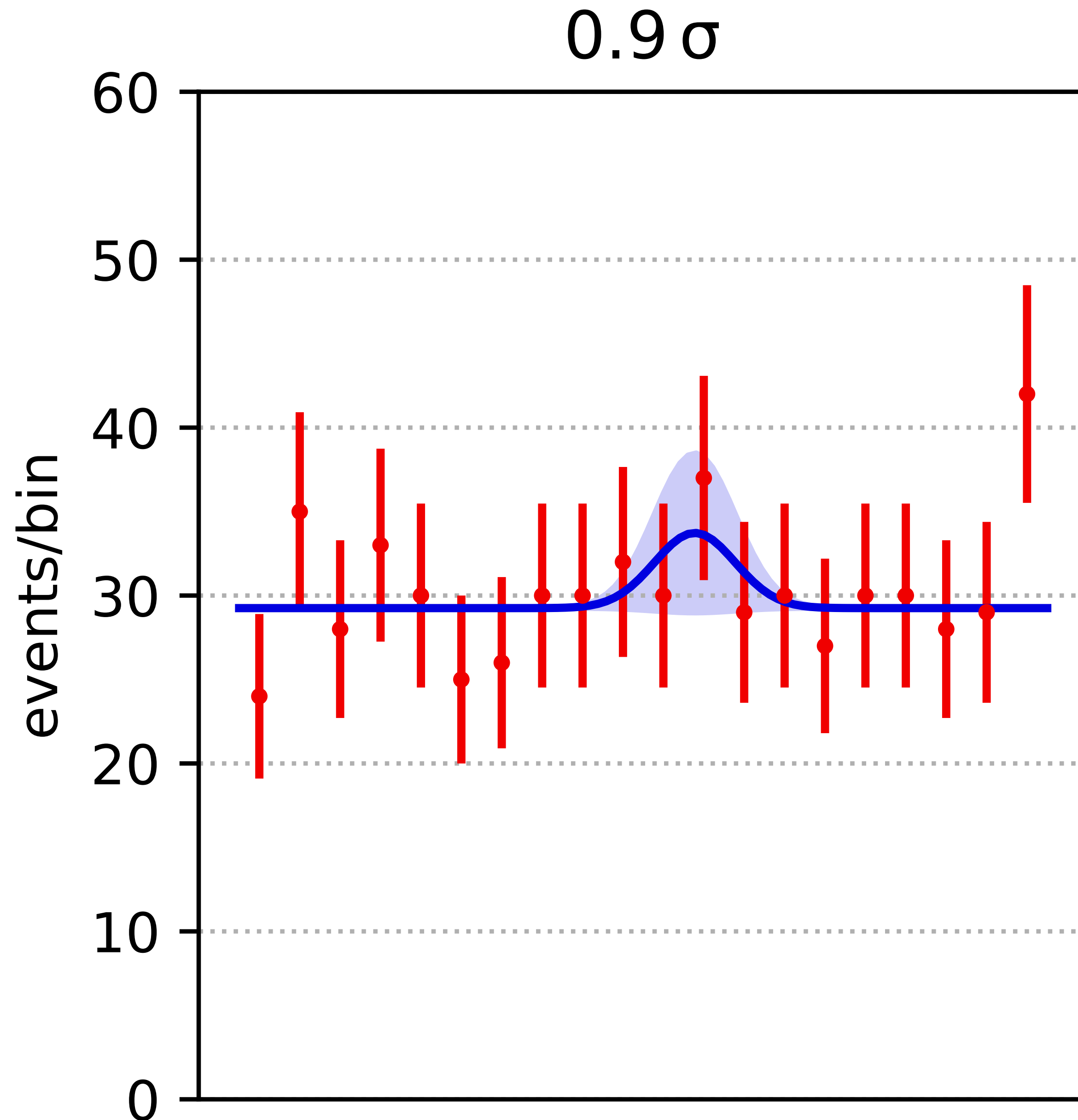
En physique des particules

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)



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

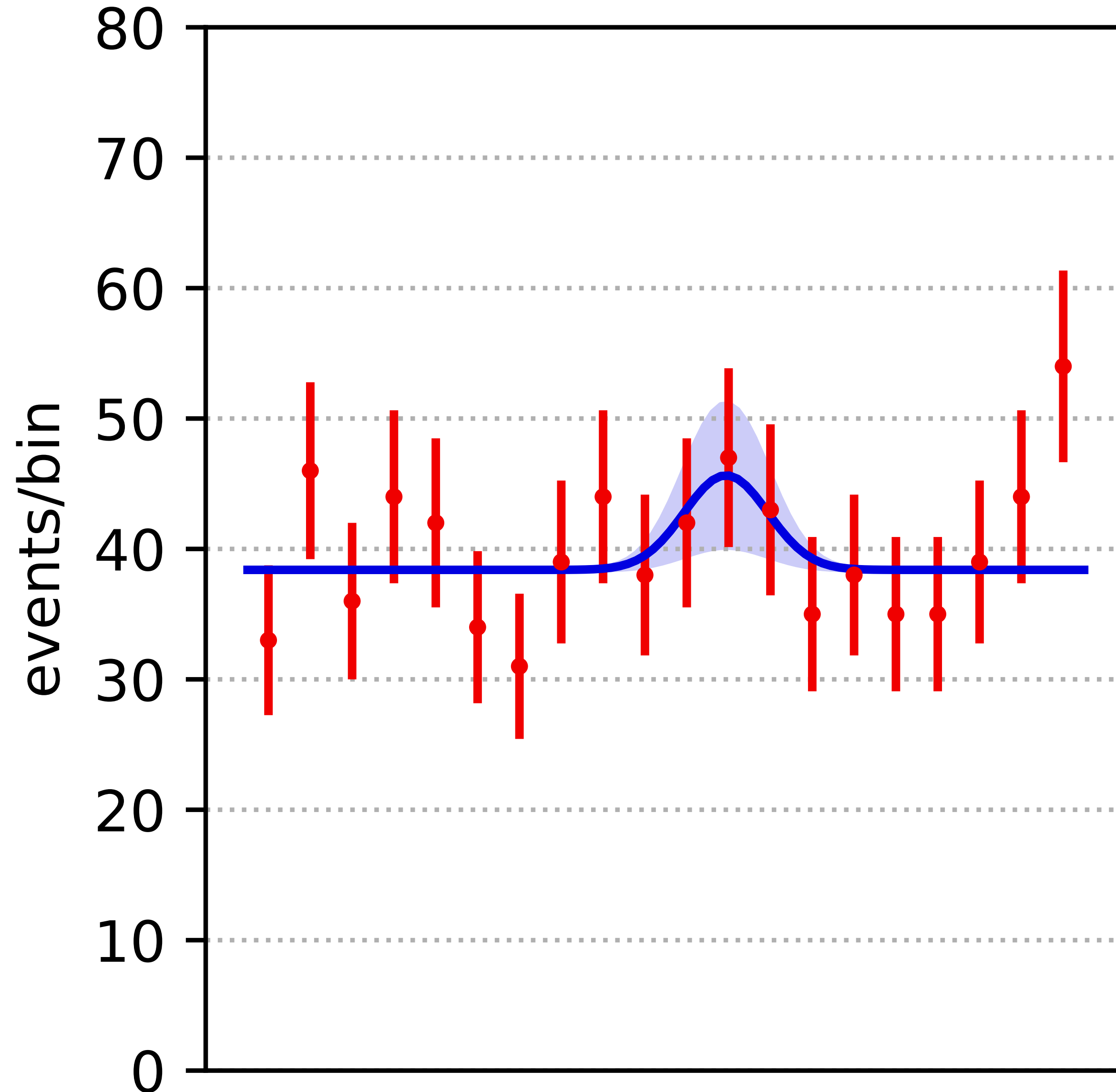
3σ : “indice” (“evidence”)

(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)

1.3 σ



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

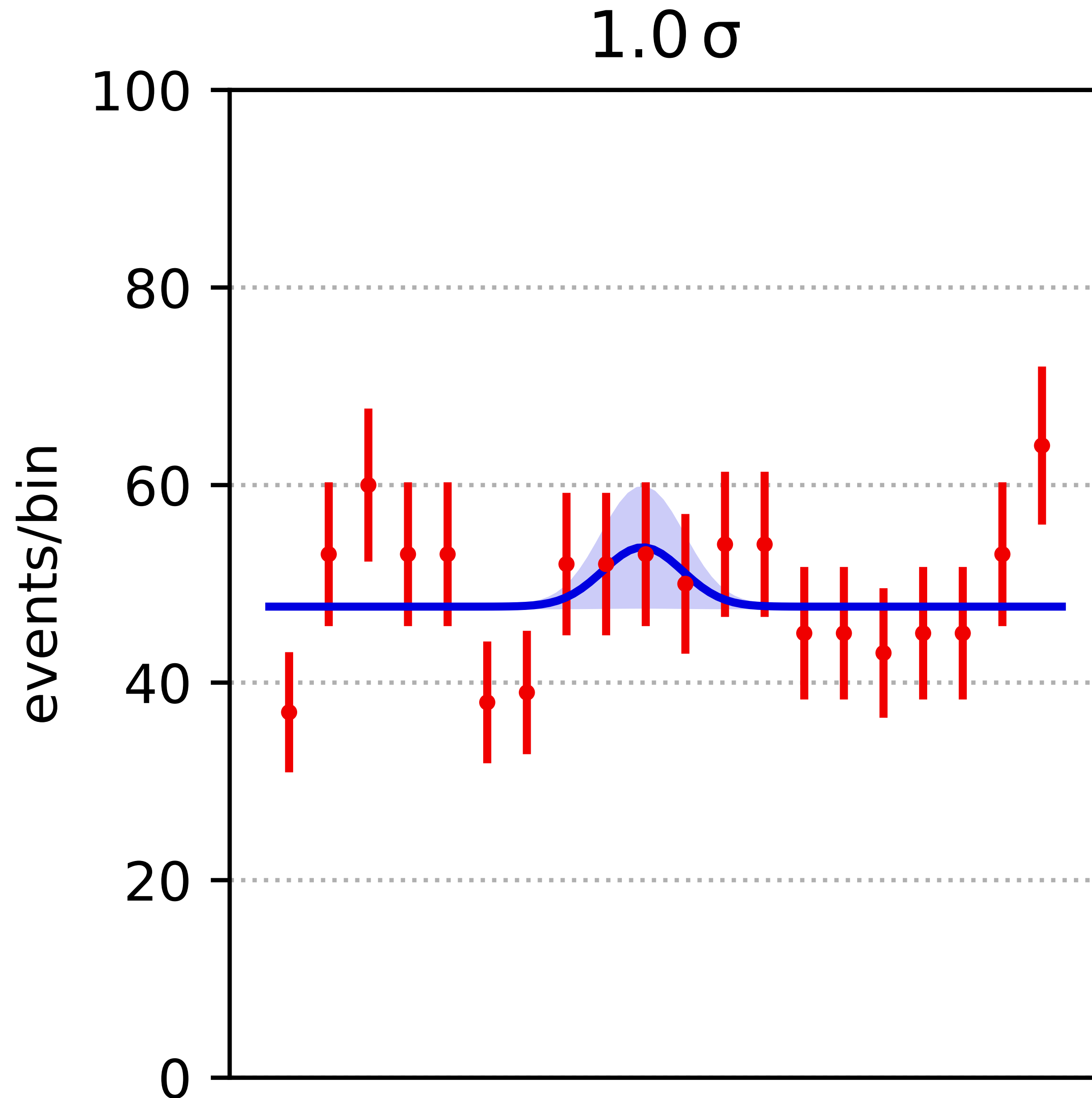
En physique des particules

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

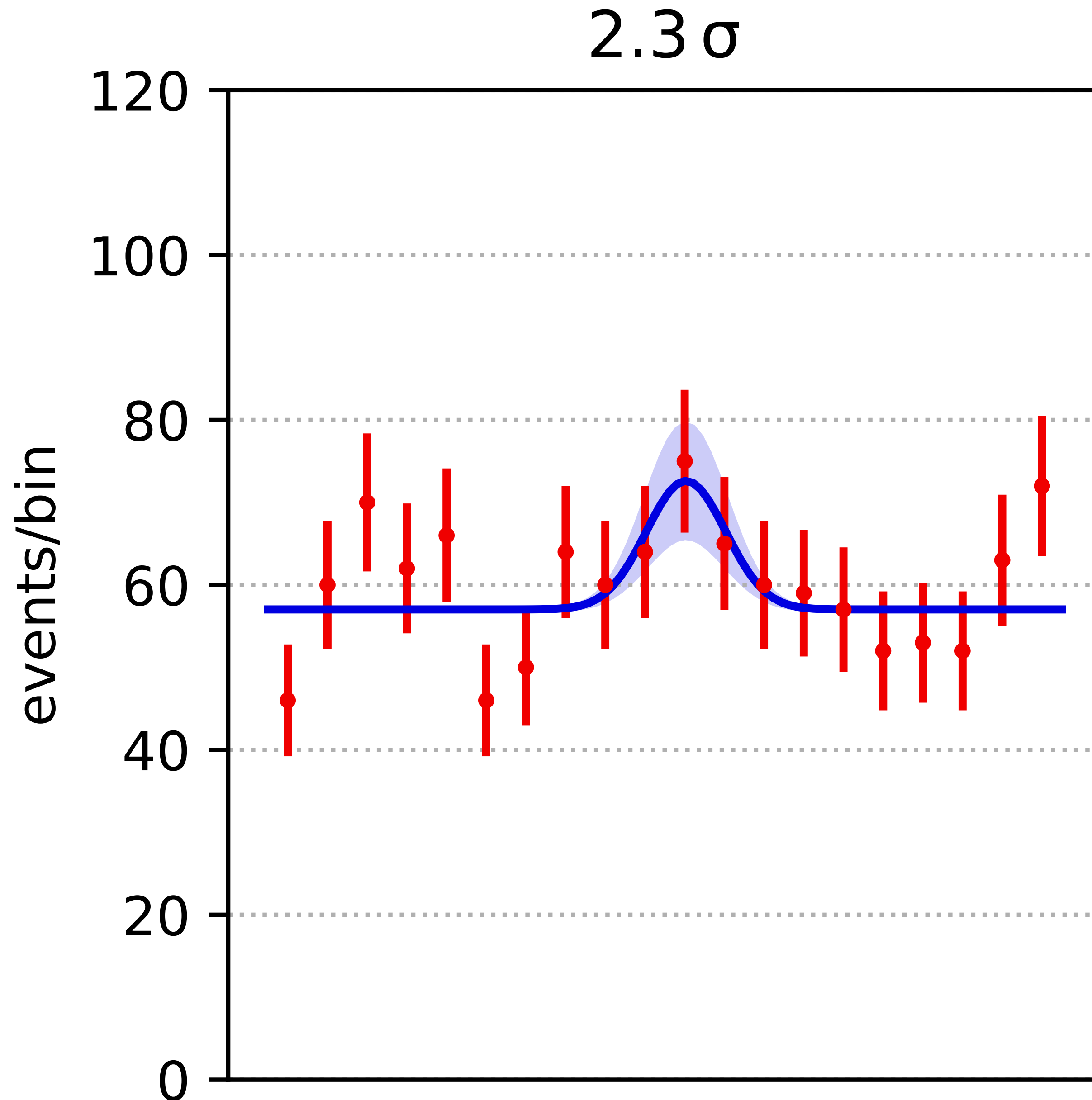
En physique des particules

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)



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

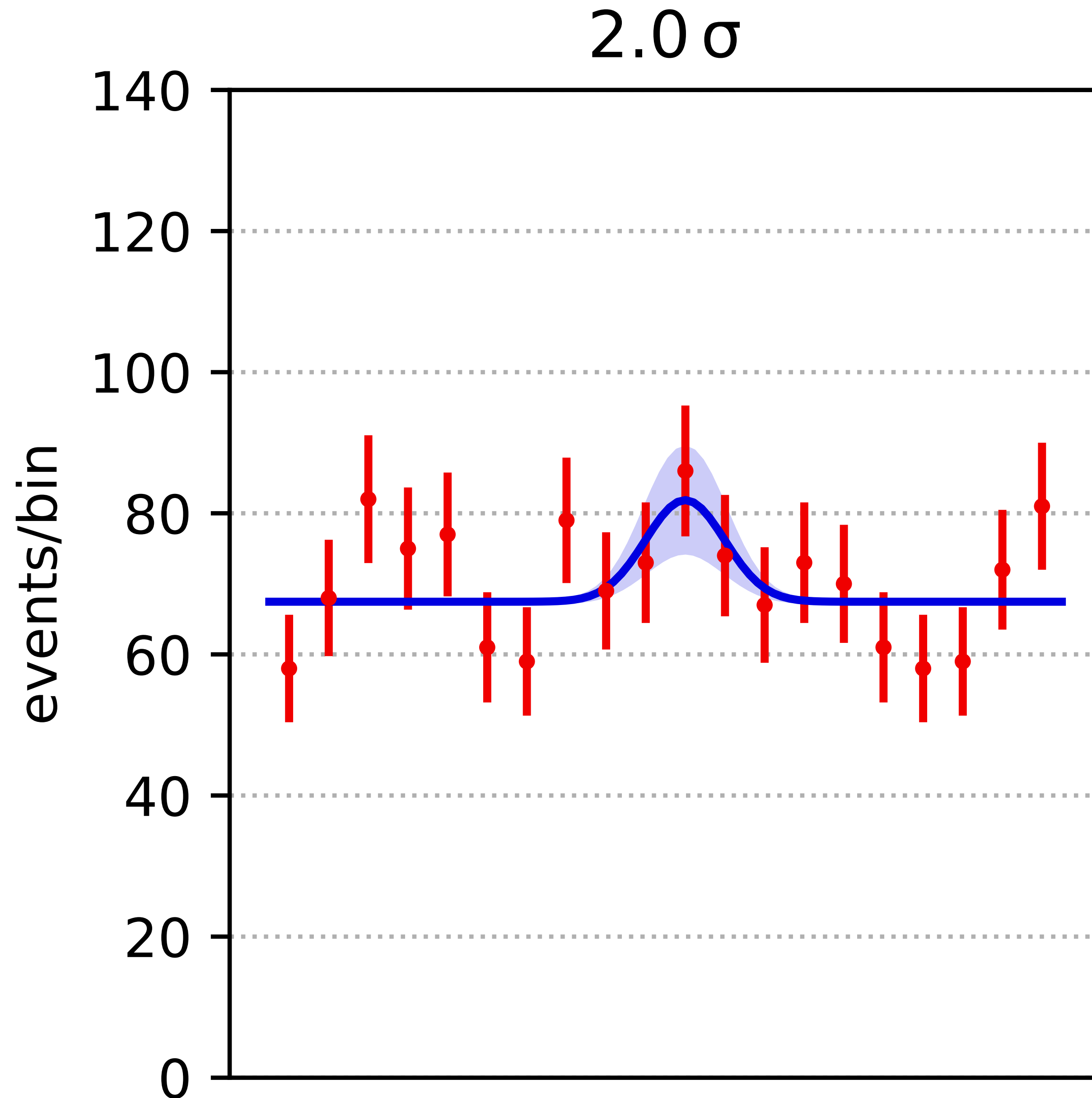
En physique des particules

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)



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

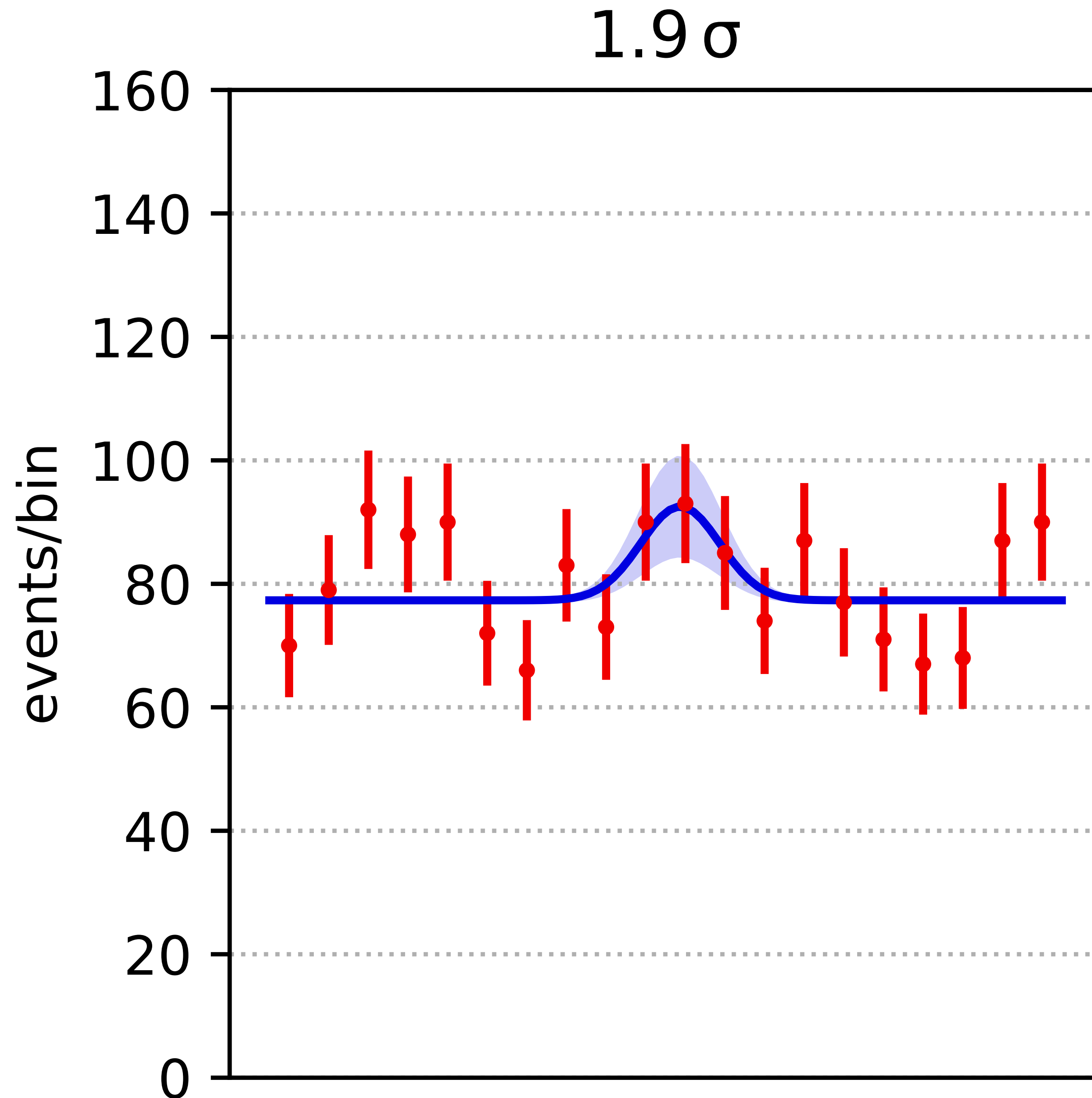
En physique des particules

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)



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

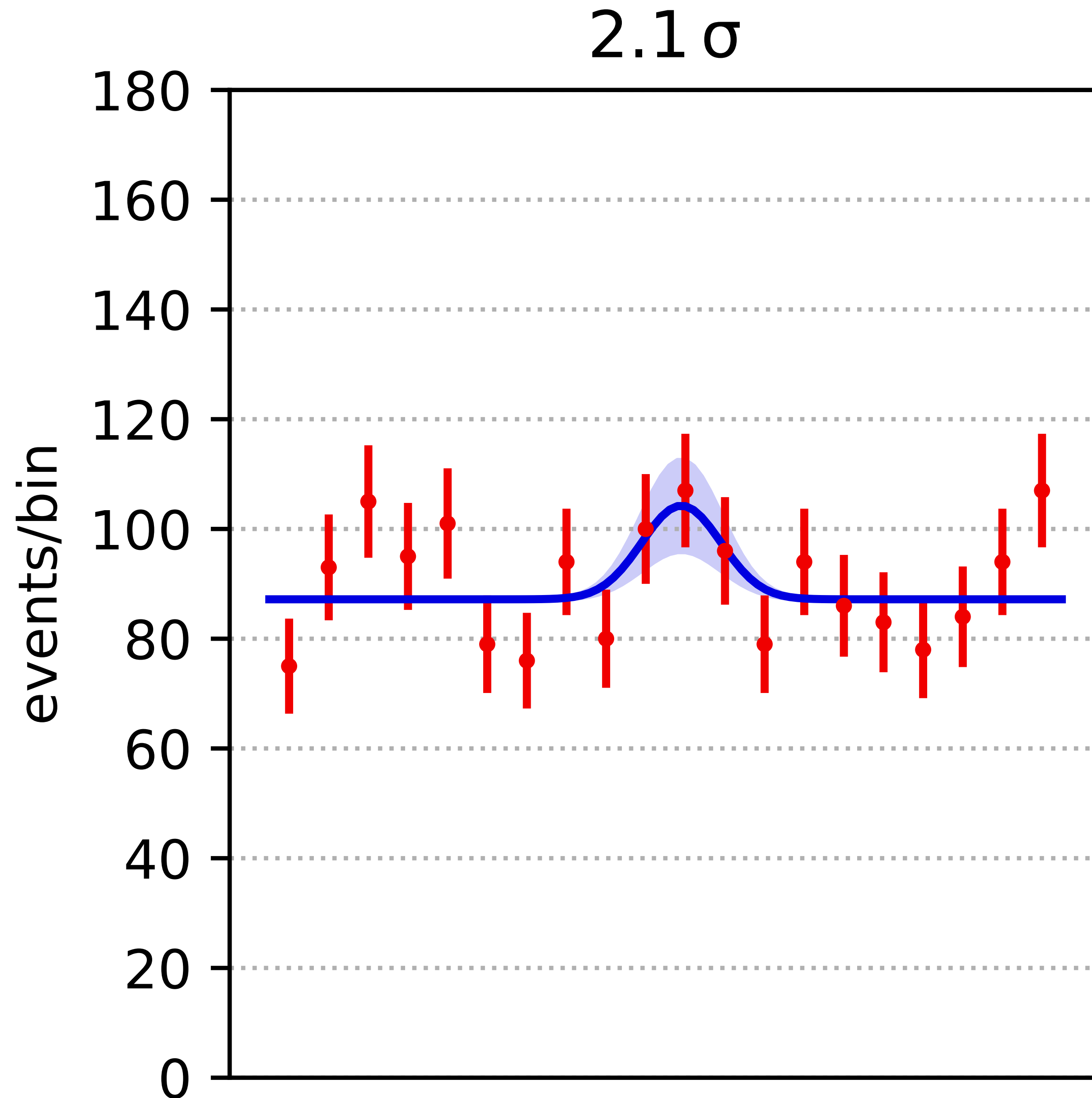
En physique des particules

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)



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

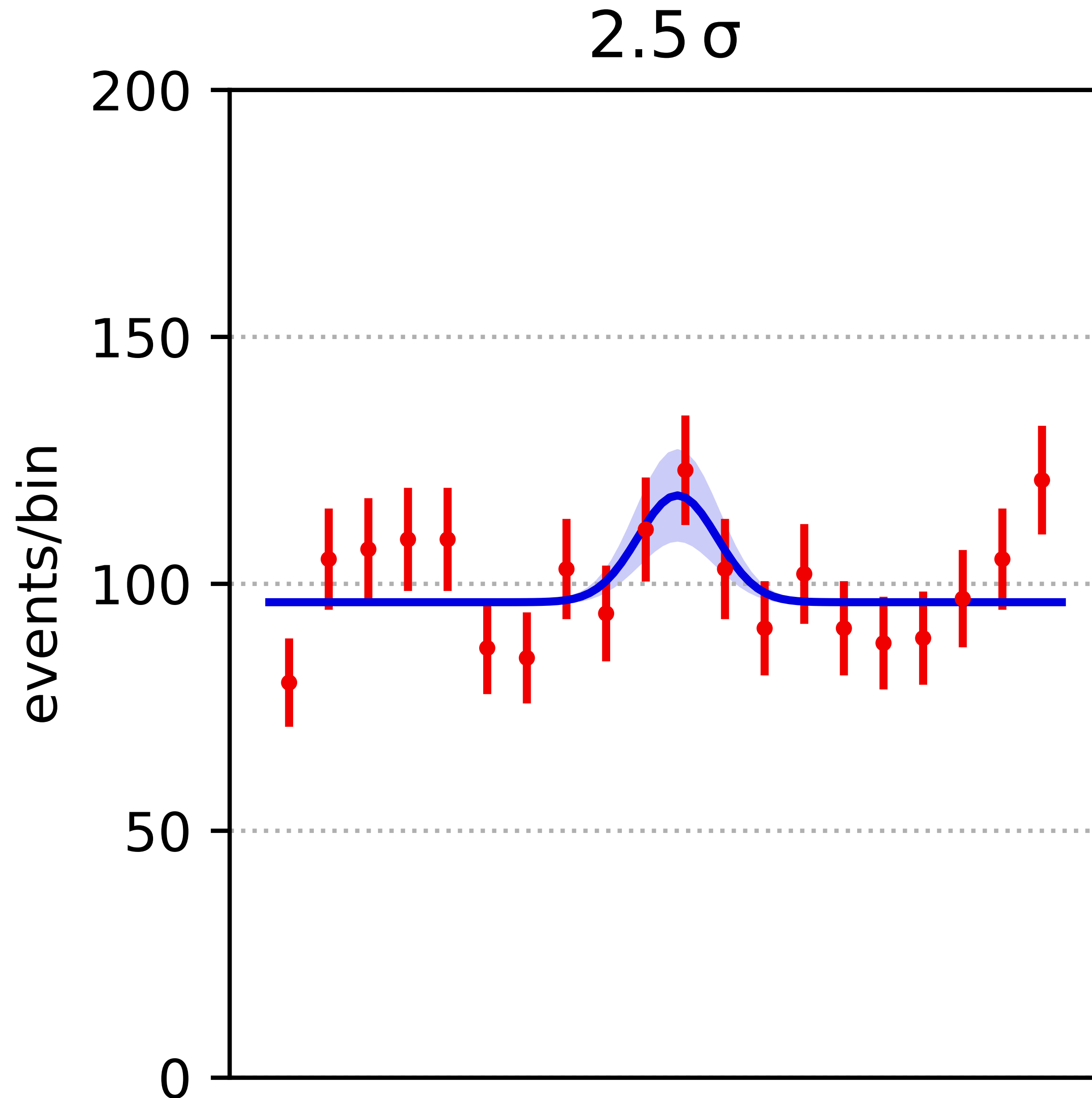
En physique des particules

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)



