

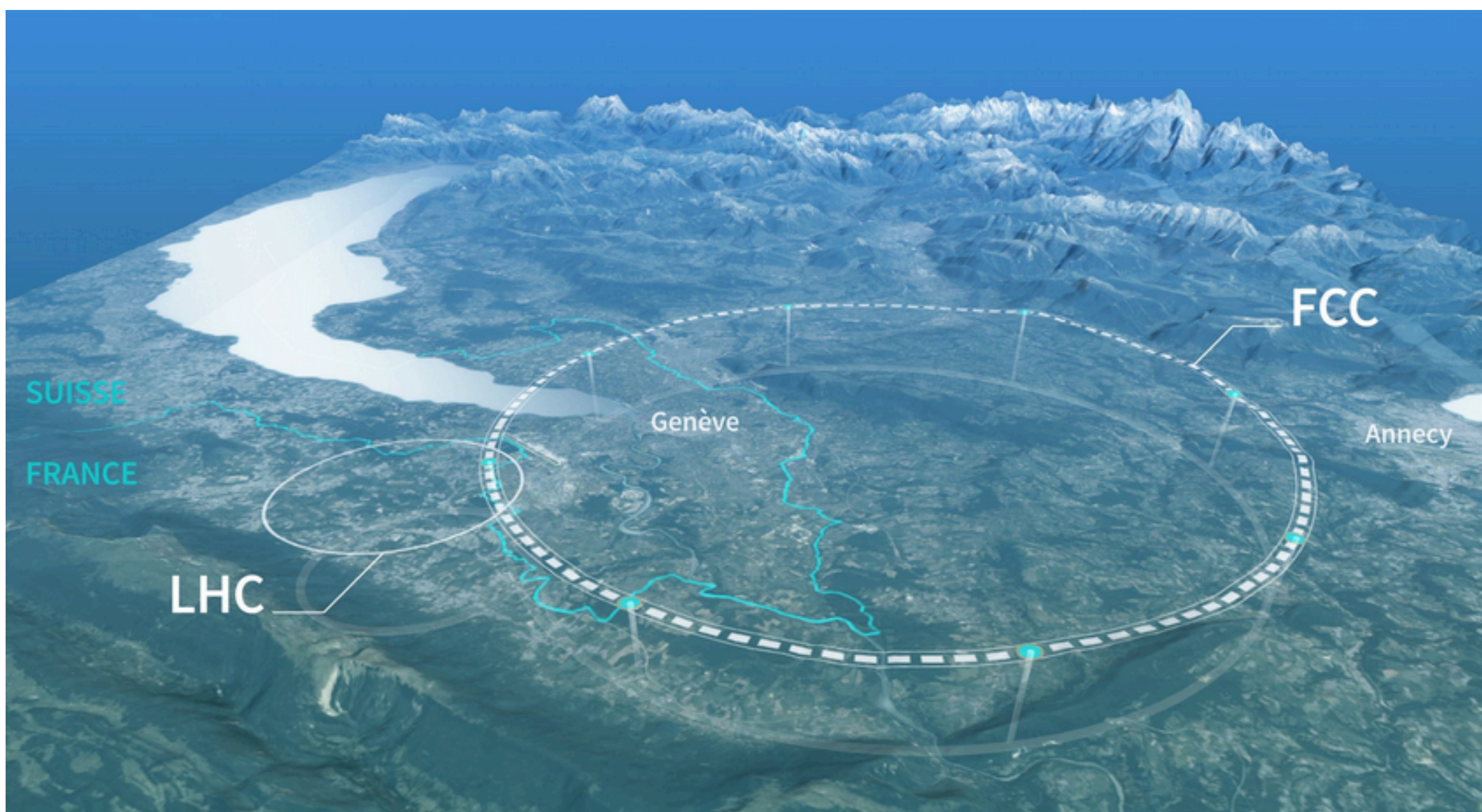
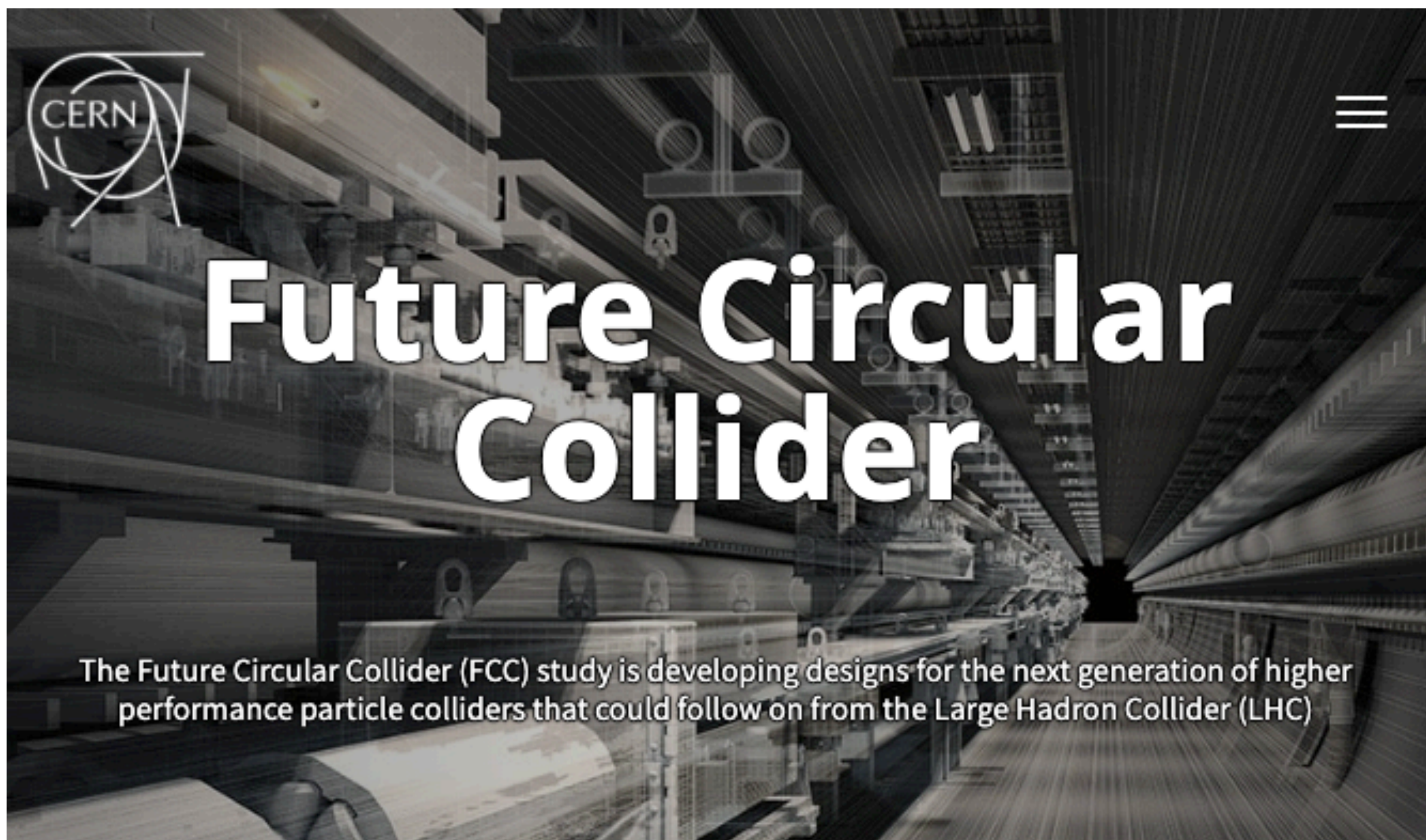
Journées de l'Institut - CNRS Nucléaire et Particules  
Paris, Campus Gérard Mégie

6 mai 2026

# Le Higgs, le FCC et la quête de l'origine de la masse

Gavin Salam  
University of Oxford & All Souls College





## FCC EN BREF

### Calendrier

- **2025** : [Publication](#) rapport d'étude de faisabilité du FCC
- **2028** : Décision des États membres du CERN et des partenaires internationaux

### Tunnel

- **90,7 km** de circonférence
- Profondeur des puits d'accès : **180 à 400 m**
- **8 sites en surface** (7 en France, 1 en Suisse)

### Deux phases

- **FCC-ee** (mesures de précision) : environ 15 ans à partir de la **fin des années 2040**
- **FCC-hh** (haute énergie) : environ 25 ans à partir des années **2070**

### Coûts/bénéfices

- **15 milliards CHF**, répartis sur environ **12 ans** pour le FCC-ee avec quatre expériences
- Ratio coûts-bénéfices socio-économiques **positif**
- Création d'environ **800 000** années-personnes d'emploi

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

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

# Future Circular Collider Feasibility Study Report

## Volume 1

### Physics, Experiments, Detectors

May 2, 2025

Submitted to the European Physics Journal ST, a joint publication of EDP Sciences,  
Springer Science+Business Media, and the Società Italiana di Fisica.

#### Contents

<b>1 Overview</b>	1
1.1 FCC-ee: A great Higgs factory, and so much more	2
1.2 FCC-hh: The energy-frontier collider with the broadest exploration potential	11
<b>2 Specificities of the FCC physics case</b>	15
2.1 The impact of FCC in particle physics	15
2.2 Characterisation of the Higgs boson: role of EW measurements and of FCC-hh	16
2.2.1 Impact of Z-pole measurements in Higgs couplings determination	20
2.2.2 Impact of diboson measurements in Higgs couplings determination	22
2.2.3 Complementarity between Z-pole and higher-energy runs	22
2.2.4 Complementarity and synergy between FCC-ee and FCC-hh	23
2.3 Discovery landscape	27
2.3.1 BSM exploration potential	27
2.3.2 Tera-Z sensitivity to heavy new physics	30
2.3.3 Flavour deconstruction at FCC-ee	37
2.3.4 Heavy Neutral Leptons	38
2.3.5 Dark matter and dark sectors	41
2.3.6 Axion-like particles	42
2.3.7 Exotic decays of the Higgs and Z bosons	43
2.3.8 Other new physics searches	44
2.3.9 Complementarity and synergy between FCC-ee and FCC-hh	45
2.4 Selected topics in flavour physics	46
2.4.1 Lepton universality tests in $\tau$ decays	47
2.4.2 Lepton flavour violating $\tau$ decays	48
2.4.3 Rare b-hadron decays with $\tau^+\tau^-$ pairs in the final state	48
2.4.4 Charged-current b-hadron decays with a $\tau\tau$ pair in the final state	48
2.4.5 Rare b- and c-hadron decays to di-neutrino final states	48
2.4.6 Rare decays and CPV studies with neutrals	49
2.4.7 On-shell Z, W, and Higgs flavour-changing decays	50
2.4.8 Combined studies and synergy between the flavour and EW programmes	50
2.5 FCC-hh specificities compared to high-energy lepton colliders	52
2.5.1 Generalities	52
2.5.2 Resonance searches	53
2.5.3 Pair production of new particles	55
2.6 Physics reach of alternative FCC-hh $\sqrt{s}$ options	56
2.6.1 Higgs properties	57
2.6.2 WIMP DM search	58

6.6.4 Time projection chamber	147
6.7 Particle identification	147
6.7.1 Precision timing detector	148
6.7.2 Compact RICH detector	148
6.8 Electromagnetic calorimeters	150
6.8.1 Silicon pads, MAPS, scintillator strips	150
6.8.2 Noble liquid	150
6.8.3 Segmented crystals with dual-readout	152
6.8.4 The GRAINITA ECAL	153
6.9 Hadron calorimeters	154
6.9.1 Scintillator tiles	154
6.9.2 Gaseous detectors	156
6.9.3 Dual readout	156
6.10 Coil	158
6.11 Cryostat	159
6.12 Muon system	160
6.13 Luminosity measurement	161
6.13.1 LumiCal design	161
6.14 Outlook	163
<b>7 FCC cavern infrastructure</b>	165
7.1 Introduction	165
7.2 The FCC-hh reference detector	165
7.3 FCC cavern infrastructure	169
<b>8 Software and computing</b>	171
8.1 The FCC software ecosystem	172
8.2 The main components of KEY4HEP	173
8.3 The event data model EDM4HEP	173
8.3.1 A specific use case: LEP data in EDM4HEP	174
8.4 Integration of event generators	174
8.4.1 Event generators as packages	175
8.4.2 Common data formats	175
8.4.3 Configuration	176
8.5 Parametrised simulation	176
8.6 Full simulation	177
8.6.1 Detector description and simulation strategy	178
8.6.2 Sub-detector models	178
8.6.3 Full detector models	179
8.7 Digitisation	181
8.8 Reconstruction	182
8.9 Analysis tools	183
8.10 Visualisation	184
8.11 Computing resources	184

2.6.3 High-mass reach	58
2.7 A forward-physics facility at FCC-hh	59
2.7.1 Neutrino physics	60
2.7.2 BSM sensitivity	61
2.7.3 QCD and hadronic structure	61
2.7.4 Summary	62
<b>3 Theoretical calculations</b>	63
3.1 Electroweak corrections	64
3.2 QCD precision calculations	66
3.2.1 QCD studies in $Z/\gamma^* \rightarrow$ jets	66
3.2.2 QCD aspects of Higgs physics	68
3.2.3 QCD modelling of the top-quark threshold	69
3.3 Monte Carlo event generators	70
3.3.1 QCD aspects	70
3.3.2 QED aspects	71
3.4 Organisation and support of future activities to improve theoretical precision	72
<b>4 Detector requirements</b>	75
4.1 Introduction	75
4.2 Brief overview of the current detector concepts	75
4.2.1 The IDEA detector concept	76
4.2.2 The CLD detector concept	76
4.2.3 The ALLEGRO detector concept	77
4.3 Measurement of the tracks of charged particles	77
4.3.1 Track momentum resolution: the measurement of the Higgs boson mass	77
4.3.2 Track momentum resolution: the Z width and the stability of the momentum scale	78
4.3.3 Angular resolutions	79
4.3.4 Number of tracker layers and highly-displaced vertices	80
4.3.5 Work ahead	81
4.3.6 Preliminary conclusions	82
4.4 Requirements for the vertex detector	82
4.4.1 Heavy-flavour tagging and the Higgs boson coupling to charm quarks	83
4.4.2 Reconstruction of vertices and the measurement of the $B \rightarrow K^*\tau$ branching fraction	83
4.4.3 Vertex resolutions and heavy-flavour electroweak precision observables	86
4.4.4 Alignment, overall scale of the detector, and the measurement of the tau lifetime	87
4.4.5 Preliminary conclusions	88
4.5 Requirements for charged hadron particle identification	88
4.5.1 Strange tagging and the Higgs boson coupling to strange (and charmed) quarks	89
4.5.2 Separation of $K^{\pm}$ from $\pi^{\pm}$ and measurement of $b \rightarrow s\ell\ell$	90
4.5.3 Separation of $K^{\pm}$ from $\pi^{\pm}$ and measurement of $B_s \rightarrow D_s K$	91
4.5.4 Work ahead	92
4.5.5 Preliminary conclusions	93
4.6 Requirements for electromagnetic calorimetry	93
4.6.1 Energy resolution and monophoton final states	94
4.6.2 Energy resolution and decays of heavy flavoured hadrons into photons or $\pi^0$	95

8.11.1 Resource modelling	185
8.11.2 Modelling resources for FCC-ee	187
8.11.3 Minimal baseline working scenario	188
8.11.4 Optimising resources: Software	189
8.11.5 Optimising resources: Analysis techniques	190
8.11.6 Optimising resources: Workload and data management	190
8.11.7 Increasing available resources: pledged resources	191
8.11.8 Increasing available resources: opportunistic resources	191
8.11.9 Projecting to the Z run	191
8.12 Human resources: status and needs	192
8.13 Outlook	193
<b>9 Energy calibration, polarisation, monochromatisation</b>	195
9.1 Overview	195
9.2 Input from the experiments	196
9.2.1 The crossing angle $\alpha$	196
9.2.2 The longitudinal boost and the collision-energy spread	196
9.2.3 Relative $\sqrt{s}$ determination in the Z-resonance scan	196
9.2.4 Absolute $\sqrt{s}$ determination	198
9.3 Expected precision on EW observables from the collision energy and its spread	199
9.4 Prospects for monochromatisation and the measurement of the electron Yukawa coupling	200
9.5 Outlook	205
<b>10 Community building</b>	207
<b>11 Outlook</b>	211
<b>References</b>	260

4.6.3 Requirements on the geometrical acceptance for $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ and $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ events at Z-pole energies	97
4.6.4 Sensitivity to charged lepton flavour violation: $Z \rightarrow \mu e$ and $\tau \rightarrow \mu\gamma$	99
4.6.5 Bremsstrahlung recovery	100
4.6.6 Prompt decays of ALPs $a \rightarrow \gamma\gamma$	101
4.6.7 Requirements from $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ reconstruction in $\tau$ decays	102
4.6.8 Work ahead	103
4.6.9 Preliminary conclusions	104
4.7 Requirements for the hadron calorimeter	104
4.7.1 Reconstruction of Higgs boson hadronic final states	104
4.7.2 Measurement of the Higgs boson invisible width	105
4.7.3 Search for heavy neutral leptons	106
4.7.4 Work ahead	107
4.7.5 Preliminary conclusions	108
4.8 Requirements for the muon detector	108
4.9 Precise timing measurements	110
4.9.1 Time-of-flight measurements	110
4.9.2 Time measurements very close to the IP	111
4.9.3 Time measurements in the calorimeters	112
4.10 Selected studies with full simulation	112
4.10.1 Machine-learning event reconstruction	113
4.10.2 Jet flavour tagging	114
4.10.3 Higgs boson mass determination	115
4.10.4 Tau polarisation	116
4.10.5 Summary of detector requirements	117
4.11 Outlook	120
<b>5 Machine-detector interface</b>	121
5.1 Interaction region layout	122
5.2 Integration and alignment	125
5.3 Maintenance and detector opening	126
5.4 Beam-induced backgrounds in the detectors	128
5.5 Implementation tests and prototyping	130
5.6 Outlook	131
<b>6 Detector concepts and systems</b>	133
6.1 Detector concepts	134
6.2 The CLD and ILD detector concepts	134
6.3 The IDEA detector concept	135
6.4 The ALLEGRO detector concept	136
6.5 Vertex detectors	137
6.6 Main tracking systems	143
6.6.1 Silicon tracker	143
6.6.2 Drift chamber	144
6.6.3 Straw tracker	146

2505.00272

290 pages

~ 30 grands axes  
d'exploration

~ 1500 auteurs

# Future Circular Collider Feasibility Study Report

## Volume 1

### Physics, Experiments, Detectors

May 2, 2025

Submitted to the European Physics Journal ST, a joint publication of EDP Sciences,  
Springer Science+Business Media, and the Società Italiana di Fisica.

#### Contents

- 1 Overview . . . . . 1
- 1.1 FCC-ee: A great Higgs factory, and so much more . . . . . 2
- 1.2 FCC-hh: The energy-frontier collider with the broadest exploration potential . . . . . 11
- 2 Specificities of the FCC physics case . . . . . 15
- 2.1 The impact of FCC in particle physics . . . . . 15
- 2.2 Characterisation of the Higgs boson: role of EW measurements and of FCC-hh . . . . . 16
- 2.2.1 Impact of Higgs boson measurements on the Higgs boson mass determination . . . . . 20
- 2.2.2 Impact of diboson measurements in Higgs couplings . . . . . 22
- 2.2.3 Complementarity between Z-pole and higher-energy runs . . . . . 22
- 2.2.4 Complementarity and synergy between FCC-ee and FCC-hh . . . . . 22
- 2.3 Discovery landscape . . . . . 27
- 2.3.1 BSM exploration potential . . . . . 27
- 2.3.2 Tera-Z sensitivity to heavy new physics . . . . . 30
- 2.3.3 Flavour deconstruction at FCC-ee . . . . . 37
- 2.3.4 Heavy Neutral Leptons . . . . . 38
- 2.3.5 Dark matter and dark sectors . . . . . 41
- 2.3.6 Axion-like particles . . . . . 42

- 2.5.1 Generalities . . . . . 52
- 2.5.2 Resonance searches . . . . . 53
- 2.5.3 Pair production of new particles . . . . . 55
- 2.6 Physics reach of alternative FCC-hh  $\sqrt{s}$  options . . . . . 56
- 2.6.1 Higgs properties . . . . . 57
- 2.6.2 WIMP DM search . . . . . 58

- 2.6.3 High-mass reach . . . . . 58
- 2.7 A forward-physics facility at FCC-hh . . . . . 59
- 2.7.1 Neutrino physics . . . . . 60
- 2.7.2 BSM sensitivity . . . . . 61
- 2.7.3 QCD and hadronic structure . . . . . 61
- 2.7.4 Summary . . . . . 62
- 3 Theoretical calculations . . . . . 63
- 3.1 Electroweak corrections . . . . . 64
- 3.2 QCD precision calculations . . . . . 66
- 3.2.1 QCD studies in  $Z/\gamma^* \rightarrow$  jets . . . . . 66
- 3.2.2 QCD aspects of Higgs physics . . . . . 68
- 3.2.3 QCD modelling of the top-quark threshold . . . . . 69
- 3.3 Monte Carlo event generators . . . . . 70
- 3.3.1 QCD aspects . . . . . 70
- 3.3.2 QED aspects . . . . . 71
- 3.4 Organisation and support of future activities to improve theoretical precision . . . . . 72
- 4 Detector requirements . . . . . 75
- 4.1 Introduction . . . . . 75
- 4.2 Brief overview of the current detector concepts . . . . . 75
- 4.2.1 The IDEA detector concept . . . . . 76
- 4.2.2 The CLD detector concept . . . . . 76
- 4.2.3 The ALLEGRO detector concept . . . . . 77
- 4.3 Measurement of the tracks for  $B \rightarrow D^* K$  . . . . . 77
- 4.3.1 Track momentum resolution: the measurement of the Higgs boson mass . . . . . 77
- 4.3.2 Track momentum resolution: the Z width and the stability of the beam scale . . . . . 78

- 6.6.4 Time projection chamber . . . . . 147
- 6.7 Particle identification . . . . . 147
- 6.7.1 Precision timing detector . . . . . 148
- 6.7.2 Compact RICH detector . . . . . 148
- 6.8 Electromagnetic calorimeters . . . . . 150
- 6.8.1 Silicon pads, MAPS, scintillator strips . . . . . 150
- 6.8.2 Noble liquid . . . . . 150
- 6.8.3 Segmented crystals with dual-readout . . . . . 152
- 6.8.4 The GRAINITA ECAL . . . . . 153
- 6.9 Hadron calorimeters . . . . . 154
- 6.9.1 Scintillator tiles . . . . . 154
- 6.9.2 Gaseous detectors . . . . . 156
- 6.9.3 Dual readout . . . . . 156
- 6.10 Coil . . . . . 158
- 6.11 Cryostat . . . . . 159
- 6.12 Muon system . . . . . 160
- 6.13 Luminosity measurement . . . . . 161
- 6.13.1 LumiCal design . . . . . 161
- 6.14 Outlook . . . . . 163
- 7 FCC cavern infrastructure . . . . . 165
- 7.1 Introduction . . . . . 165
- 7.2 The FCC-hh reference detector . . . . . 165
- 7.3 FCC cavern infrastructure . . . . . 169
- 8 Software and computing . . . . . 171
- 8.1 The FCC software ecosystem . . . . . 172
- 8.2 The main components of KEY4HEP . . . . . 173
- 8.3 The event data model EDM4HEP . . . . . 173
- 8.3.1 A specific use case: LEP data in EDM4HEP . . . . . 174
- 8.4 Integration of event generators . . . . . 174
- 8.4.1 Event generators as packages . . . . . 175
- 8.4.2 Common data formats . . . . . 175
- 8.4.3 Configuration . . . . . 176
- 8.5 Parametrised simulation . . . . . 176
- 8.6 Full simulation . . . . . 177
- 8.6.1 Detector description and simulation strategy . . . . . 178
- 8.6.2 Sub-detector models . . . . . 178
- 8.6.3 Full detector models . . . . . 179
- 8.7 Digitisation . . . . . 181
- 8.8 Reconstruction . . . . . 182
- 8.9 Analysis tools . . . . . 183
- 8.10 Visualisation . . . . . 184
- 8.11 Computing resources . . . . . 184

- 4.5.3 Separation of  $K^+$  from  $\pi^+$  and measurement of  $B_c \rightarrow D^* K$  . . . . . 91
- 4.5.4 Work ahead . . . . . 92
- 4.5.5 Preliminary conclusions . . . . . 93
- 4.6 Requirements for electromagnetic calorimetry . . . . . 93
- 4.6.1 Energy resolution and monophoton final states . . . . . 94
- 4.6.2 Energy resolution and decays of heavy flavoured hadrons into photons or  $\pi^0$  . . . . . 95
- 8.11.1 Resource modelling . . . . . 185
- 8.11.2 Modelling resources for FCC-ee . . . . . 187
- 8.11.3 Minimal baseline working scenario . . . . . 188
- 8.11.4 Optimising resources: Software . . . . . 189
- 8.11.5 Optimising resources: Analysis techniques . . . . . 190
- 8.11.6 Optimising resources: Workload and data management . . . . . 190
- 8.11.7 Increasing available resources: pledged resources . . . . . 191
- 8.11.8 Increasing available resources: opportunistic resources . . . . . 191
- 8.11.9 Projecting to the Z run . . . . . 191
- 8.12 Human resources: status and needs . . . . . 192
- 8.13 Outlook . . . . . 193
- 9 Energy calibration, polarisation, monochromatisation . . . . . 195
- 9.1 Overview . . . . . 195
- 9.2 Input from the experiments . . . . . 196
- 9.2.1 The crossing angle  $\alpha$  . . . . . 196
- 9.2.2 The longitudinal boost and the collision-energy spread . . . . . 196
- 9.2.3 Relative  $\sqrt{s}$  determination in the Z-resonance scan . . . . . 196
- 9.2.4 Absolute  $\sqrt{s}$  determination . . . . . 198
- 9.3 Expected precision on EW observables from the collision energy and its spread . . . . . 199
- 9.4 Prospects for monochromatisation and the measurement of the electron Yukawa coupling . . . . . 200
- 9.5 Outlook . . . . . 205
- 10 Community building . . . . . 207
- 11 Outlook . . . . . 211
- References . . . . . 260