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

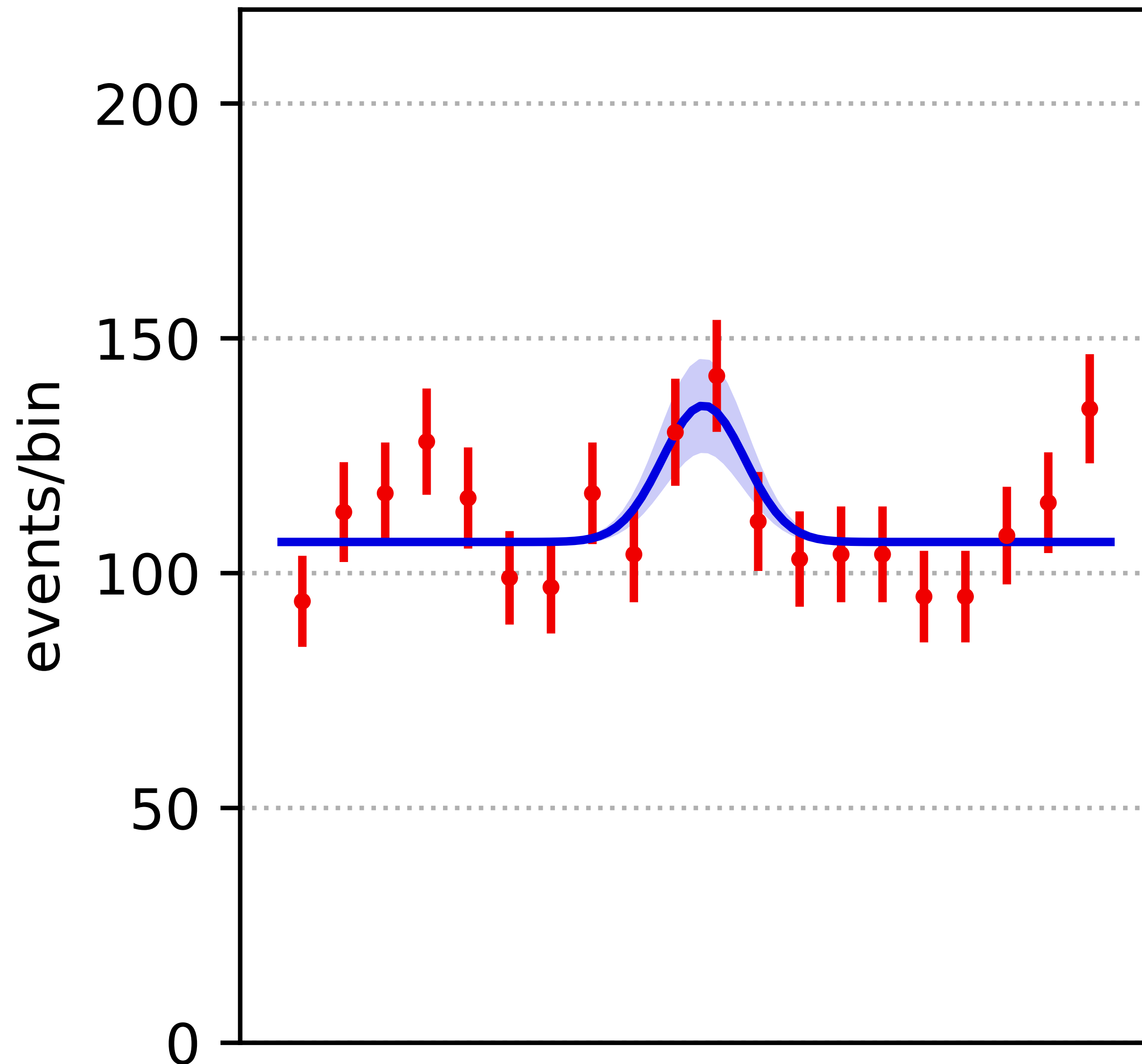
3σ : “indice” (“evidence”)

(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)

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

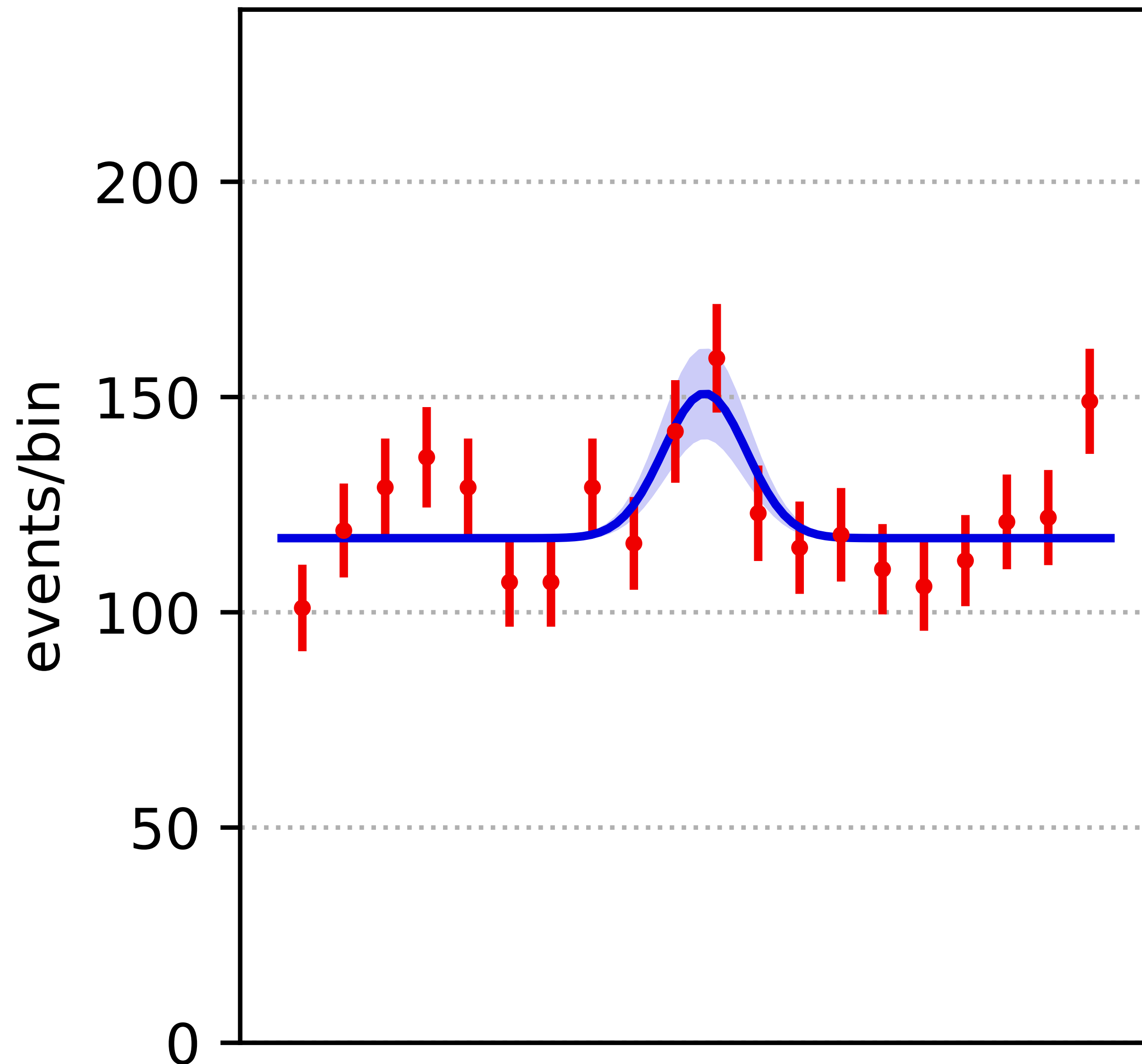
3σ : “indice” (“evidence”)

(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)

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

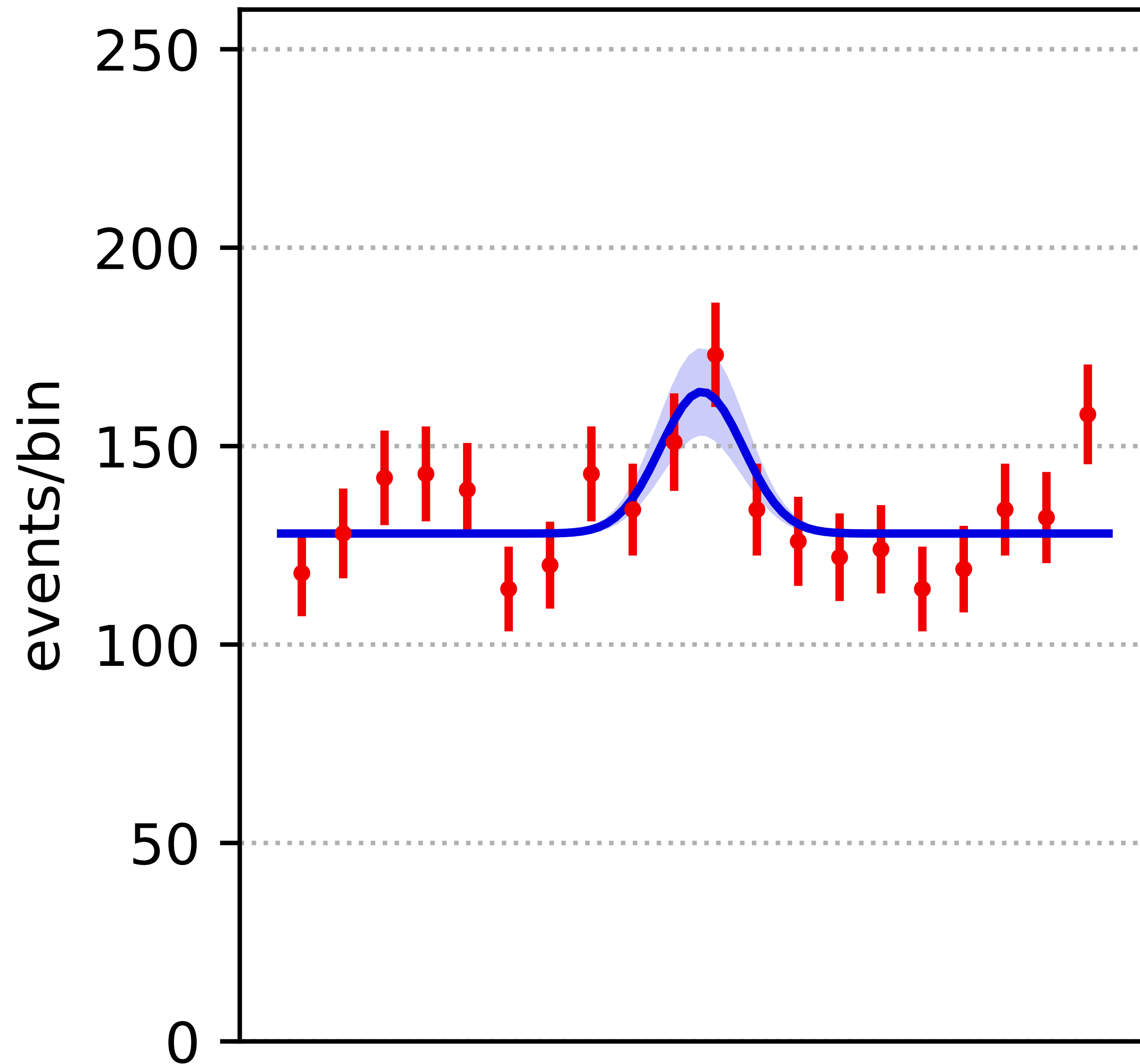
3σ : “indice” (“evidence”)

(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)

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

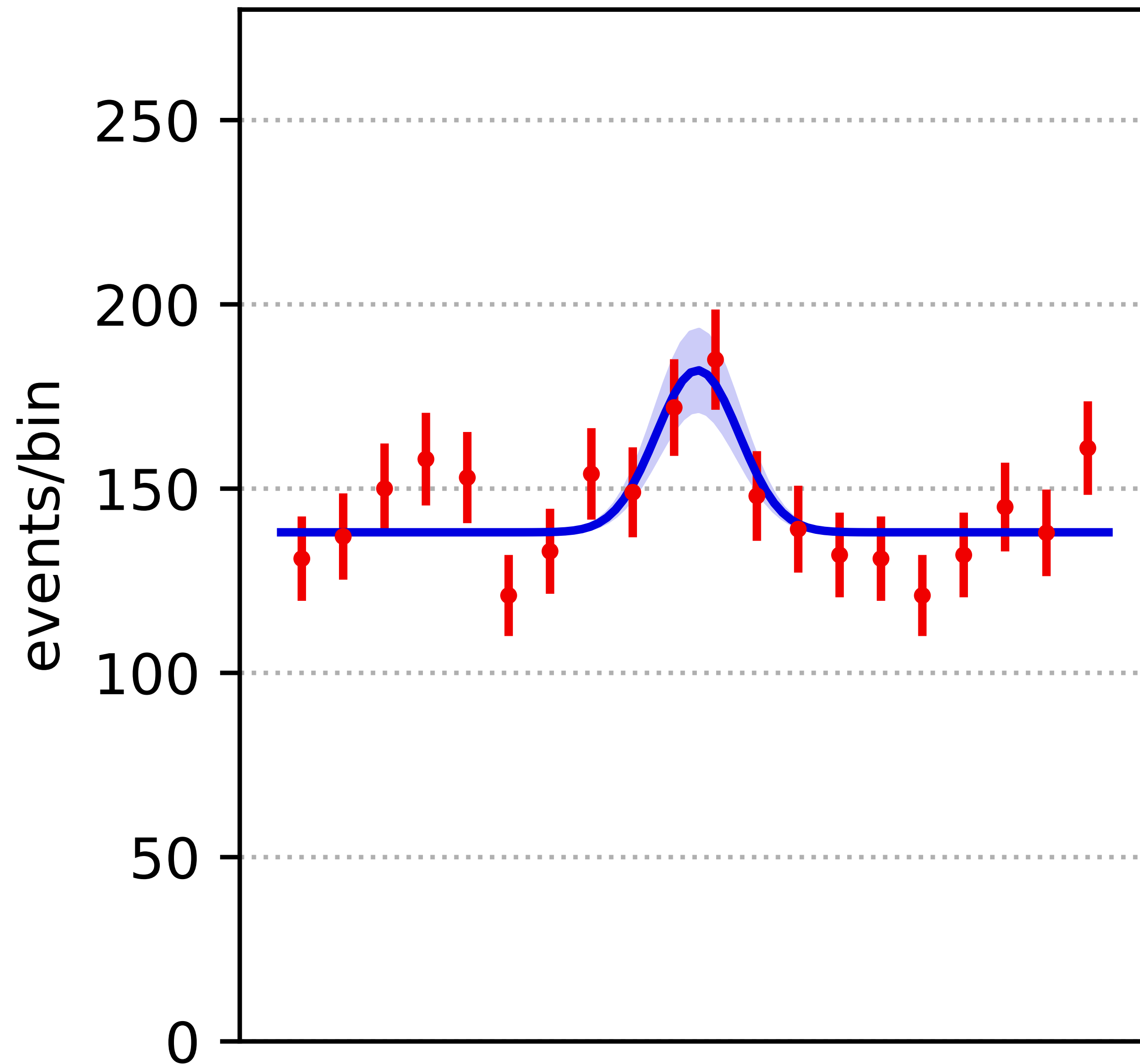
3σ : “indice” (“evidence”)

(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)

4.1 σ



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

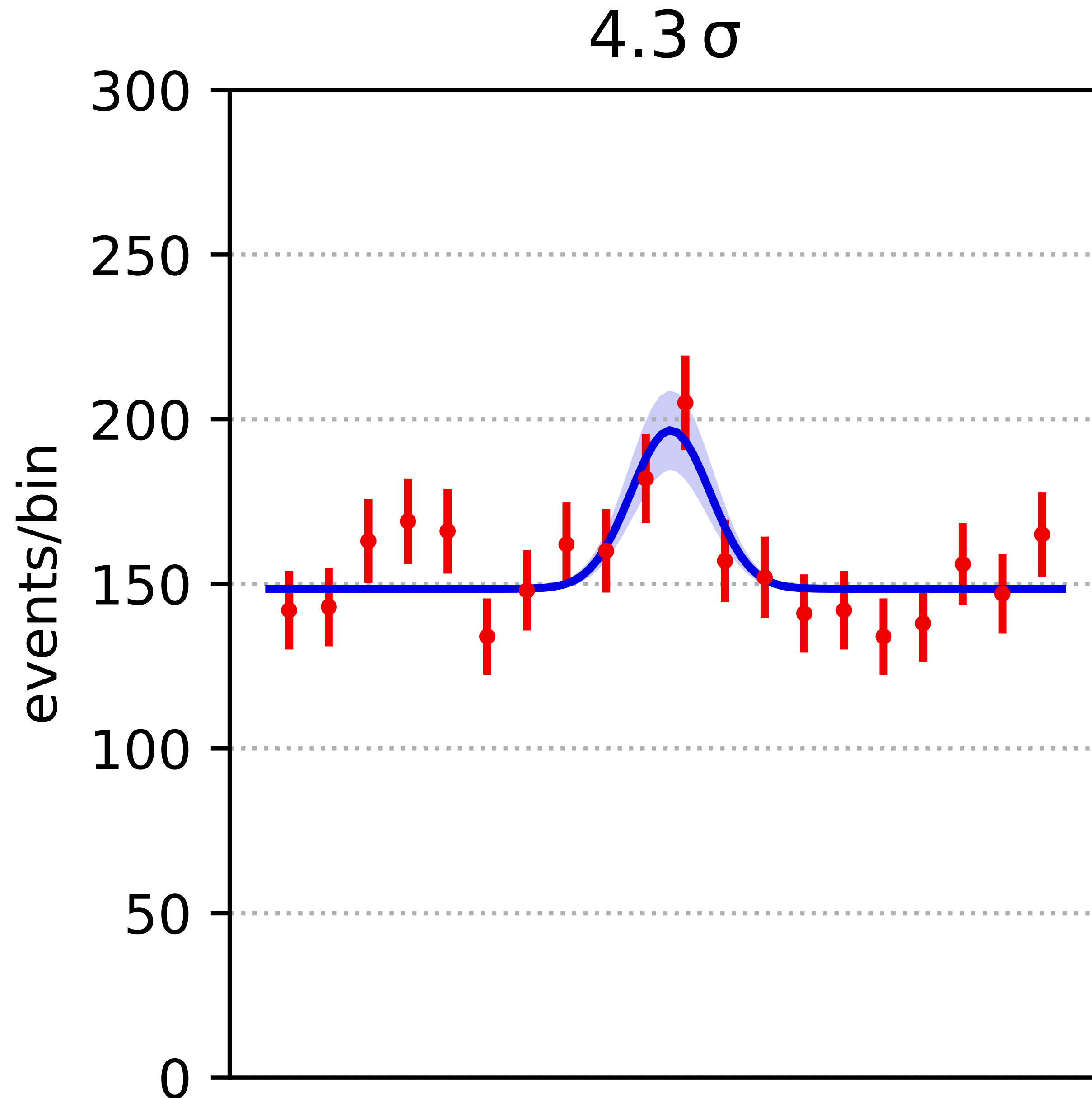
En physique des particules

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

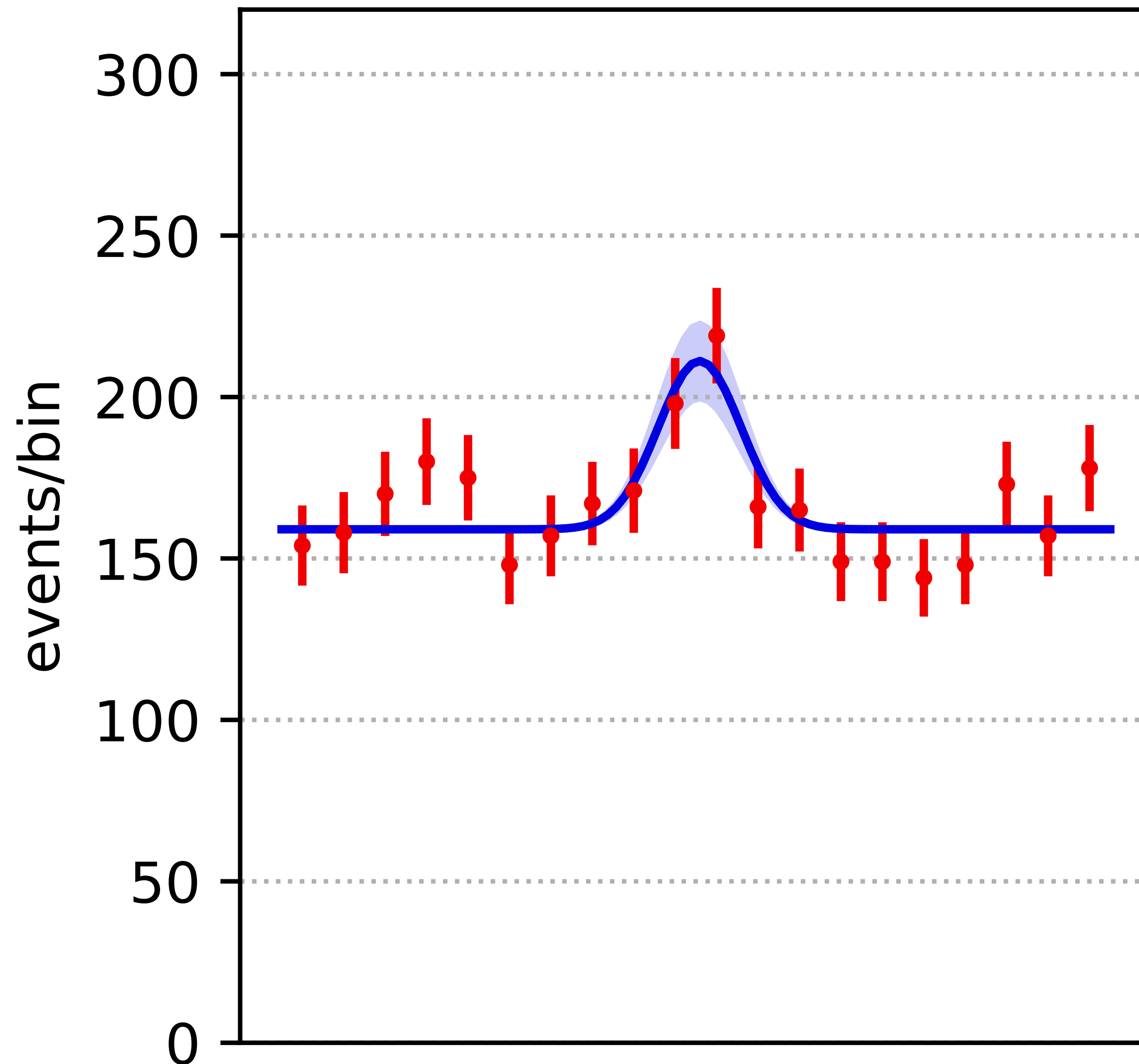
3 σ : “indice” (“evidence”)

(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)

4.5 σ



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

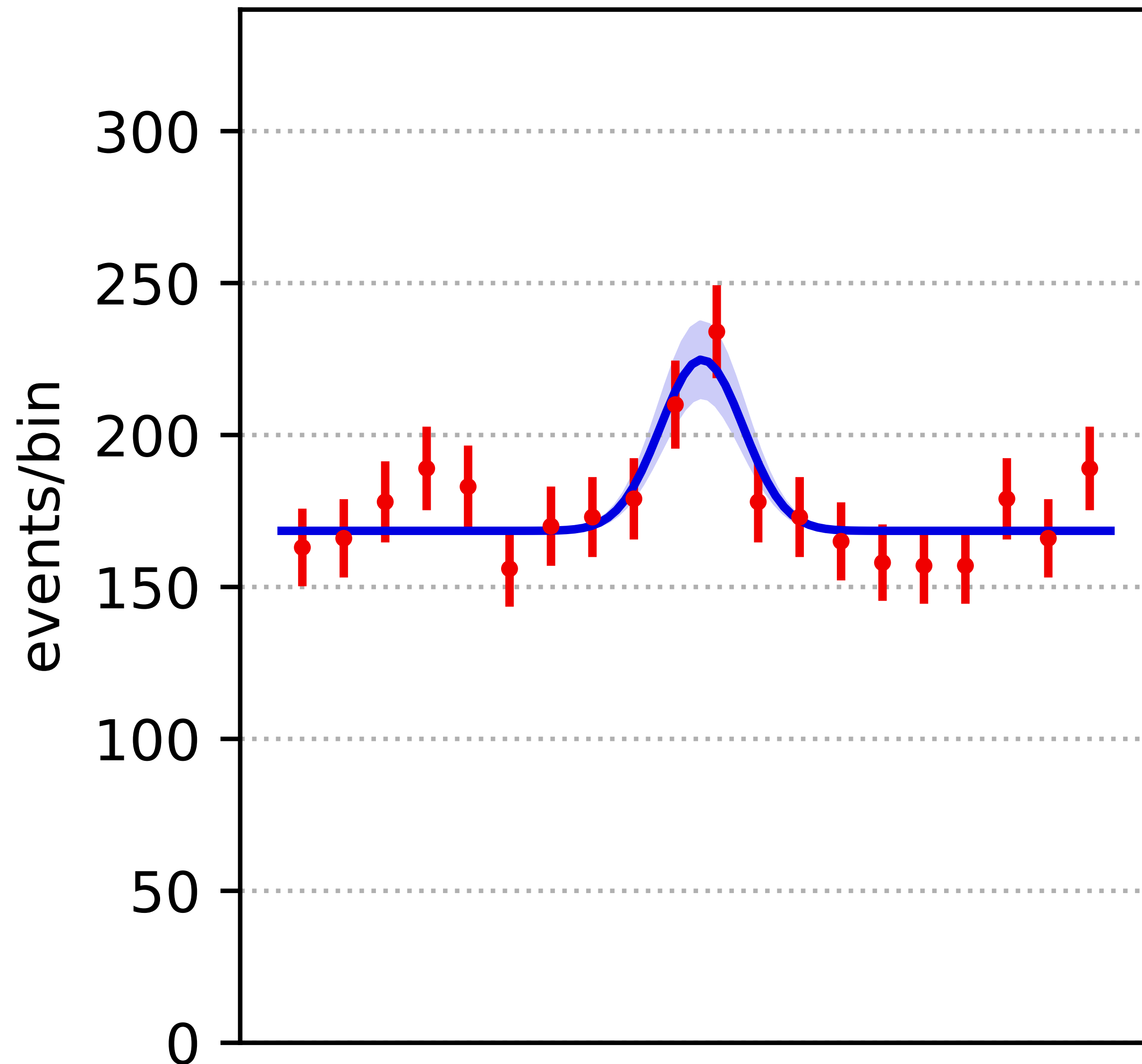
3 σ : “indice” (“evidence”)

(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)

4.7 σ



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

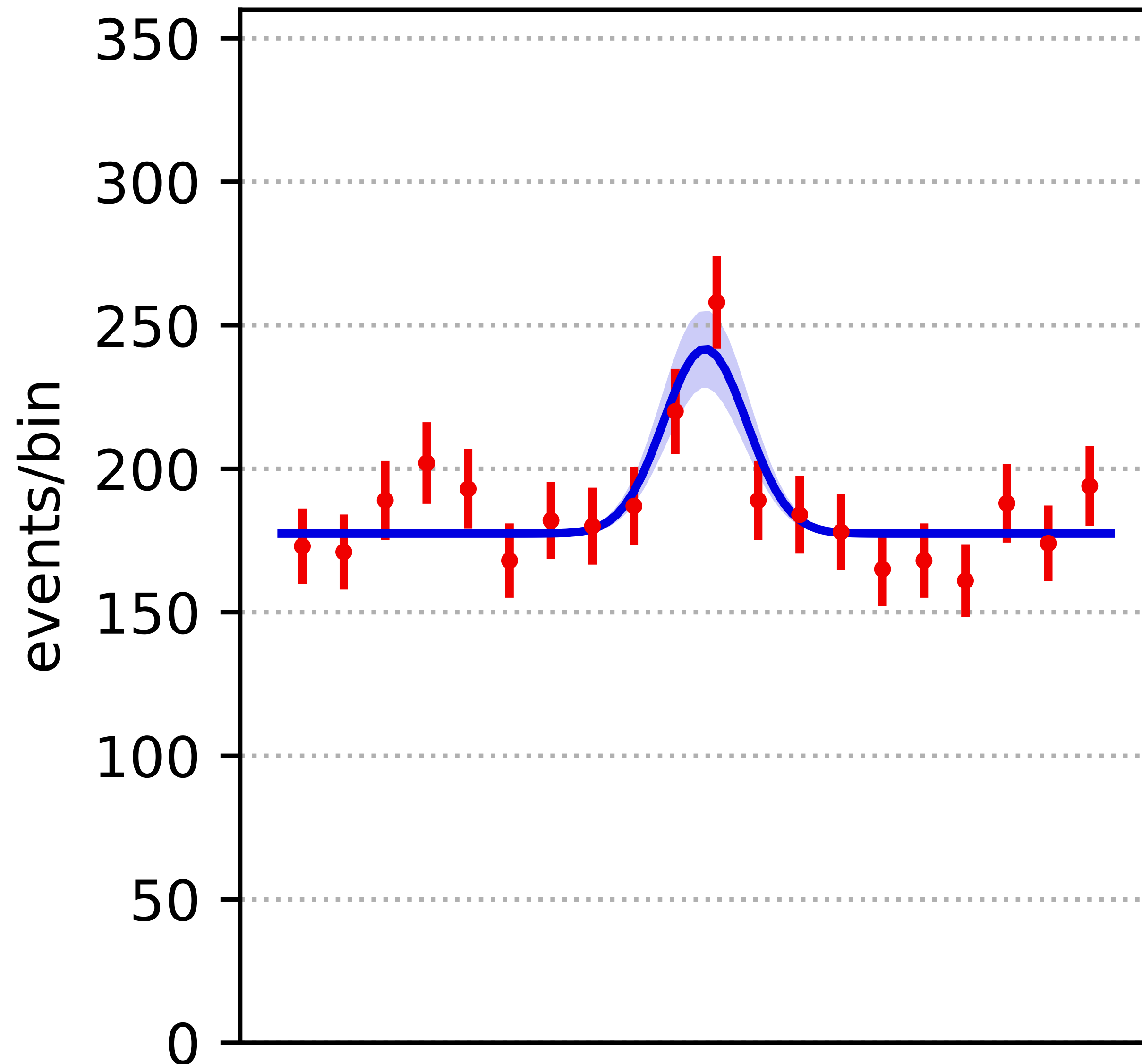
3 σ : “indice” (“evidence”)

(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)