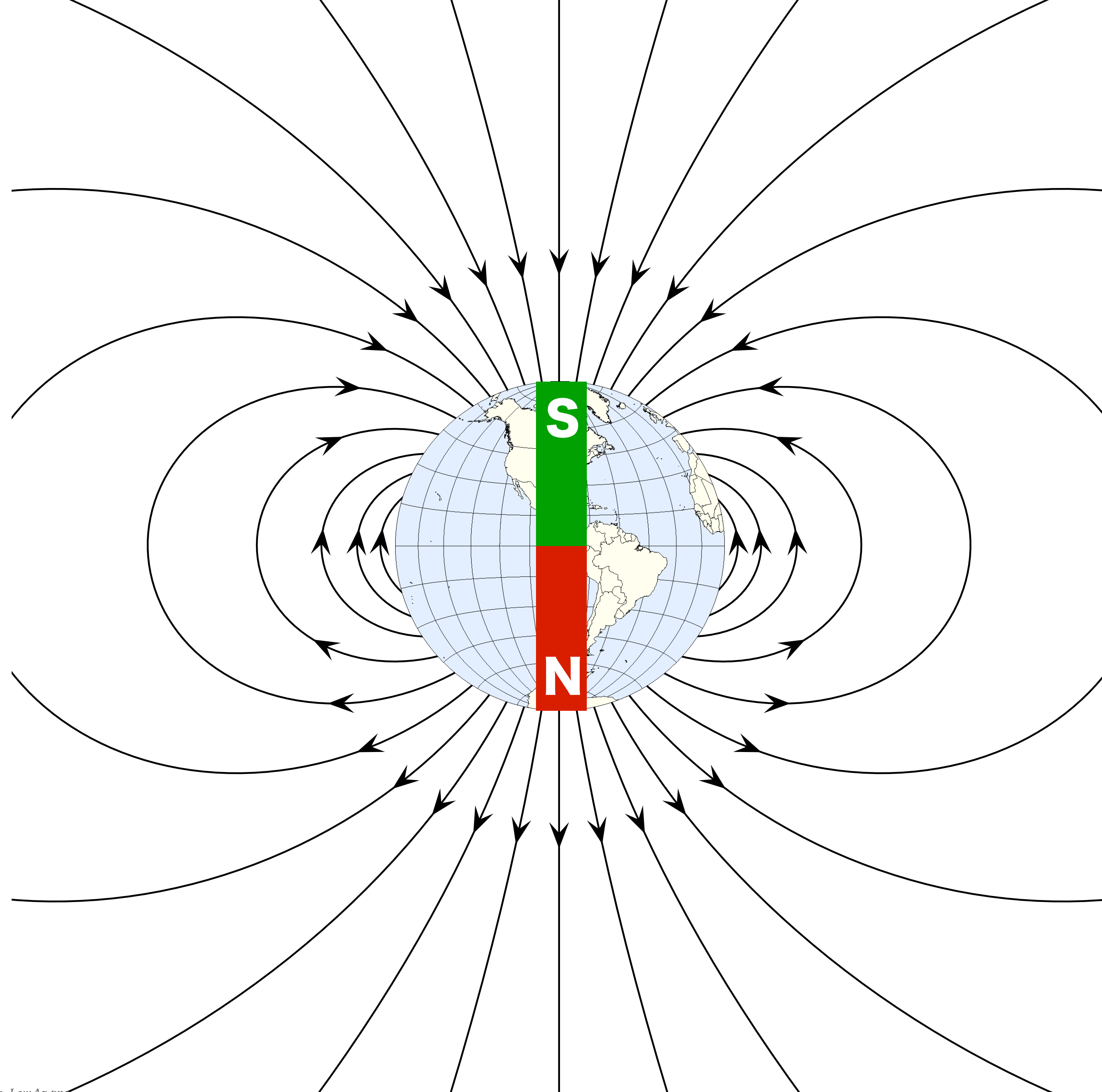
- 4.6.3 Requirements on the geometrical acceptance for  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$  and  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  events at Z-pole energies . . . . . 97
- 4.6.4 Sensitivity to charged lepton flavour violation:  $Z \rightarrow \mu e$  and  $\tau \rightarrow \mu\gamma$  . . . . . 99
- 4.6.5 Bremsstrahlung recovery . . . . . 100
- 4.6.6 Prompt decays of ALPs  $a \rightarrow \gamma\gamma$  . . . . . 101
- 4.6.7 Requirements from  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  reconstruction in  $\tau$  decays . . . . . 102
- 4.6.8 Work ahead . . . . . 103
- 4.6.9 Preliminary conclusions . . . . . 104
- 4.7 Requirements for the hadron calorimeter . . . . . 104
- 4.7.1 Reconstruction of Higgs boson hadronic final states . . . . . 104
- 4.7.2 Measurement of the Higgs boson invisible width . . . . . 105
- 4.7.3 Search for heavy neutral leptons . . . . . 106
- 4.7.4 Work ahead . . . . . 107
- 4.7.5 Preliminary conclusions . . . . . 108
- 4.8 Requirements for the muon detector . . . . . 108
- 4.9 Precise timing measurements . . . . . 110
- 4.9.1 Time-of-flight measurements . . . . . 110
- 4.9.2 Time measurements very close to the IP . . . . . 111
- 4.9.3 Time measurements in the calorimeters . . . . . 112
- 4.10 Selected studies with full simulation . . . . . 112
- 4.10.1 Machine-learning event reconstruction . . . . . 113
- 4.10.2 Jet flavour tagging . . . . . 114
- 4.10.3 Higgs boson mass determination . . . . . 115
- 4.10.4 Tau polarisation . . . . . 116
- 4.10.5 Summary of detector requirements . . . . . 117
- 4.11 Outlook . . . . . 120
- 5 Machine-detector interface . . . . . 121
- 5.1 Interaction region layout . . . . . 122
- 5.2 Integration and alignment . . . . . 125
- 5.3 Maintenance and detector opening . . . . . 126
- 5.4 Beam-induced backgrounds in the detectors . . . . . 128
- 5.5 Implementation tests and prototyping . . . . . 130
- 5.6 Outlook . . . . . 131
- 6 Detector concepts and systems . . . . . 133
- 6.1 Detector concepts . . . . . 134
- 6.2 The CLD and ILD detector concepts . . . . . 134
- 6.3 The IDEA detector concept . . . . . 135
- 6.4 The ALLEGRO detector concept . . . . . 136
- 6.5 Vertex detectors . . . . . 137
- 6.6 Main tracking systems . . . . . 143
- 6.6.1 Silicon tracker . . . . . 143
- 6.6.2 Drift chamber . . . . . 144
- 6.6.3 Straw tracker . . . . . 146

2505.00272

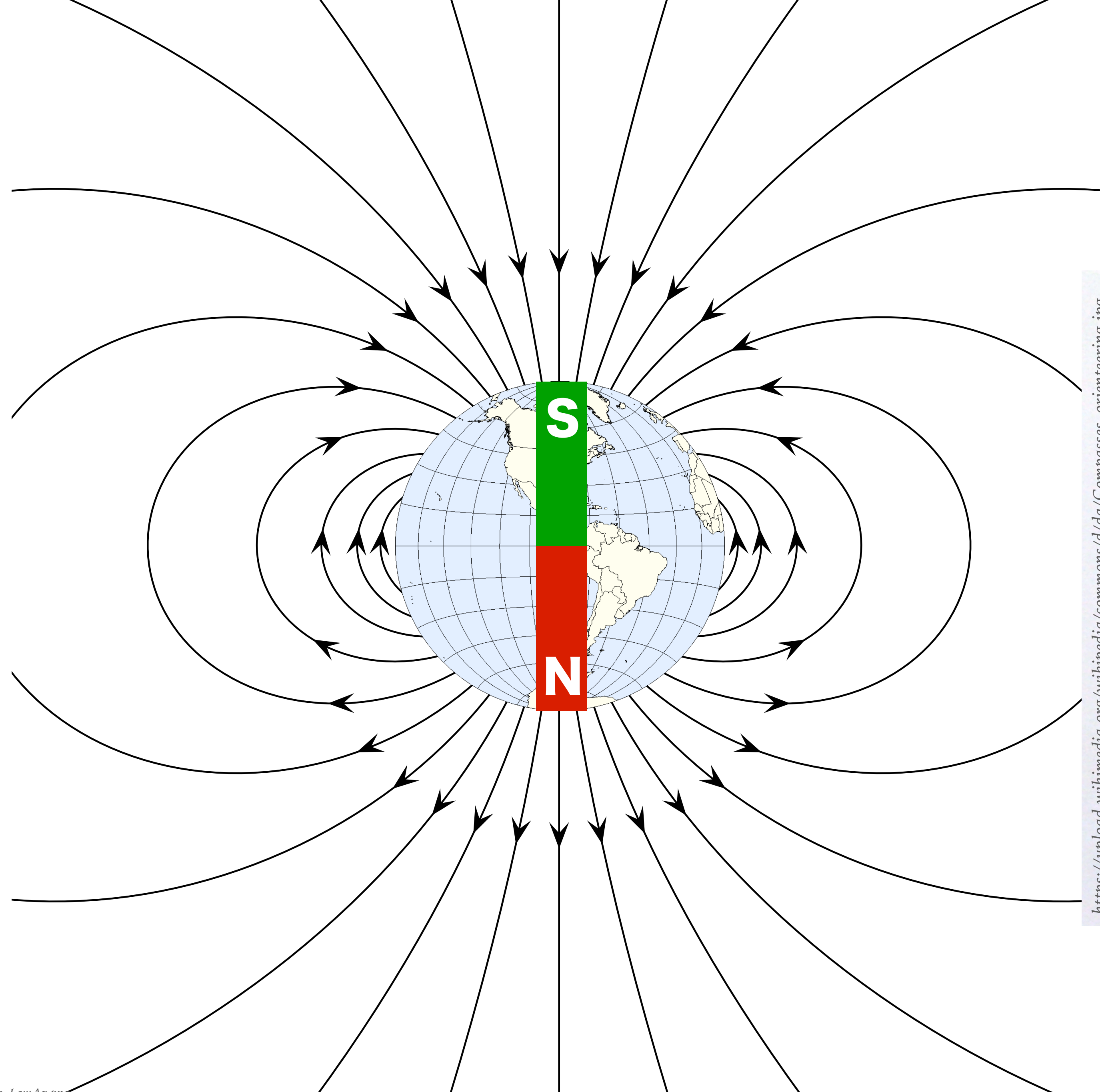
290 pages

~ 30 grands axes  
d'exploration

~ 1500 auteurs



[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFpt\\_Dipole\\_field.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFpt_Dipole_field.svg)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Western\\_Hemisphere#/media/File:Western\\_Hemisphere\\_LamAz.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Western_Hemisphere#/media/File:Western_Hemisphere_LamAz.png)



[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFpt\\_Dipole\\_field.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFpt_Dipole_field.svg)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Western\\_Hemisphere#/media/File:Western\\_Hemisphere\\_LamAz.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Western_Hemisphere#/media/File:Western_Hemisphere_LamAz.png)



[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/da/Compasses\\_orienteeering.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/da/Compasses_orienteeering.jpg)

HIGGS  
FIELD

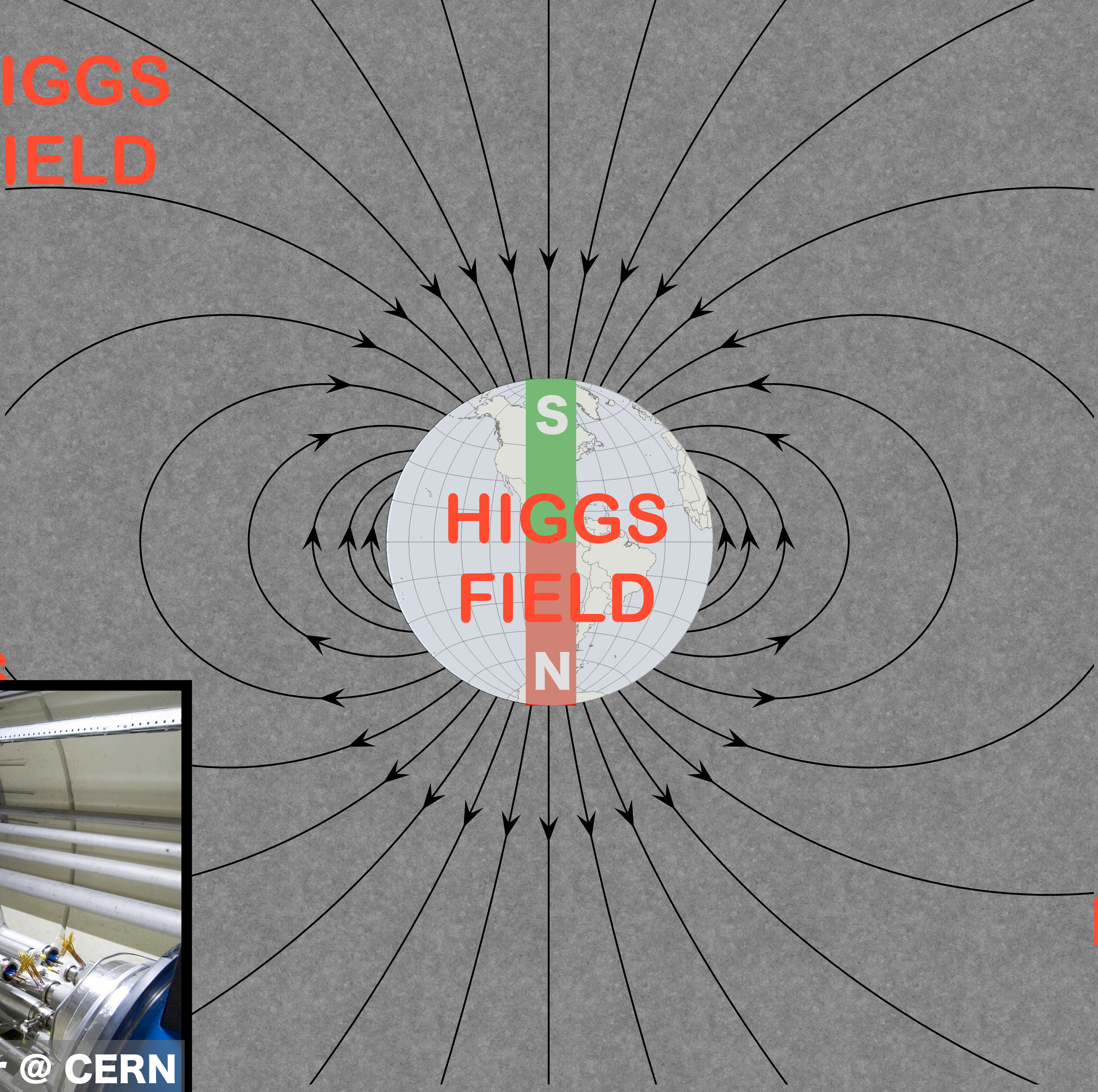
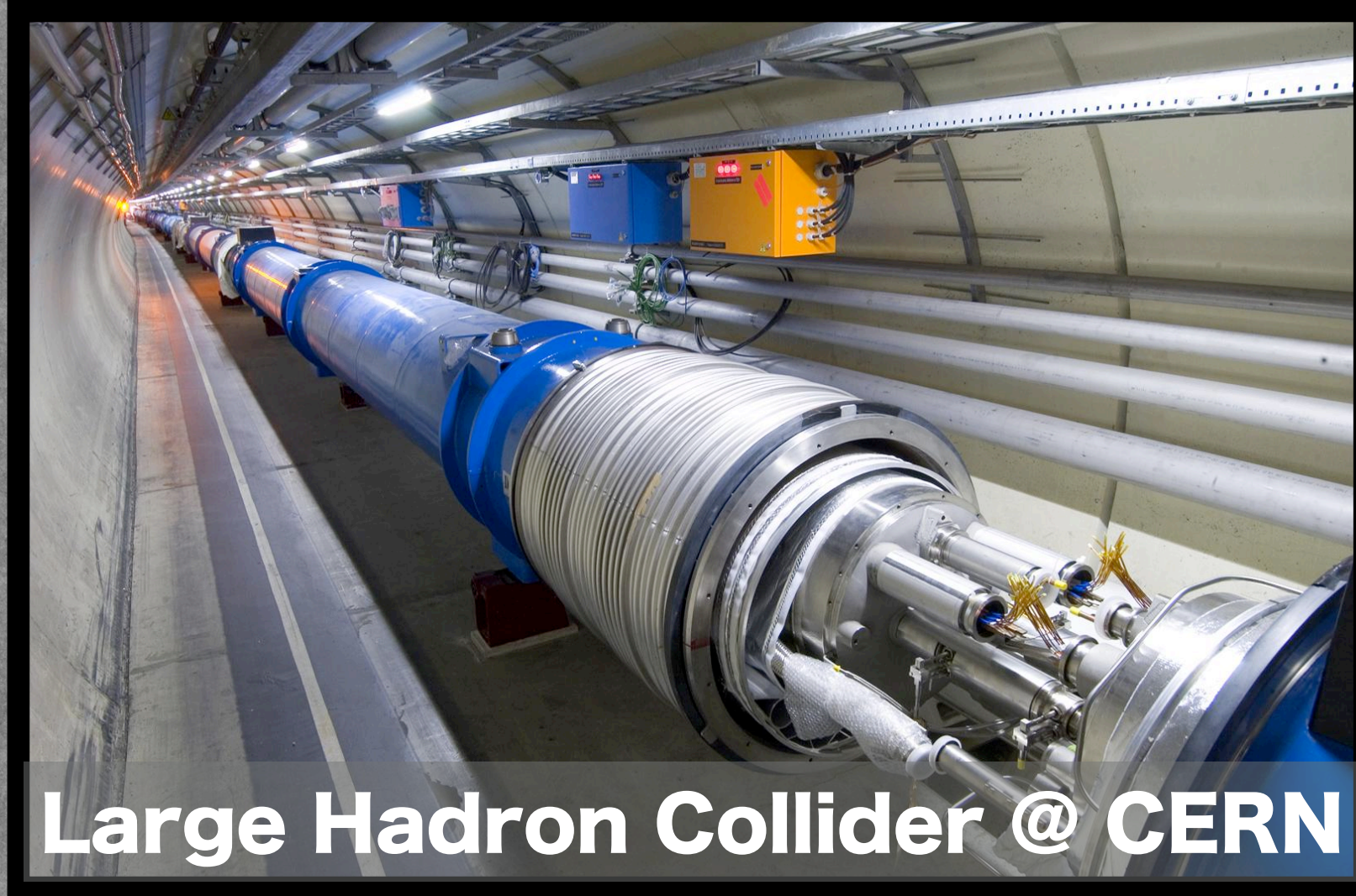
HIGGS  
FIELD

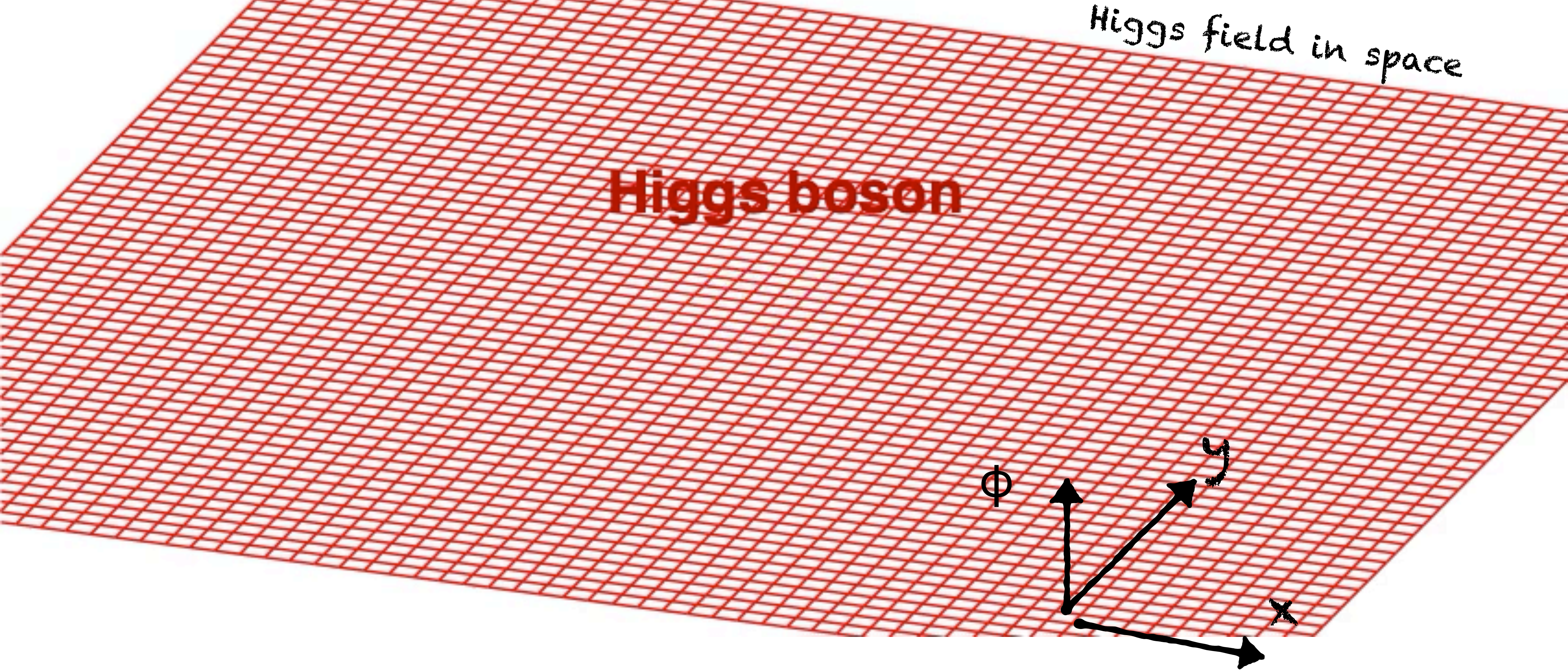
HIGGS  
FIELD

HIGGS  
FIELD

HIGGS  
FIELD

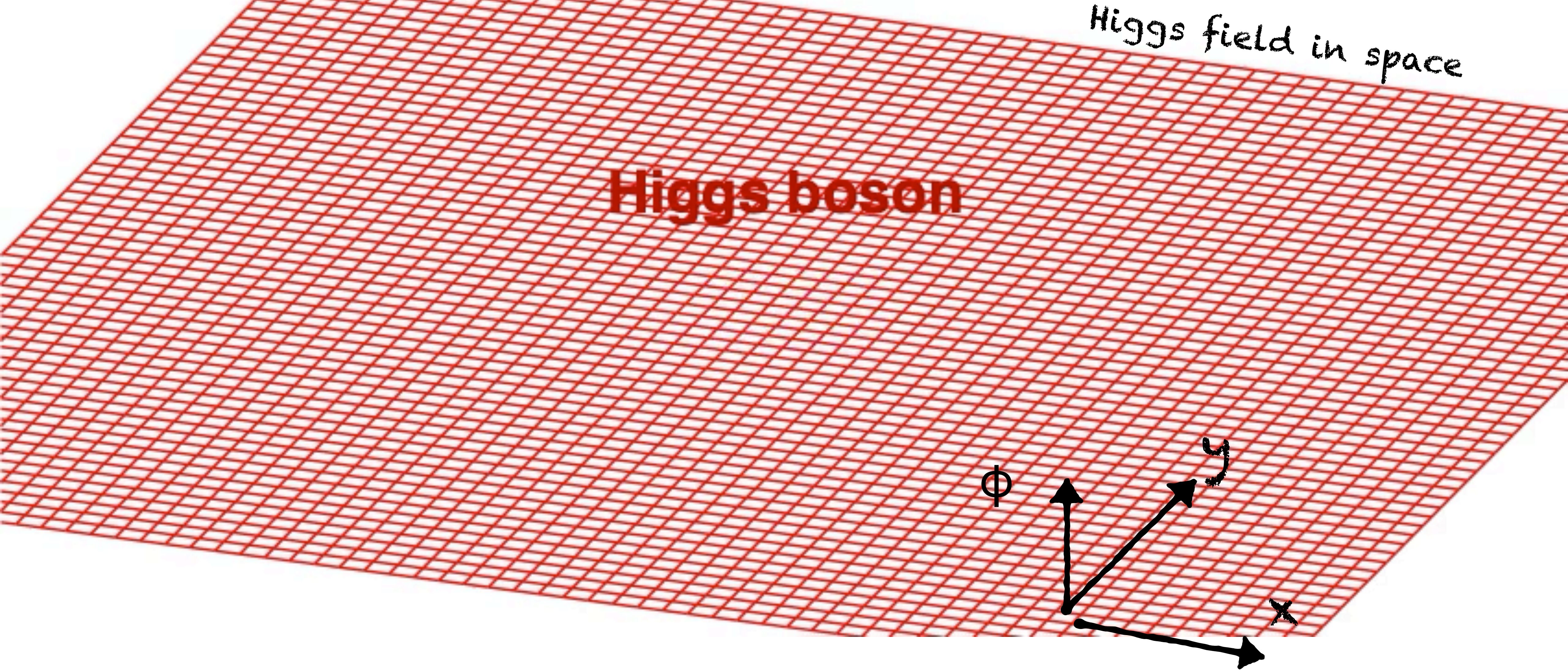
HIGGS





Le champ de Higgs ( $\phi$ ) peut prendre une valeur différente à chaque endroit.

Le boson de Higgs correspond à une fluctuation localisée du champ



Le champ de Higgs ( $\phi$ ) peut prendre une valeur différente à chaque endroit.

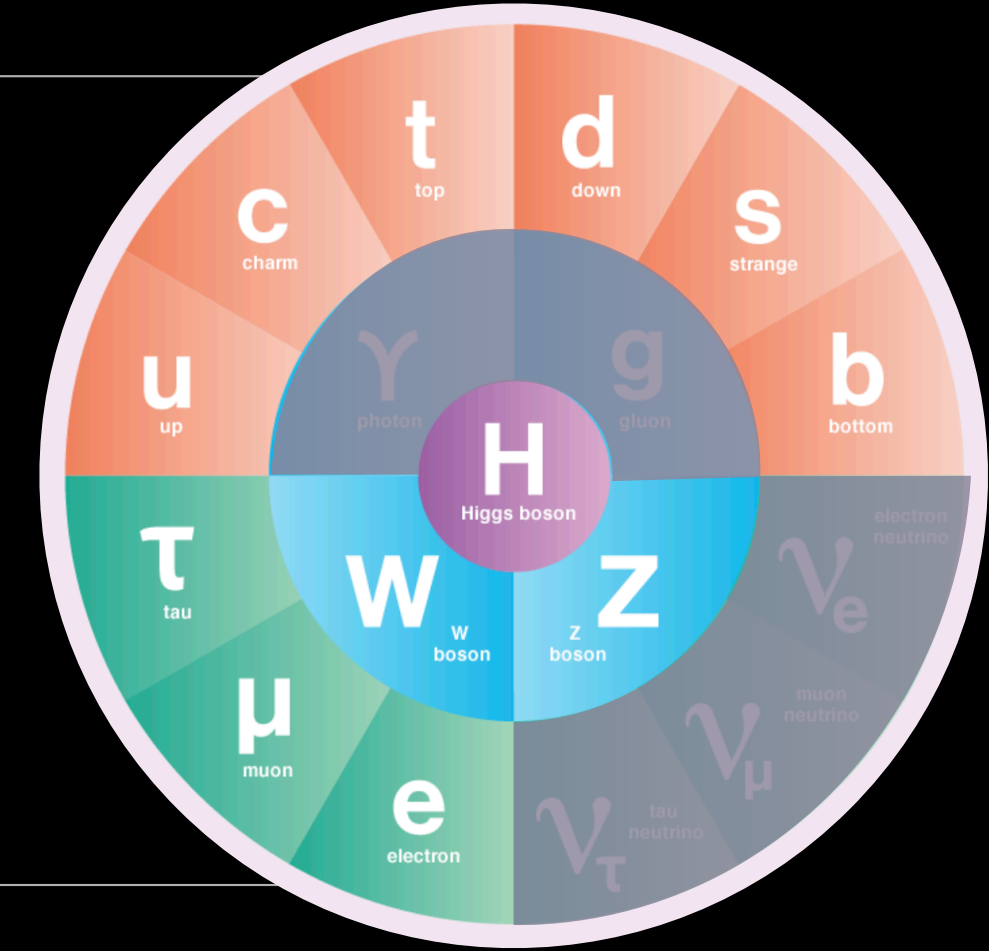
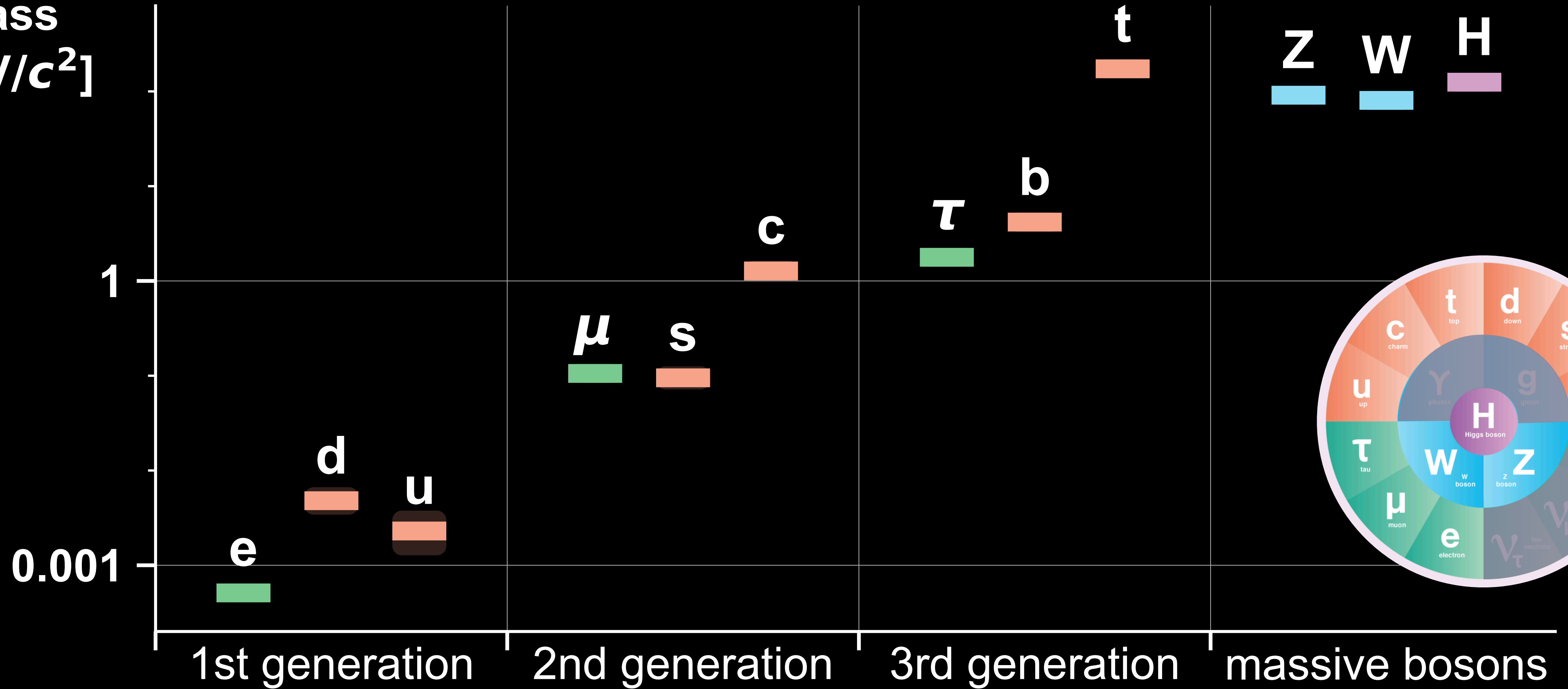
Le boson de Higgs correspond à une fluctuation localisée du champ