5.2 σ



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

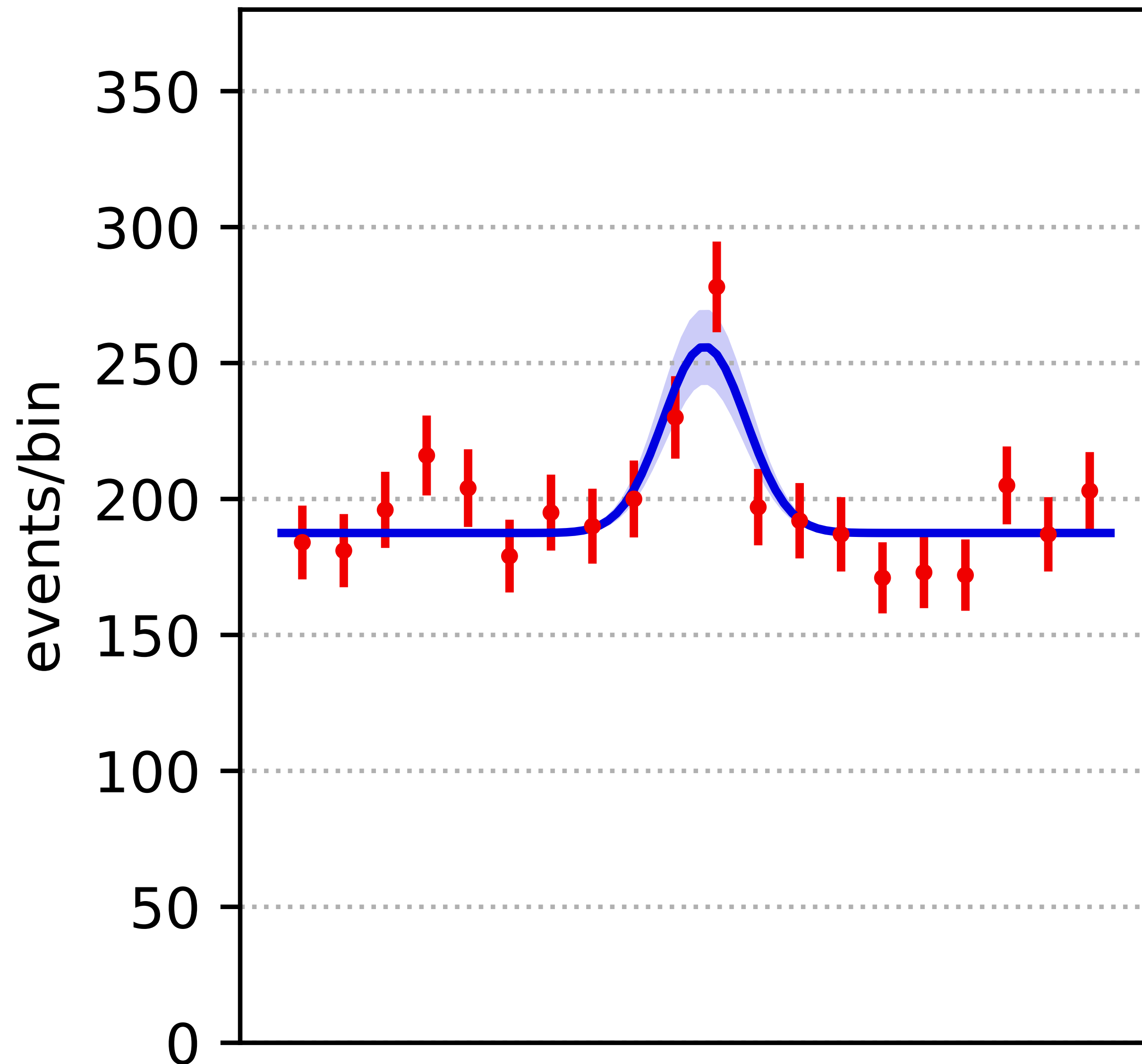
3 σ : “indice” (“evidence”)

(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)

5.3 σ



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

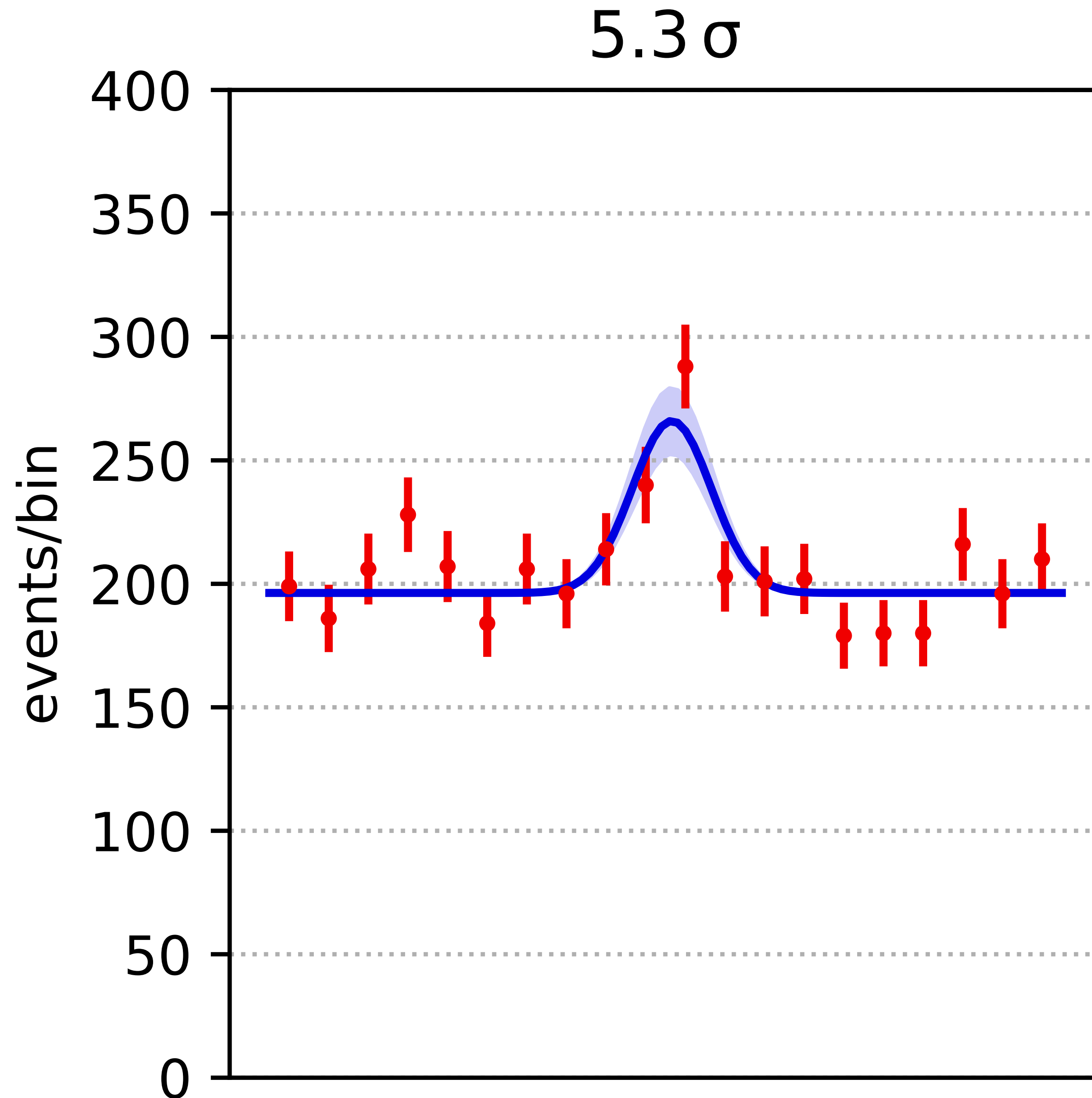
En physique des particules

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

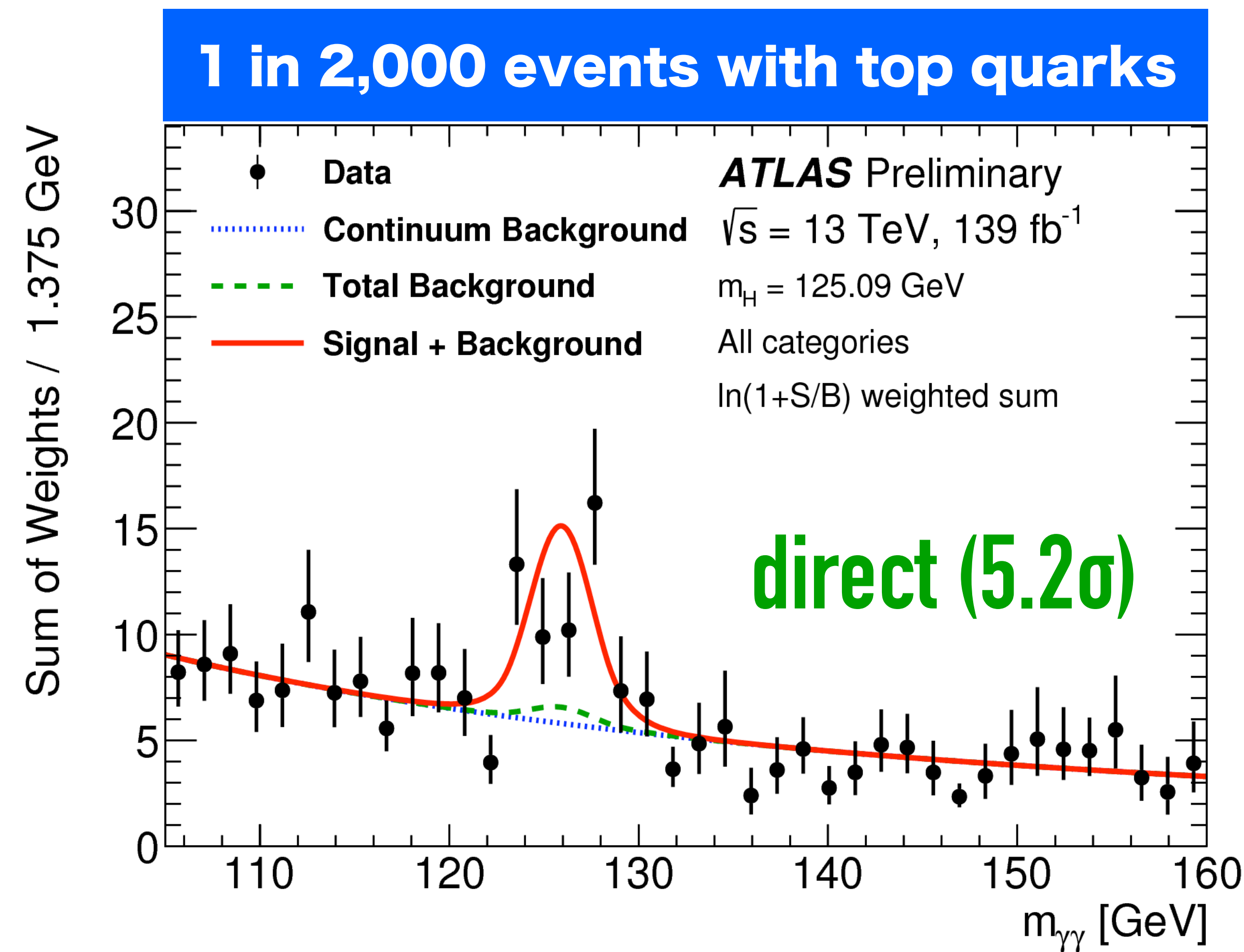
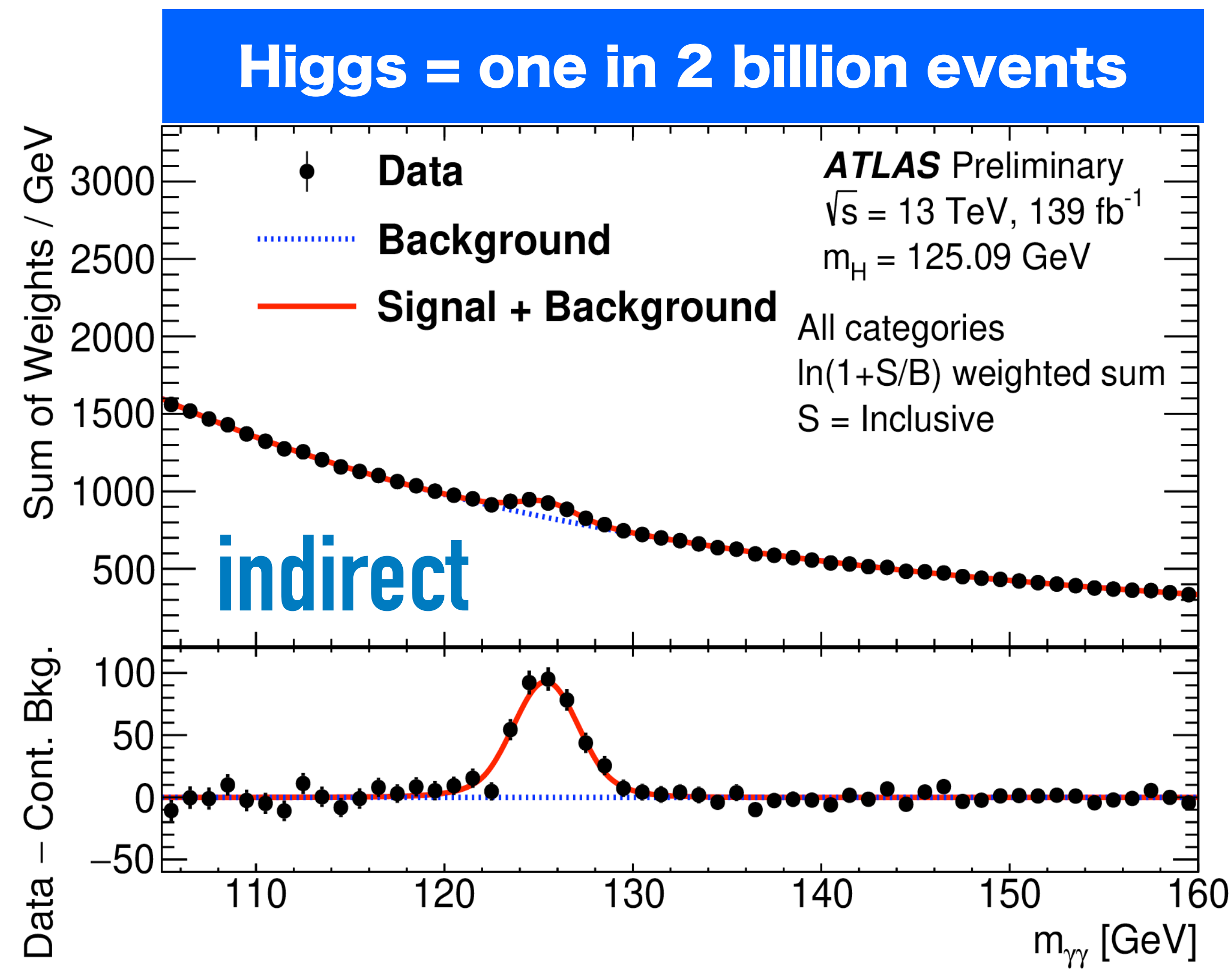
3 σ : “indice” (“evidence”)

(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)

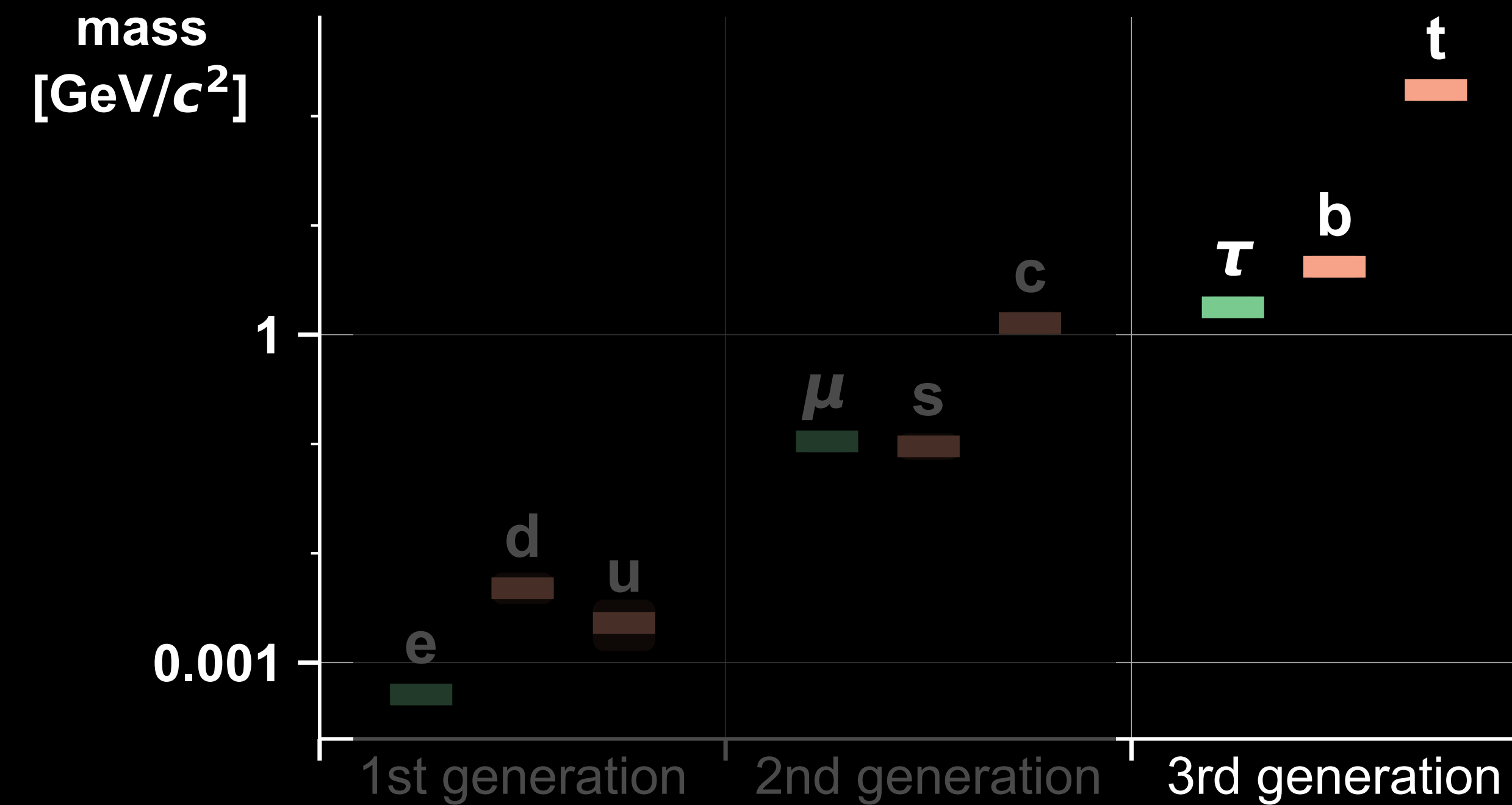
depuis 2018: ATLAS & CMS observent ($>5\sigma$) des évènements avec simultanément des quarks top & un Higgs



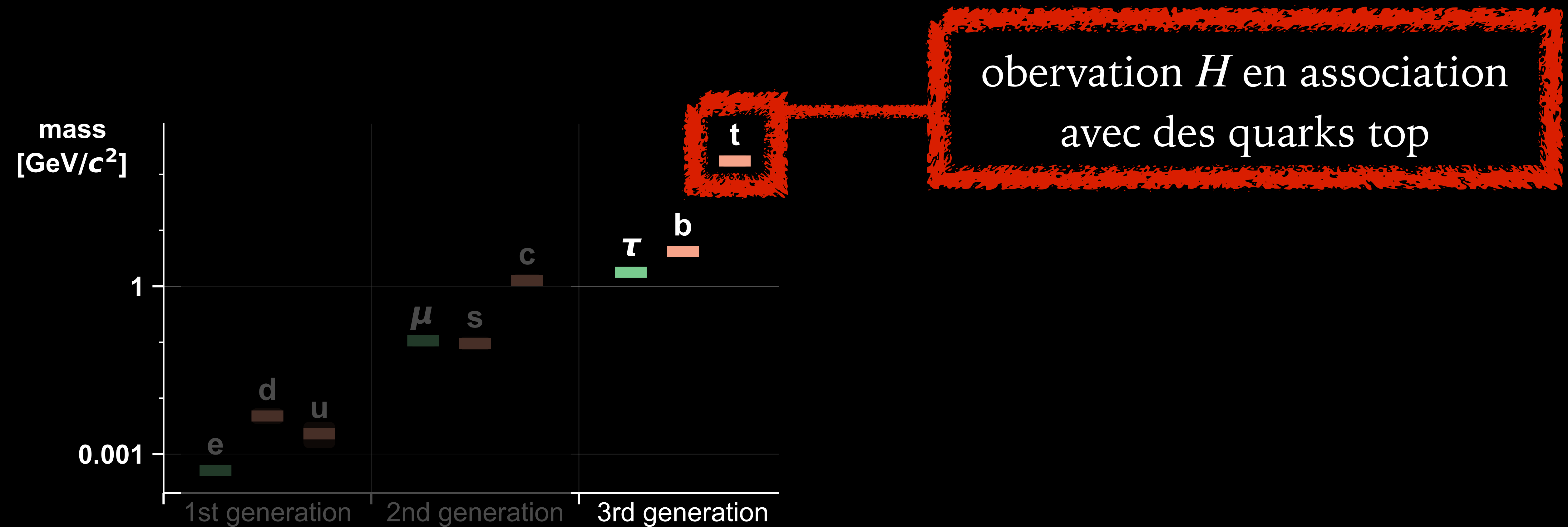
fraction accrue de Higgs dans les évènements avec quarks top
→ observation directe de l'interaction Higgs-top
(consistant avec le MS au niveau $\pm 25\%$)

mass →	≈2.3 MeV/c²	≈1.275 GeV/c²	≈173.07 GeV/c²
charge →	2/3	2/3	2/3
spin →	1/2	1/2	1/2
	u	c	t
	up	charm	top
	4.8 MeV/c²	≈95 MeV/c²	
	-1/3	-1/3	-1/3
	1/2	1/2	1/2
	d	s	b
	down	strange	bottom
	0.511 MeV/c²	105.7 MeV/c²	1.777 GeV/c²
	-1	-1	-1
	1/2	1/2	1/2
	e	μ	τ
	electron	muon	tau

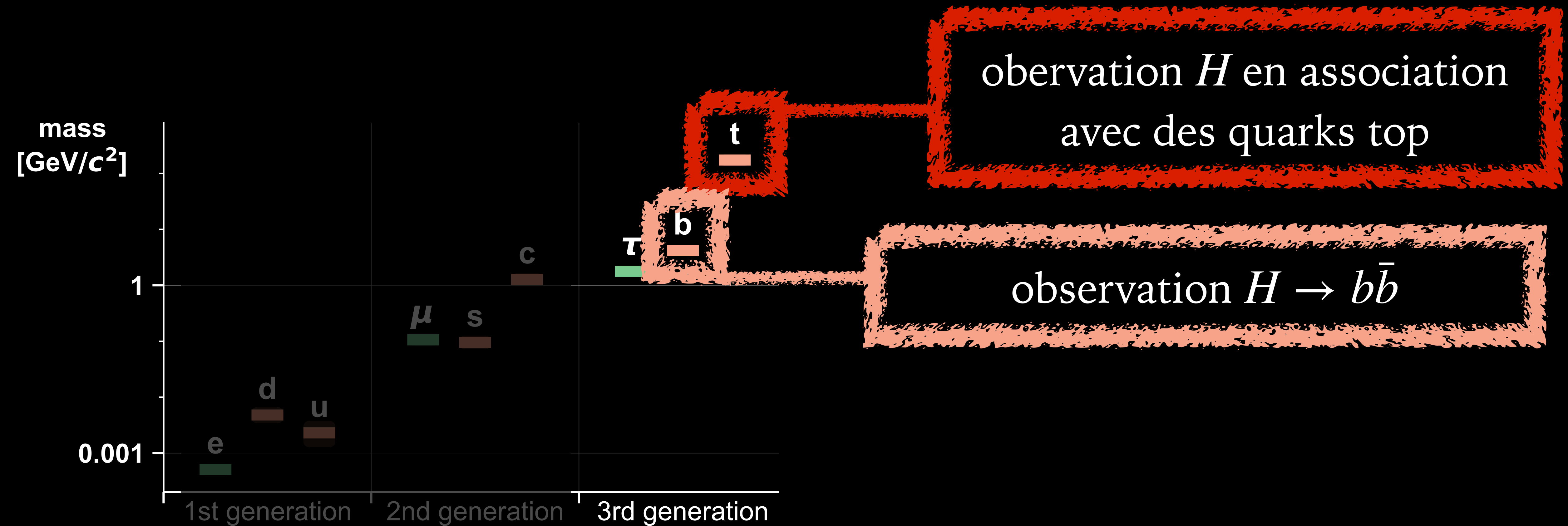
Découverte des interactions 3^e generation—Higgs par ATLAS & CMS ~ 2018



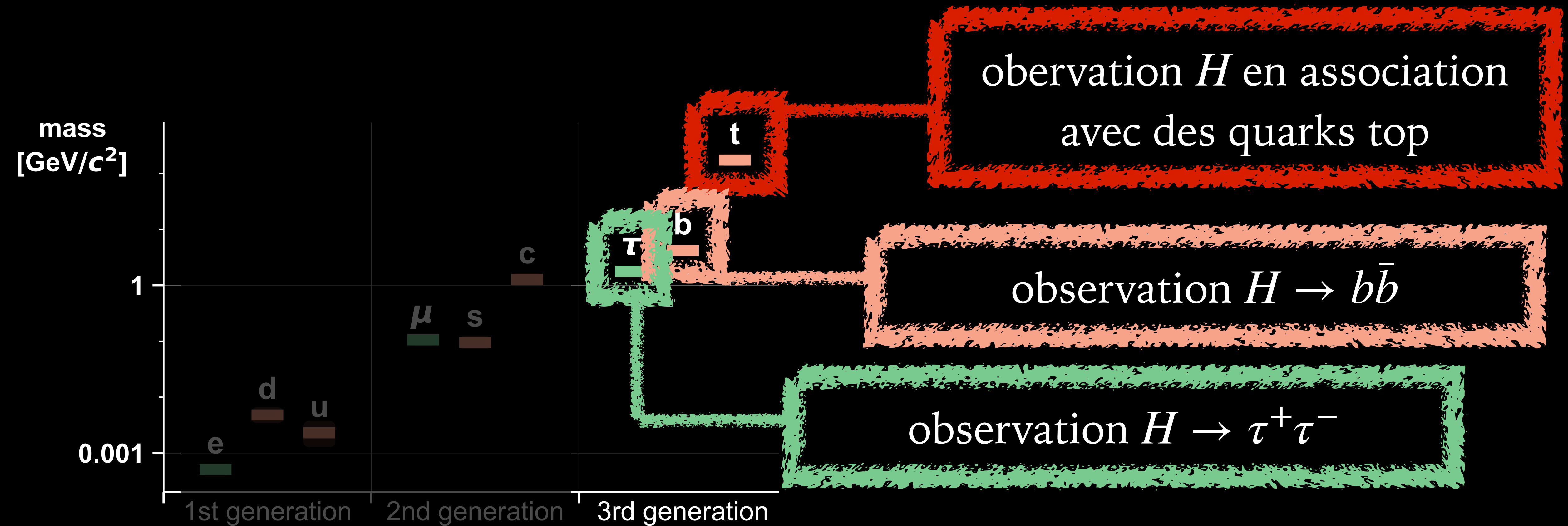
Découverte des interactions 3^e generation—Higgs par ATLAS & CMS ~ 2018



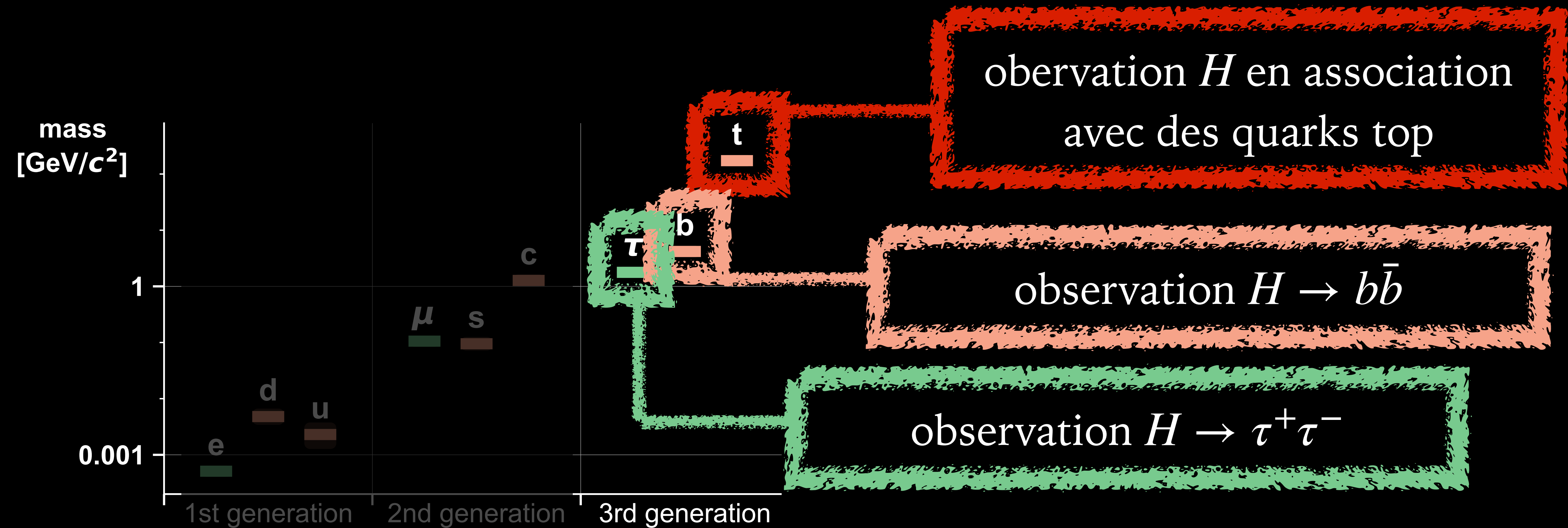
Découverte des interactions 3^e generation—Higgs par ATLAS & CMS ~ 2018