**une hypothèse au coeur du  
modèle standard**

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

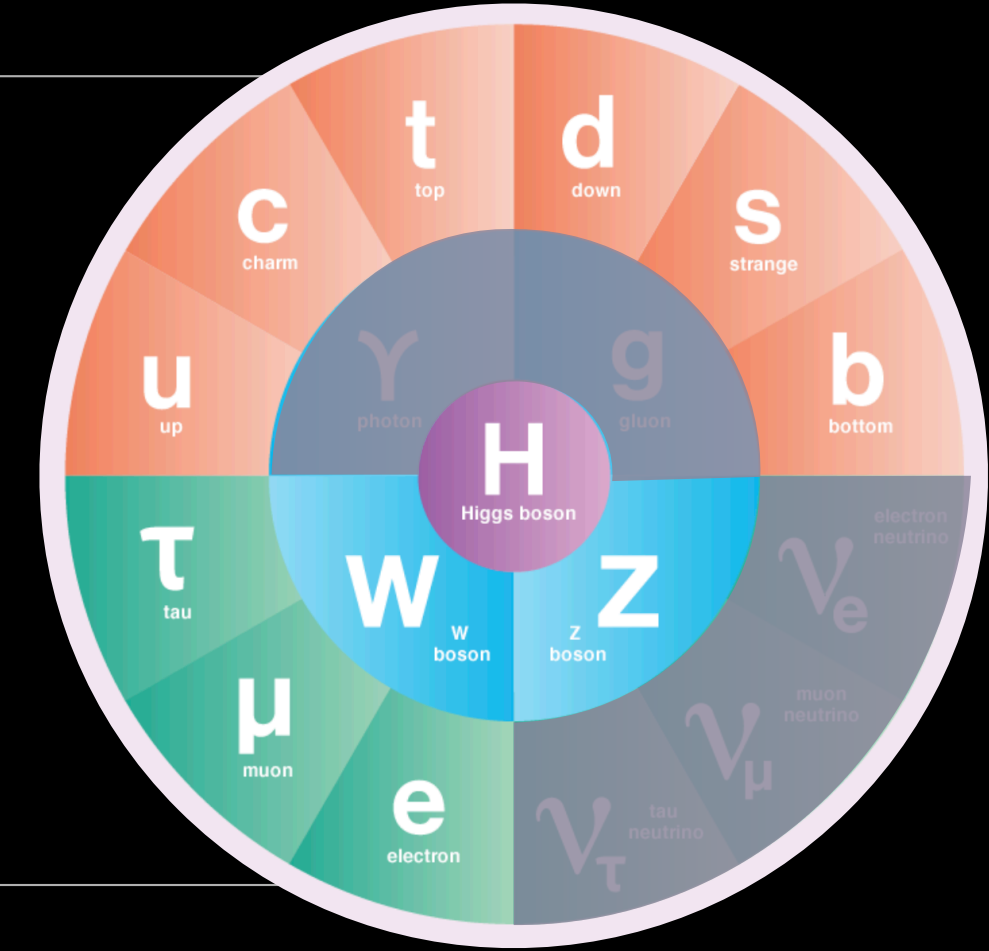
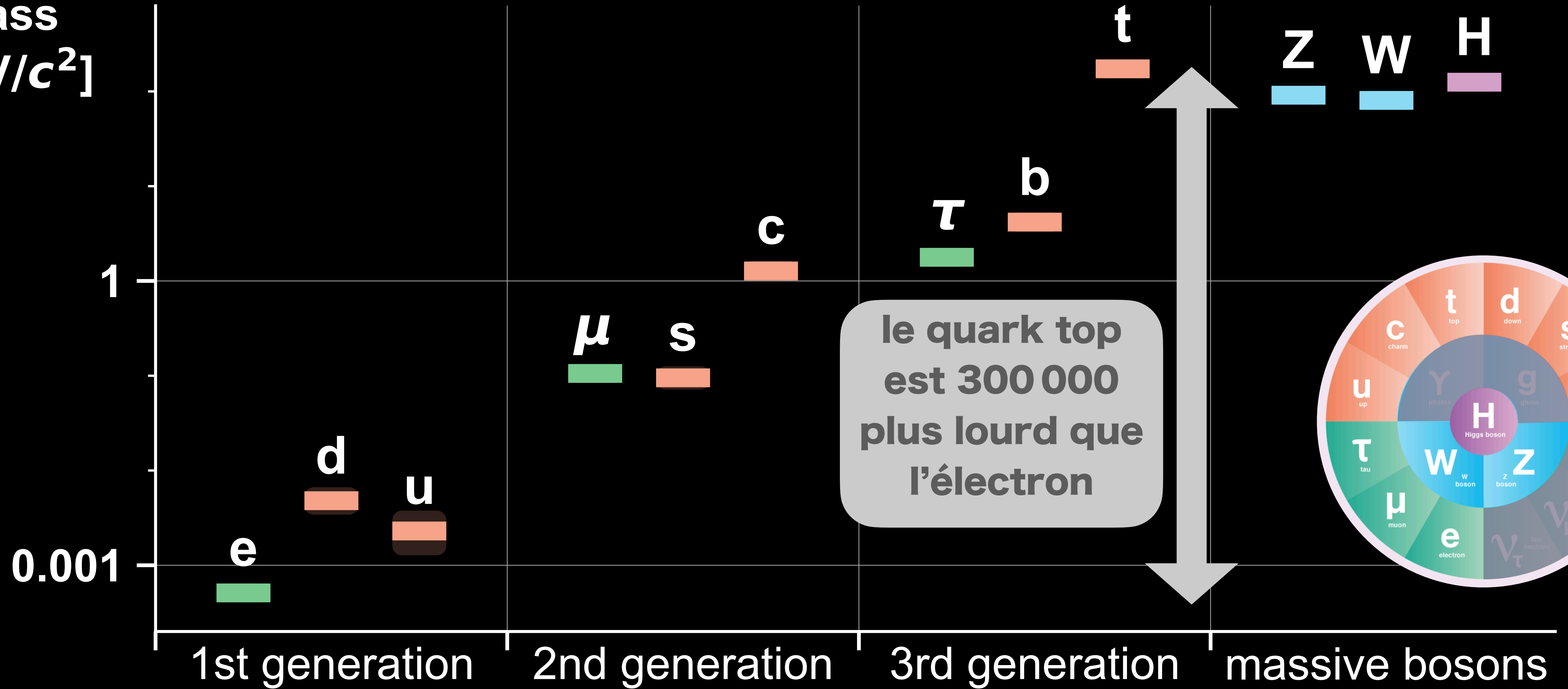
# Standard Model massive particles (except $\nu$ )

mass  
[GeV/c<sup>2</sup>]



# Standard Model massive particles (except $\nu$ )

mass  
[GeV/c<sup>2</sup>]



# champ de Higgs

mass  
[GeV/c<sup>2</sup>]

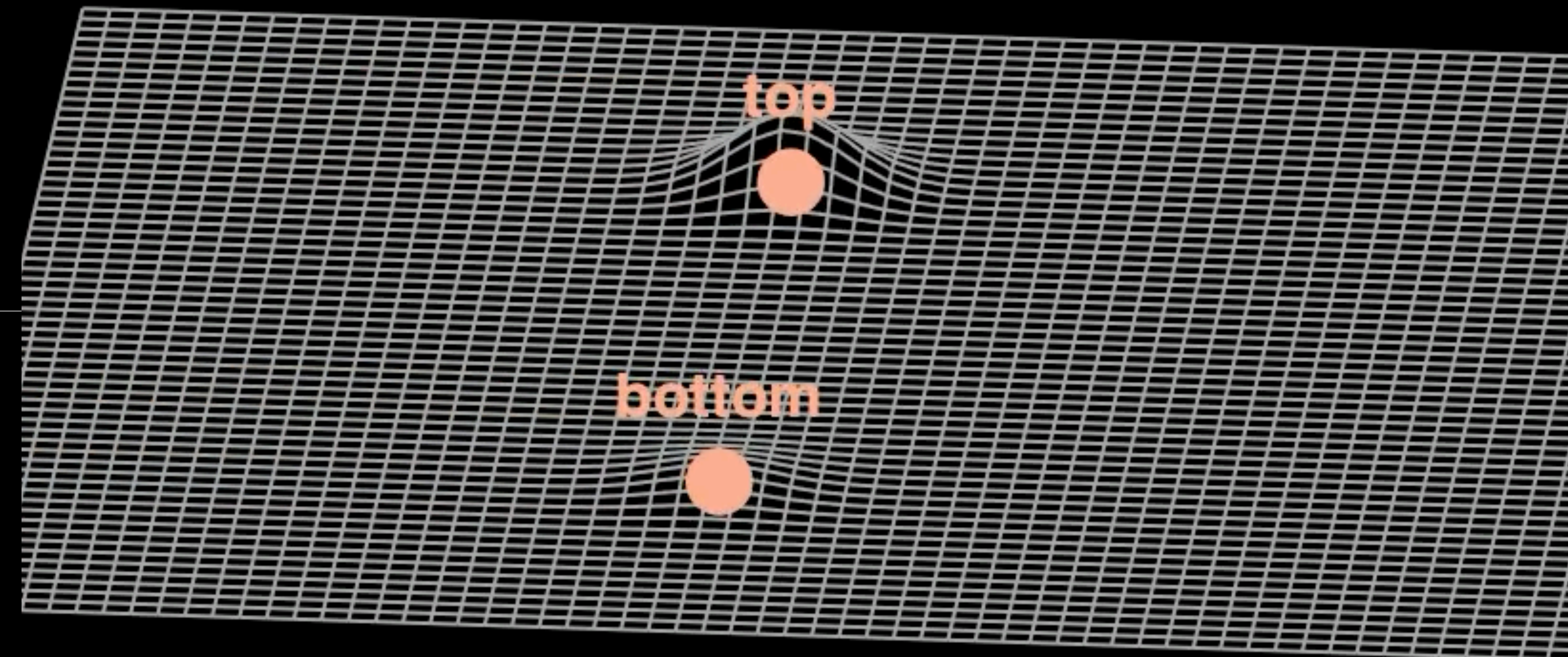
t

b

1

0.001

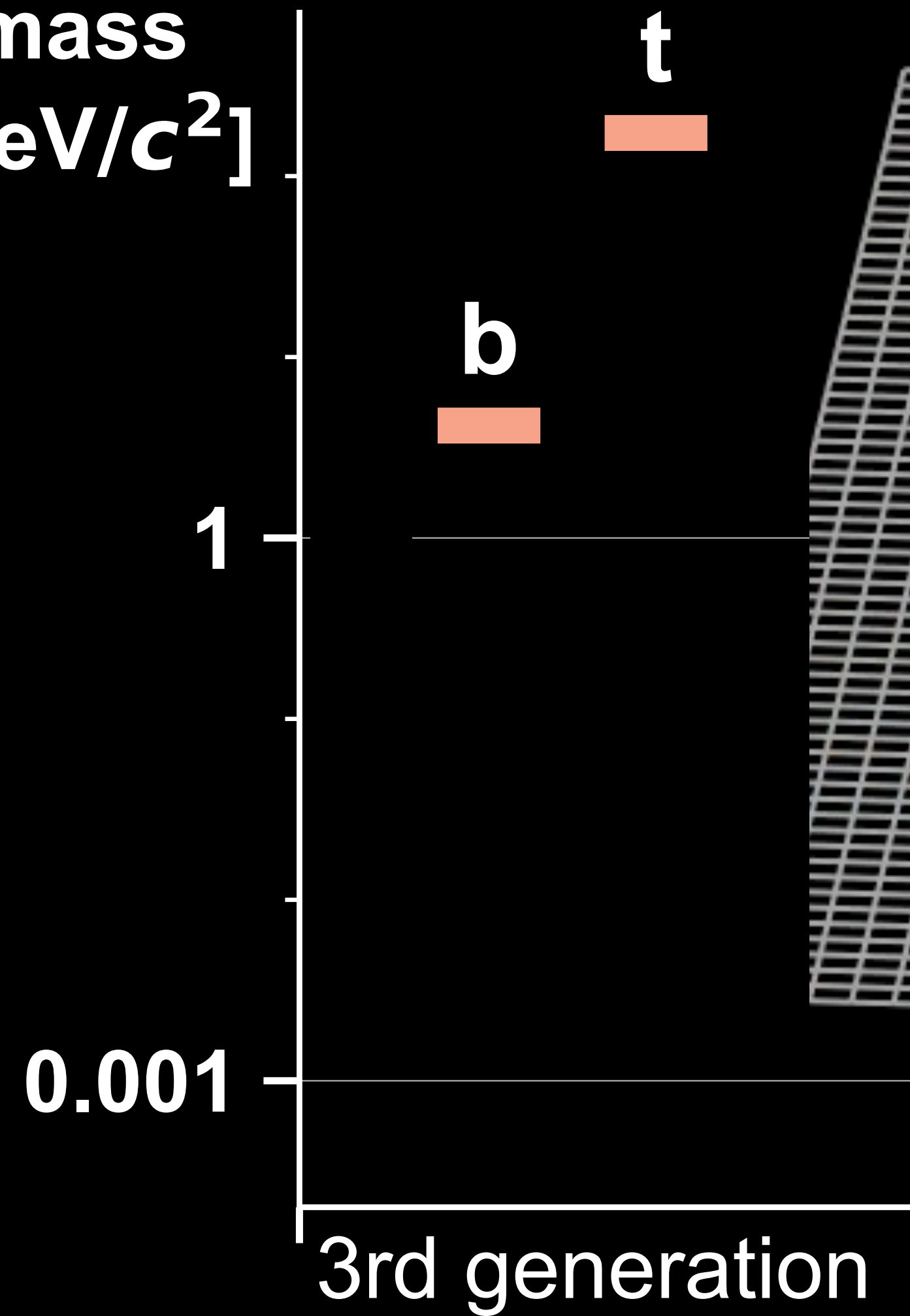
3rd generation



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

# champ de Higgs

mass  
[GeV/c<sup>2</sup>]



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

# champ de Higgs

mass  
[GeV/c<sup>2</sup>]

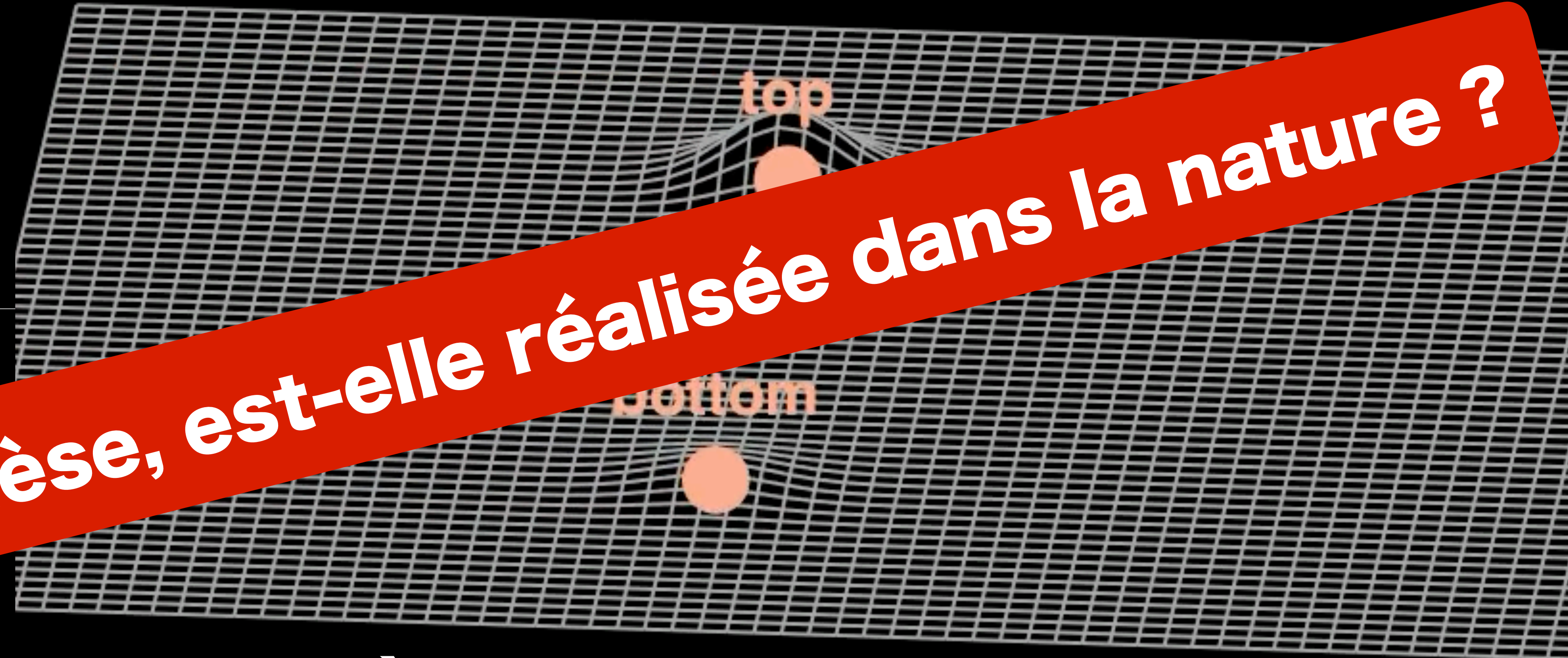
t

b

1

0.001

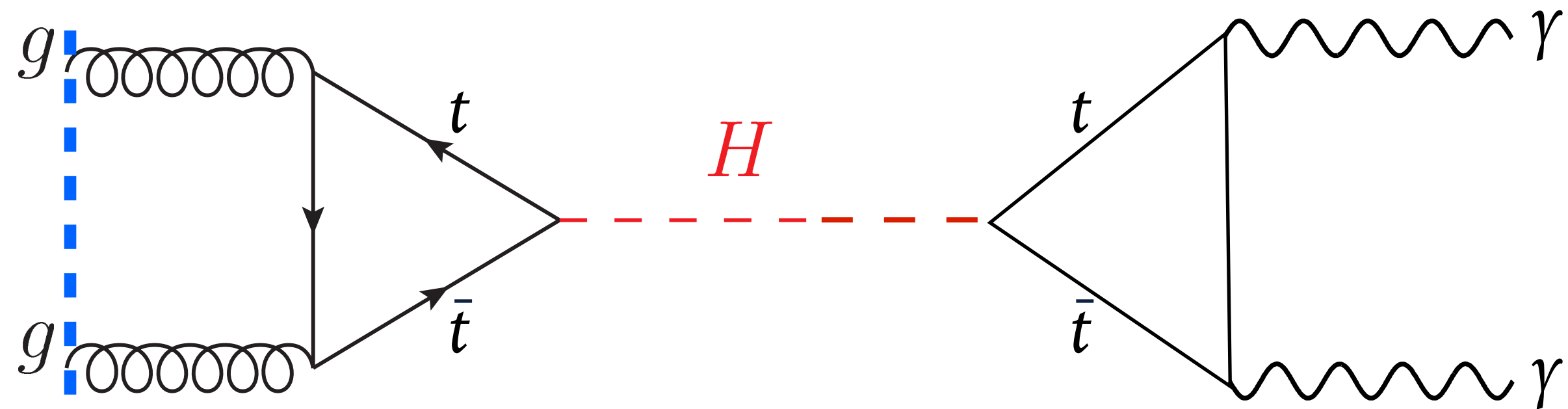
3rd generation



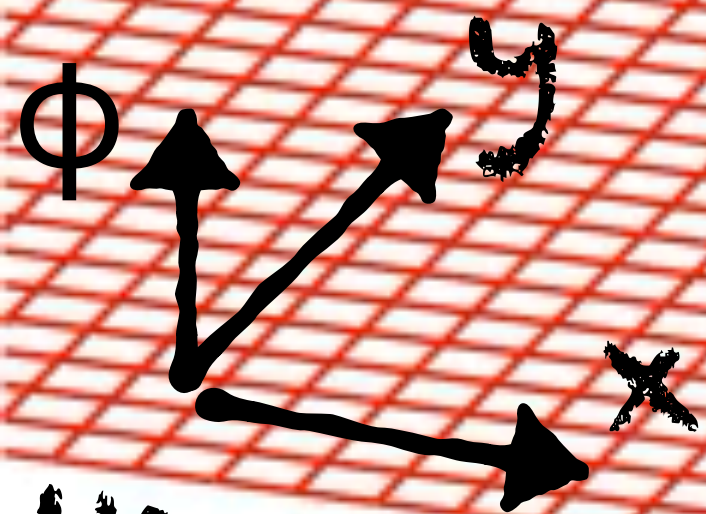
**cette hypothèse, est-elle réalisée dans la nature ?**

**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 révélées le boson de Higgs



quon

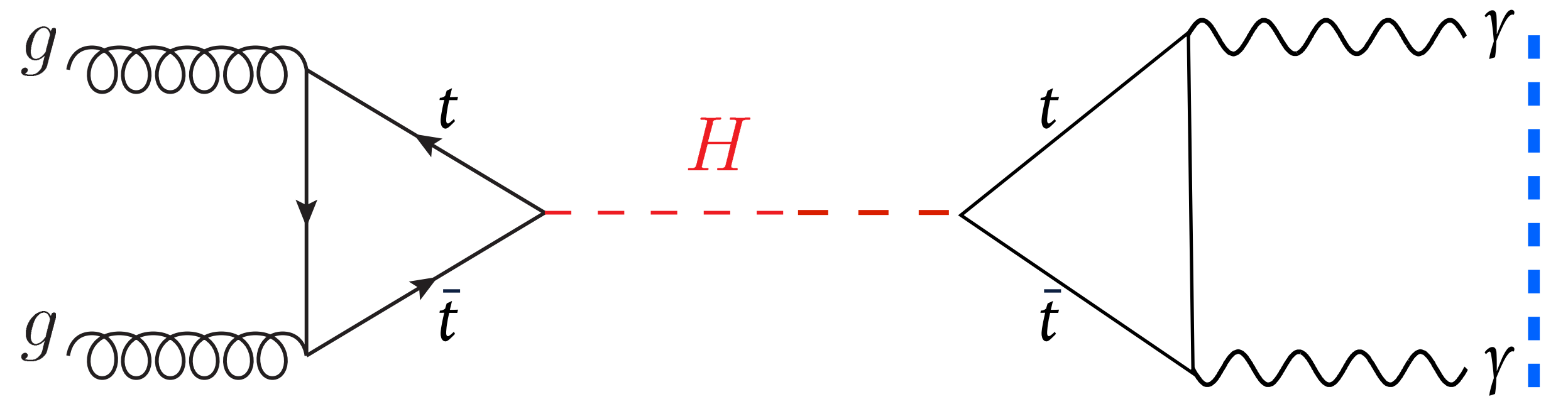


Higgs field in space

gluon



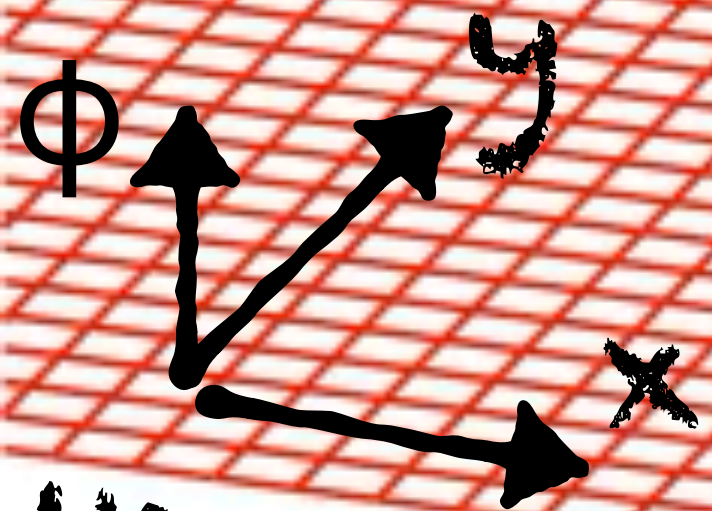
# Une collision au LHC comme celles ayant révélées le boson de Higgs



quon

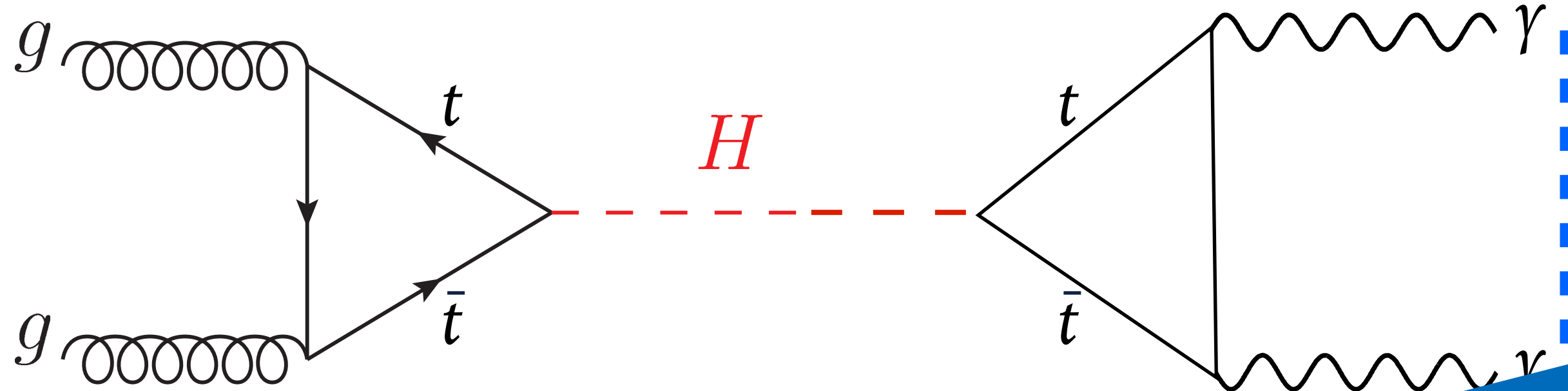


gluo



Higgs field in space

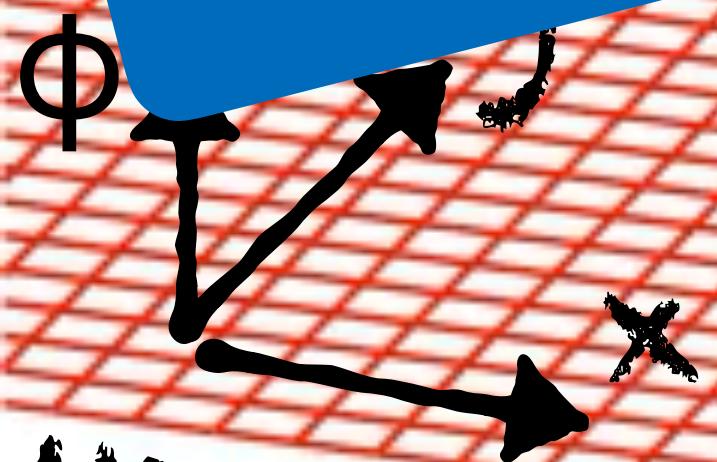
Une collision au LHC comme celles ayant révélées le boson de Higgs



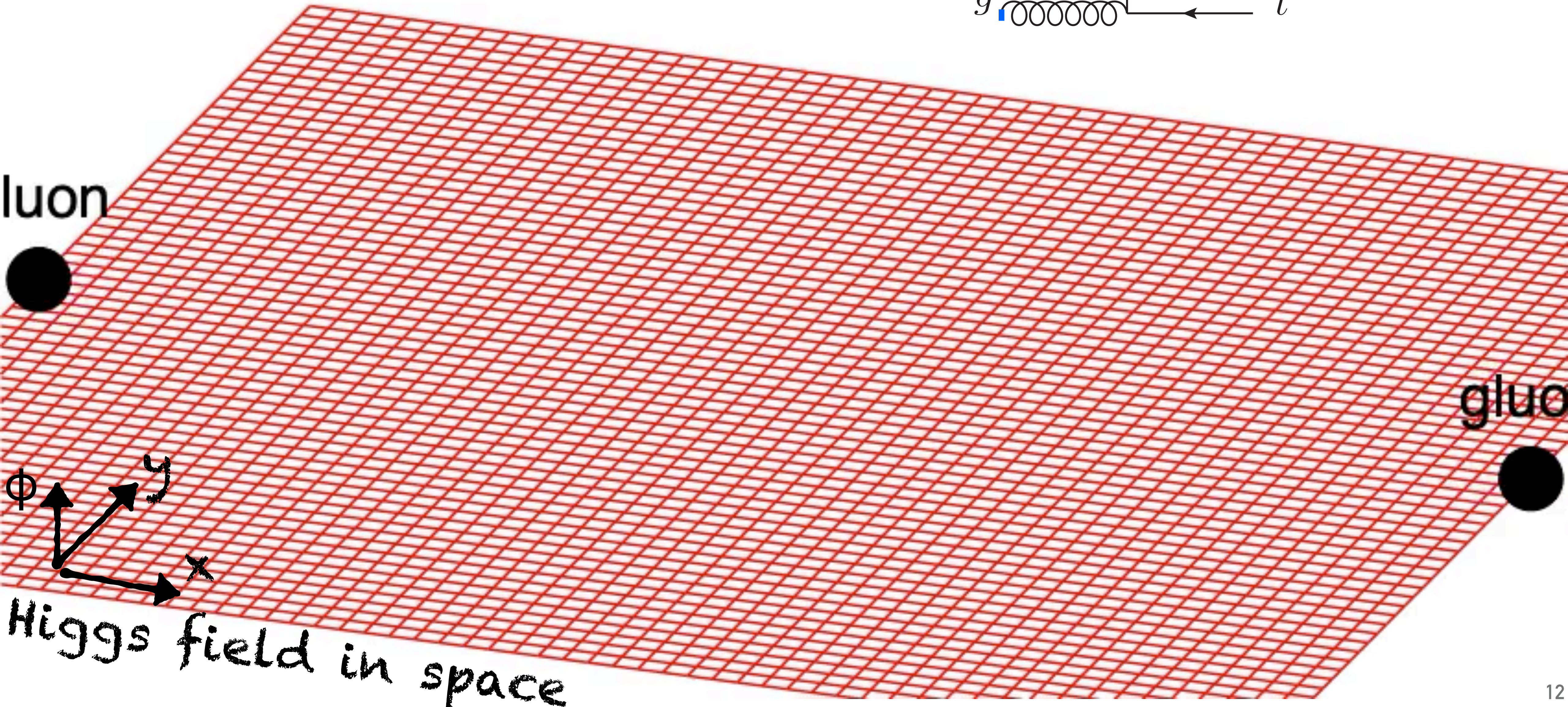
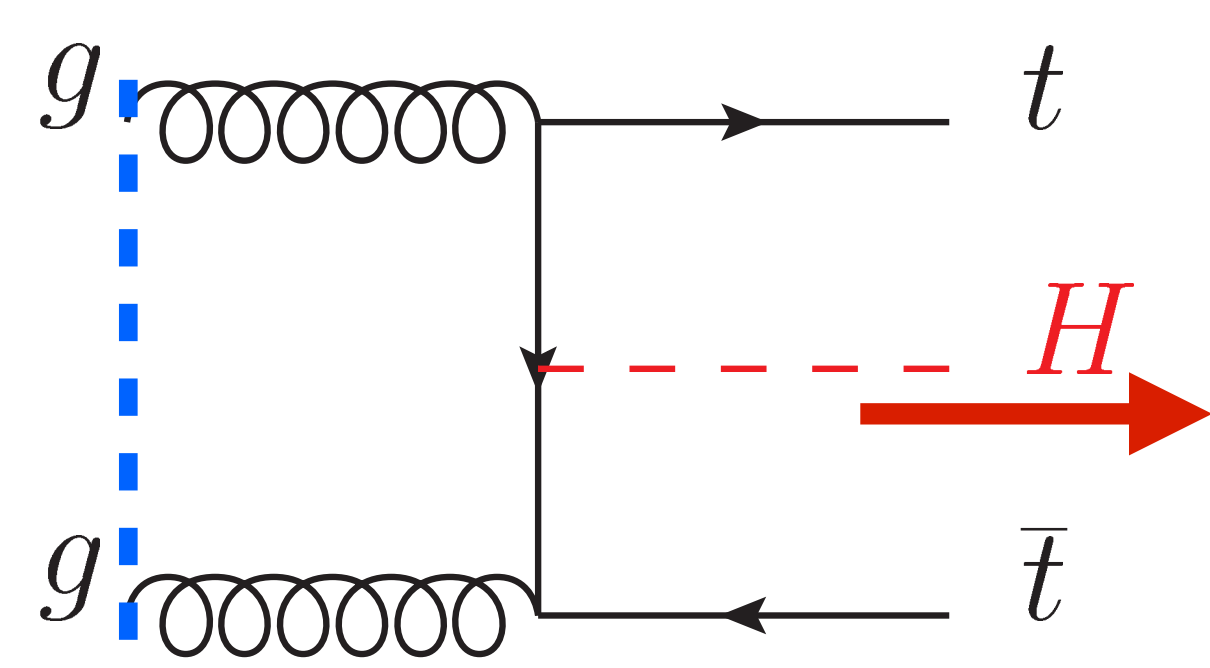
quon

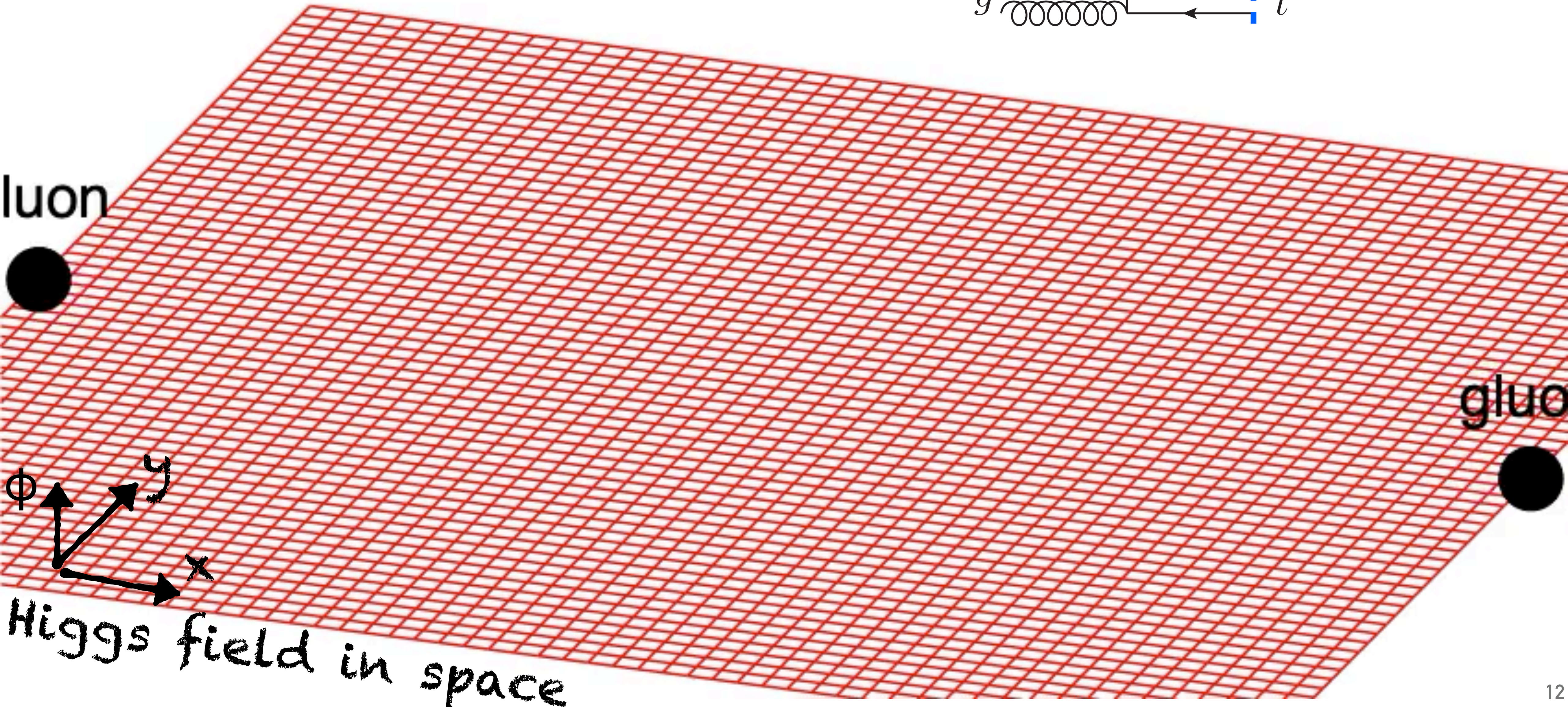
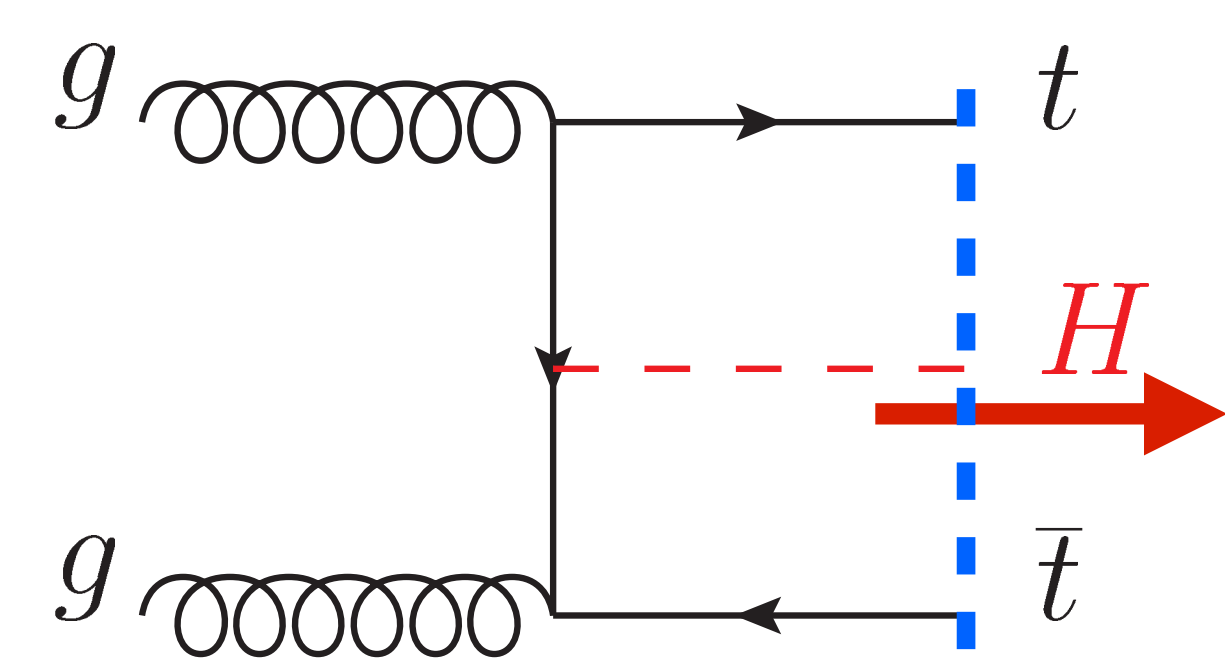
découverte de boson (et champ) de Higgs

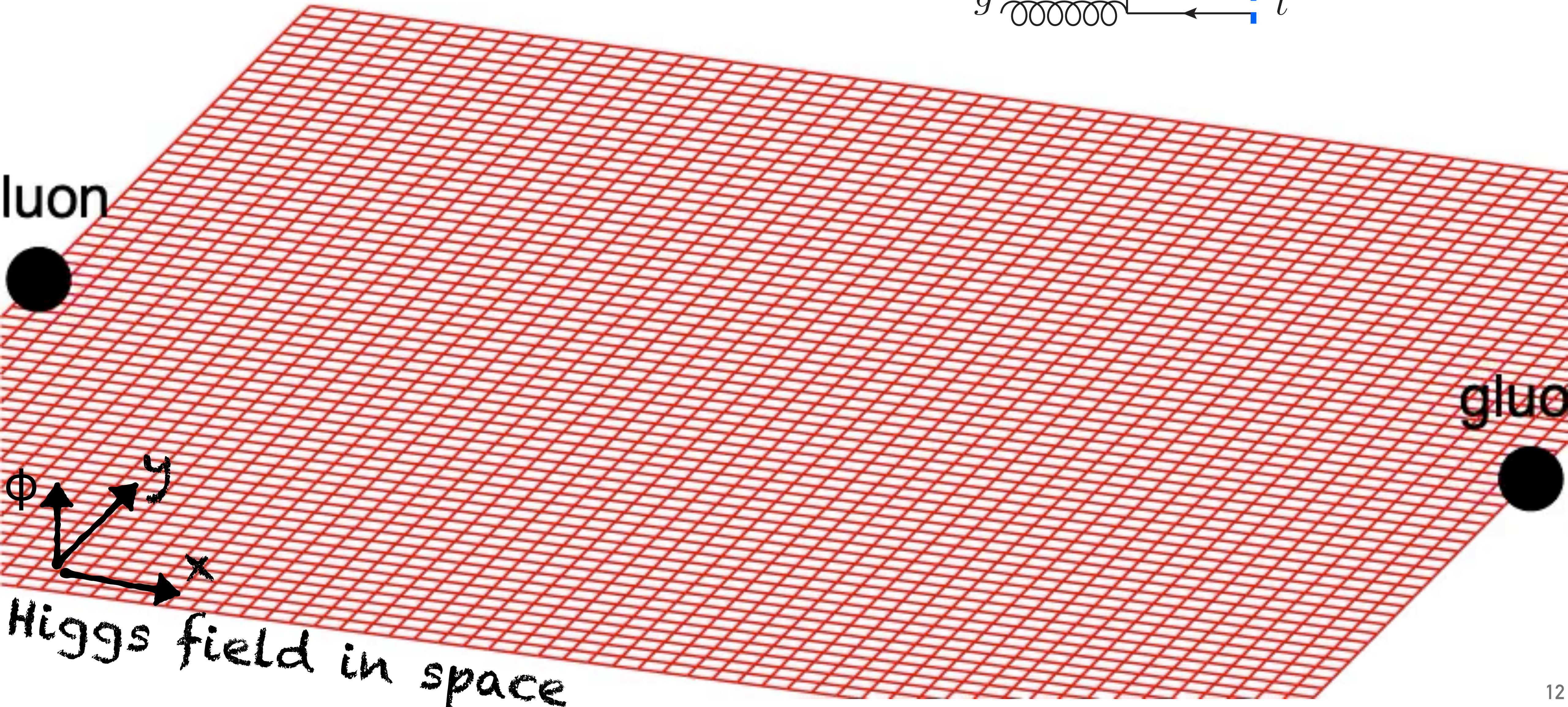
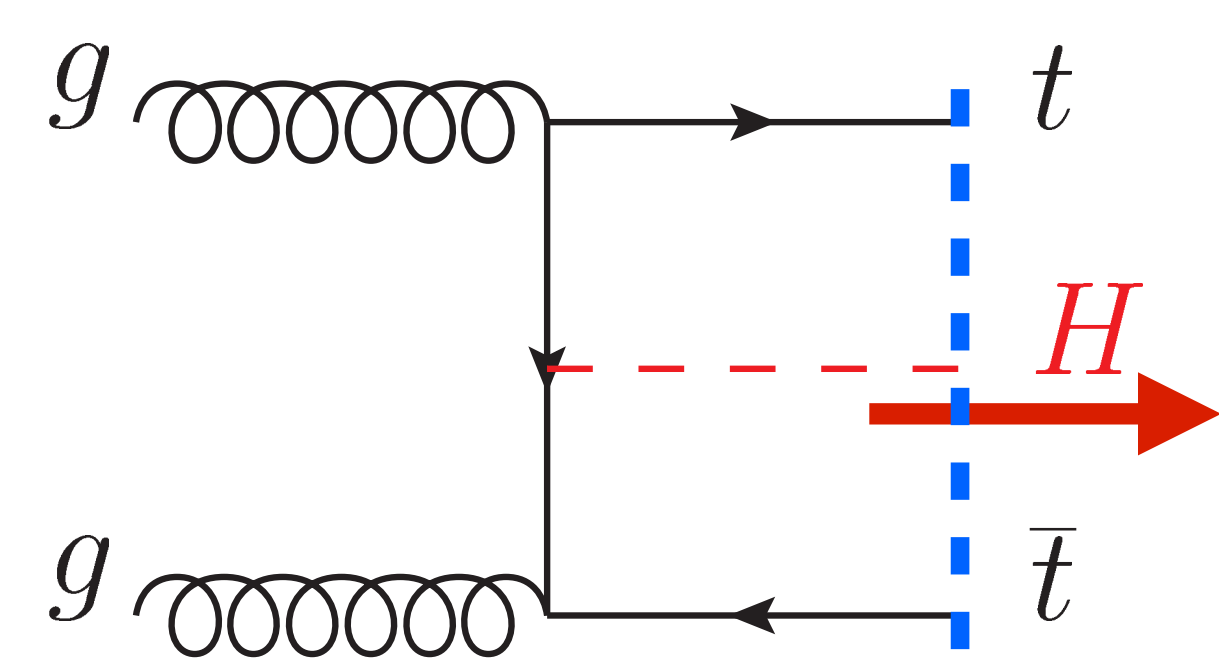
gluo



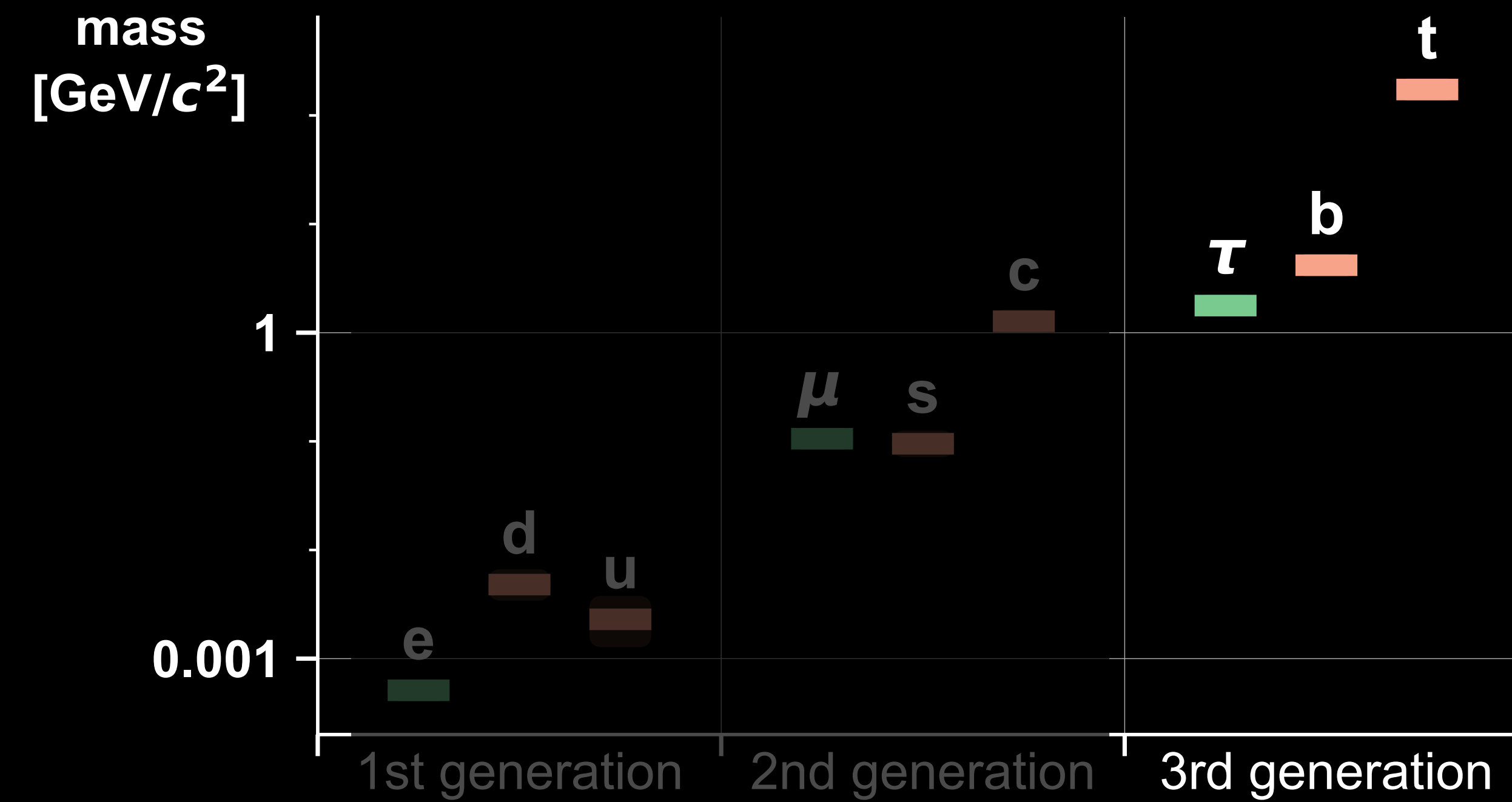
Higgs field in space



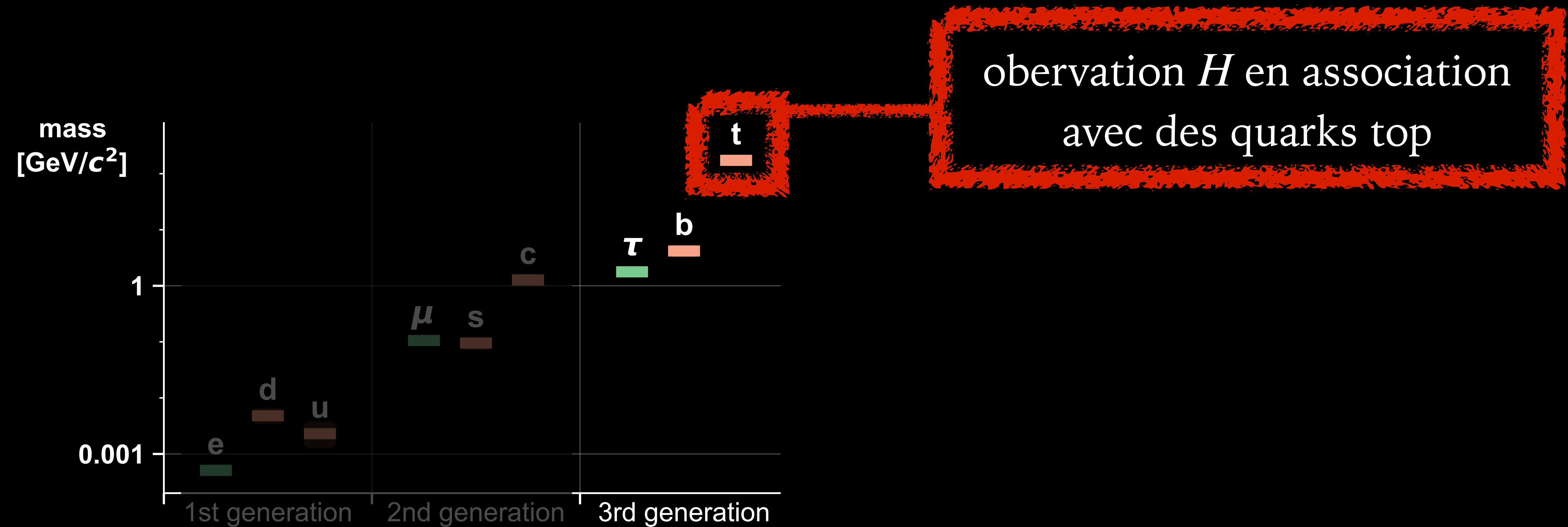




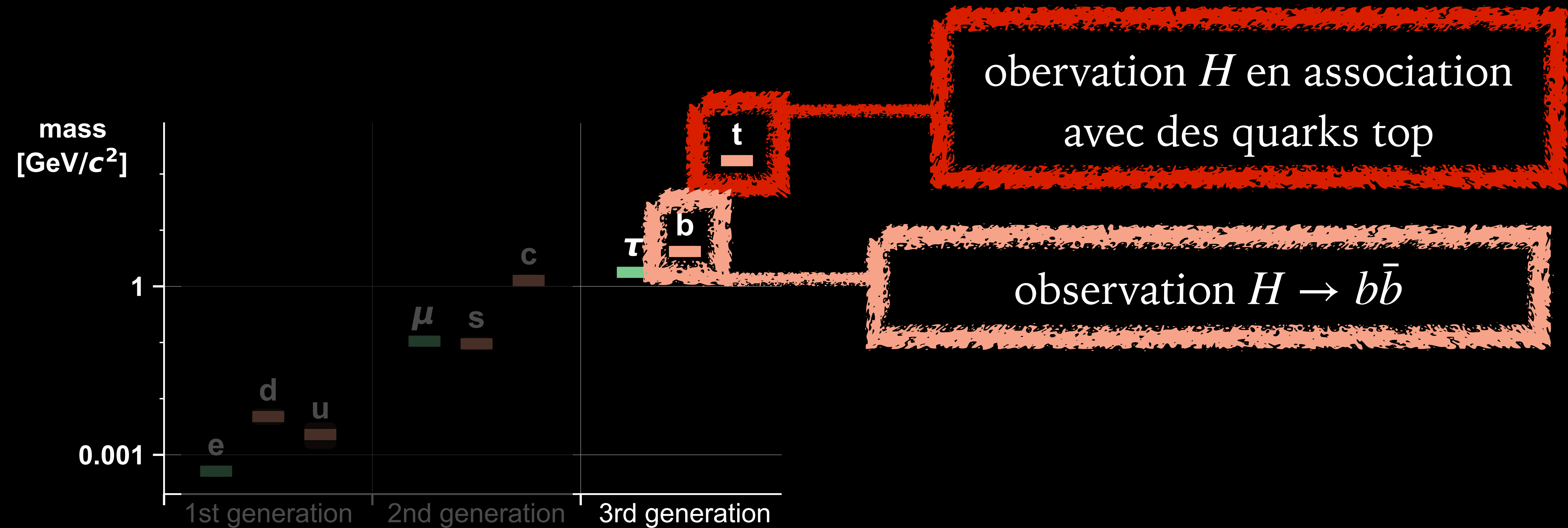
# Découverte des interactions 3<sup>e</sup> generation–Higgs par ATLAS & CMS ~ 2018