Découverte des interactions 3^e generation—Higgs par ATLAS & CMS ~ 2018

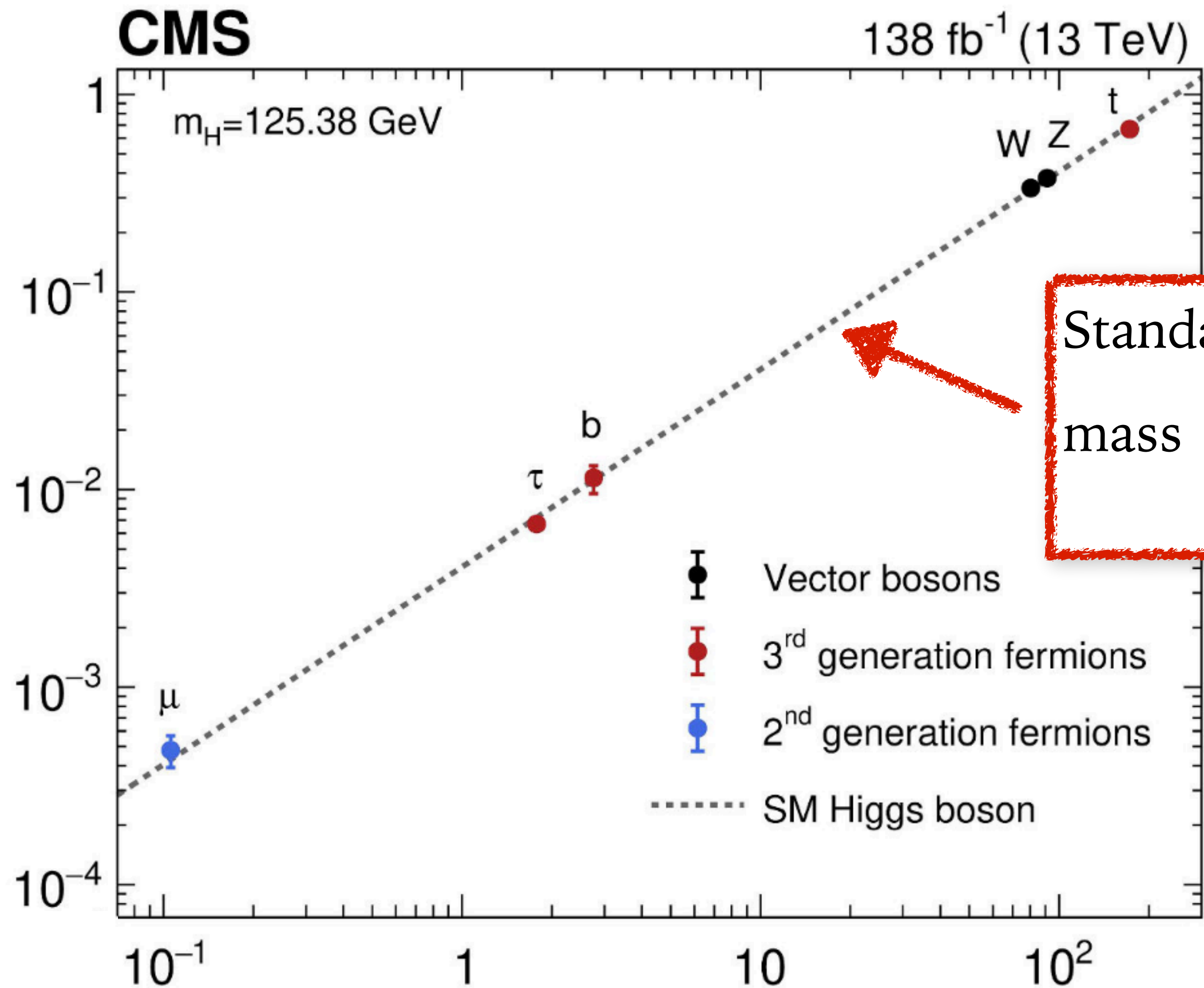


Découverte des interactions 3^e generation—Higgs par ATLAS & CMS ~ 2018



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**



Standard Model prediction:
 $\text{mass} = \text{higgs-field-value} \times \text{interaction-strength}$

**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 modifiées

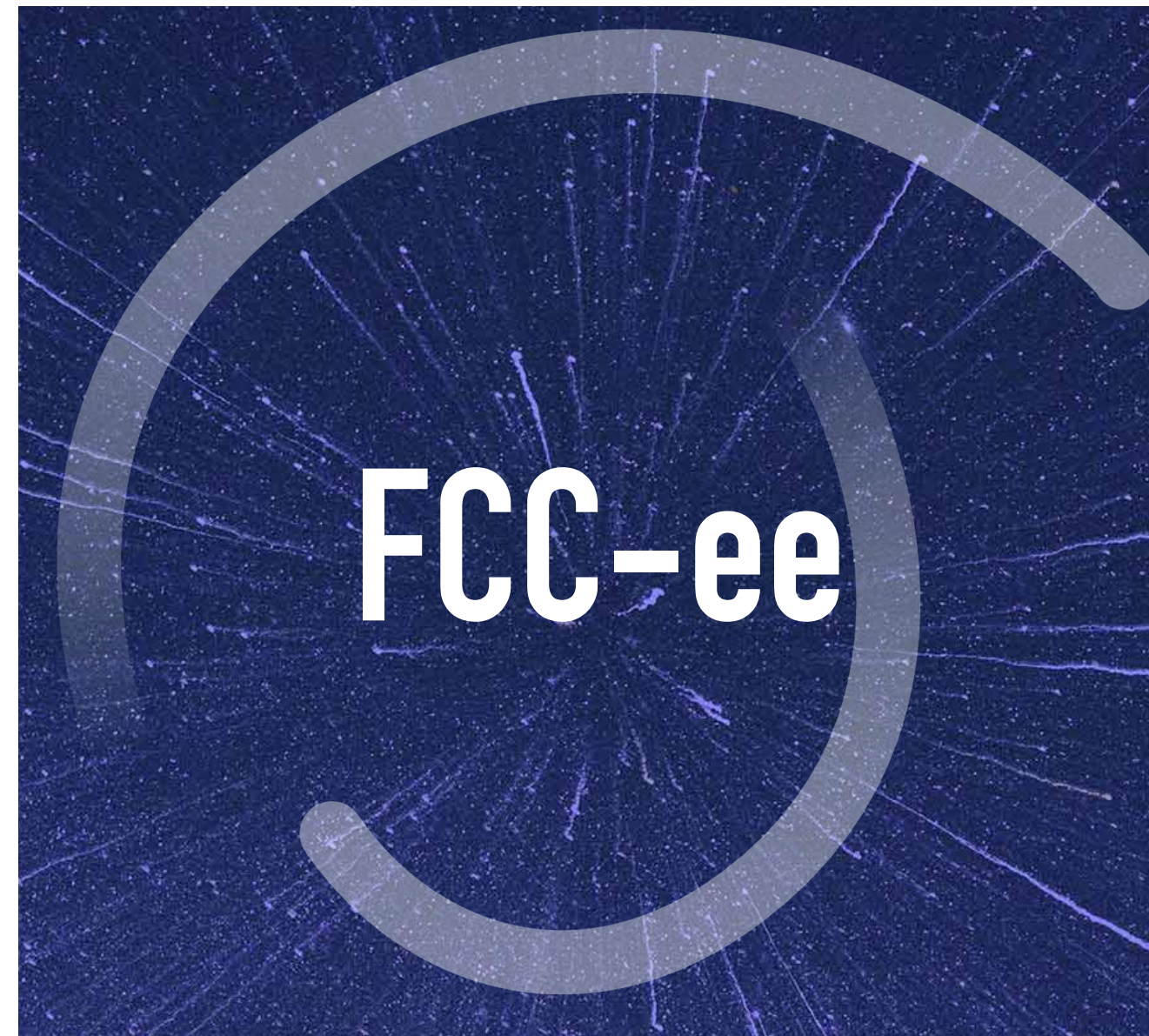
Est-ce moins important que la découverte du boson de Higgs ?
À mon avis : non

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



2029–2041

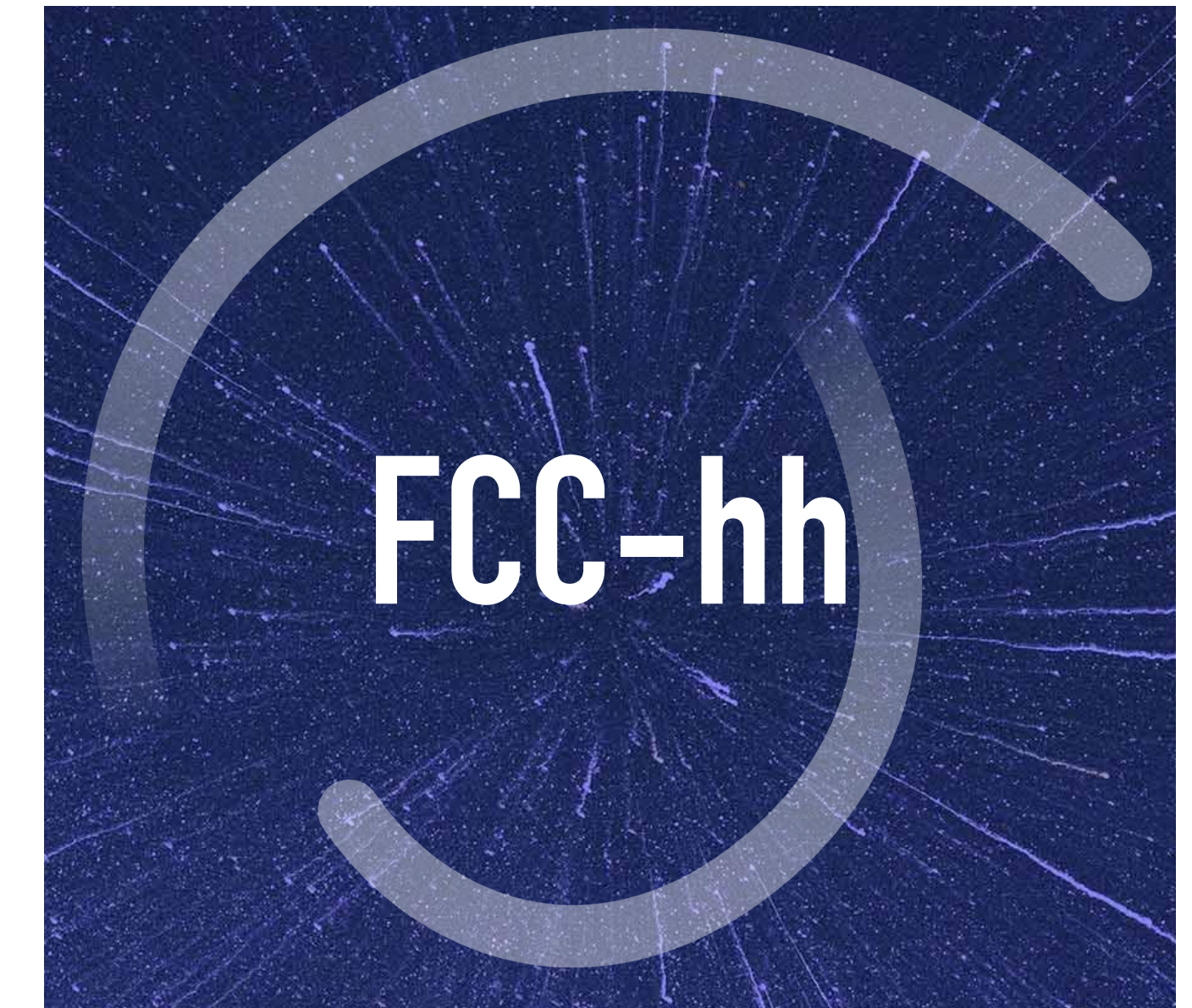
proton–proton
14,000 GeV energy
10× more collisions
than LHC



2045–2060(c.)

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

[or CEPC@China,
ILC, CLIC]



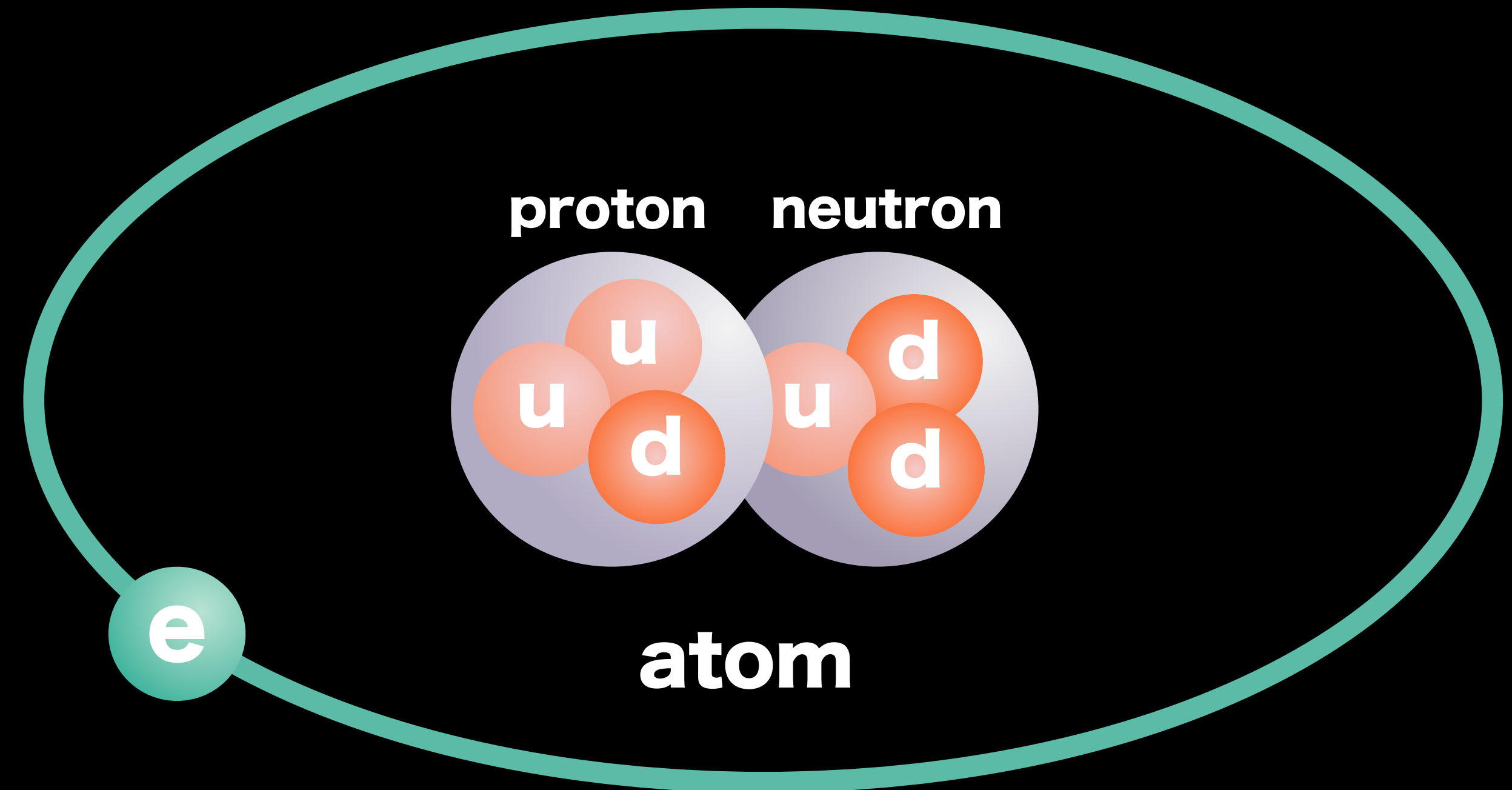
2070–2090(c.)

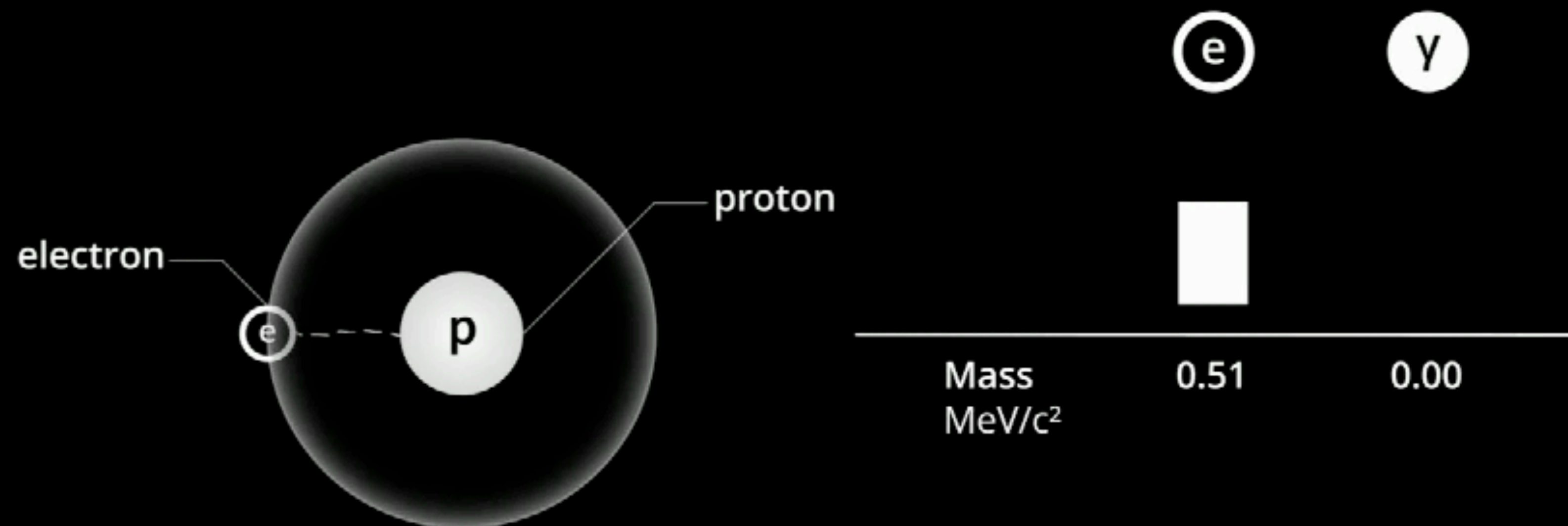
proton–proton
~100,000 TeV energy
10× more collisions
than HL-LHC

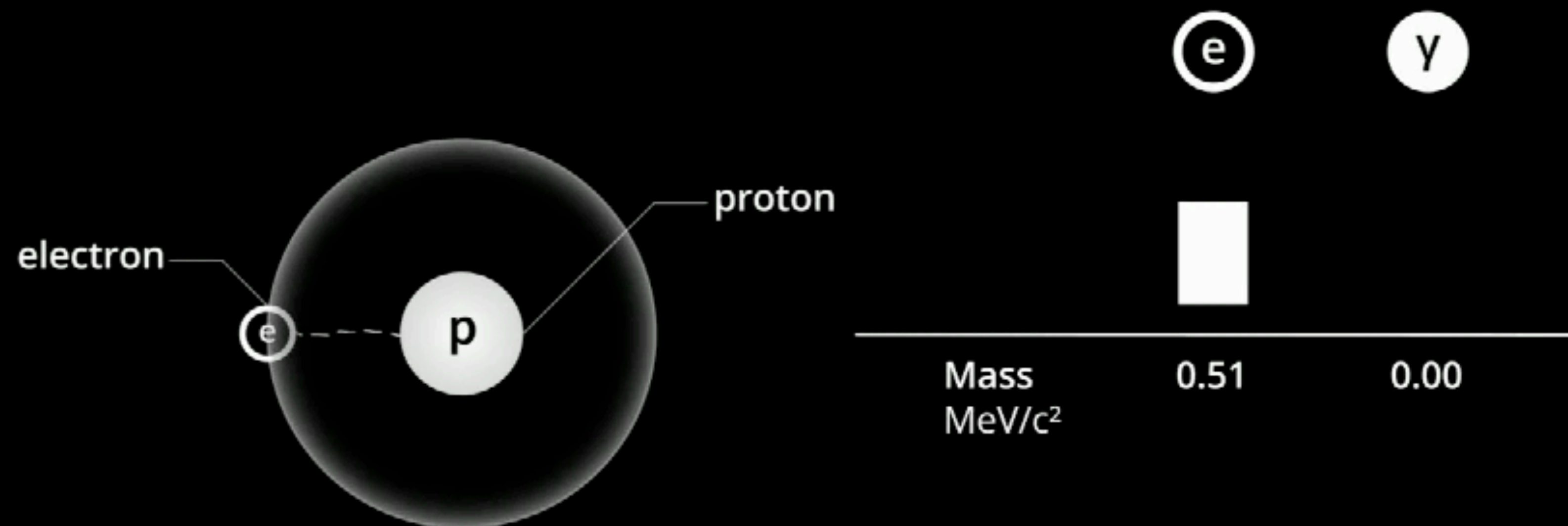
or SppS@China
or muon collider

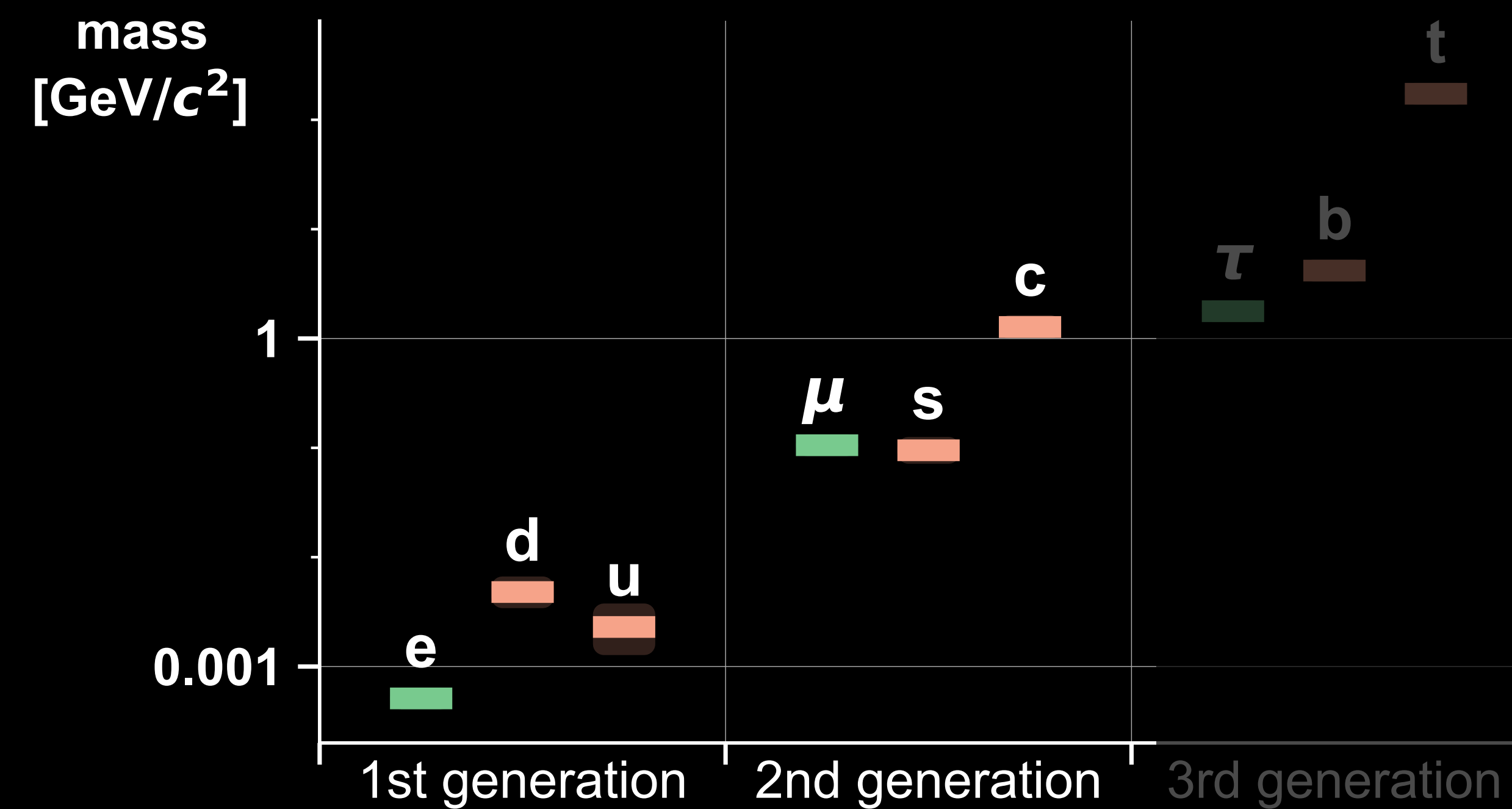
*NB: la grande majorité de la masse des
protons et neutrons vient d'autres
sources*

Les particules
fondamentales
dont sont
composés les
atomes



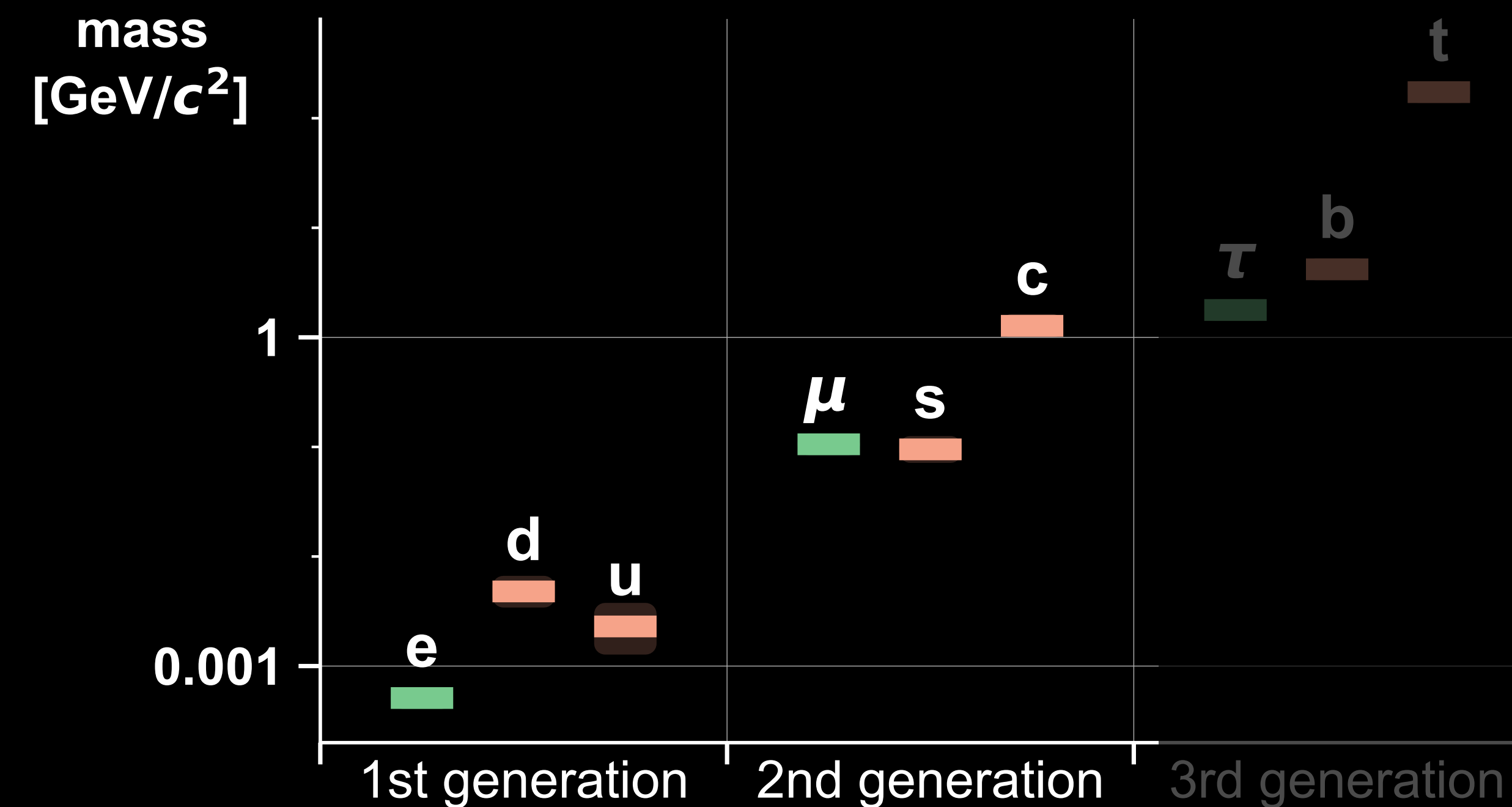




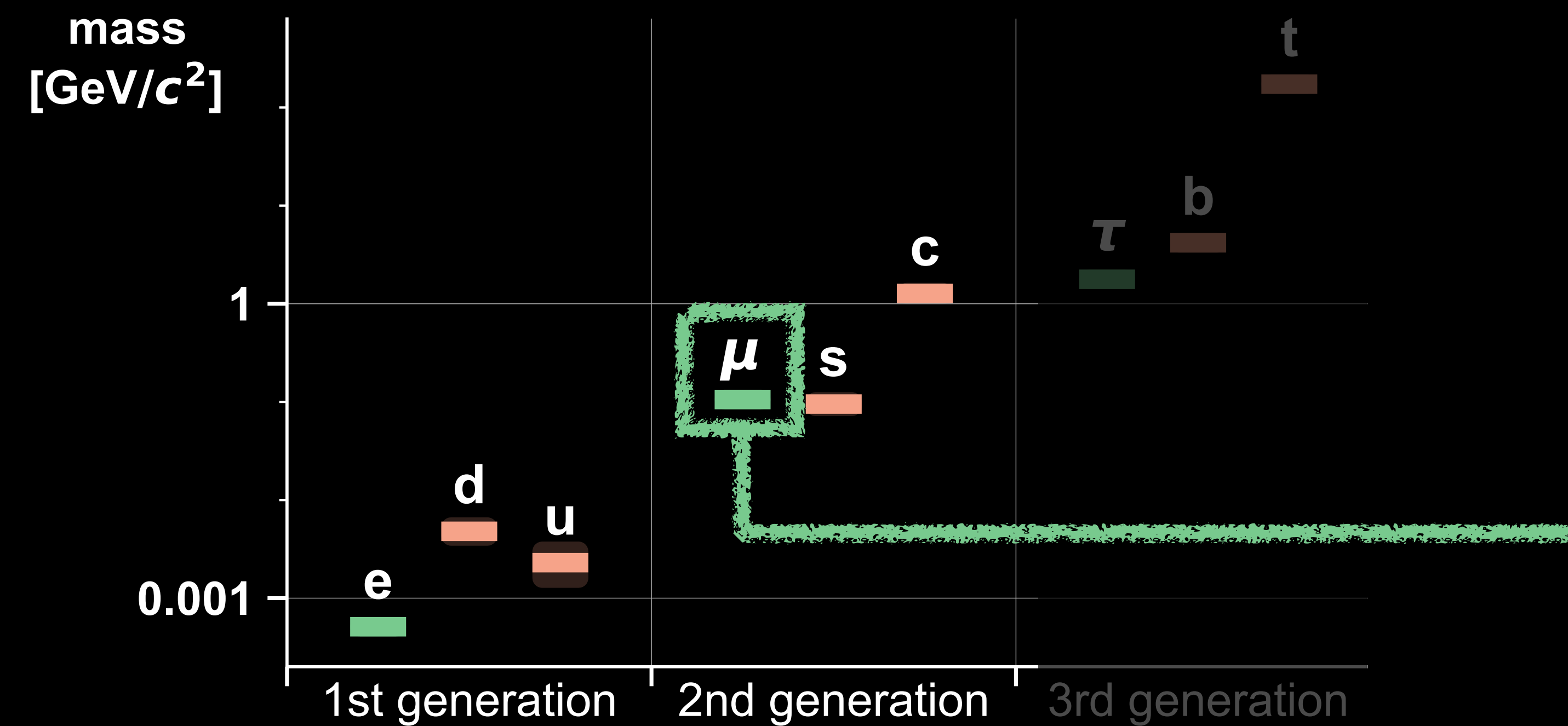


est-ce que TOUTES les
particules obtiennent leur
masse de la même façon ?