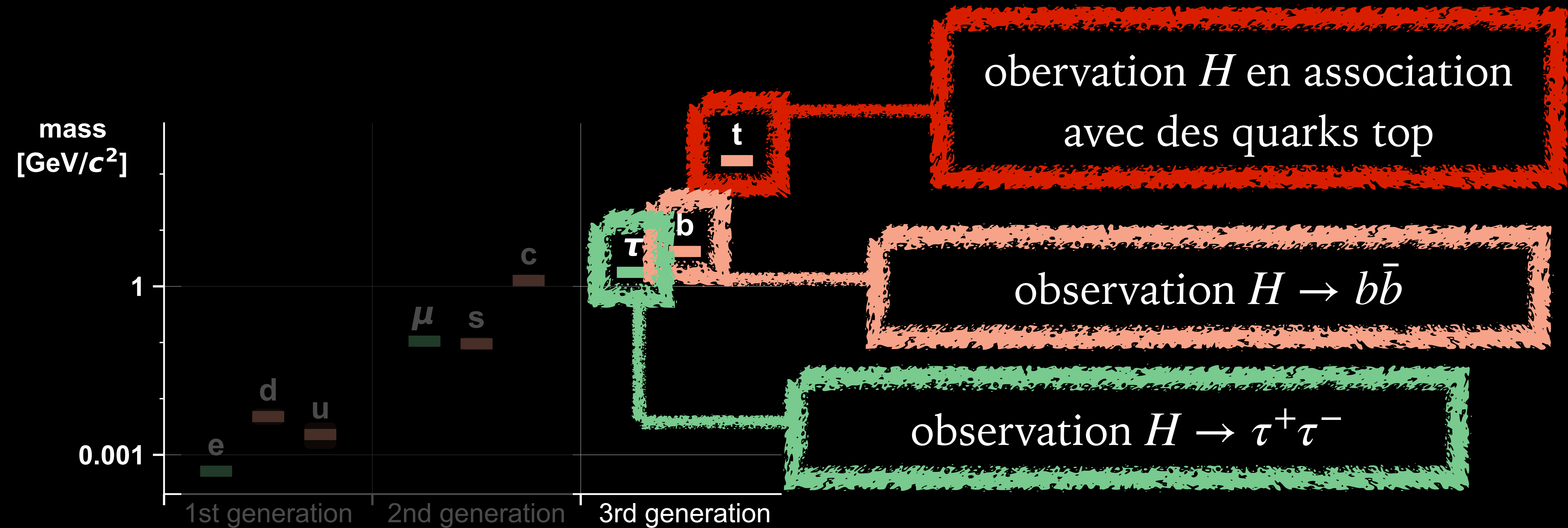
# Découverte des interactions 3<sup>e</sup> generation–Higgs par ATLAS & CMS ~ 2018



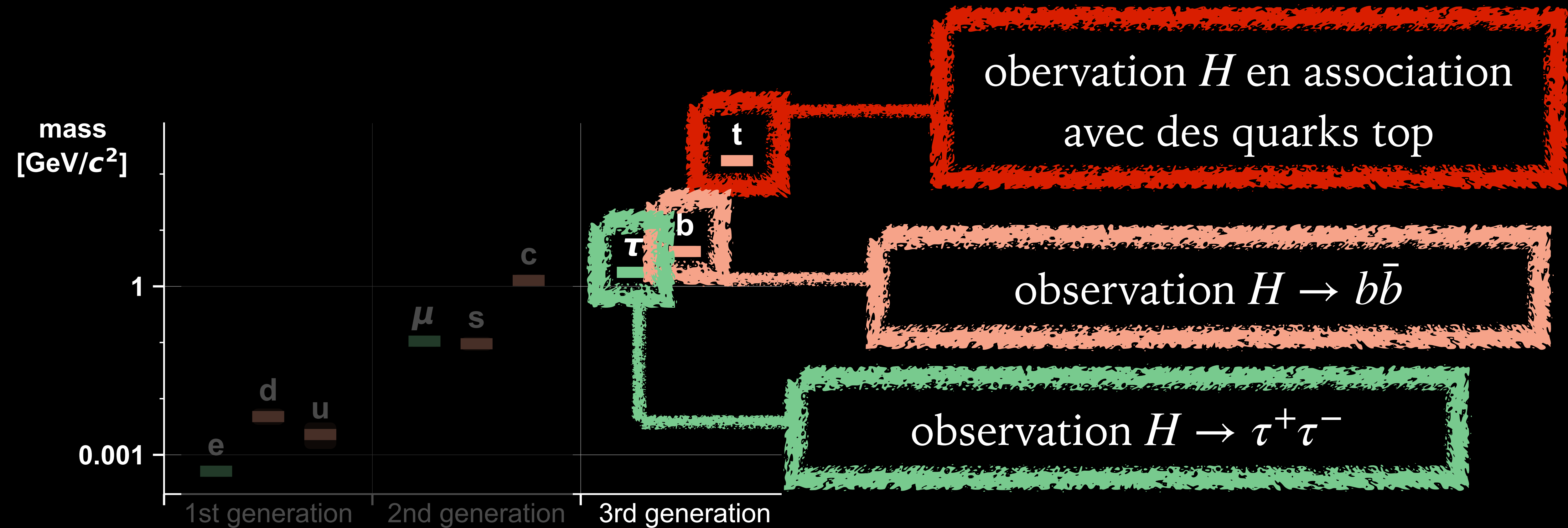
# Découverte des interactions 3<sup>e</sup> generation–Higgs par ATLAS & CMS ~ 2018



# Découverte des interactions 3<sup>e</sup> generation–Higgs par ATLAS & CMS ~ 2018



# Découverte des interactions 3<sup>e</sup> generation—Higgs par ATLAS & CMS ~ 2018



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

# quelle est l'importance de cette découverte ?

---

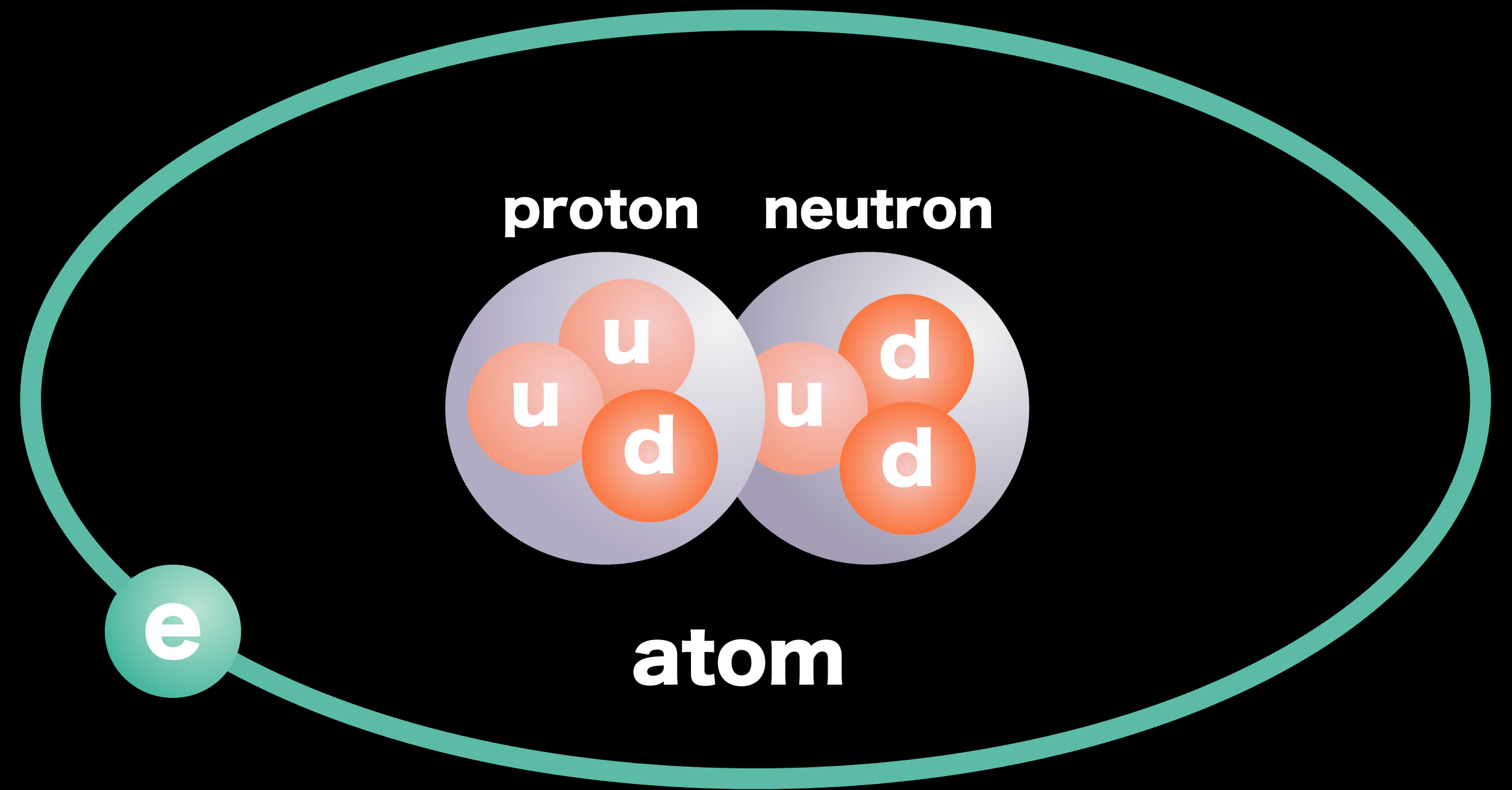
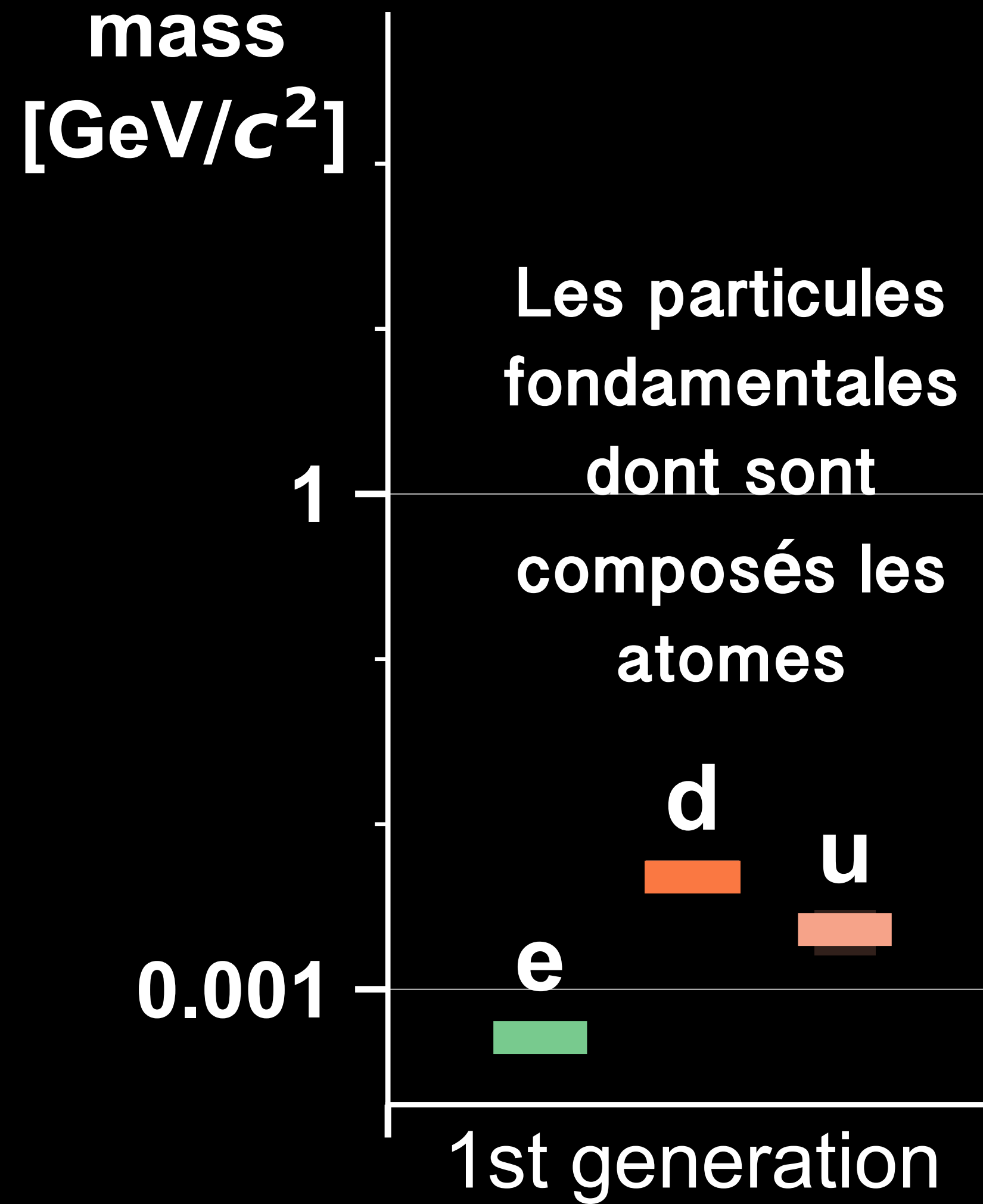
Pour une série entière de particules (3<sup>ème</sup> génération), comme celles dont nous sommes composés, le LHC a démontré que leur masse n'est pas une propriété intrinsèque, mais plutôt le résultat d'une interaction avec un champ de Higgs  $\neq 0$ .

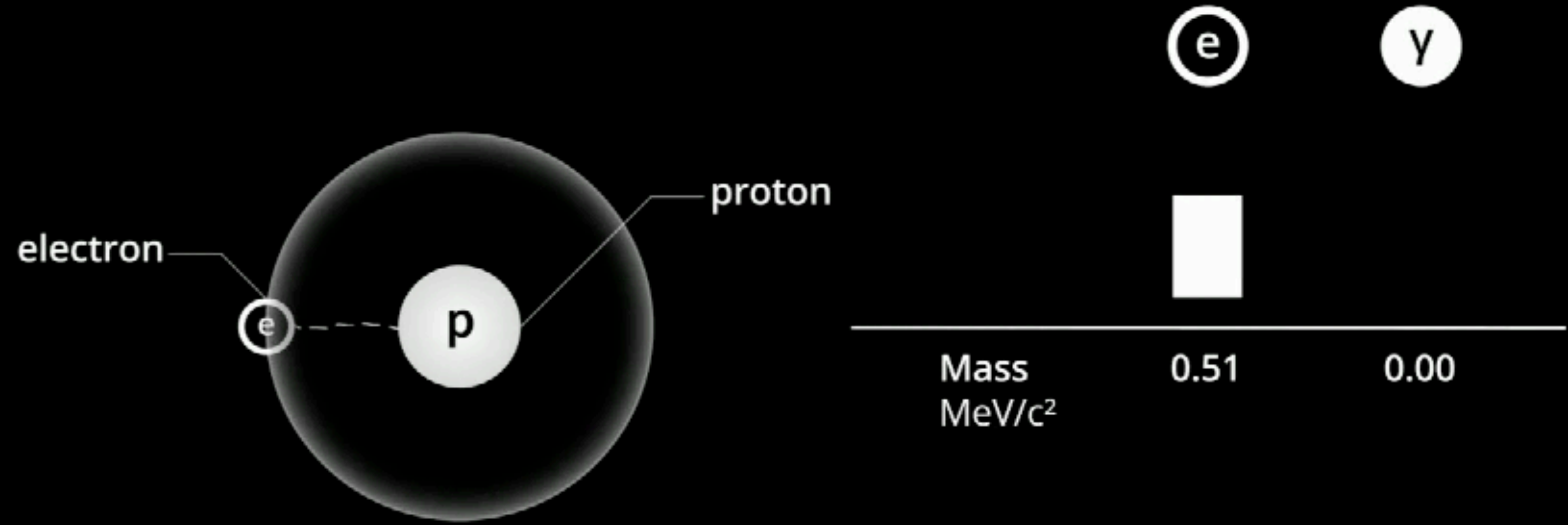
Un champ peut en principe être modifié. Ainsi les masses des particules pourraient, en principe, être modifiées

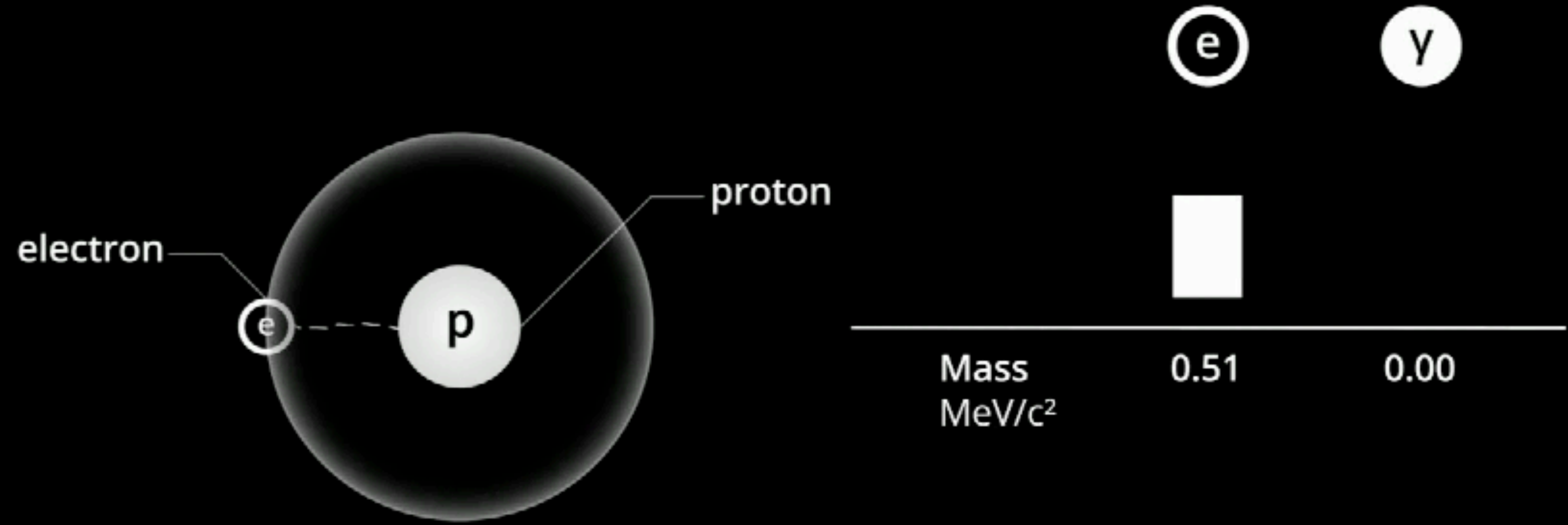
**Est-ce moins important que la découverte du boson de Higgs ?**  
**À mon avis : non**

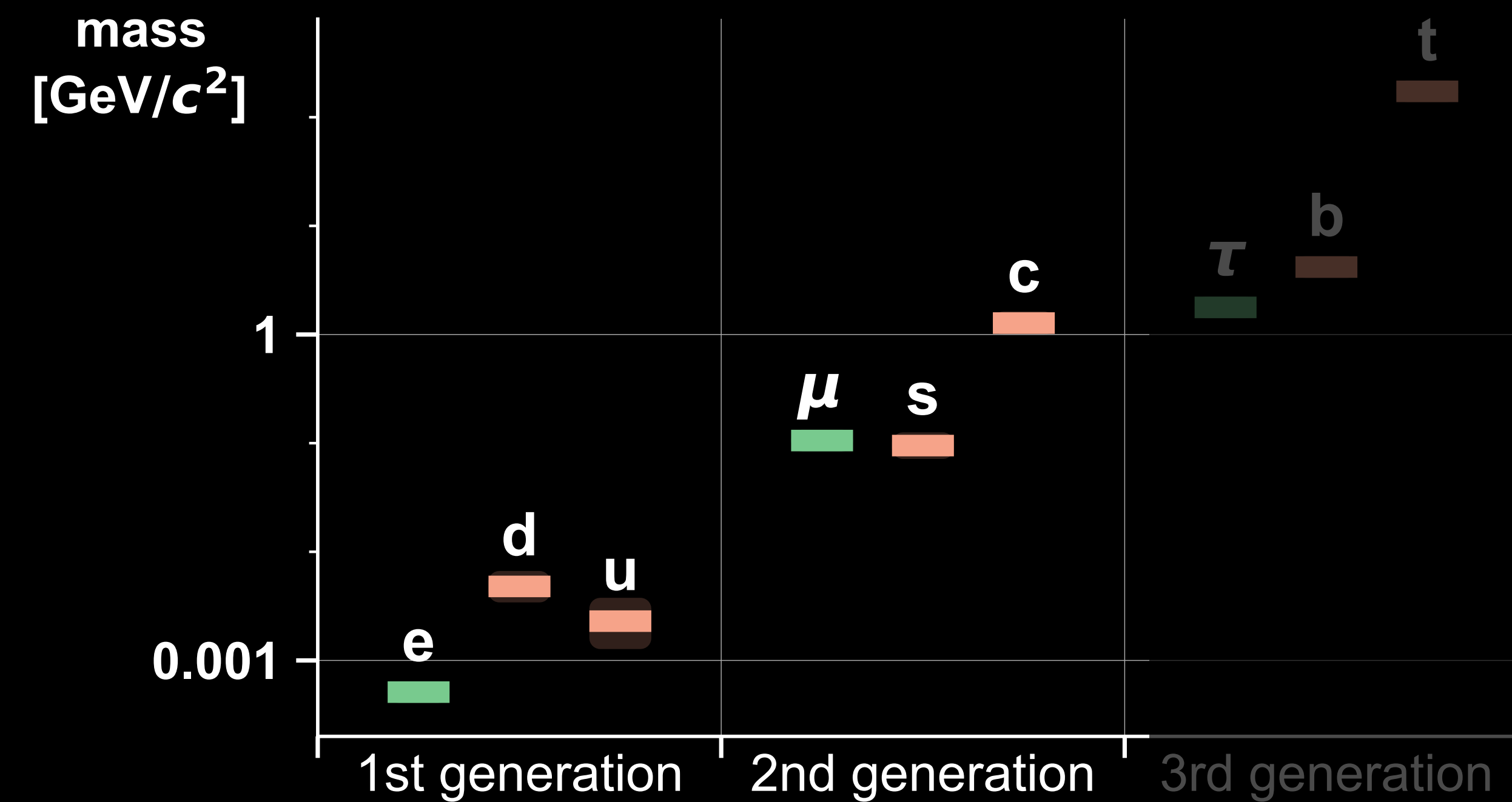
“Après Newton et Einstein, les expériences du LHC établissent un nouveau concept de masse” [E. Laenen]

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



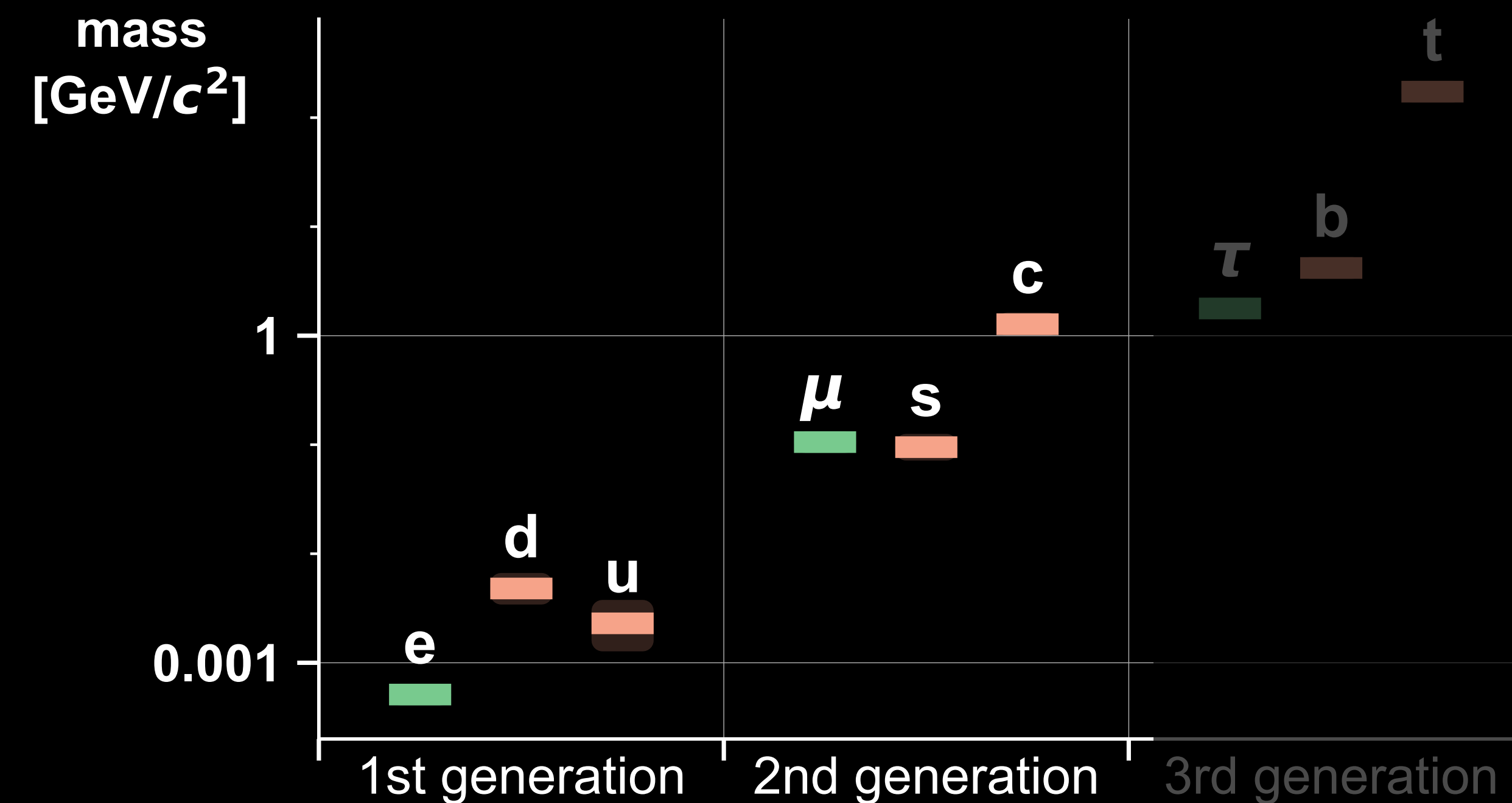




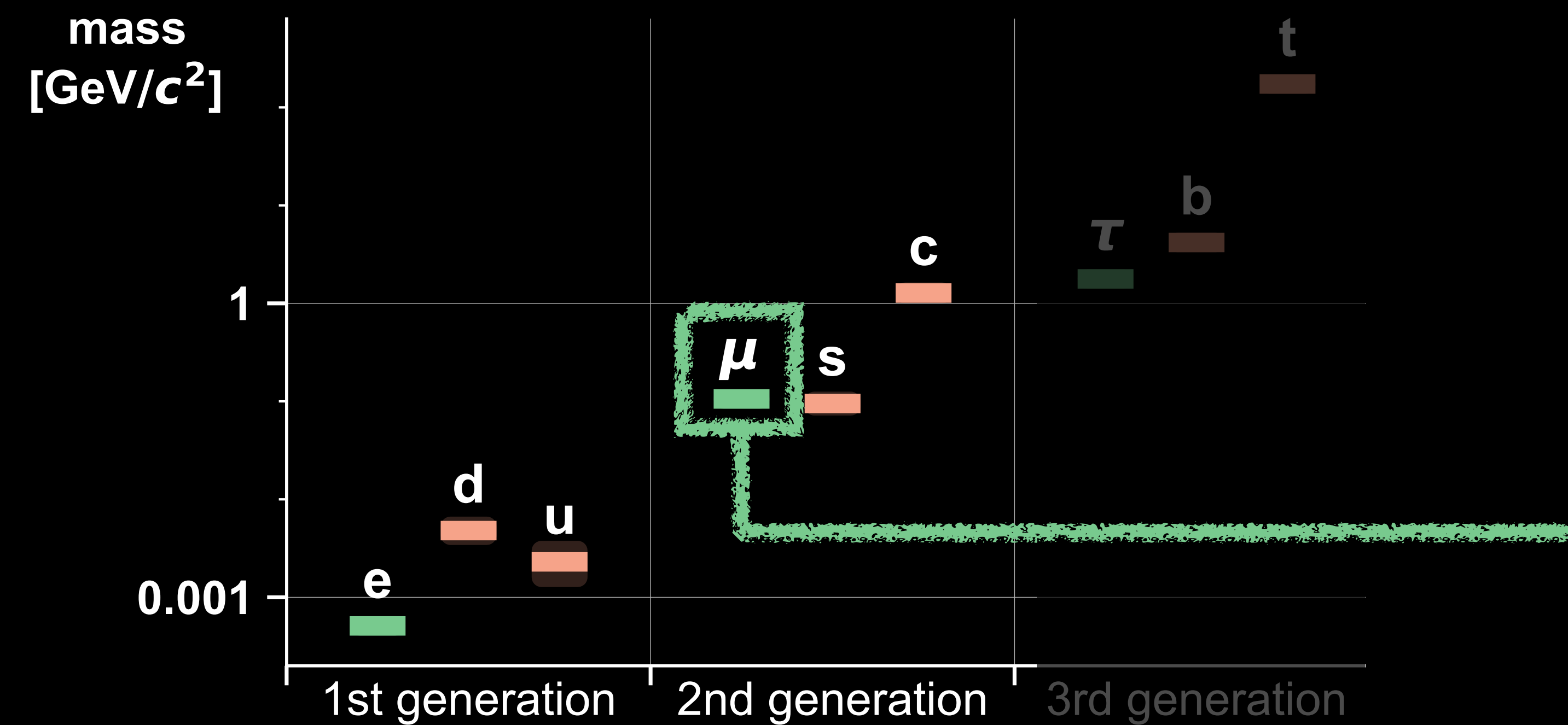


est-ce que TOUTES les  
particules obtiennent leur  
masse de la même façon ?

**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



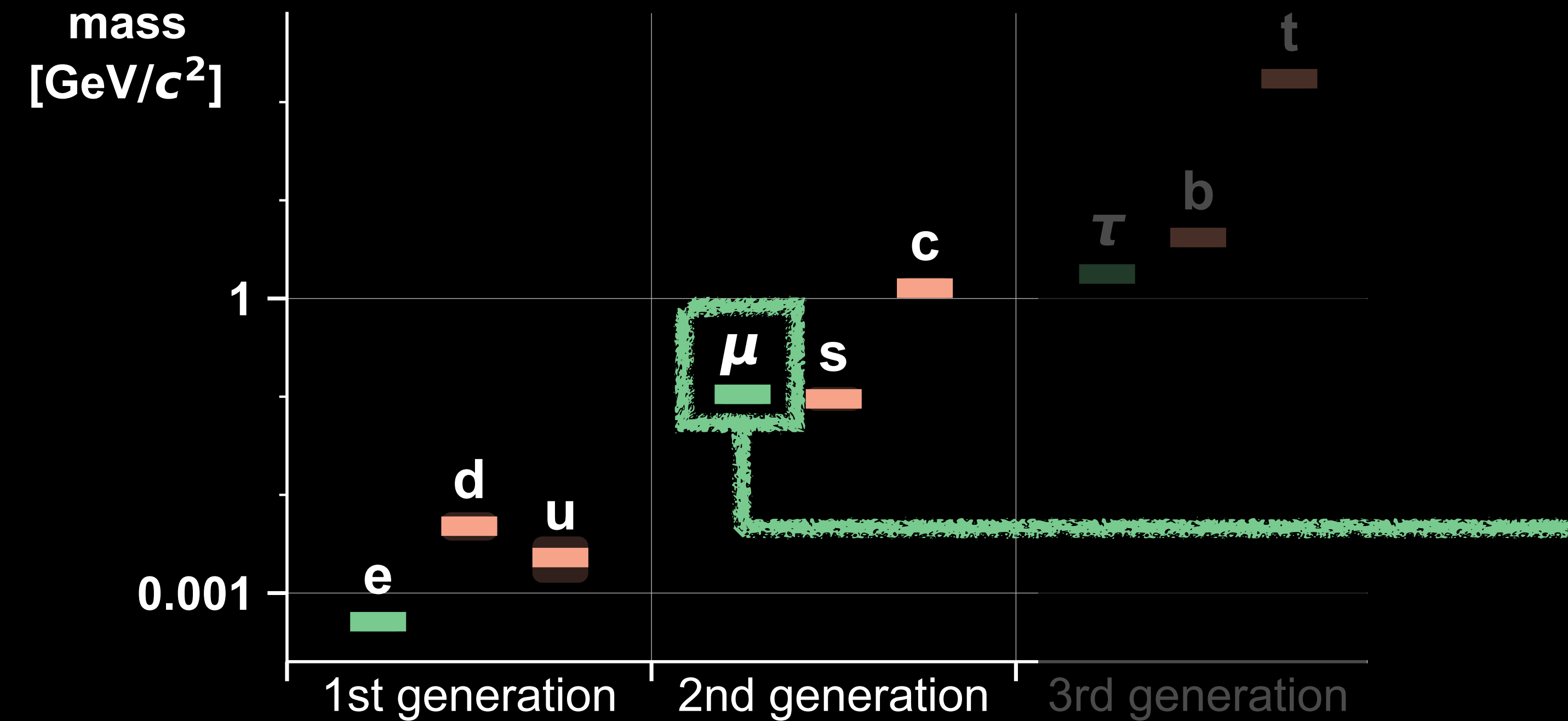
est-ce que TOUTES les particules obtiennent leur masse de la même façon ?



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<sup>e</sup> génération obtient sa masse de la même façon

[ATLAS/CMS ont de premières indications, main 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



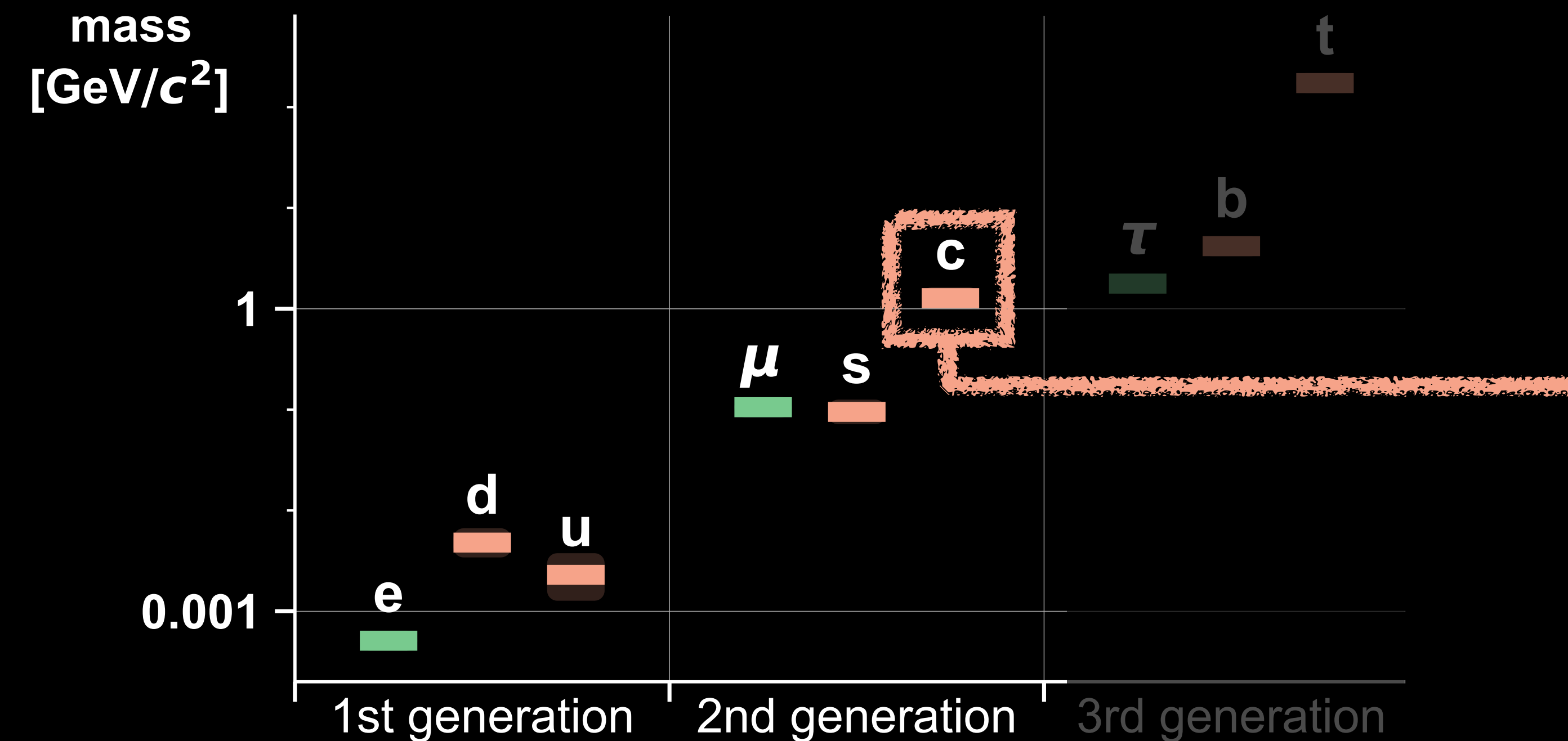
un principal objectif des prochaines années du LHC (Run-3 ou HL-LHC) sera d'établir, pour la première fois, si une particule de la 2<sup>e</sup> génération obtient sa masse de la même façon

[ATLAS/CMS ont de premières indications, main pas encore  $5\sigma$ ]

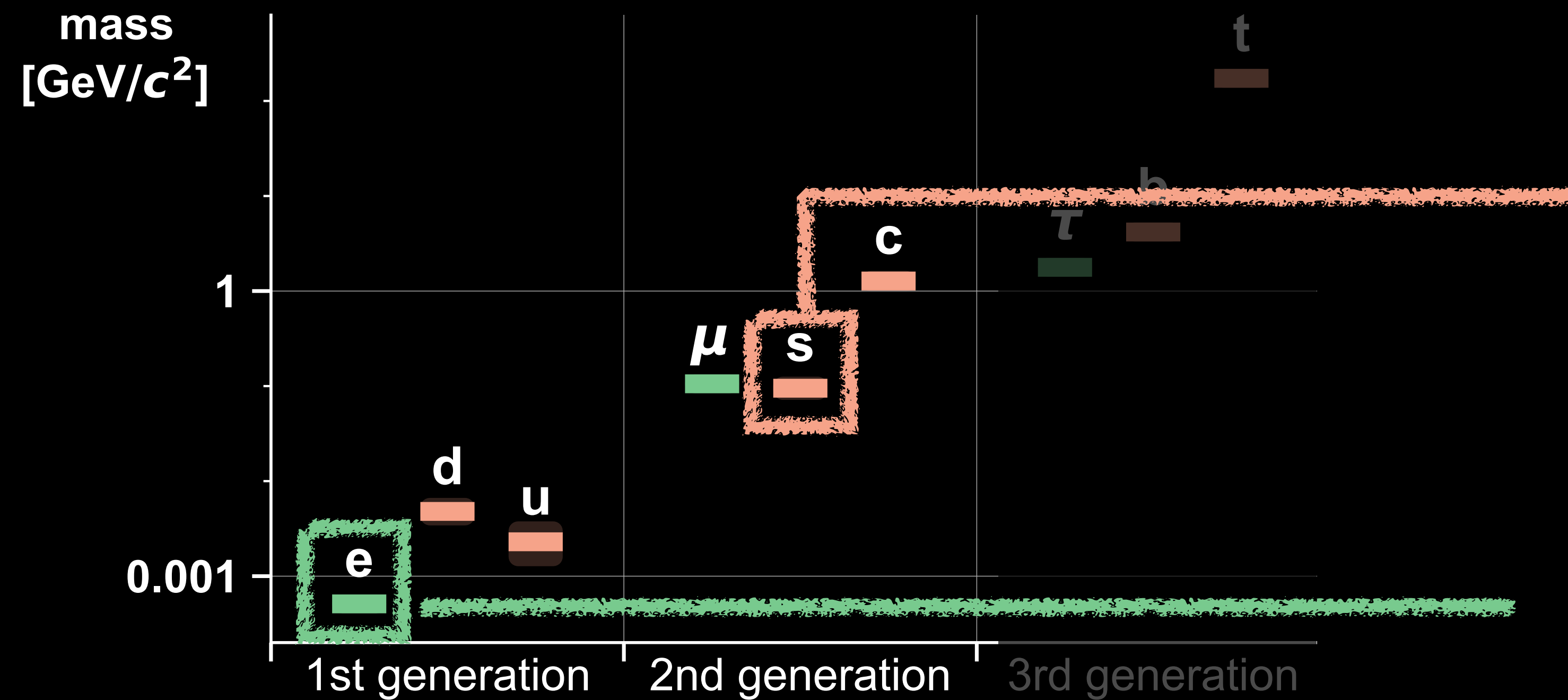
# Qu'en est-il du FCC-ee?

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?

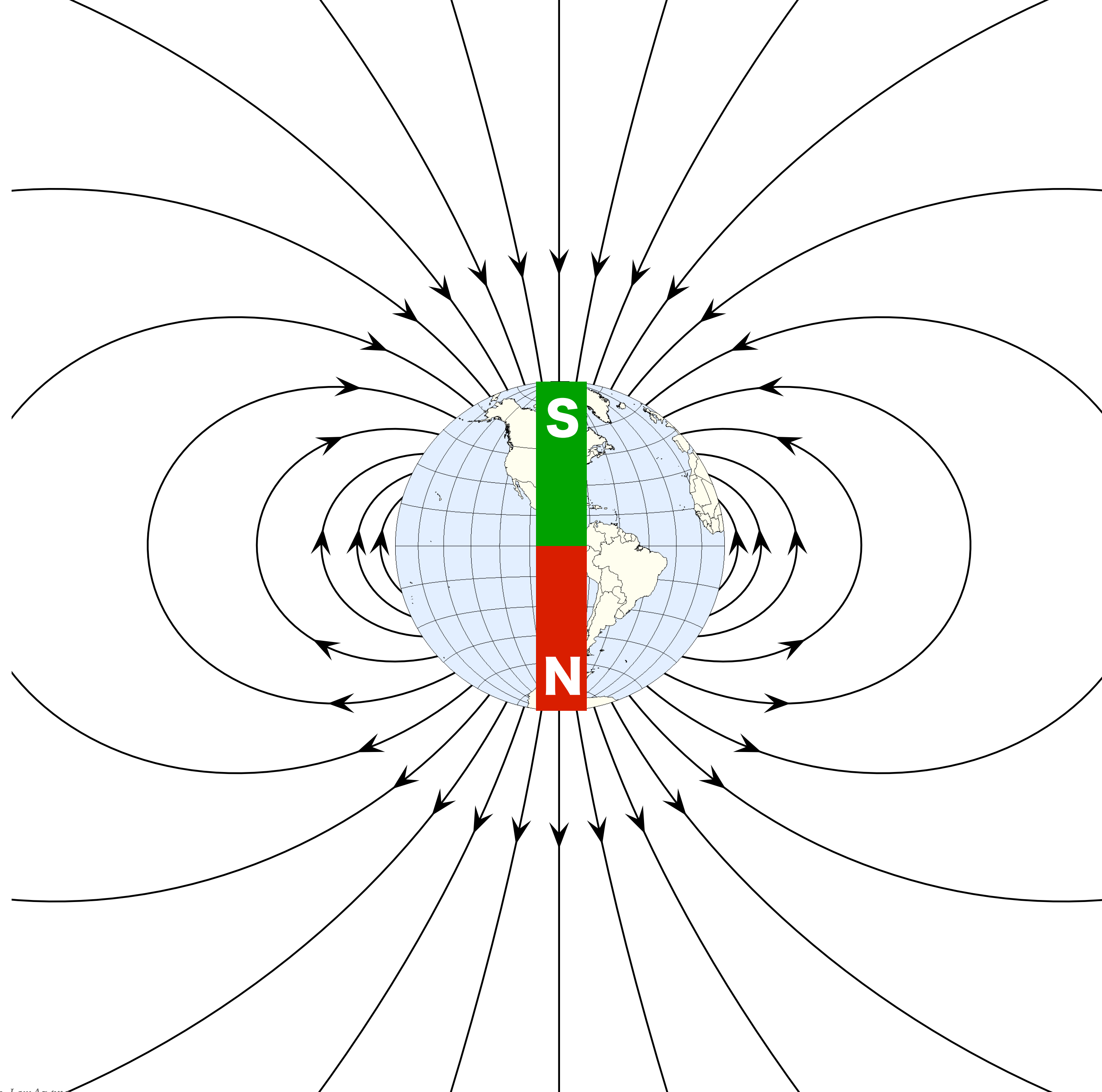


L'étude du FCC-ee montre que les couplages de Yukawa du quark strange et de l'électron sont à peine au-delà de ce qui est accessible.

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

**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://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFpt_Dipole_field.svg)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Western\\_Hemisphere#/media/File:Western\\_Hemisphere\\_LamAz.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Western_Hemisphere#/media/File:Western_Hemisphere_LamAz.png)





**modèle  
standard**

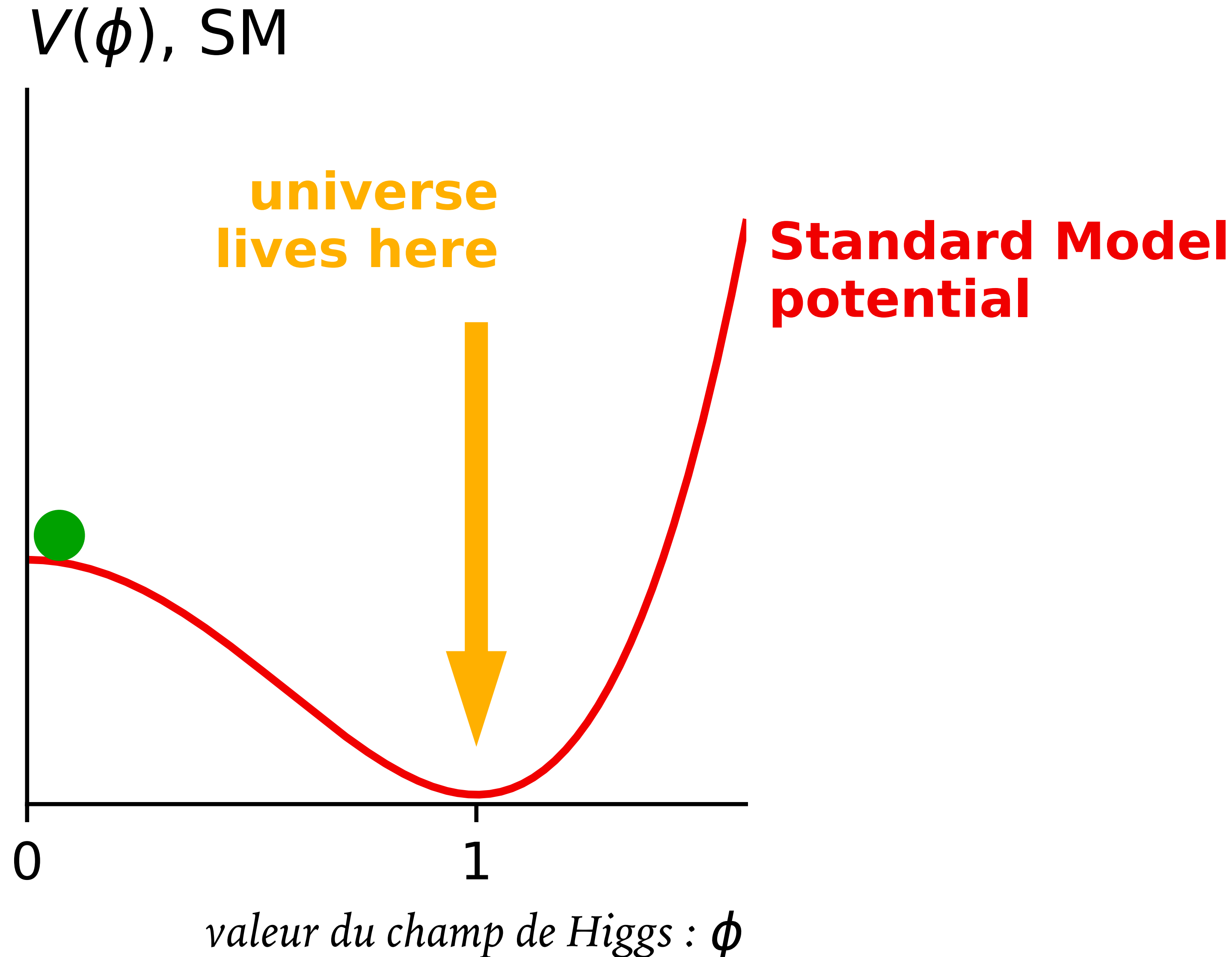
Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=95023097>