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



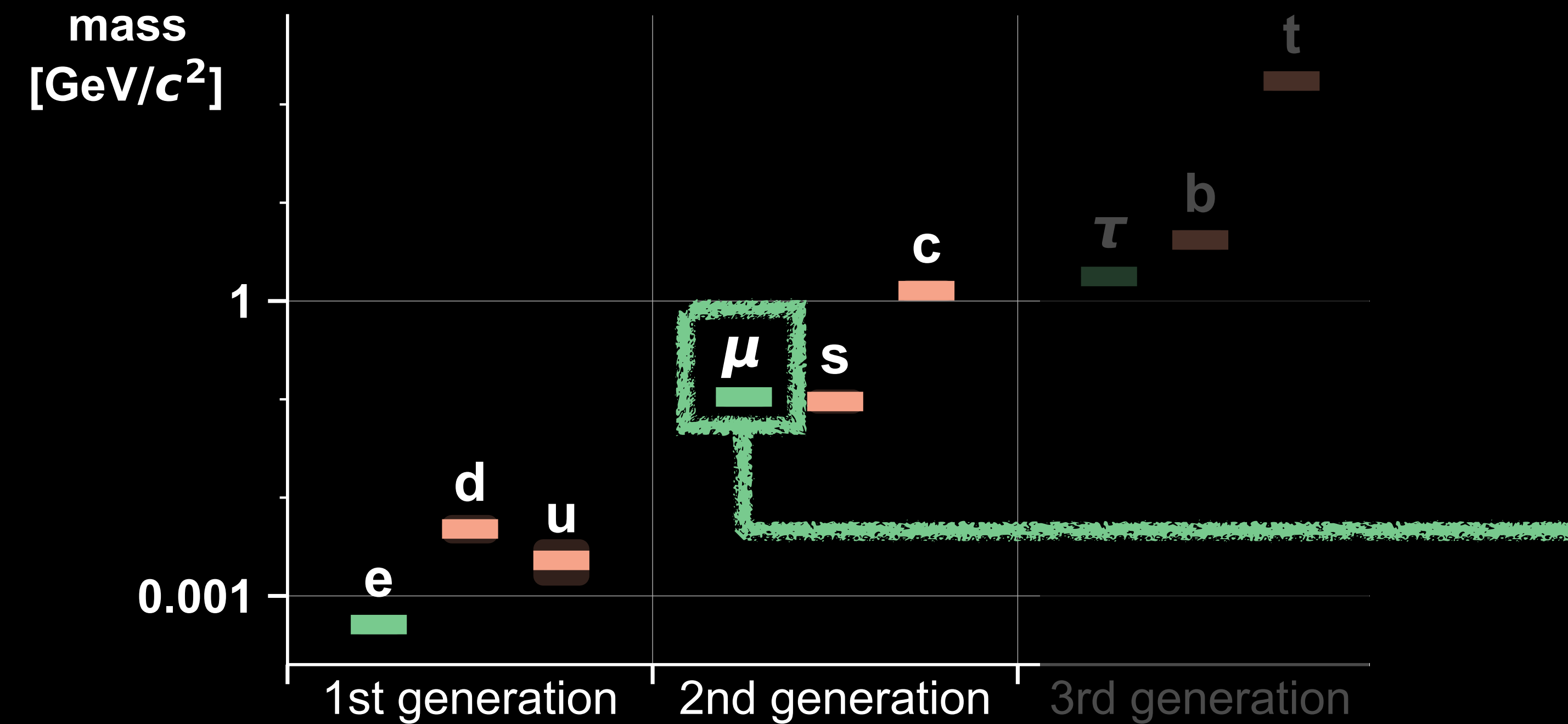
est-ce que TOUTES les
particules obtiennent leur
masse de la même façon ?



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 5σ]

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



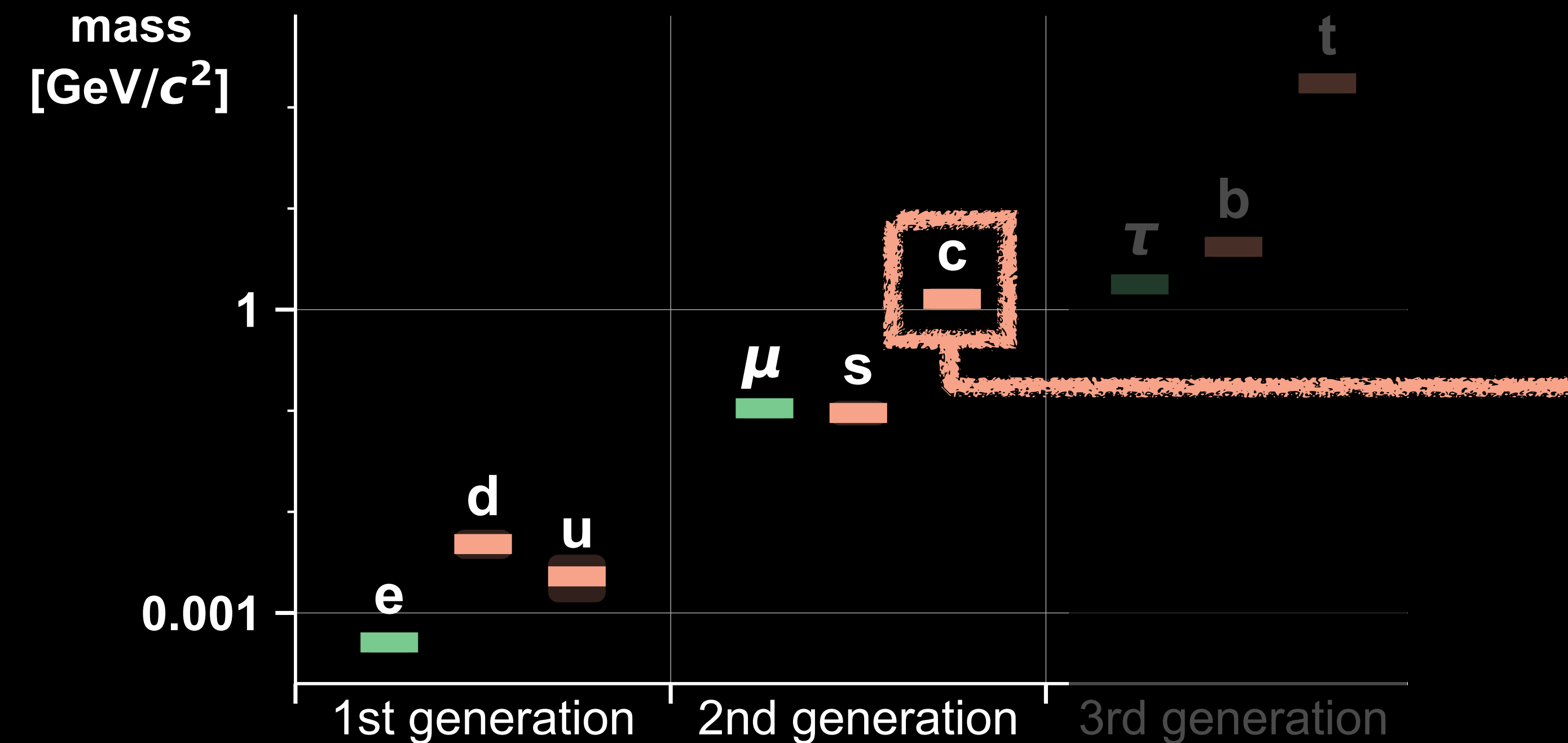
un principal objectif des prochaines années du LHC (Run-3 ou HL-LHC) sera d'établir, pour la première fois, si une particule de la 2^e génération obtient sa masse de la même façon

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

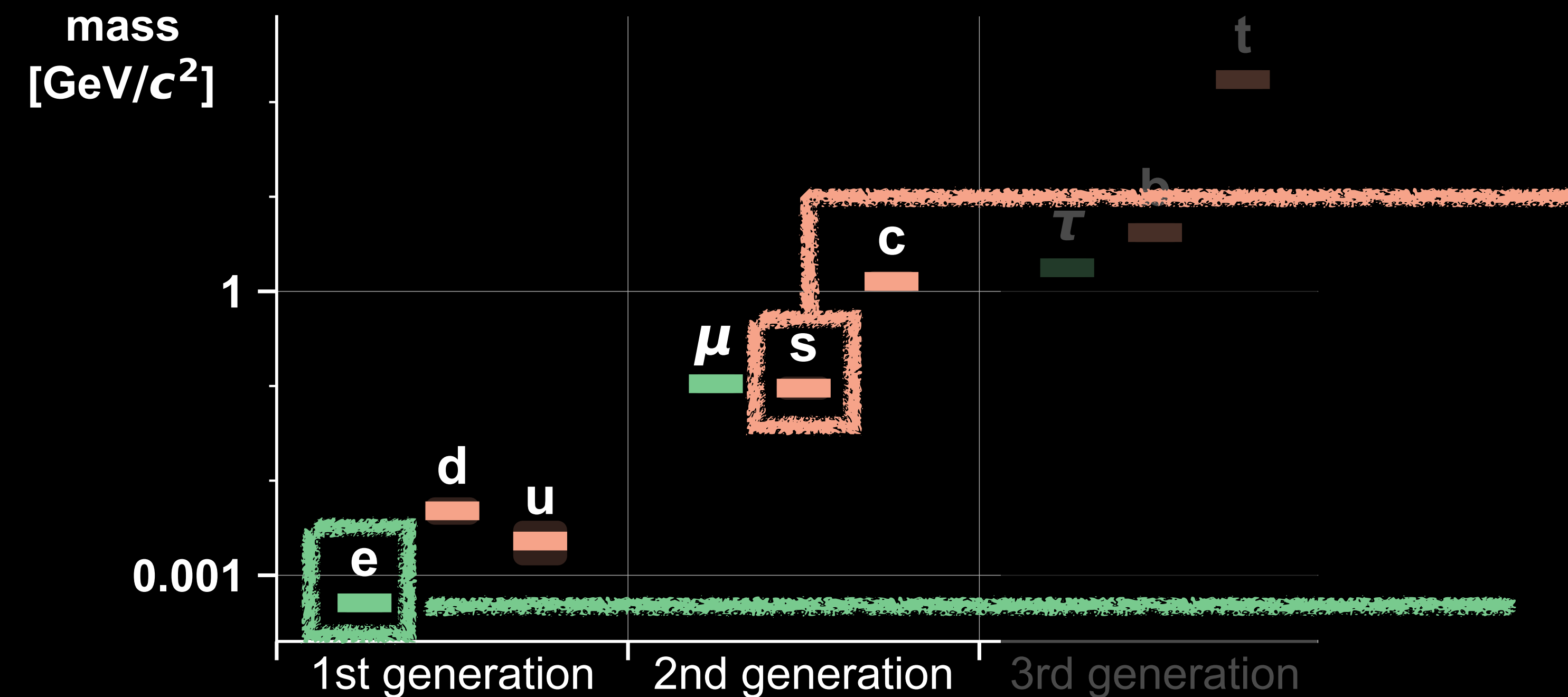
Qu'en est-il du FCC-ee?

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 project en physique des particules

un objectif important à atteindre \sim 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 project en physique des particules

un objectif important à atteindre ~ découverte garantie

?

élargissement de l'exploration par un facteur significatif en énergie

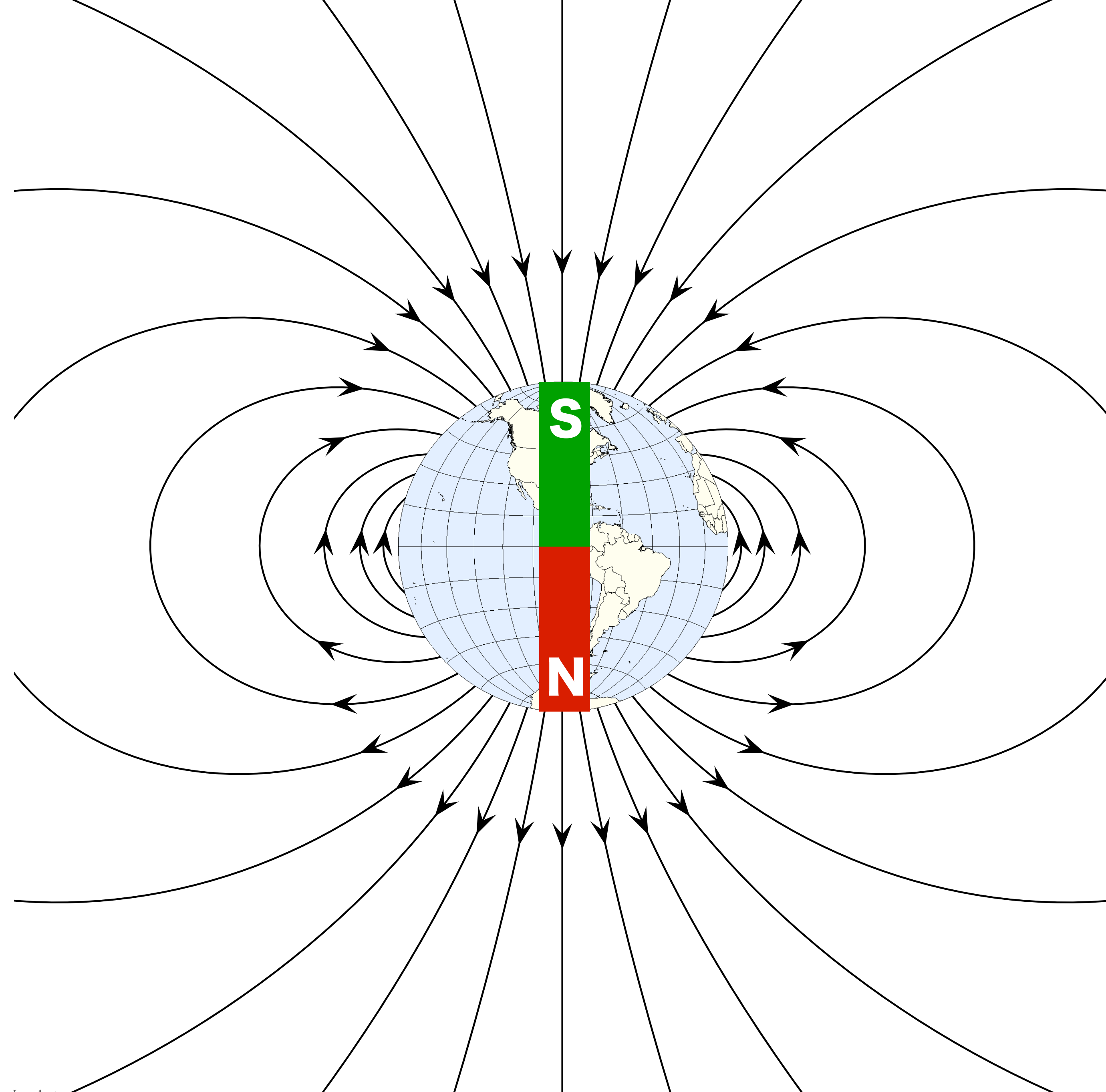
progrès majeurs sur une gamme de sujets en physique des
particules

probabilité de succès, robustesse (ex : plusieurs expériences)

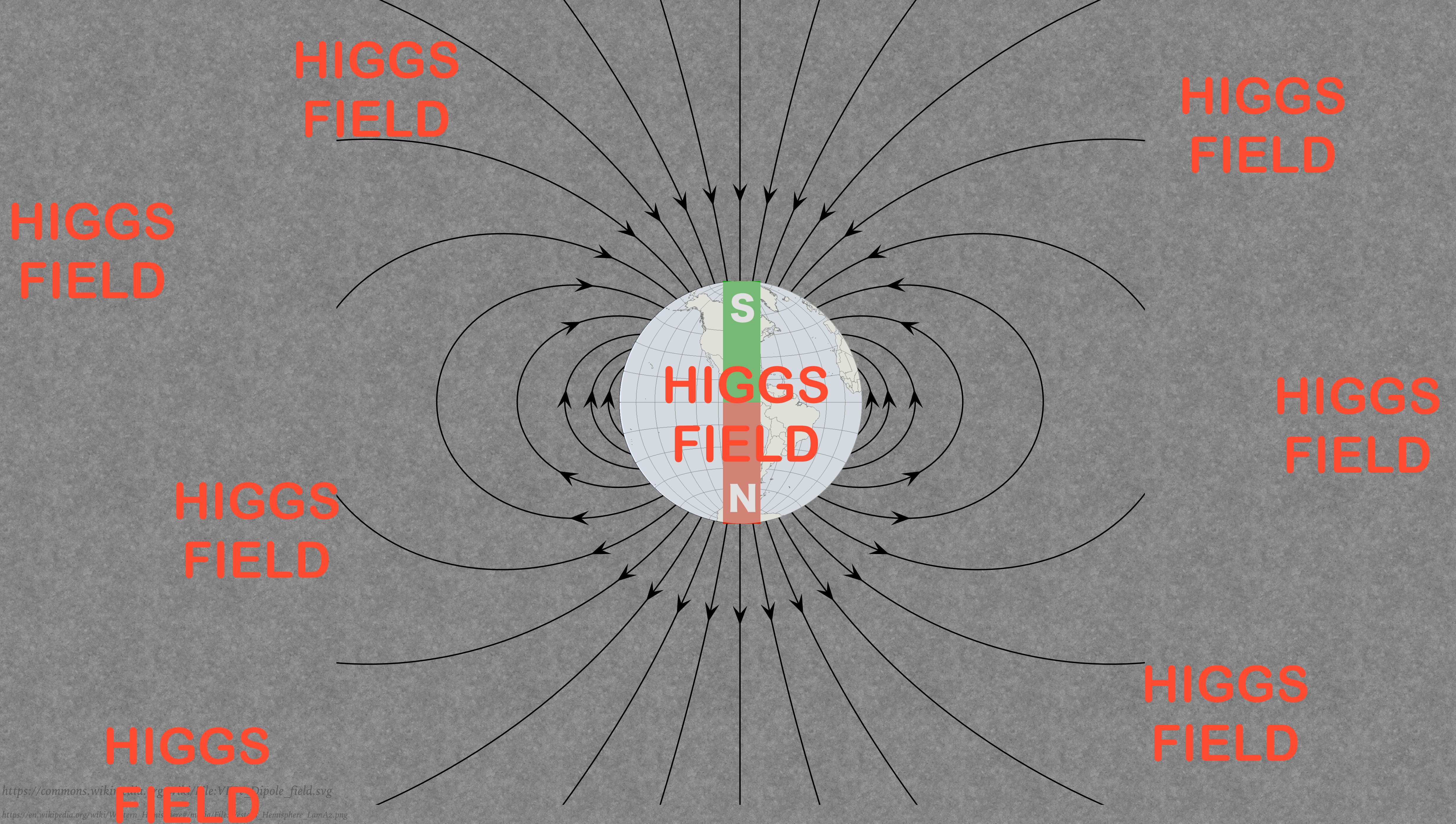
bon rapport coûts/physique pour la construction et l'exploitation,
empreinte carbone limitée, nouvelles technologies

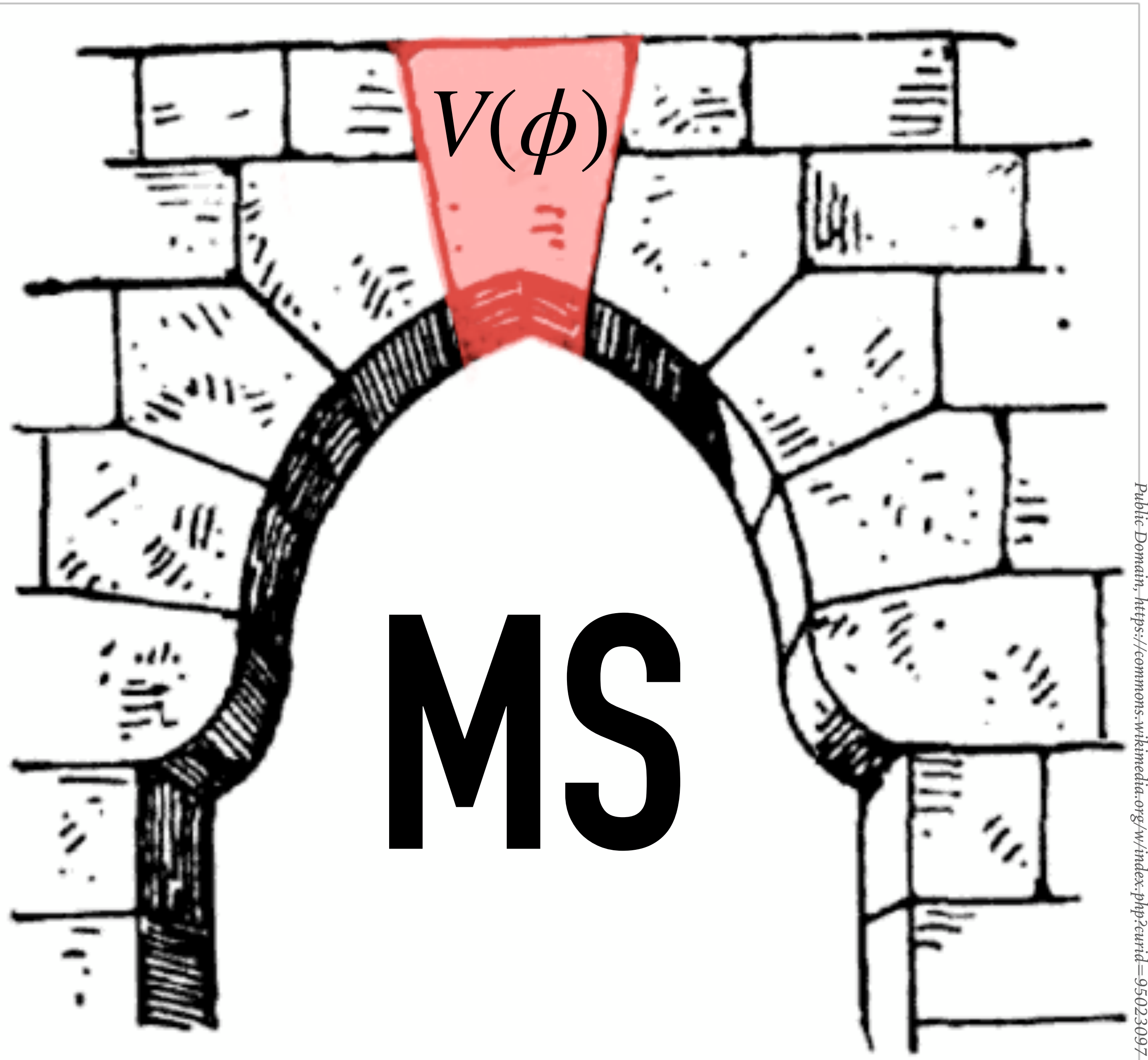
**les particules fondamentales
n'obtiennent une masse que si le
champ de Higgs a une valeur non-nulle**

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





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

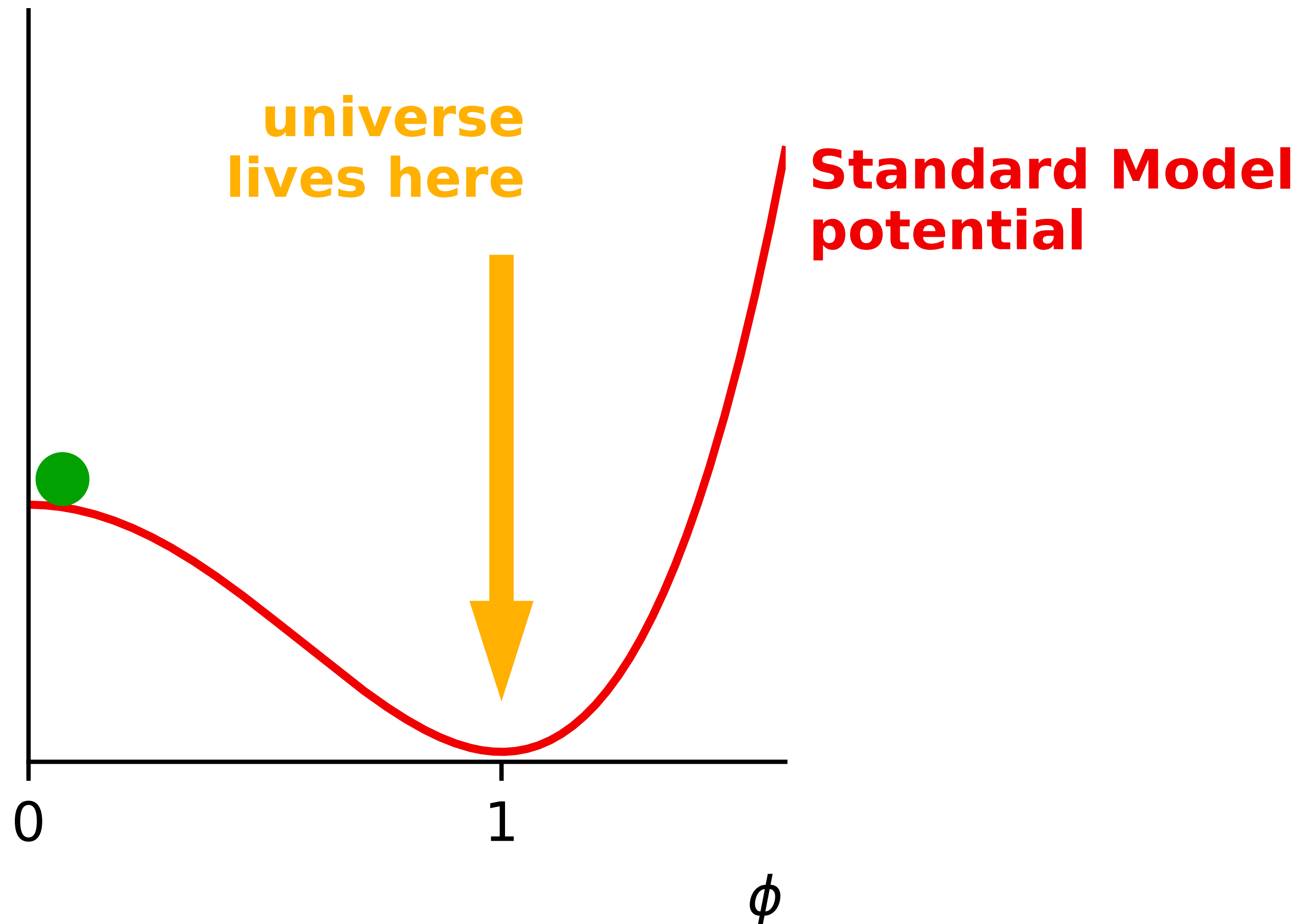
**parmi tous les champs
que nous connaissons, le
champ de Higgs est
unique: le seul à être non-
nul au niveau “classique”**

**Pourquoi?
Potential de Higgs?**

Clé de voûte du MS

Potentiel de Higgs

$V(\phi)$, SM

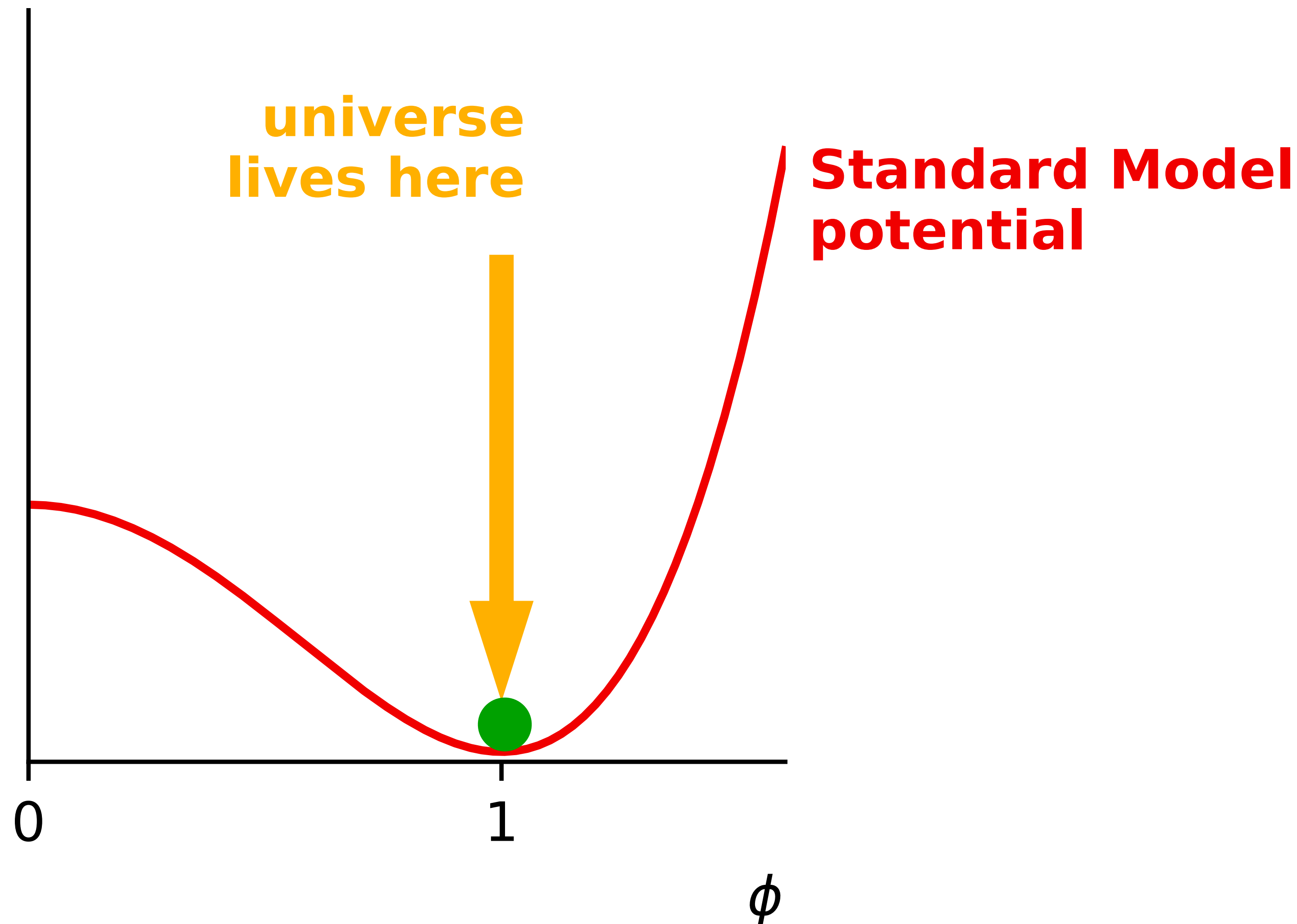


Le champ de Higgs
serait non-nul parce
que ça correspond
au minimum de
l'énergie potentielle