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 modèle standard**

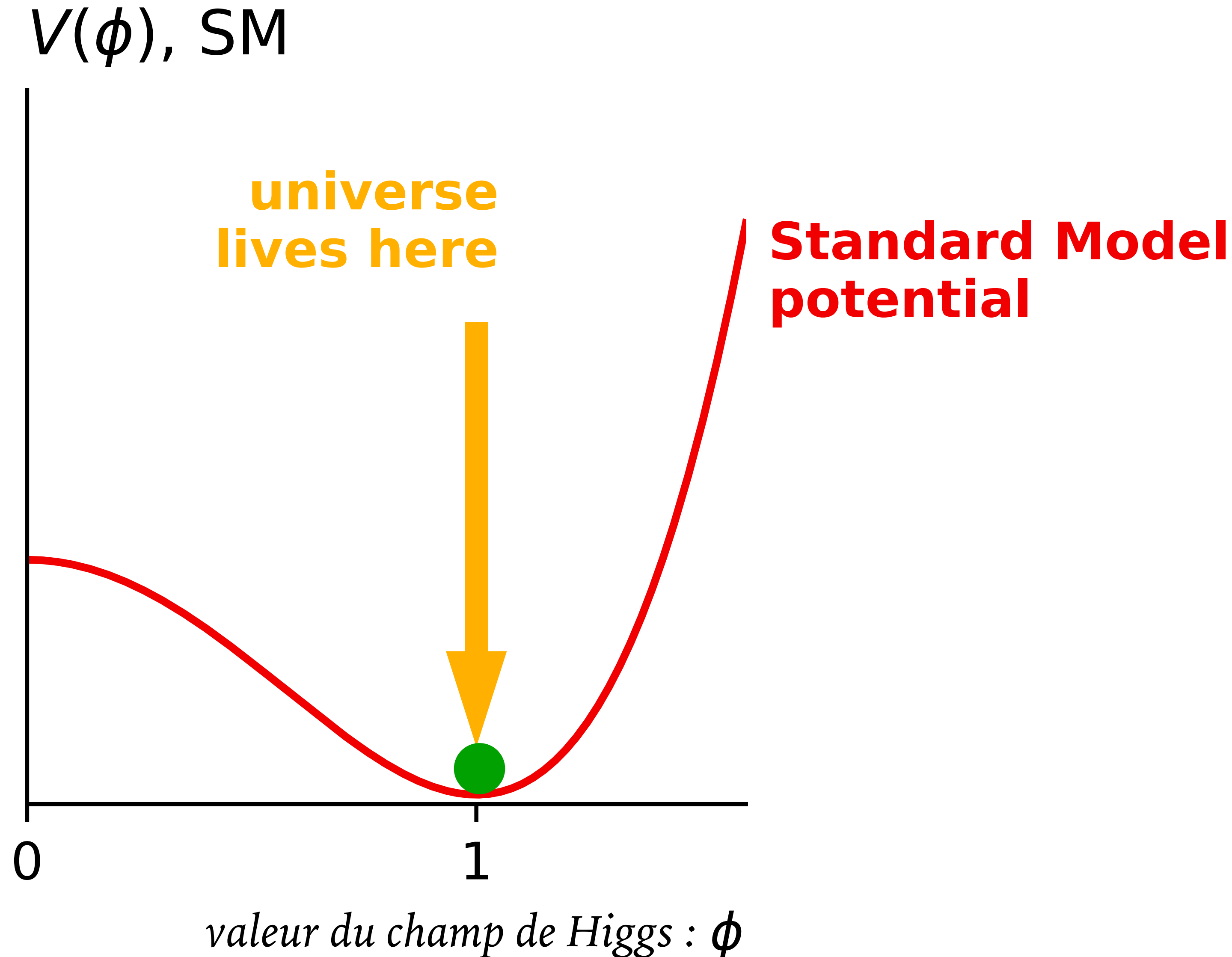
# Potentiel de Higgs



**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**

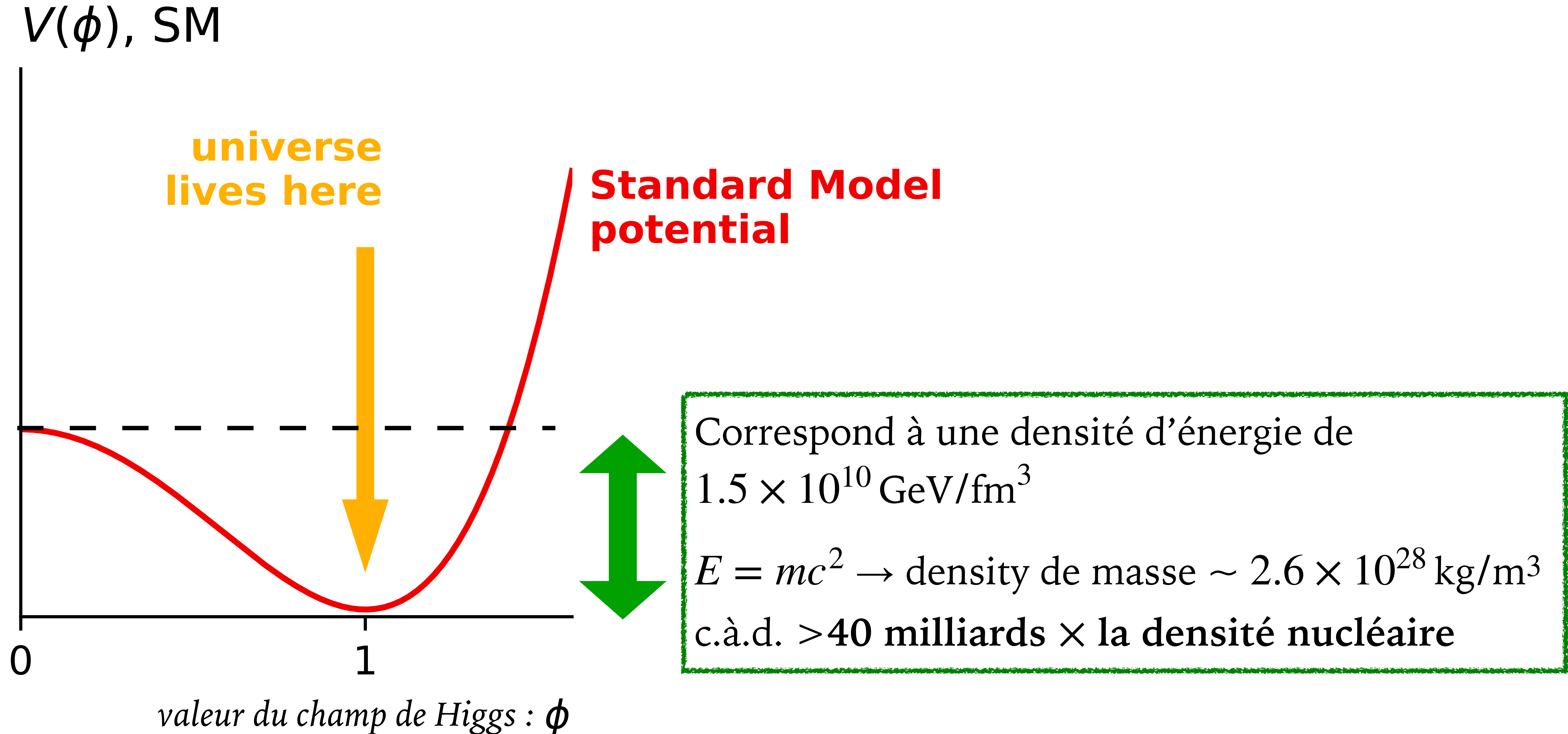
# Potentiel de Higgs



**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**

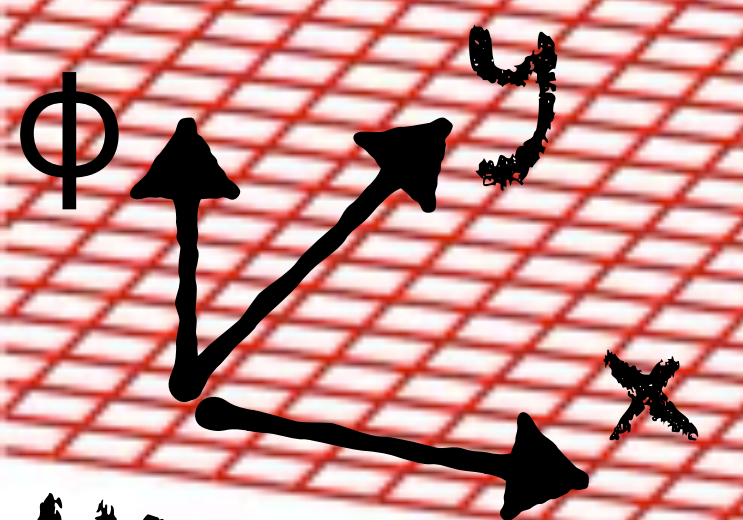


**la terre, à la densité du  
potentiel de Higgs**

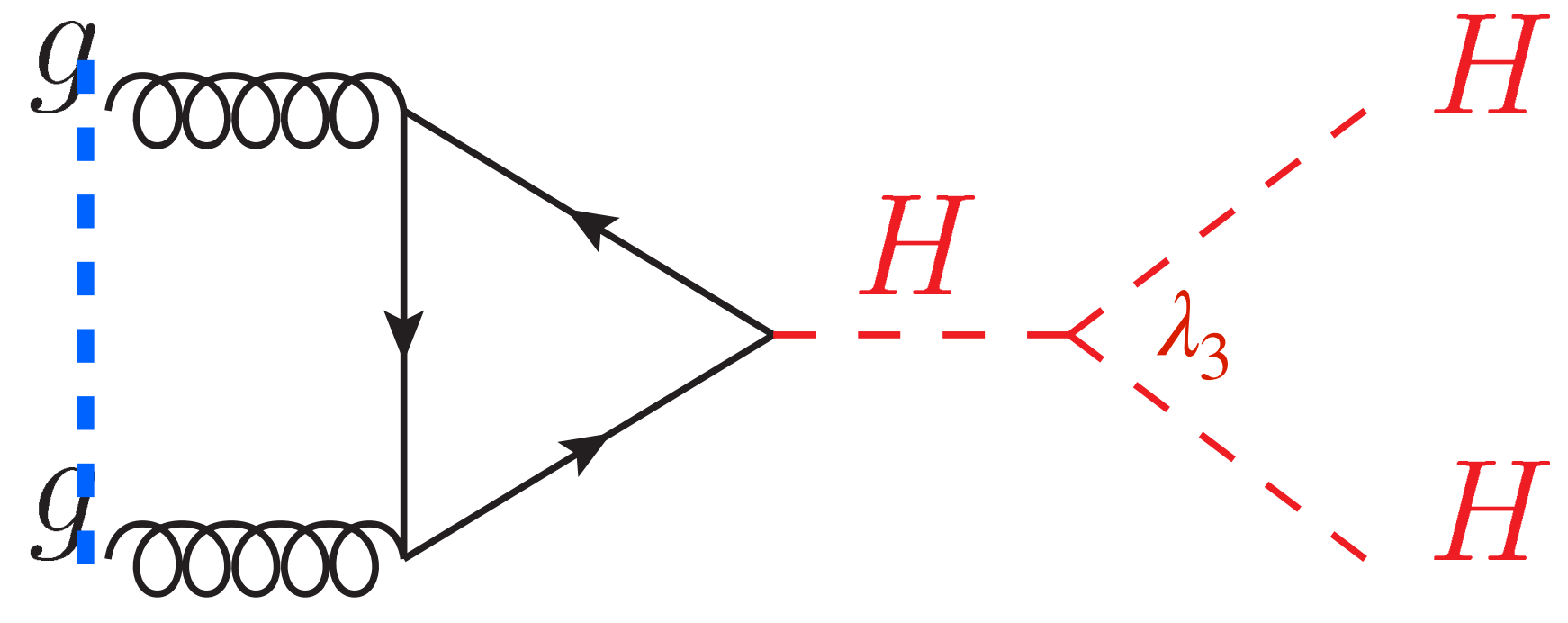
quon



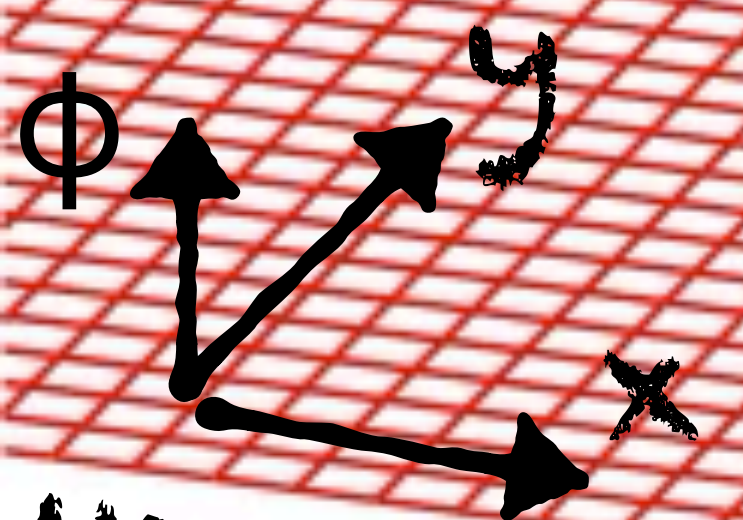
gluon



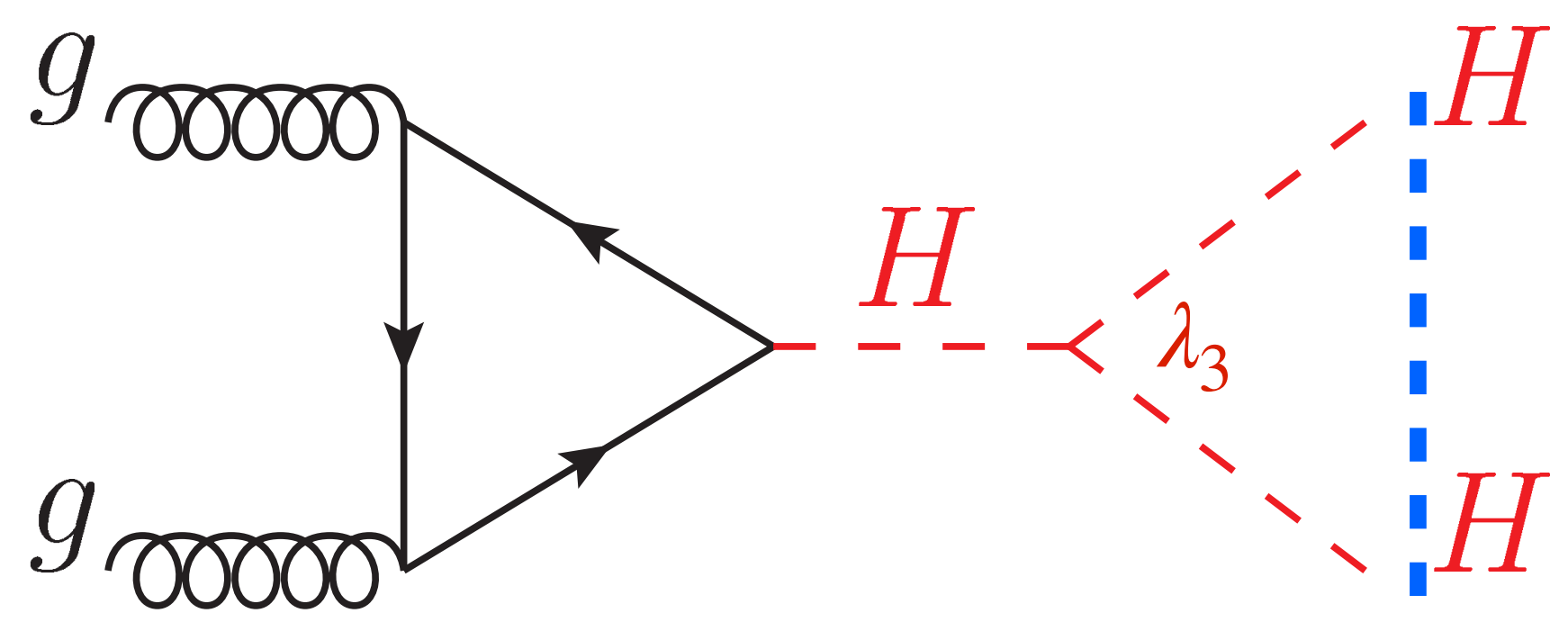
Higgs field in space



quon



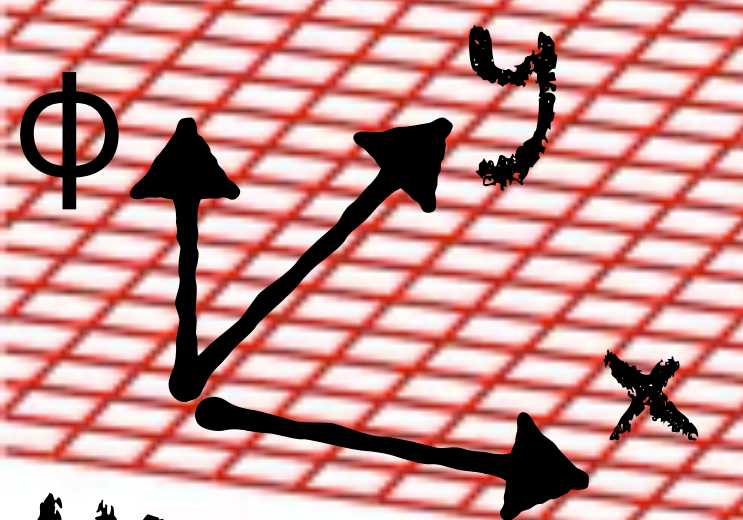
Higgs field in space



gluon

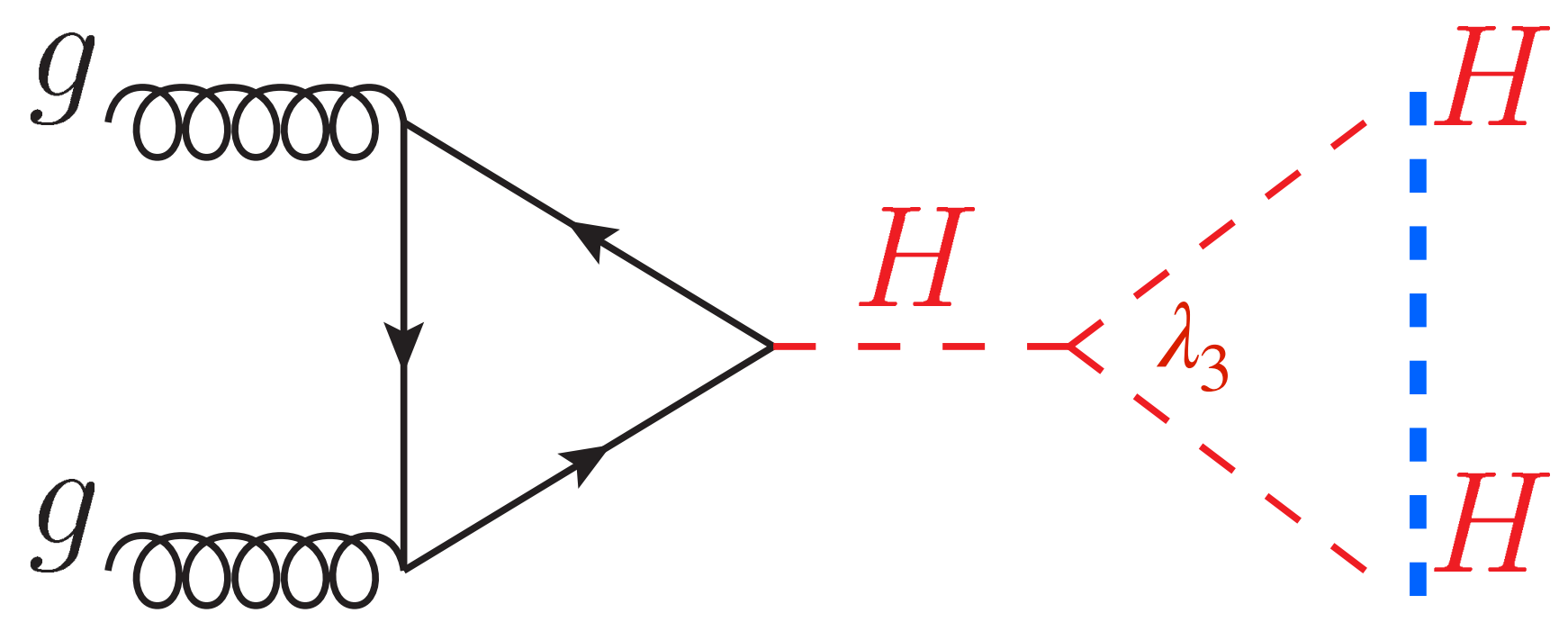


quon

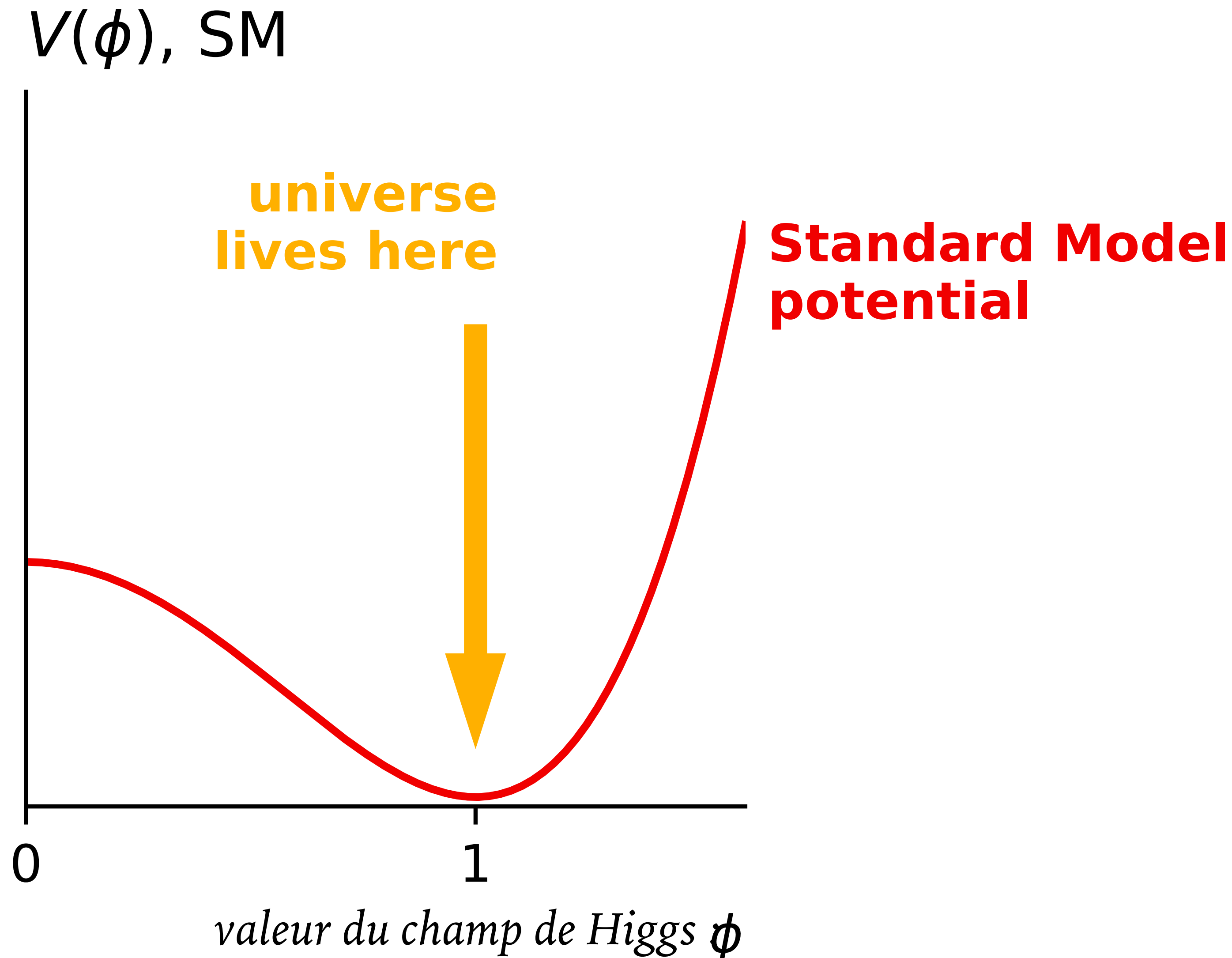


Higgs field in space

gluon



# Potentiel de Higgs



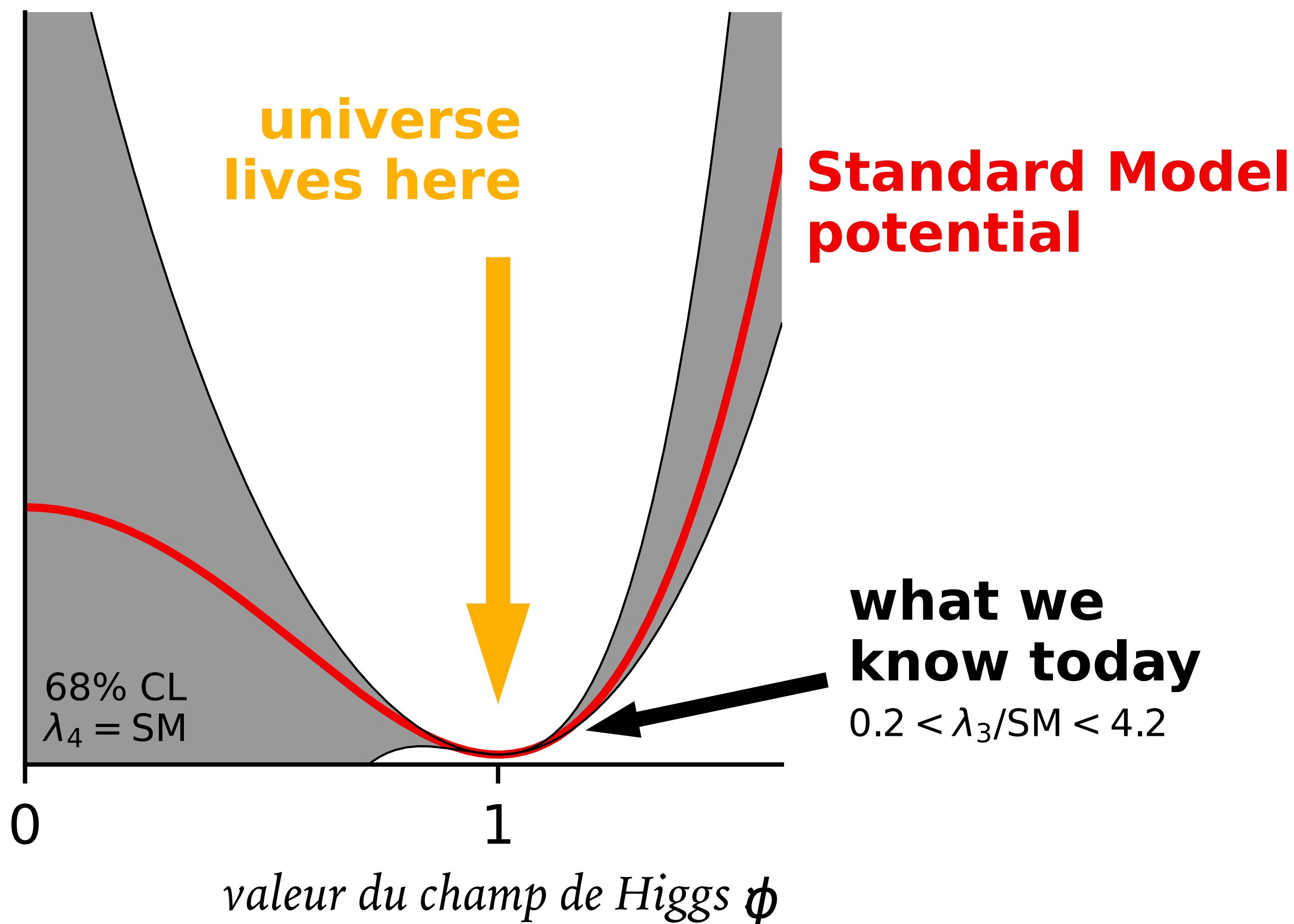
L'étude de  $H \rightarrow HH$  sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

sa troisième dérivée ( $\lambda_3$ ), c.à.d. son asymétrie au minimum

[la reconstruction du graphique suppose des dérivées  $\geq 4$  comme dans le MS]

# Potentiel de Higgs

$V(\phi)$ , today



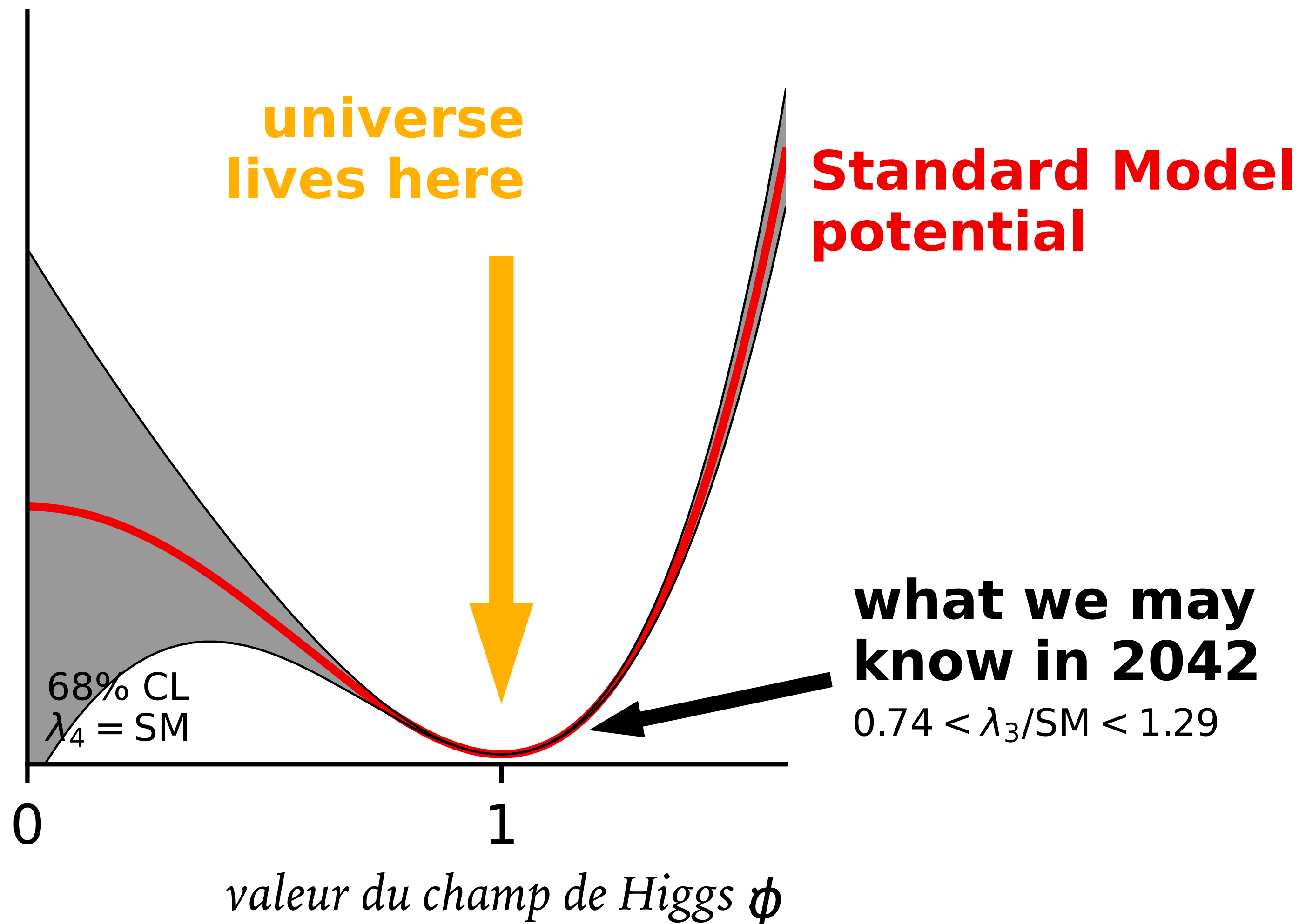
L'étude de  $H \rightarrow HH$  sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

sa troisième dérivée ( $\lambda_3$ ), c.à.d. son asymétrie au minimum

[la reconstruction du graphique suppose des dérivées  $\geq 4$  comme dans le MS]

# Potentiel de Higgs

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

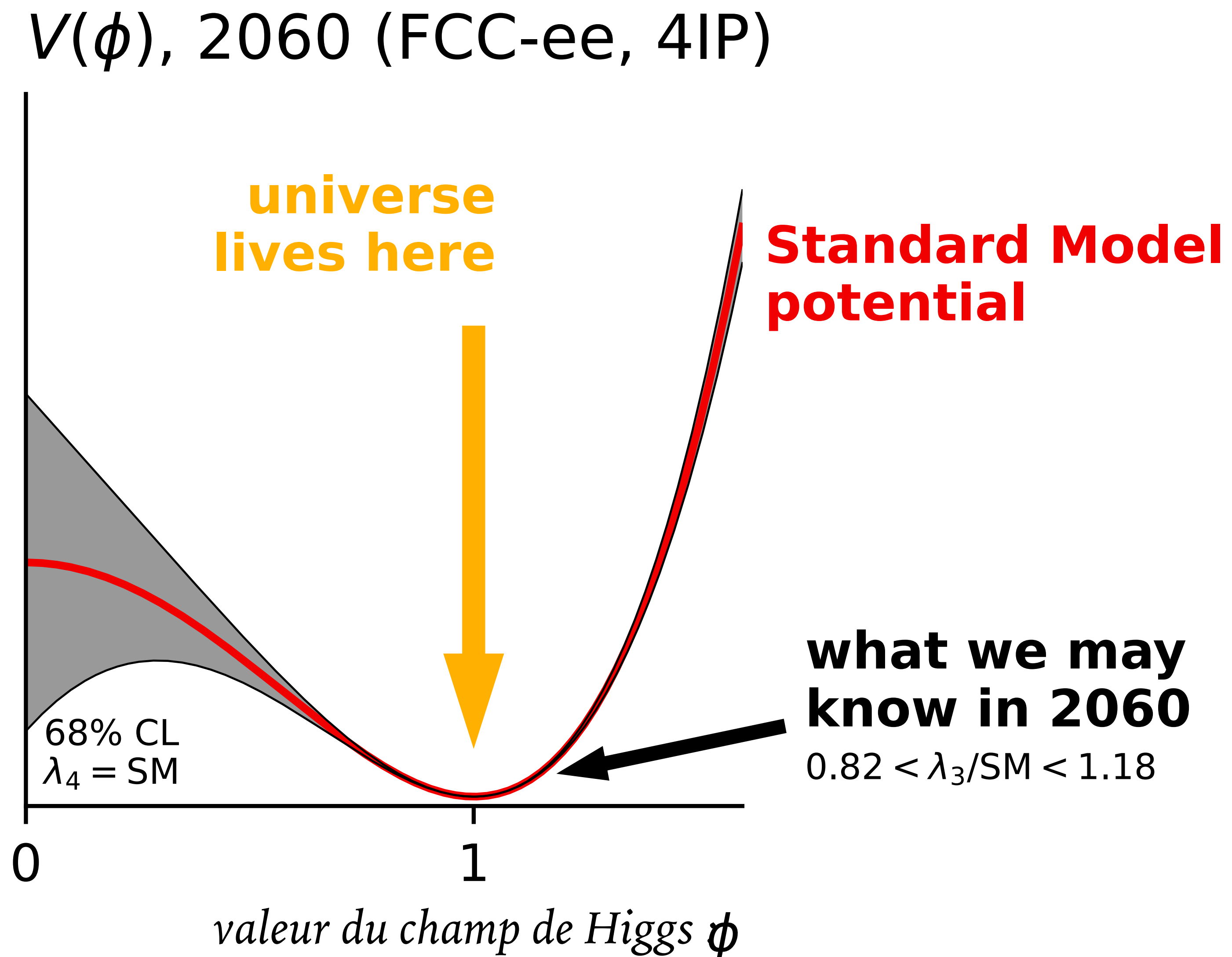


L'étude de  $H \rightarrow HH$  sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

sa troisième dérivée ( $\lambda_3$ ), c.à.d. son asymétrie au minimum

[la reconstruction du graphique suppose des dérivées  $\geq 4$  comme dans le MS]