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

Potentiel de Higgs

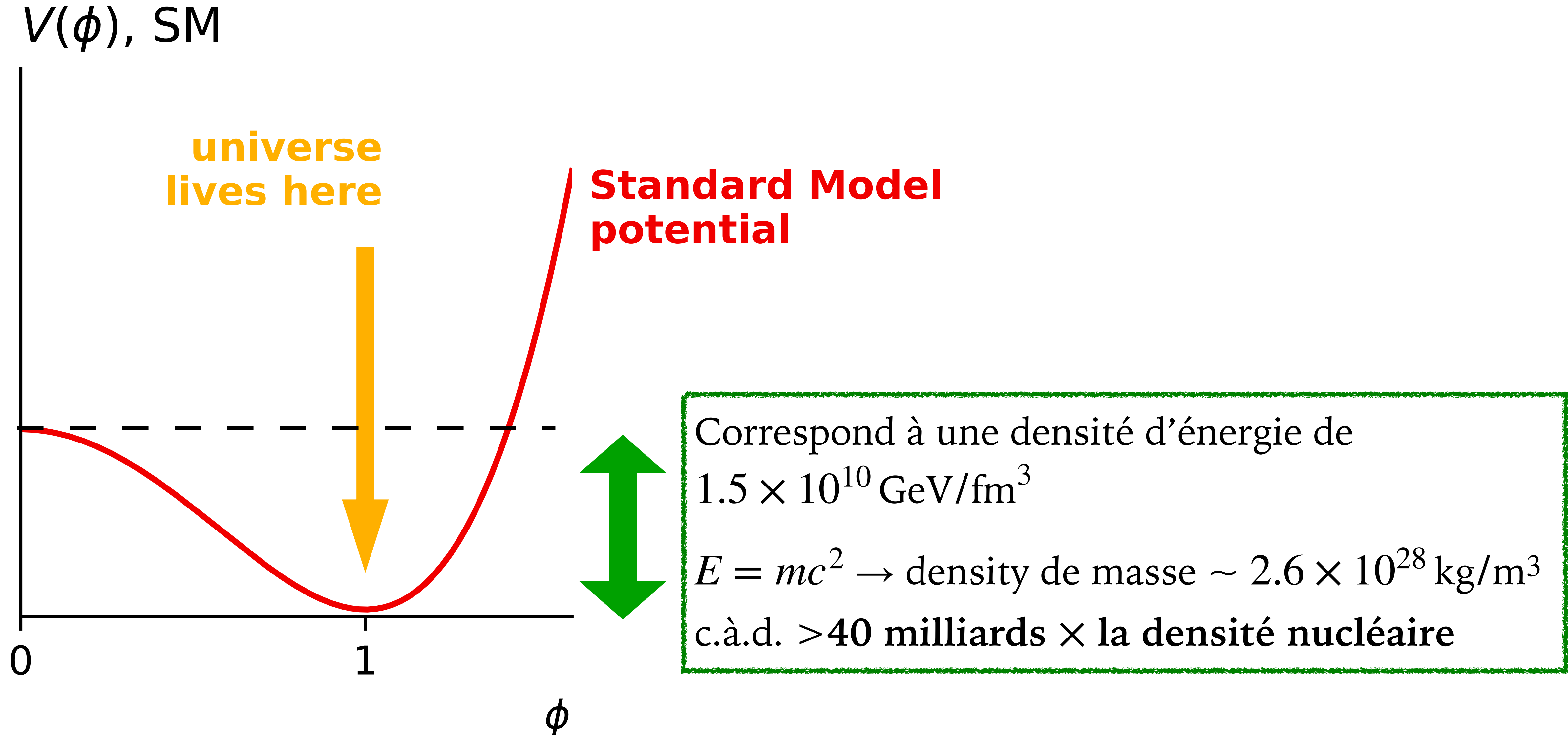
$V(\phi)$, SM



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







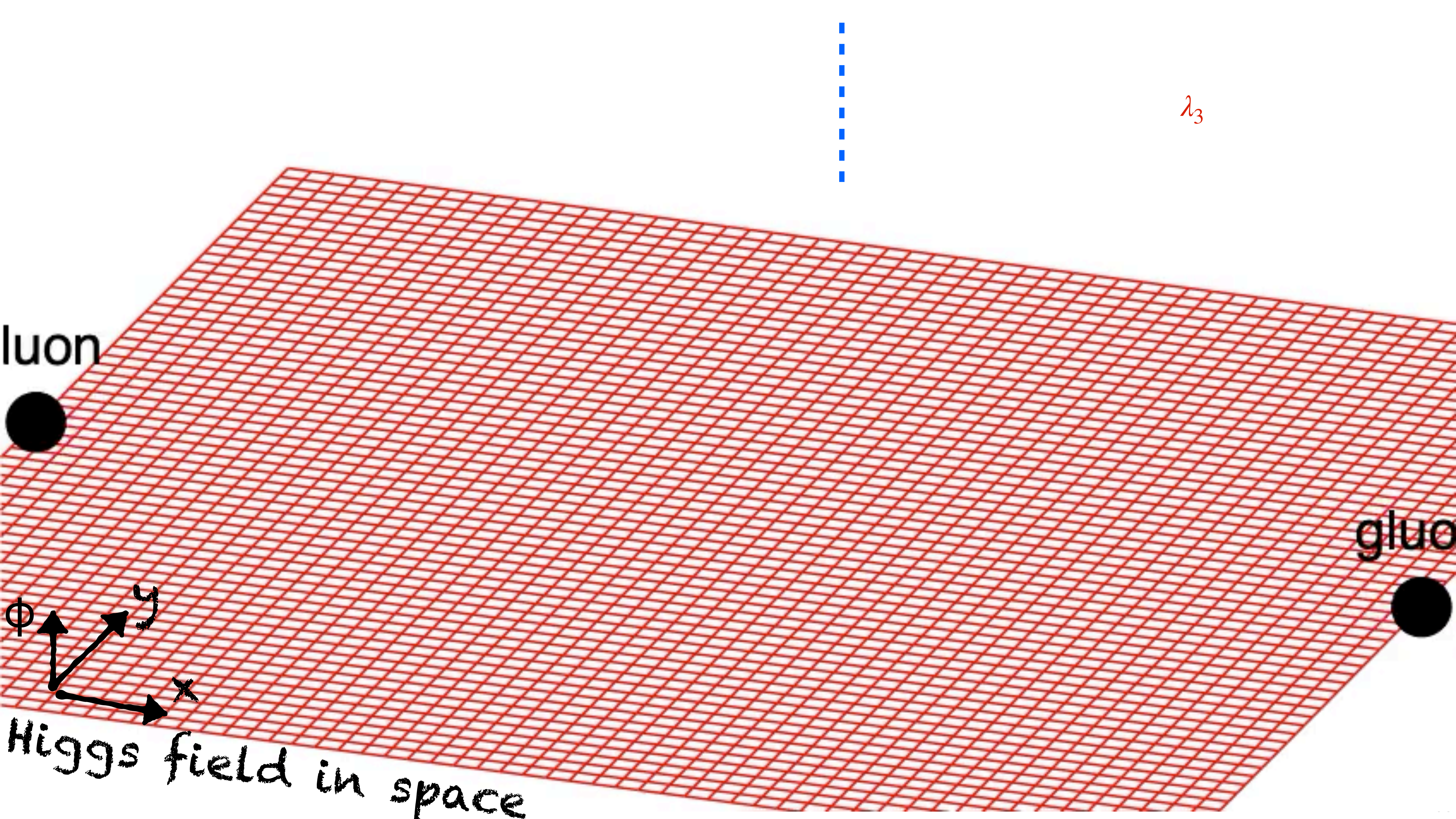
**la terre, à la densité d'une
étoile de neutrons**



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



**la terre, à la densité du
potentiel de Higgs**



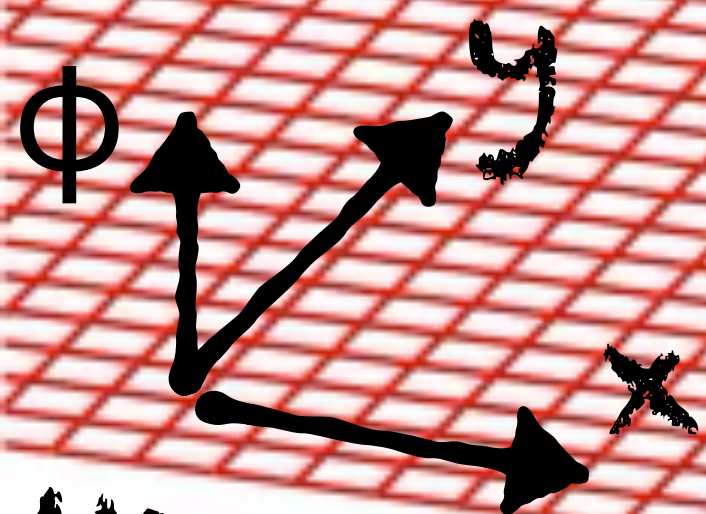
quon



λ_3



gluon



Higgs field in space

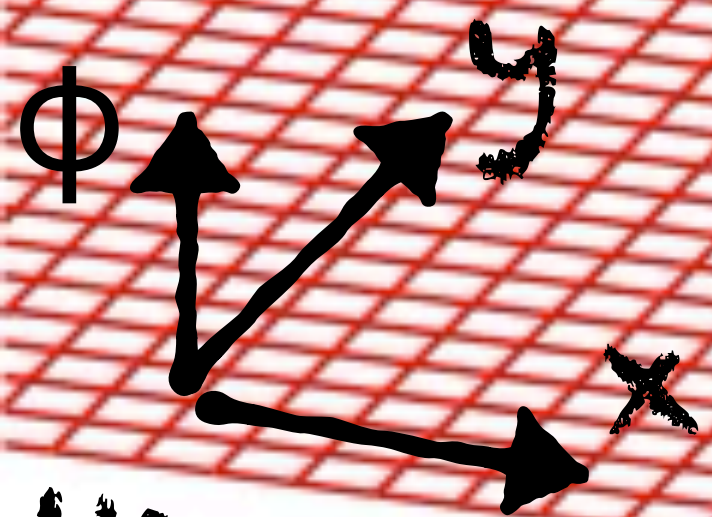
quon



λ_3

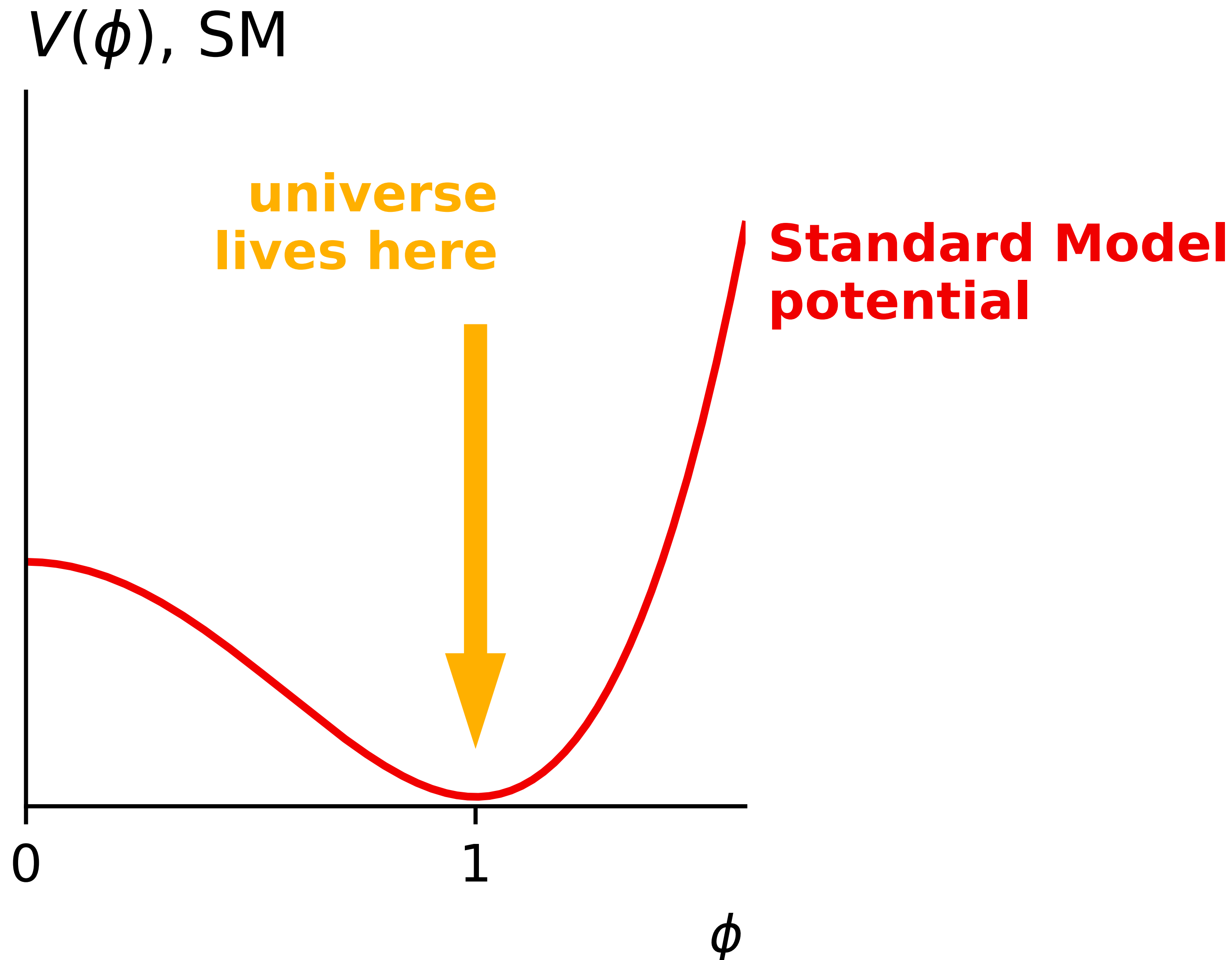


gluon



Higgs field in space

Potentiel de Higgs

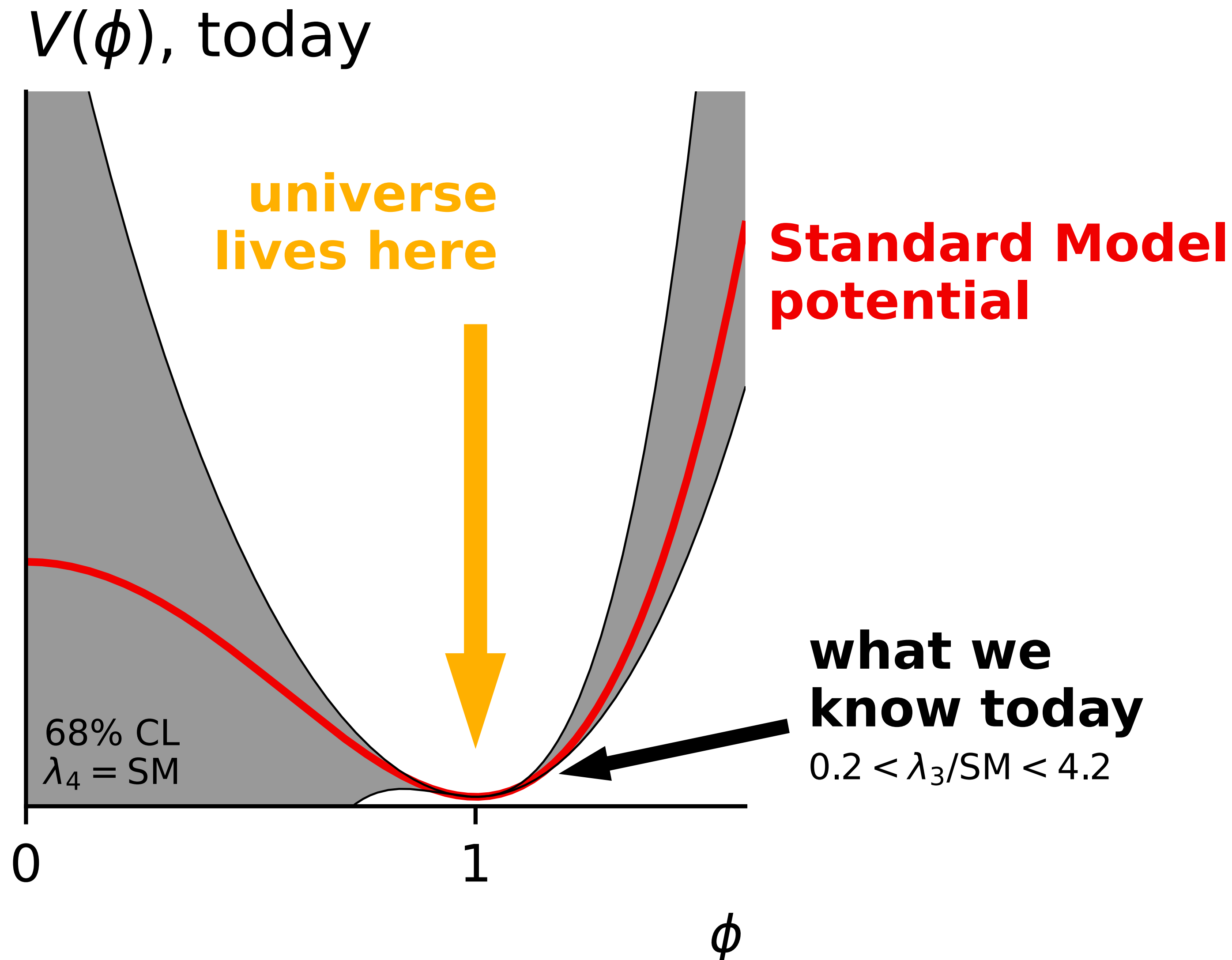


L'étude de $H \rightarrow HH$ sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

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



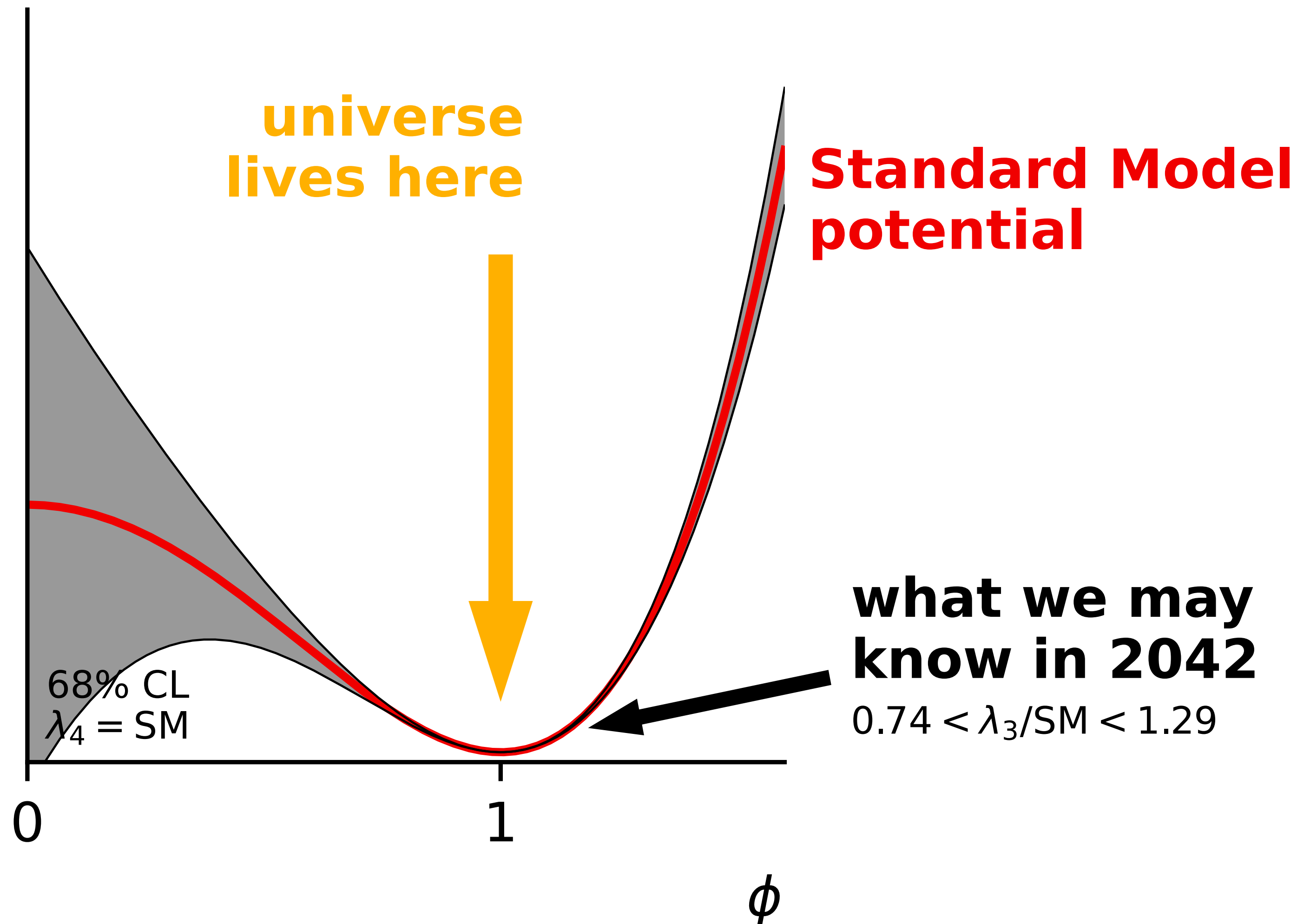
L'étude de $H \rightarrow HH$ sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

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)

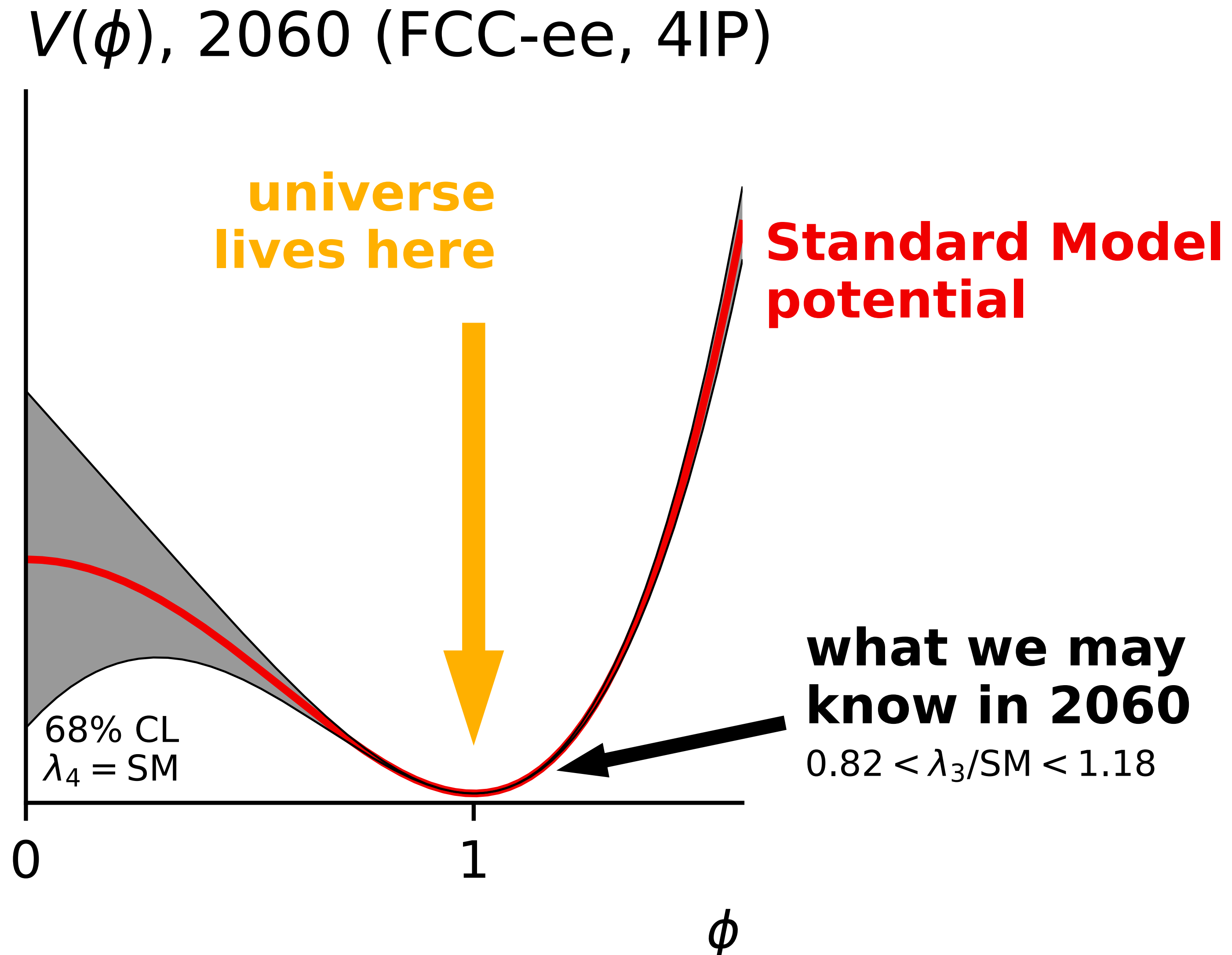


L'étude de $H \rightarrow HH$ sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

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



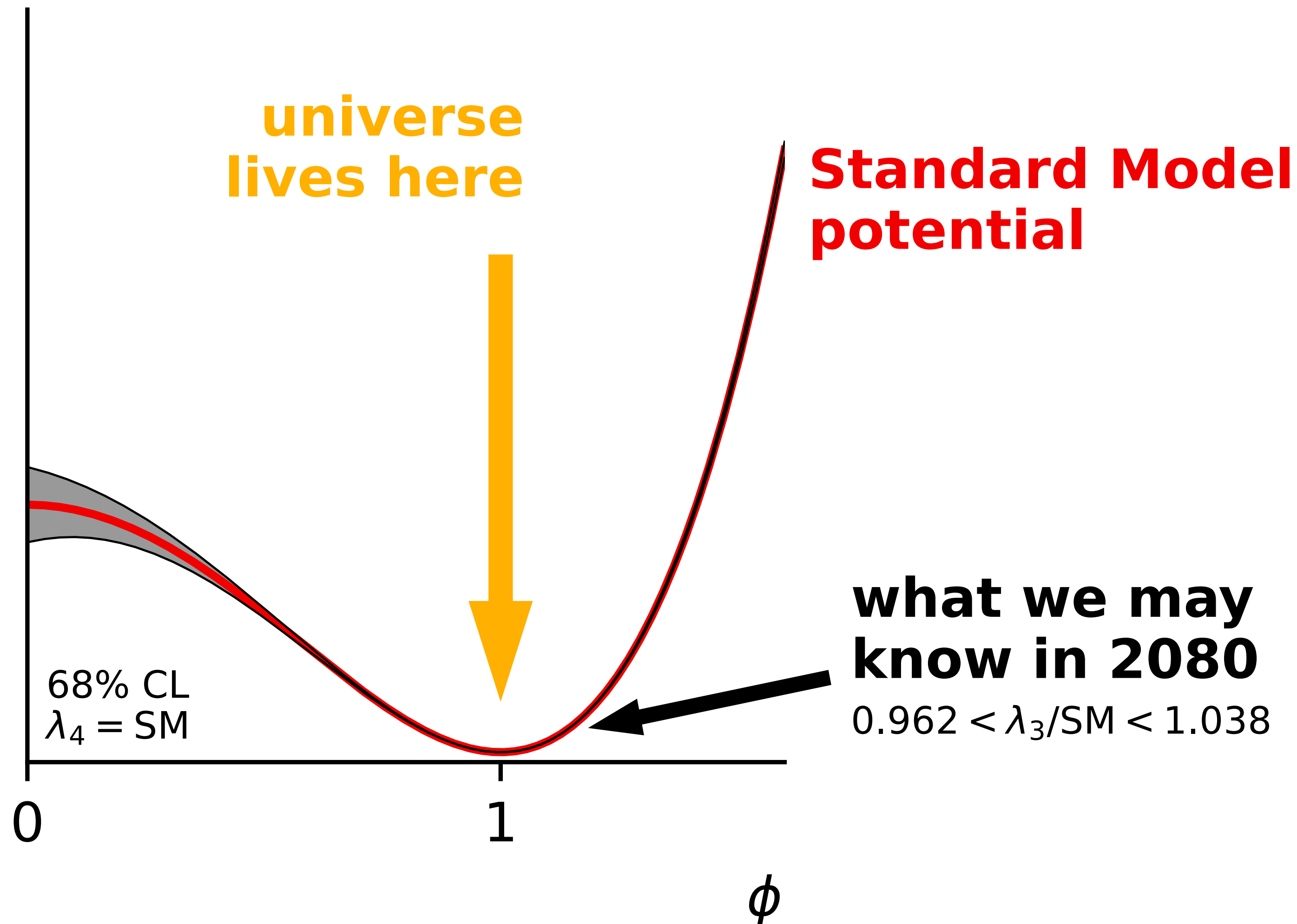
L'étude de $H \rightarrow HH$ sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

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)



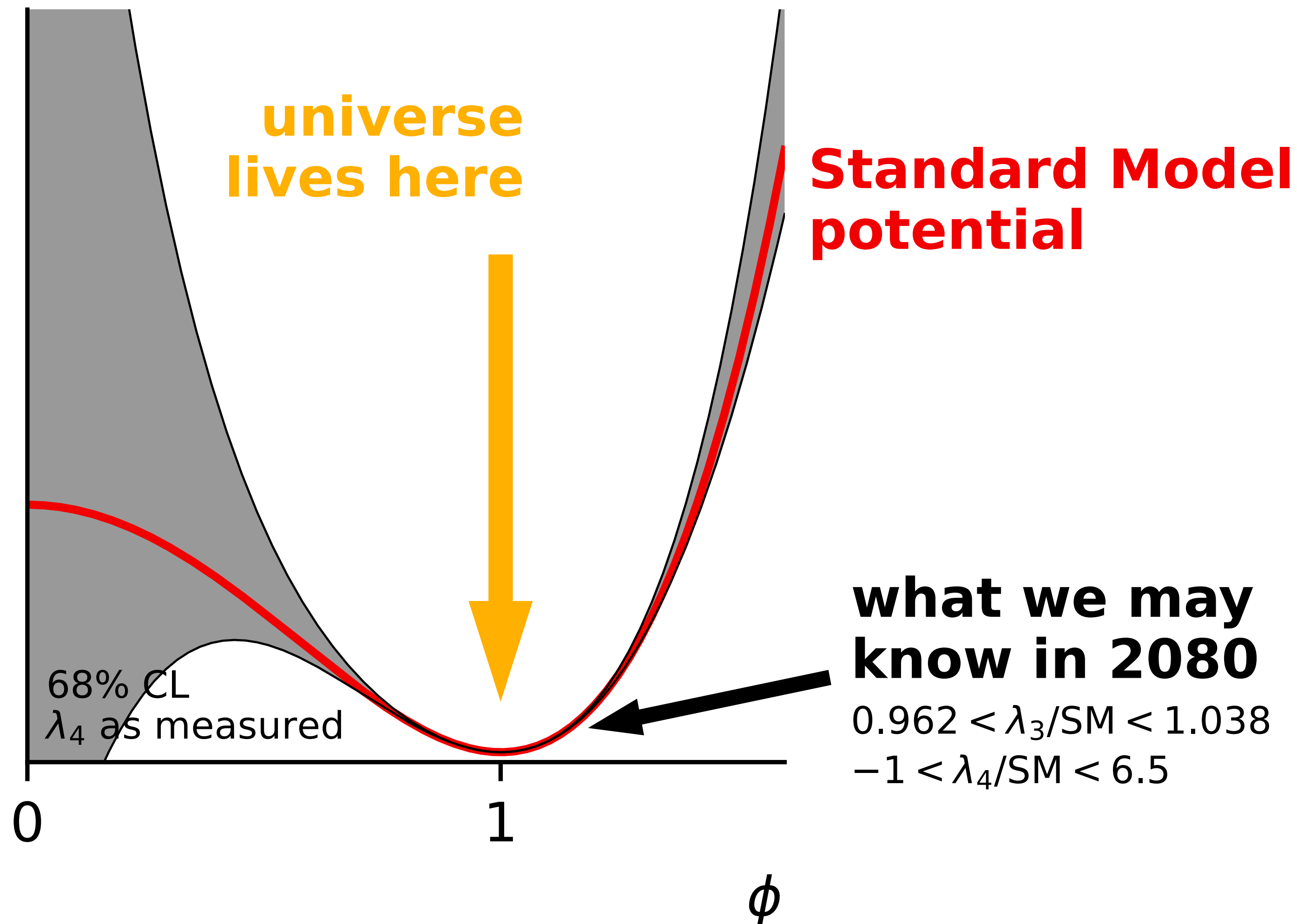
L'étude de $H \rightarrow HH$ sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

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)



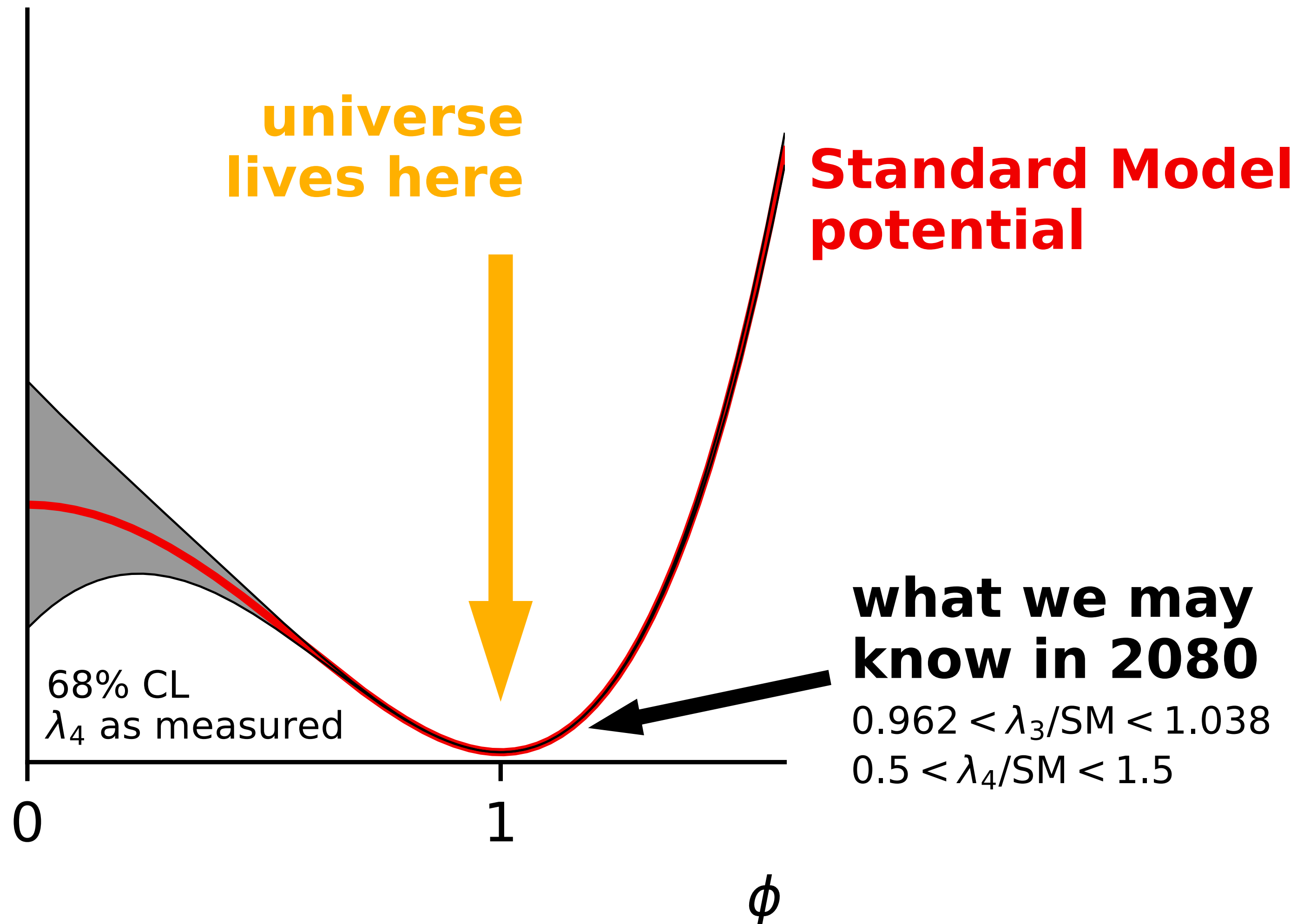
L'étude de $H \rightarrow HH$ sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

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.)



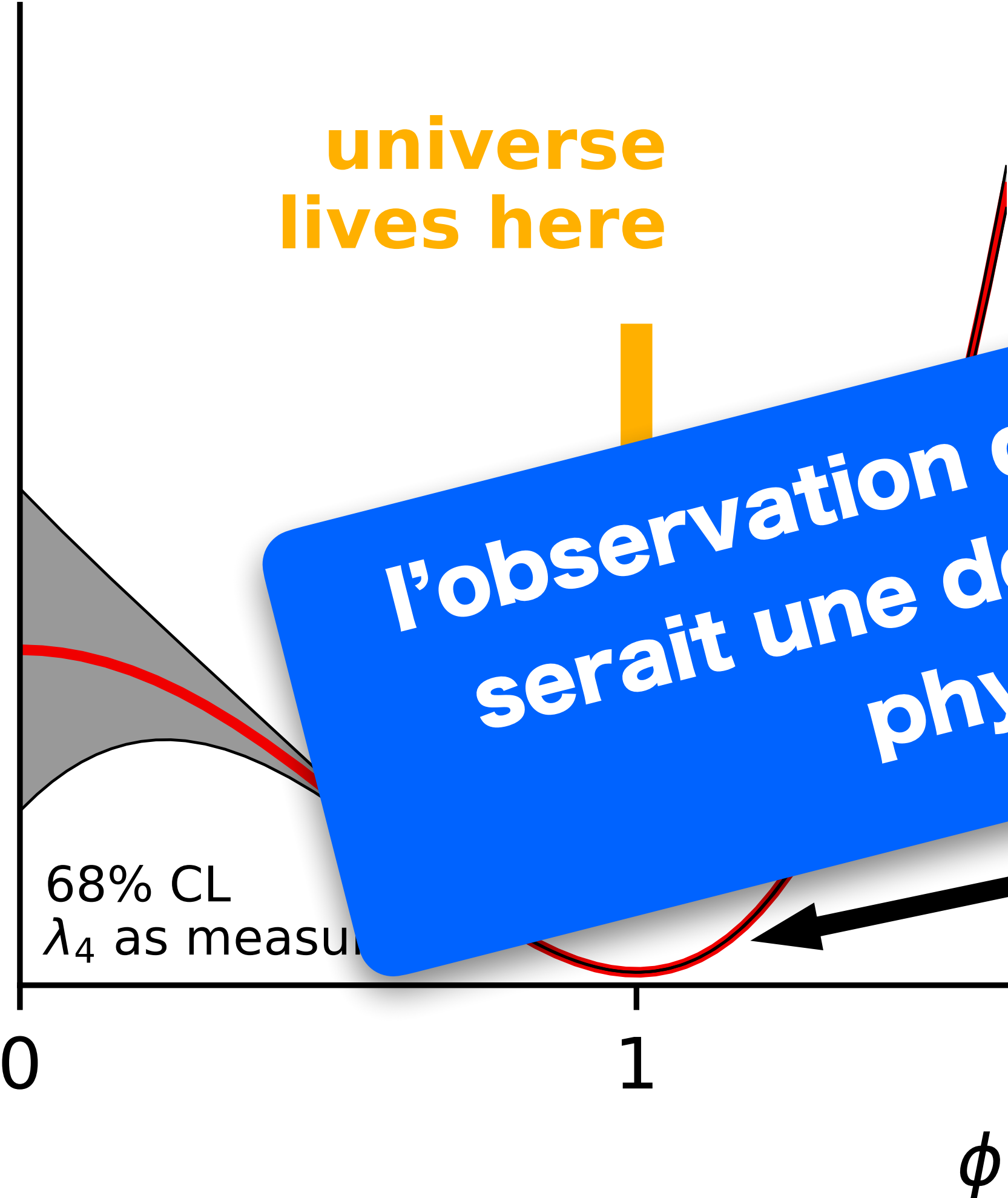
L'étude de $H \rightarrow HH$ sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

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

$V(\phi), 2080 \text{ (FCC-hh)} + \lambda_4 \text{ (muon coll.)}$



l'observation directe de l'interaction $H \rightarrow HH$ serait une découverte "garantie" pour la physique des particules

Standard Model potential

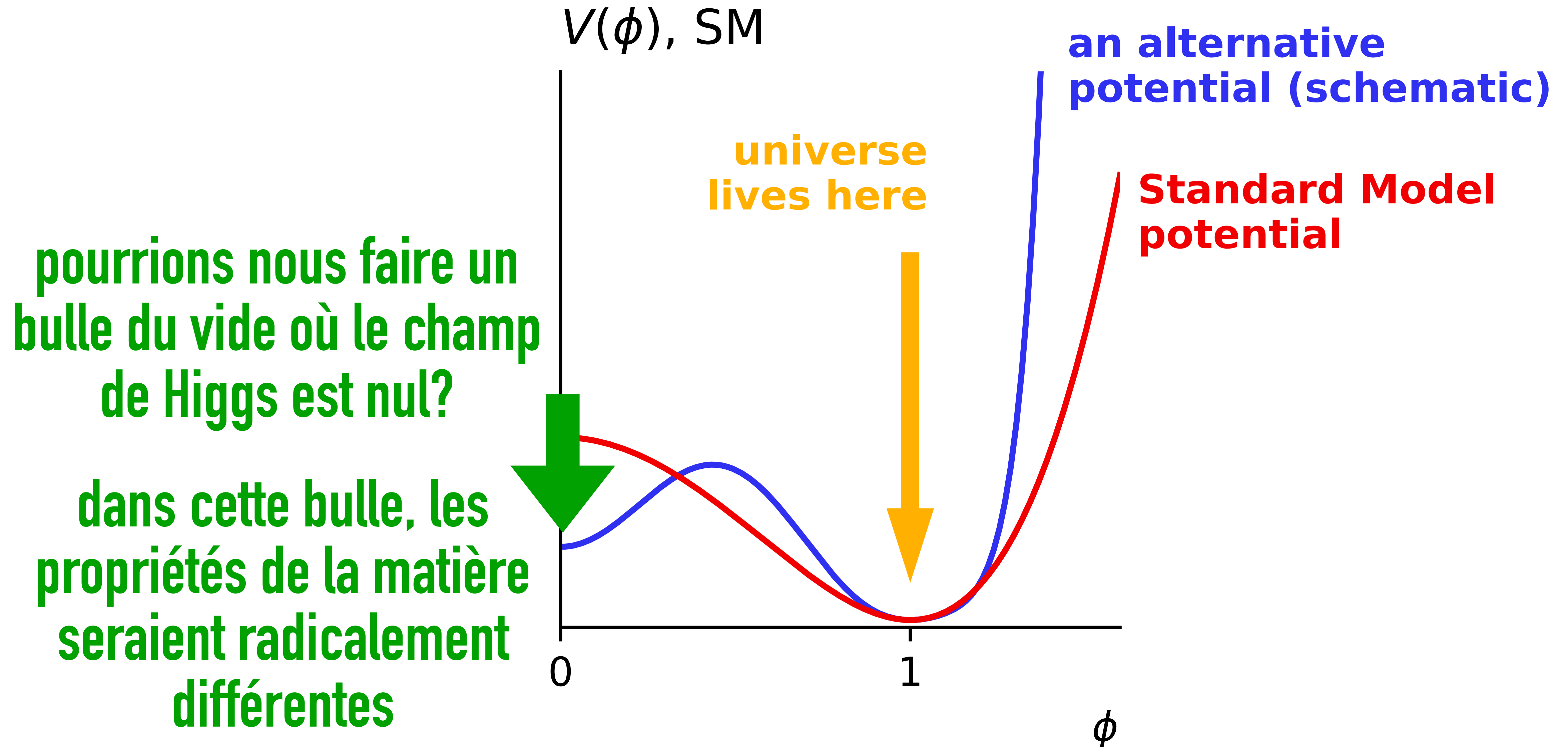
what we may know in 2080

$0.962 < \lambda_3/\text{SM} < 1.038$
 $0.5 < \lambda_4/\text{SM} < 1.5$

L'étude de $H \rightarrow HH$ sonde une propriété systématique de la forme du potentiel (le paramètre λ_3), et sa symétrie ou asymétrie au minimum

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

Science fiction



Science fiction

$V(\phi)$, SM

an alternative
potential (schematic)

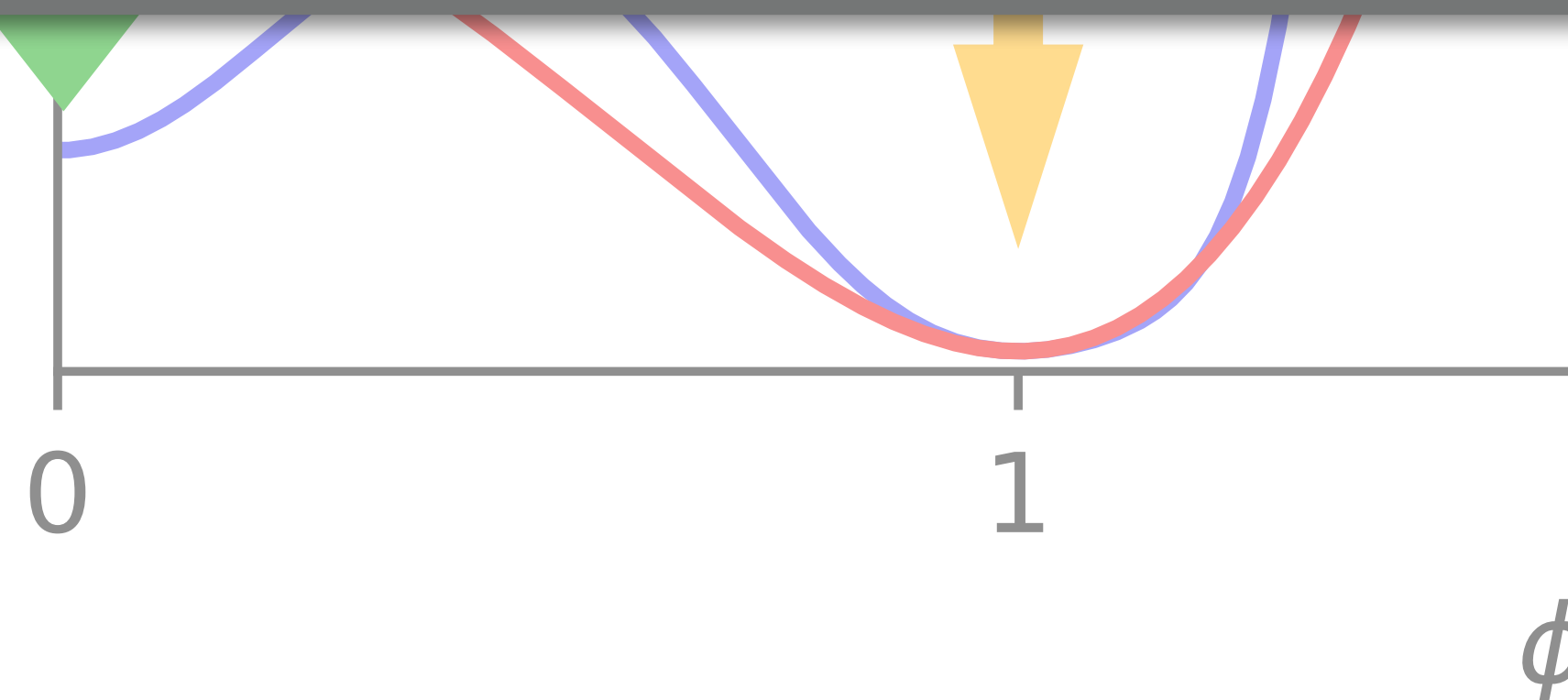
universe
lives here

/ Standard Model

rien de suggère que ce serait possible

mais nous 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 cette bulle, les
propriétés de la matière
seraient radicalement
différentes



atouts pour un futur grand project en physique des particules

un objectif important à atteindre \sim 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



<https://free-prod-v1-generations.s3.us-east-1.amazonaws.com/images/665c051f55404f33485e4a9a2a81c36.webp>

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**

**30 orders
of magnitude
in interaction
strength**




**30 orders of
magnitude in mass**



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


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



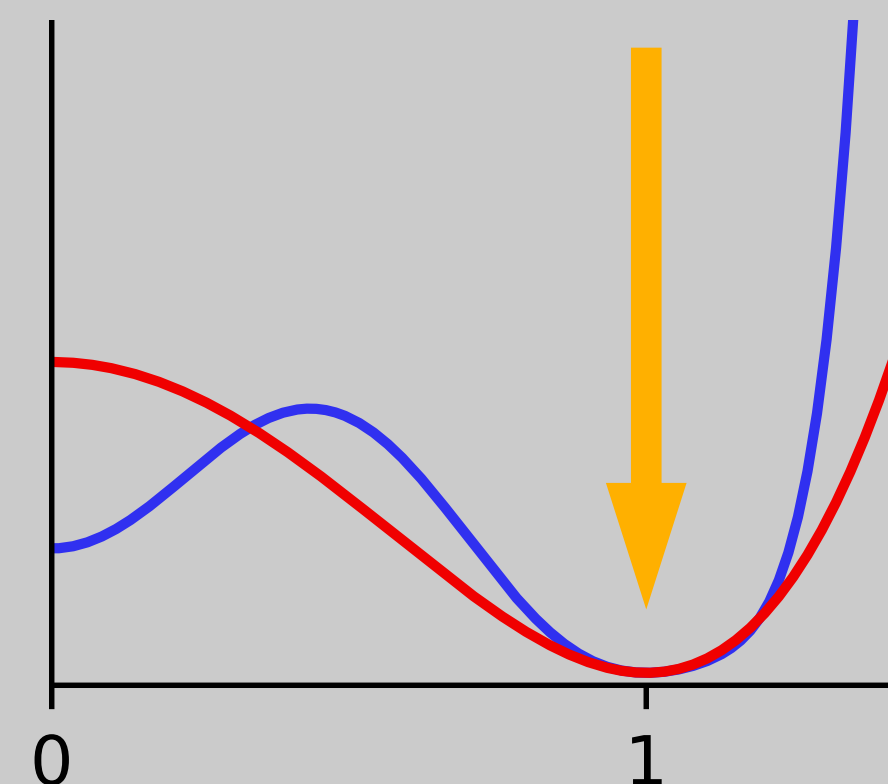
flavour *naturalness* *stability* *cosmological constant*

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

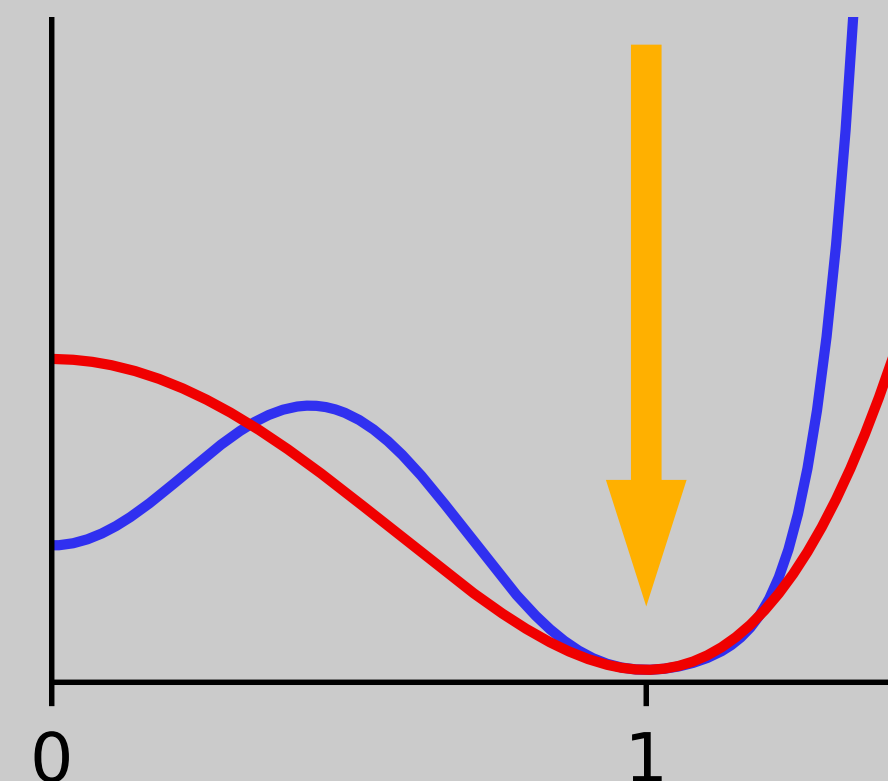


Almost every problem of the Standard Model originates from Higgs interactions

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



flavour *naturalness* *stability* *cosmological constant*

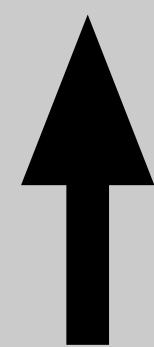


Almost every problem of the Standard Model originates from Higgs interactions

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



flavour



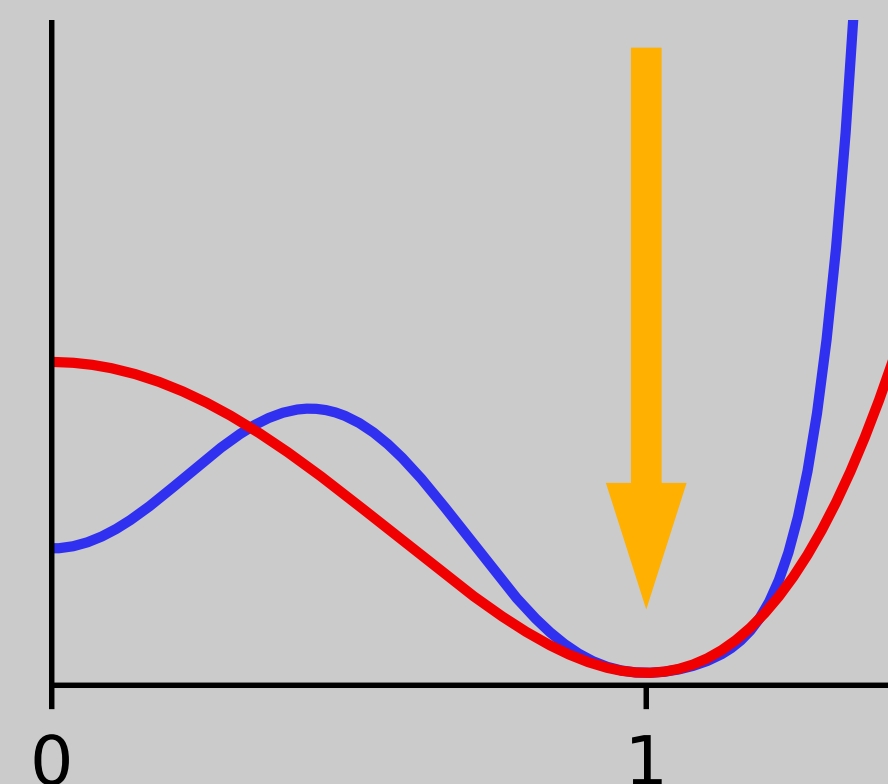
naturalness



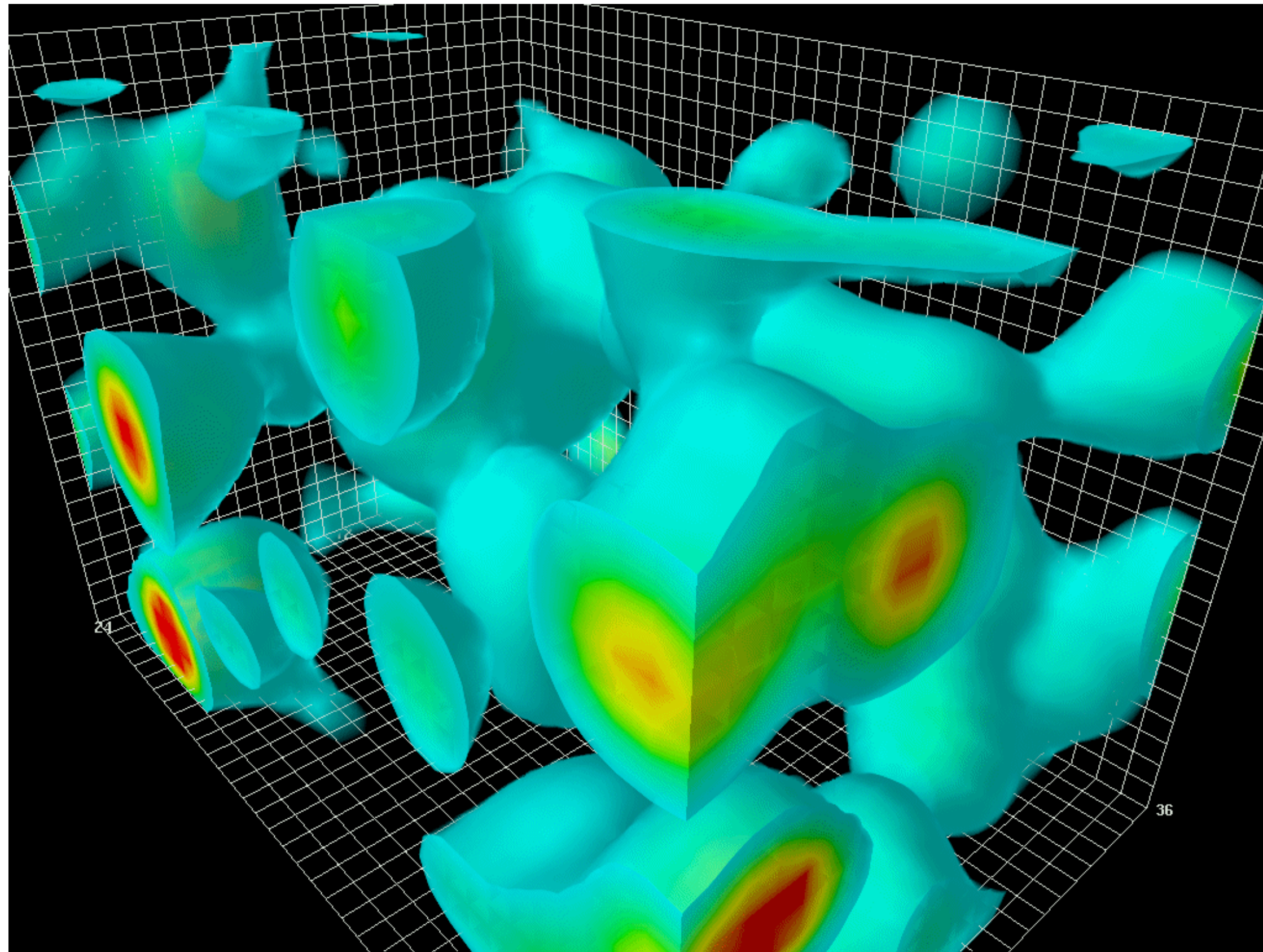
stability



cosmological constant



Naturalité en physique des particules



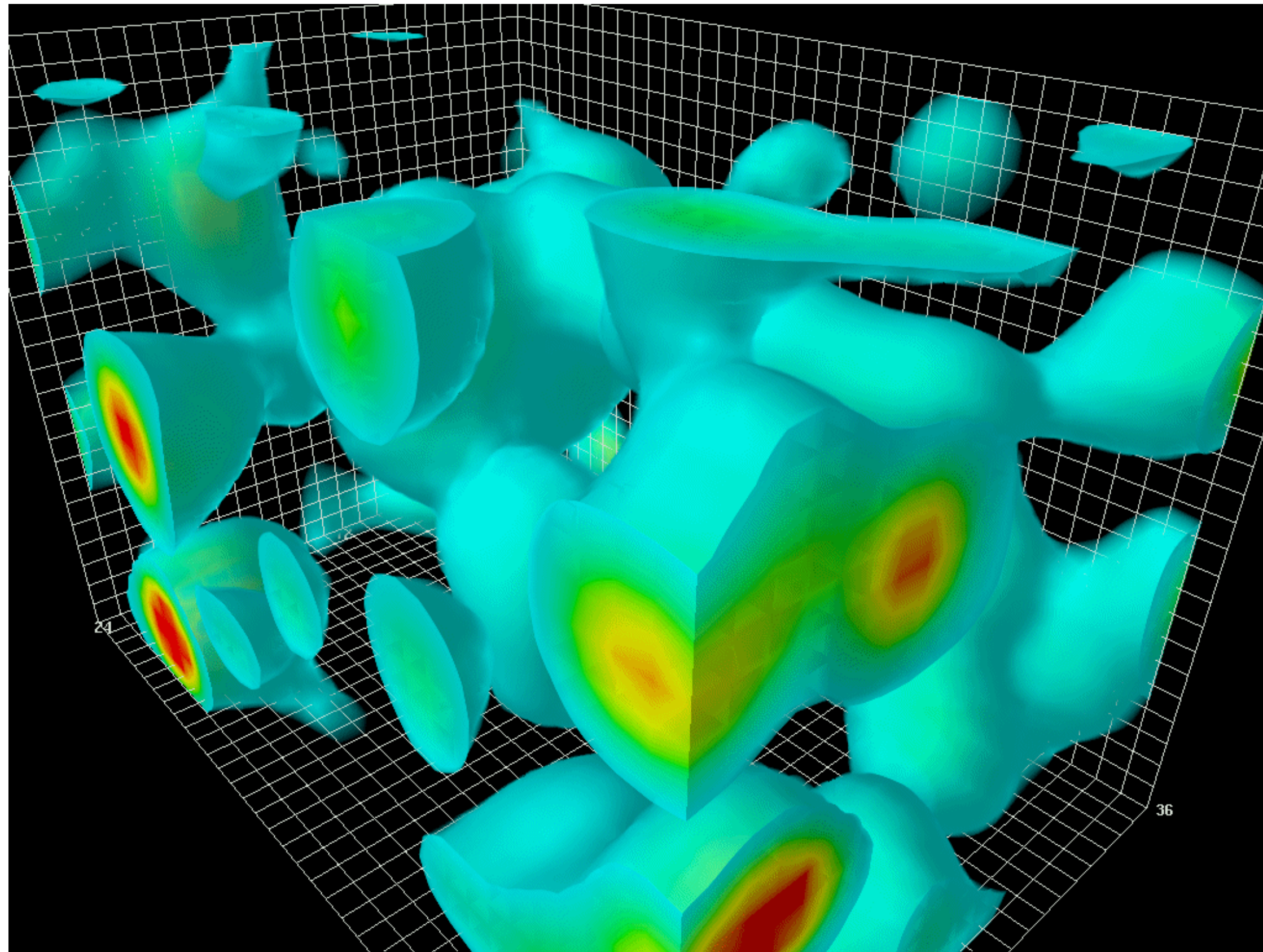
<http://www.physics.adelaide.edu.au/theory/staff/leinweber/VisualQCD/Nobel/index.html>

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>

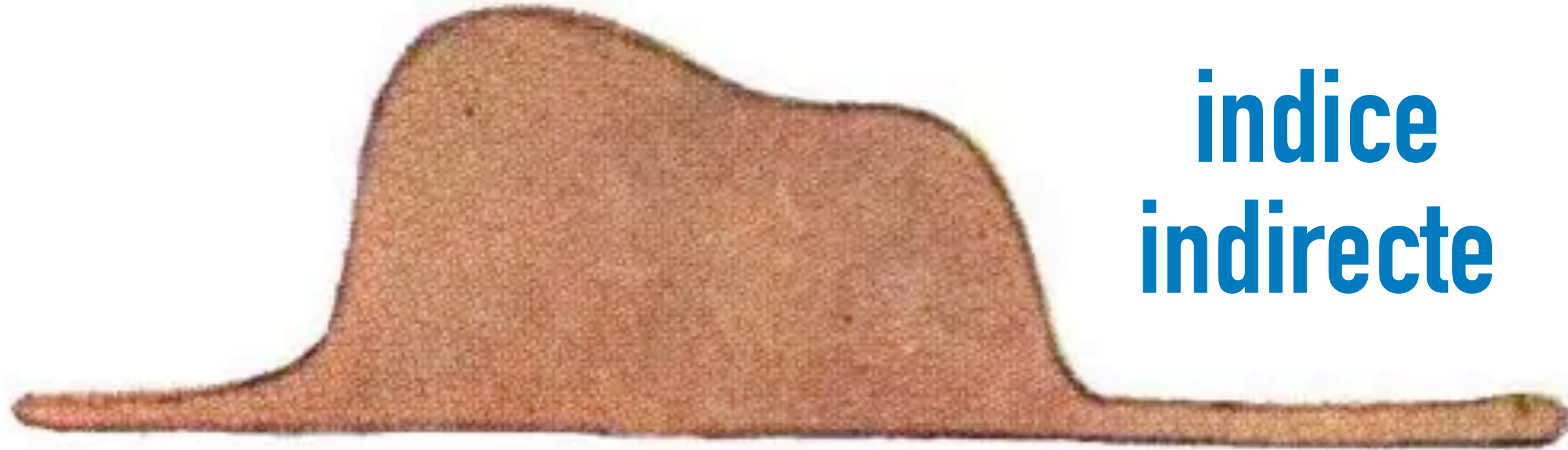
NB: shows QCD quantum fluctuations, so not directly those connected with the Higgs mass

- 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**

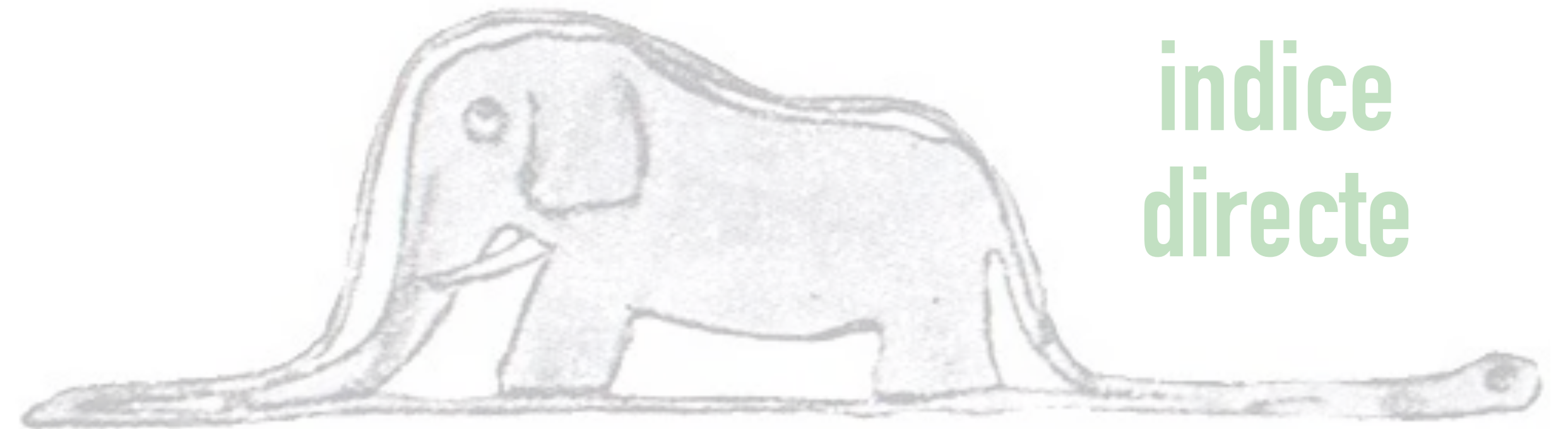


« Pourquoi un chapeau ferait-il peur ? »

Le Petit Prince, Antoine de Saint-Exupéry

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

**indice
directe**



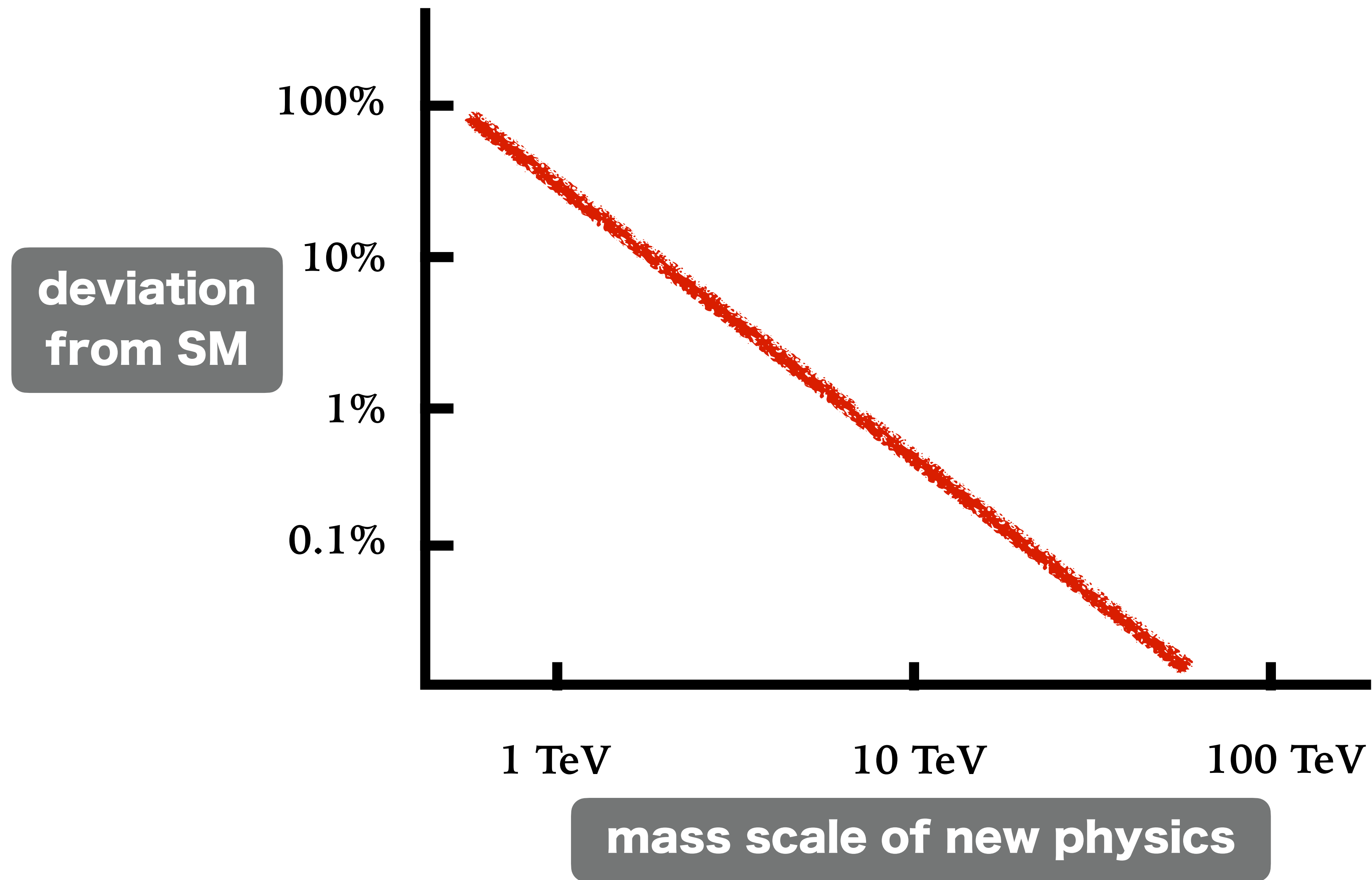
Mon dessin numéro 2

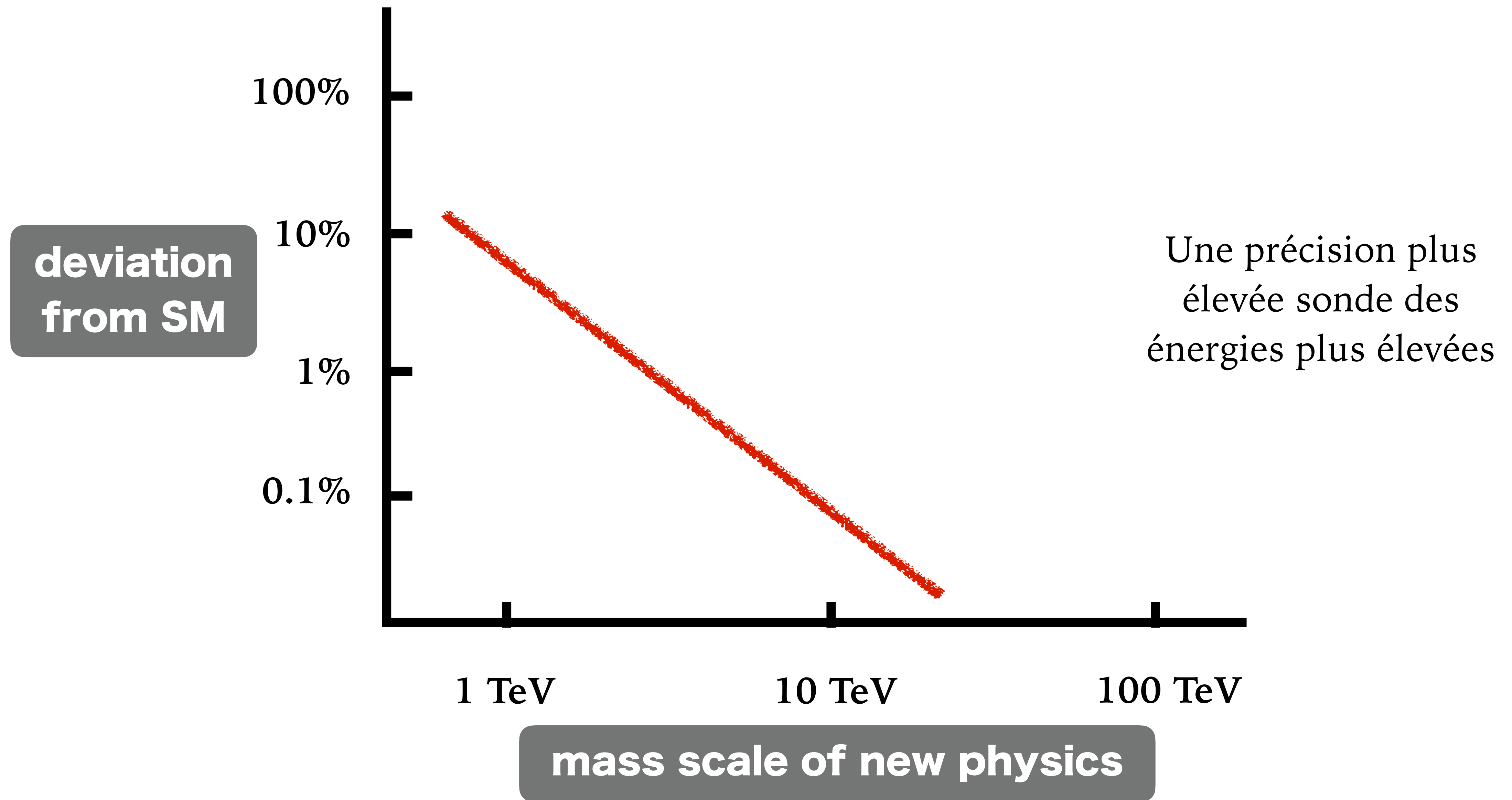
la mesure d'une multiplicité de signaux pourrait être crucial dans les recherches indirectes

scénario de déviations par rapport au SM [%]

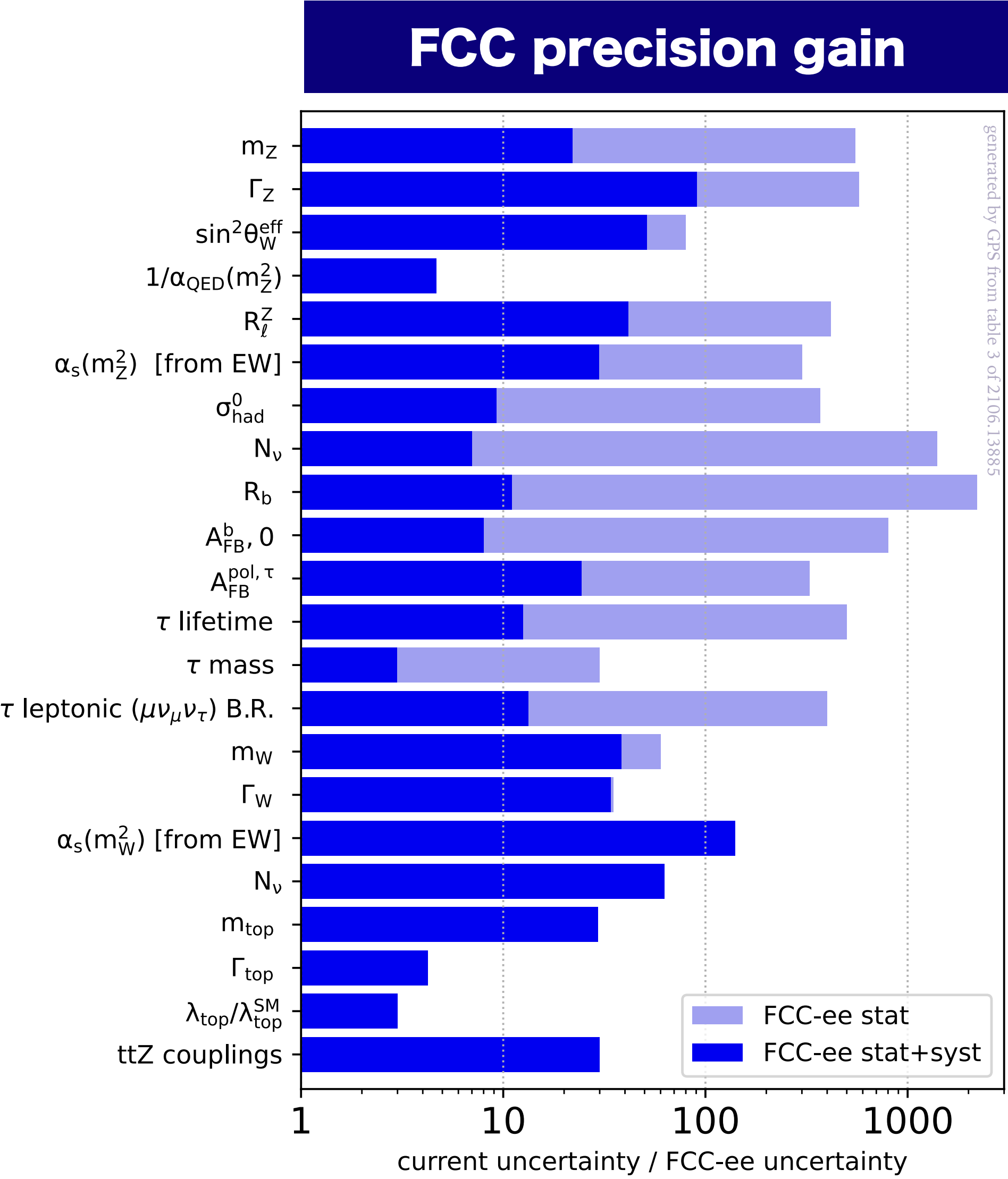
chaque variante de
nouvelle physique
aurait une empreinte
distincte

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

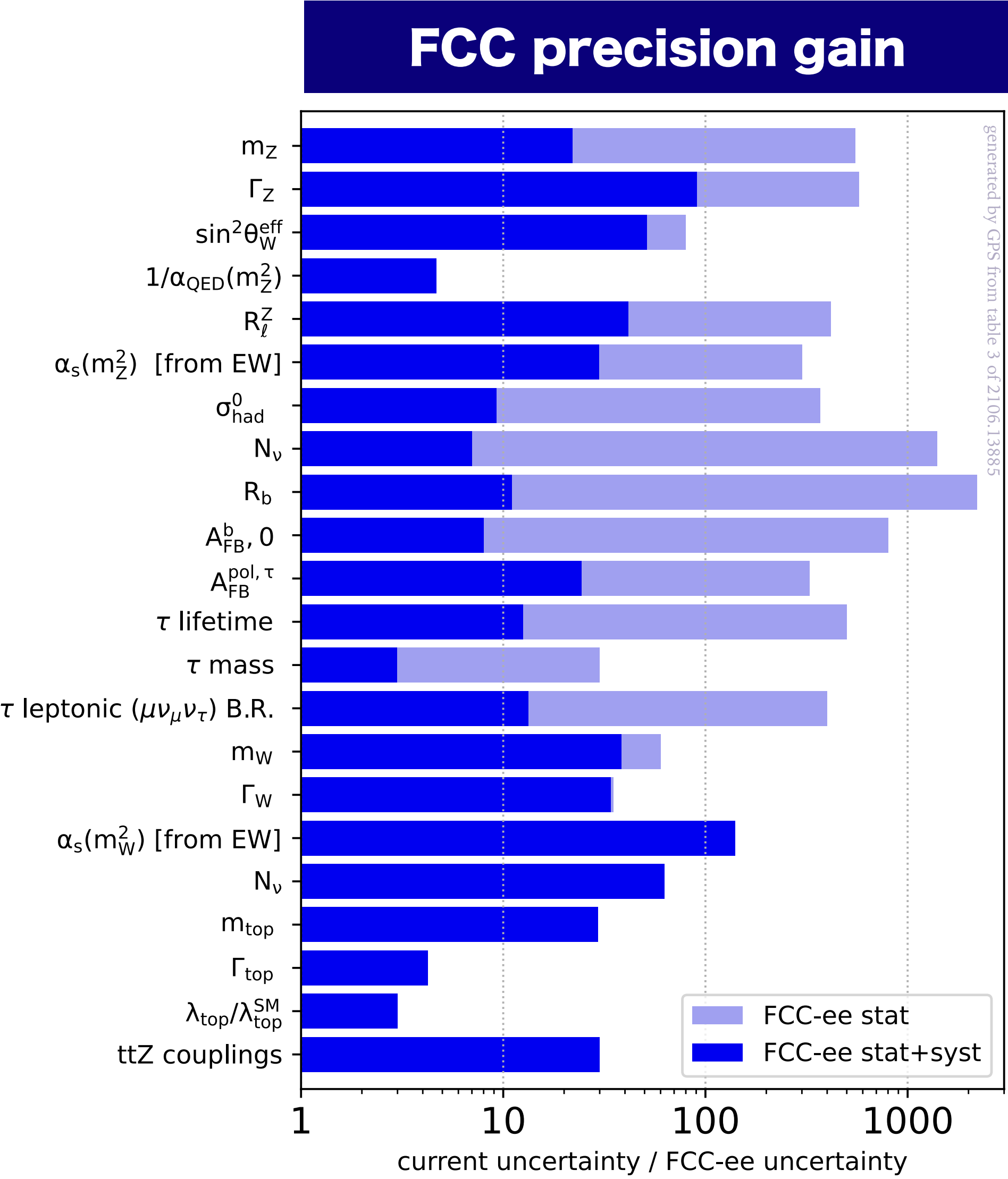




la précision au FCC-ee vaut une augmentation de $\times 4 - 5$ en énergie



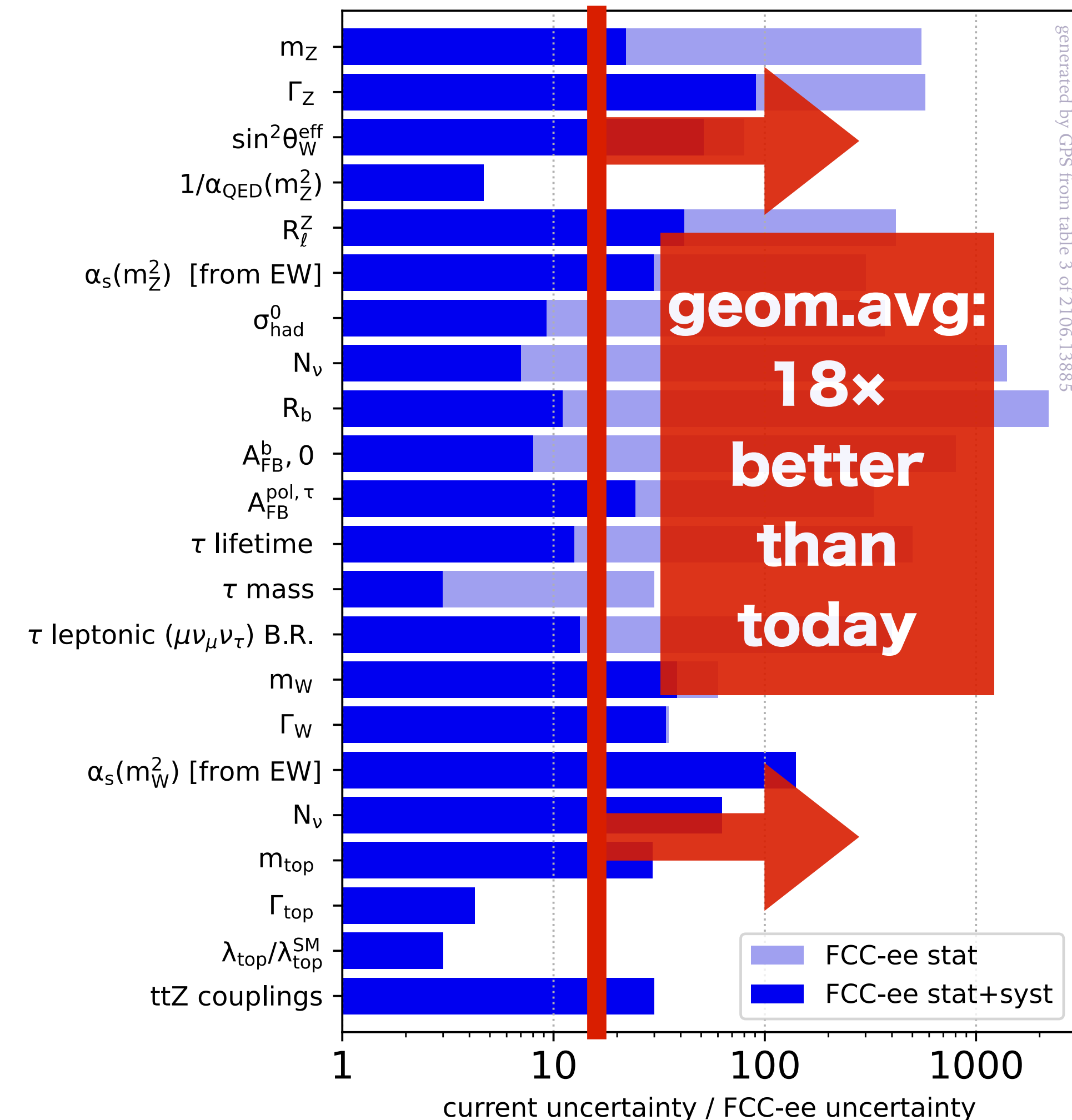
la précision au FCC-ee vaut une augmentation de $\times 4 - 5$ en énergie



maximum scale probed indirectly — up to 70 TeV

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

FCC-ee precision gain



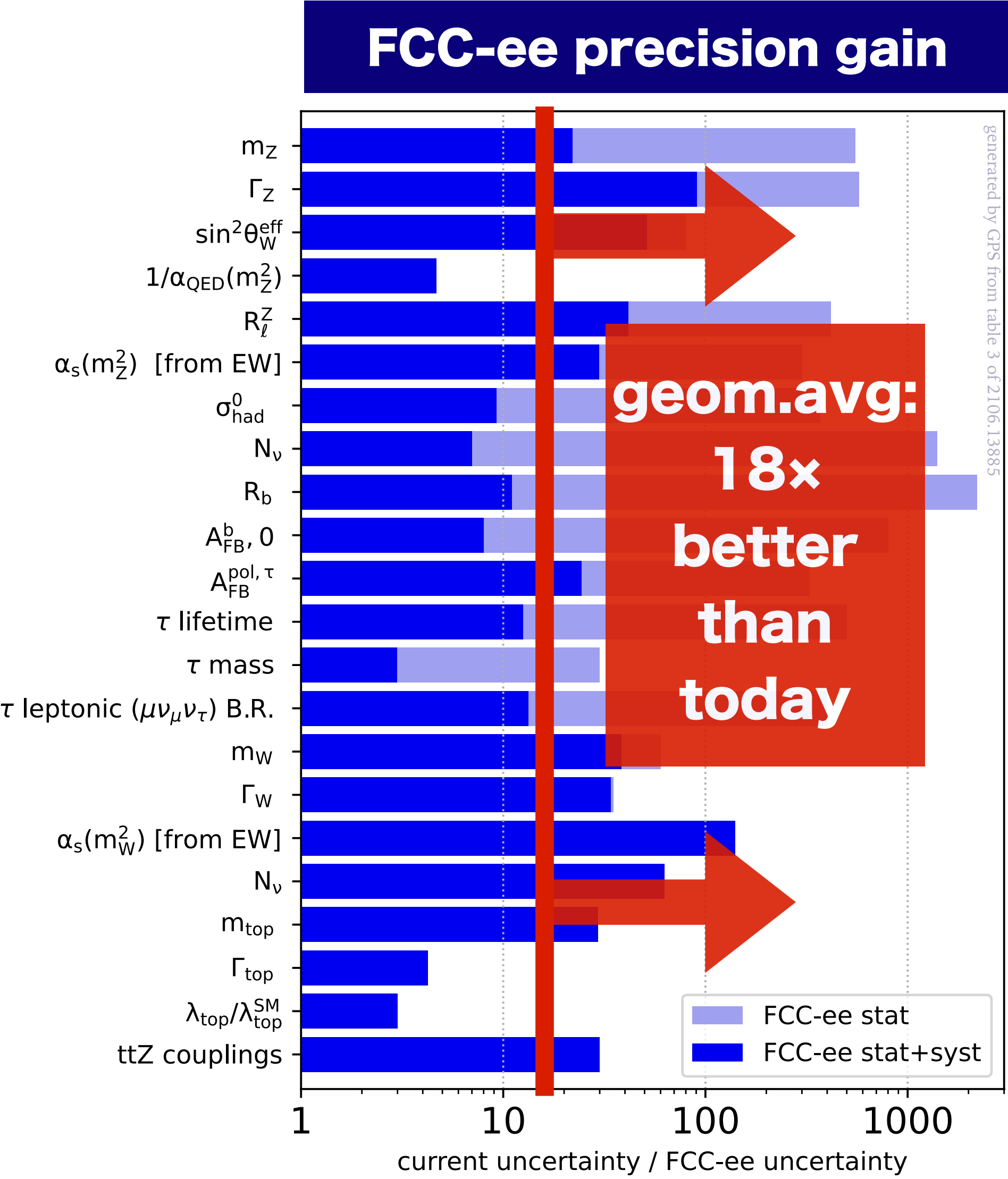
deux messages

- 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 effets 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