# Potentiel de Higgs



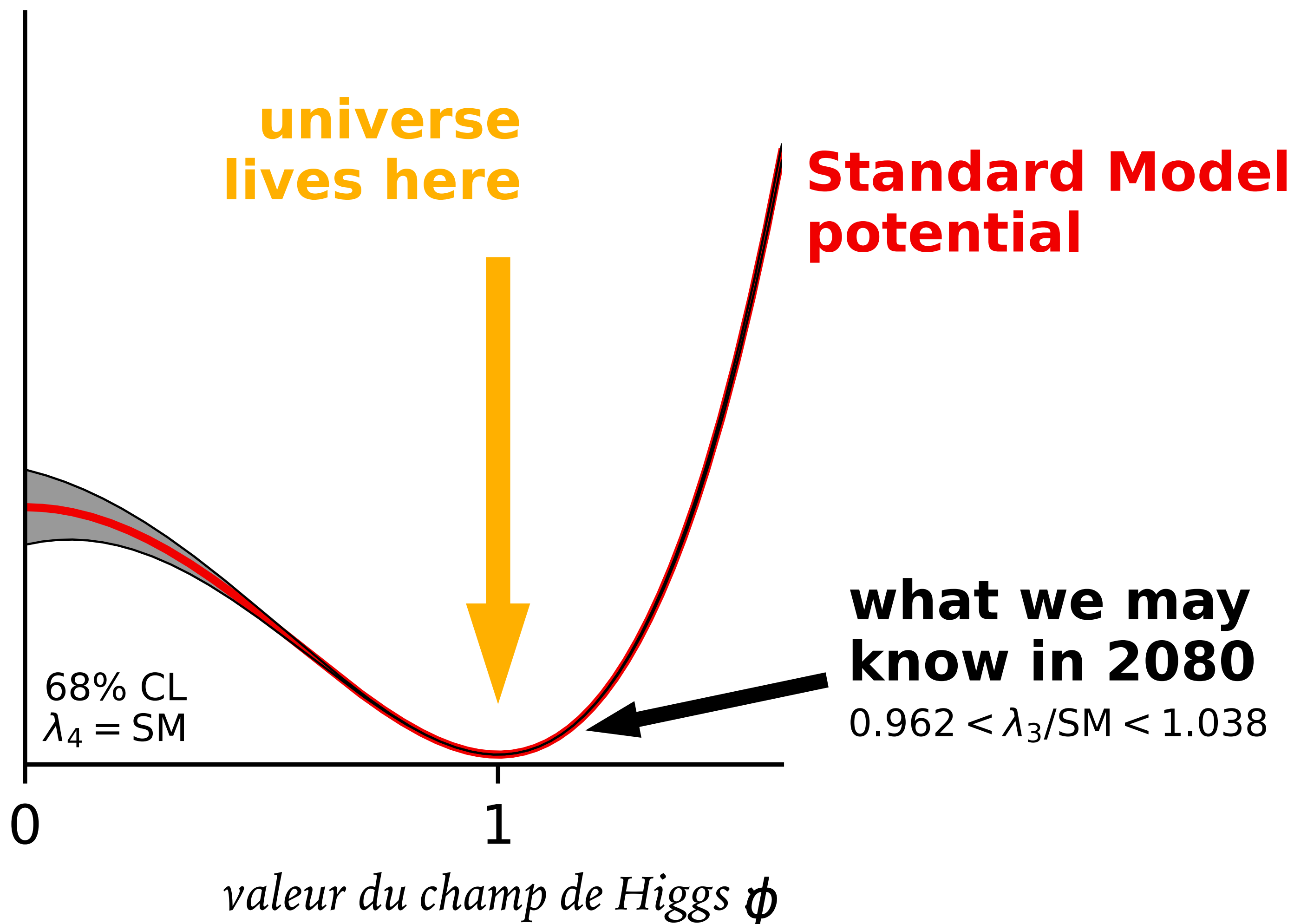
L'étude de  $H \rightarrow HH$  sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

sa troisième dérivée ( $\lambda_3$ ), c.à.d. son asymétrie au minimum

[la reconstruction du graphique suppose des dérivées  $\geq 4$  comme dans le MS]

# Potentiel de Higgs

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



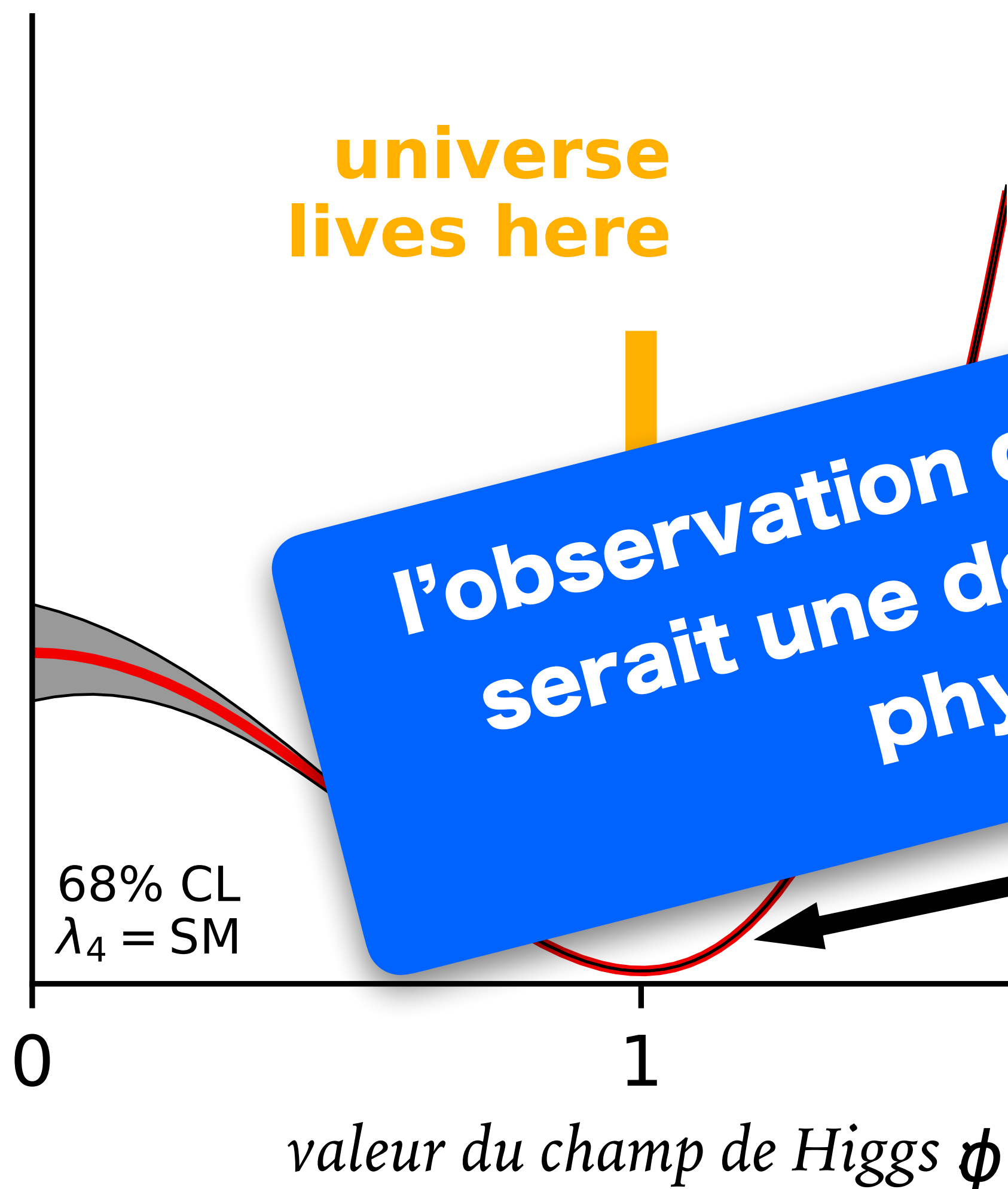
L'étude de  $H \rightarrow HH$  sonde une propriété mathématique spécifique de la forme du potentiel:

sa troisième dérivée ( $\lambda_3$ ), c.à.d. son asymétrie au minimum

[la reconstruction du graphique suppose des dérivées  $\geq 4$  comme dans le MS]

# Potentiel de Higgs

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



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

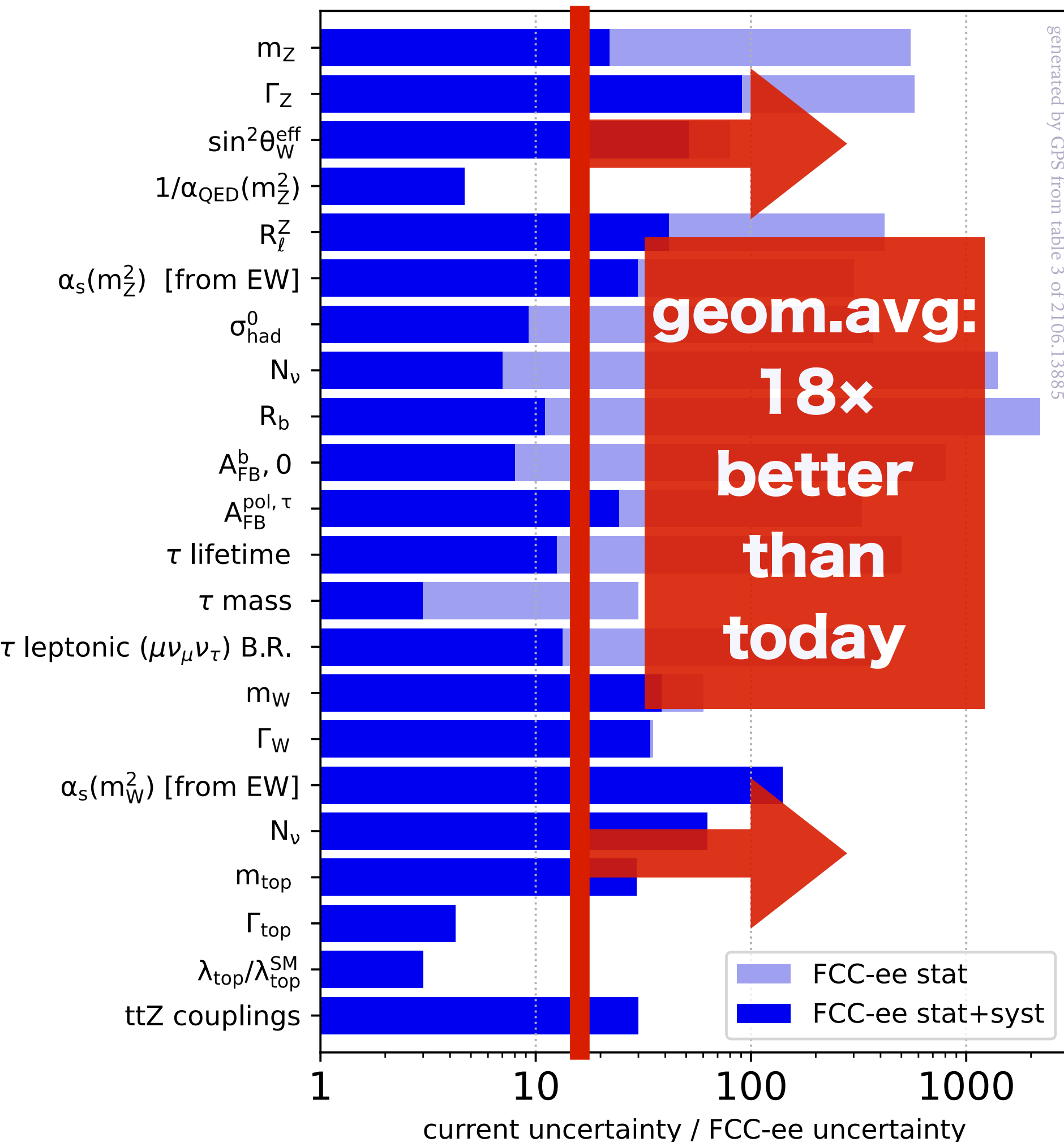
**what we may know in 2080**  
 $0.962 < \lambda_3/\text{SM} < 1.038$

L'étude de  $H \rightarrow HH$  sonde une propriété systématique de la forme du potentiel. L'asymétrie au minimum ( $\lambda_3$ ),

[la reconstruction du graphique suppose des dérivées  $\geq 4$  comme dans le MS]

# la précision au FCC-ee, qui 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 systématiques (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

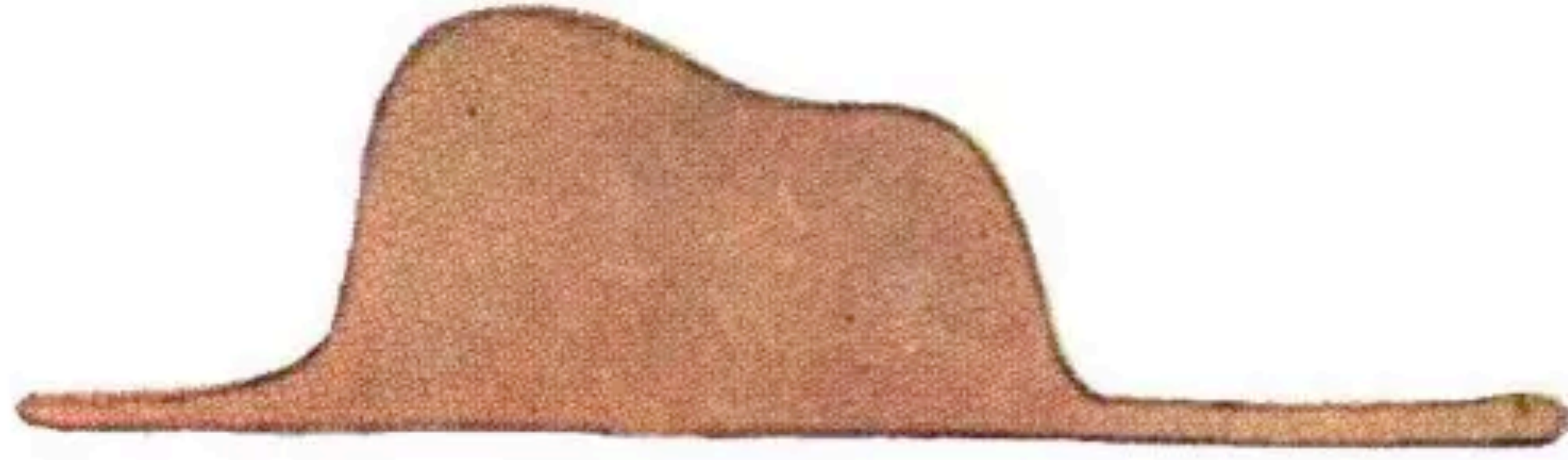
# Conclusions

---

- 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

**backup**

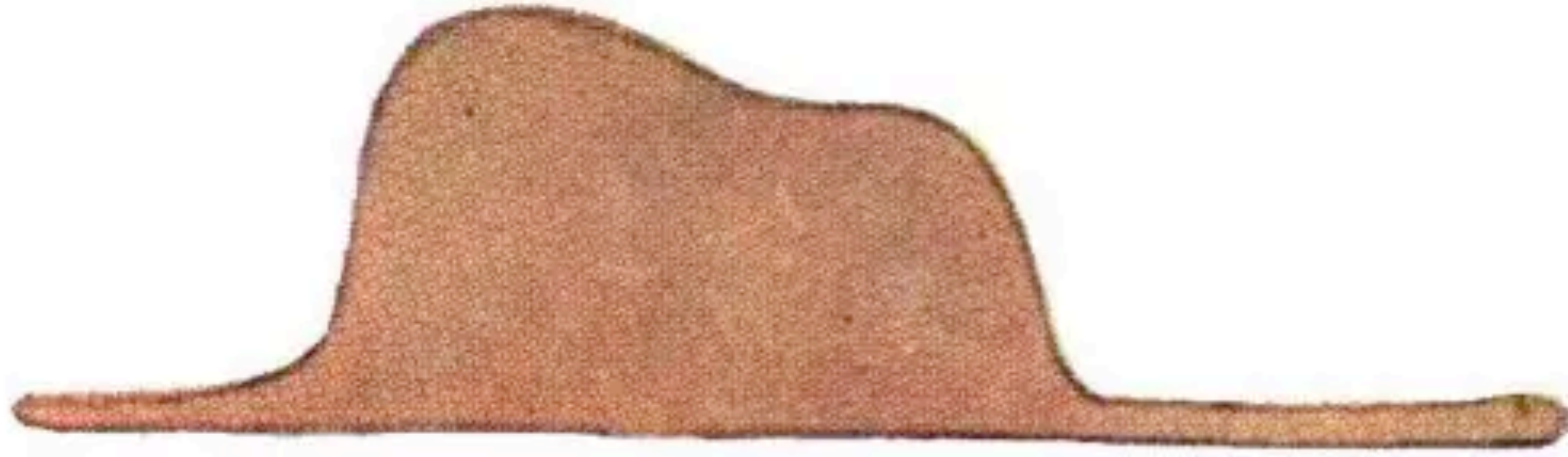
Mon dessin numéro 1



« Pourquoi un chapeau ferait-il peur ? »

*Le Petit Prince, Antoine de Saint-Exupéry*

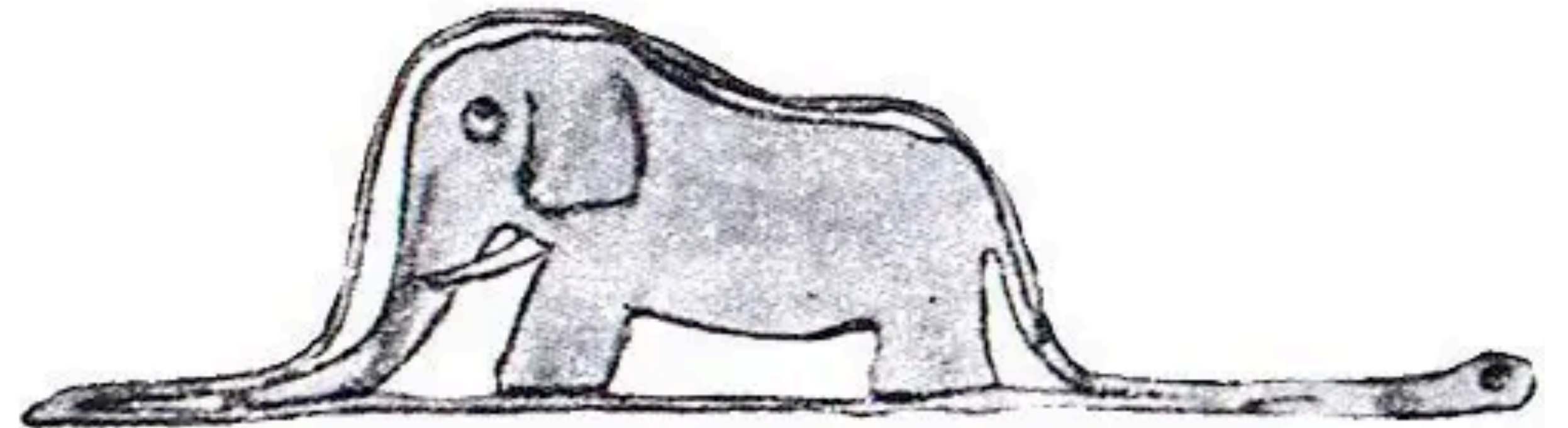
Mon dessin numéro 1



« Pourquoi un chapeau ferait-il peur ? »

*Le Petit Prince, Antoine de Saint-Exupéry*

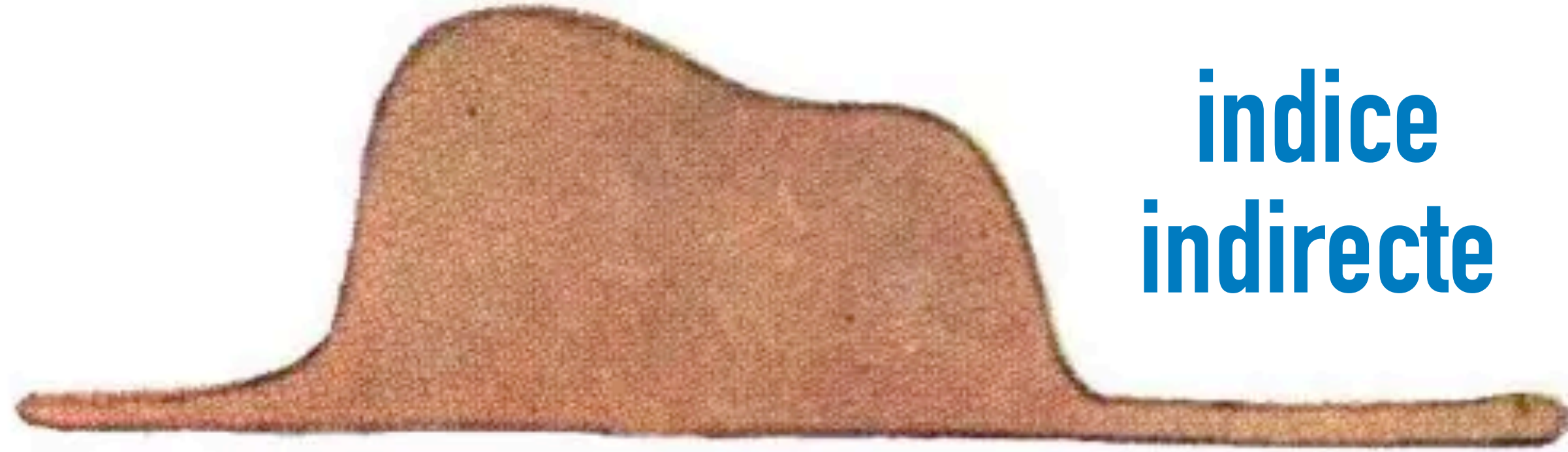
« Mon dessin ne représentait pas un chapeau. Il représentait un serpent boa qui digérait un éléphant. »



Mon dessin numéro 2

Mon dessin numéro 1

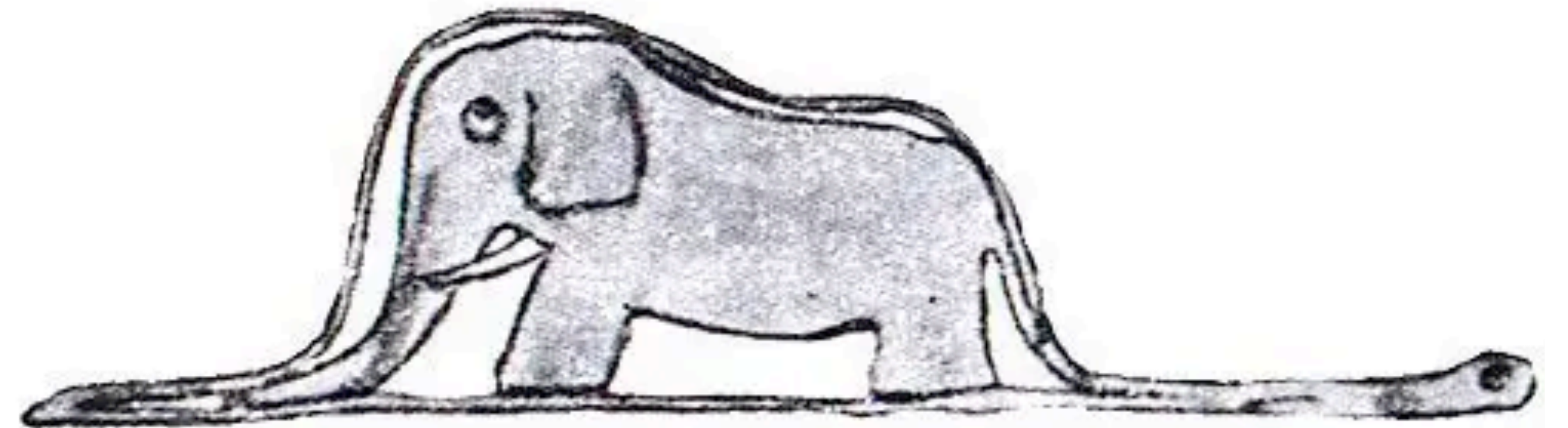
**indice  
indirecte**



« Pourquoi un chapeau ferait-il peur ? »

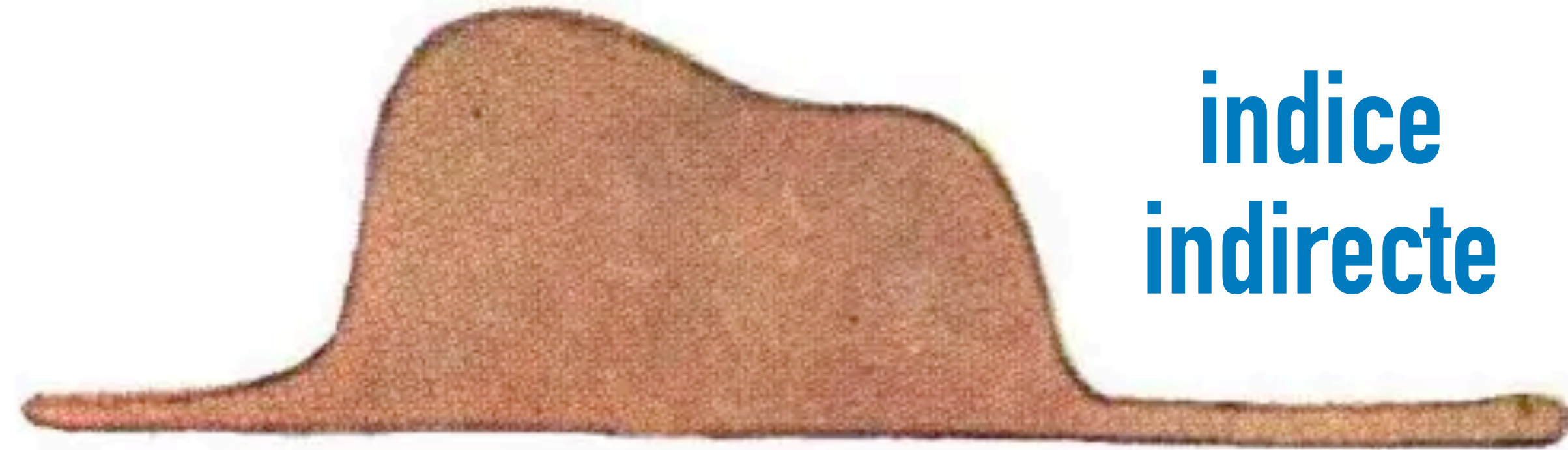
*Le Petit Prince, Antoine de Saint-Exupéry*

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



Mon dessin numéro 2

Mon dessin numéro 1

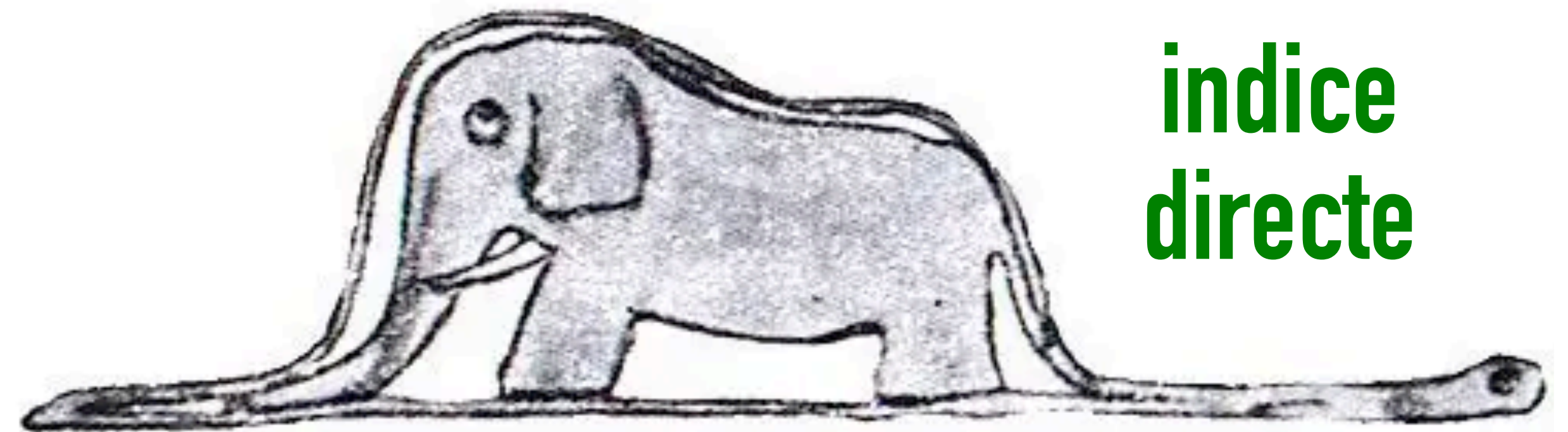


**indice  
indirecte**

« 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. »

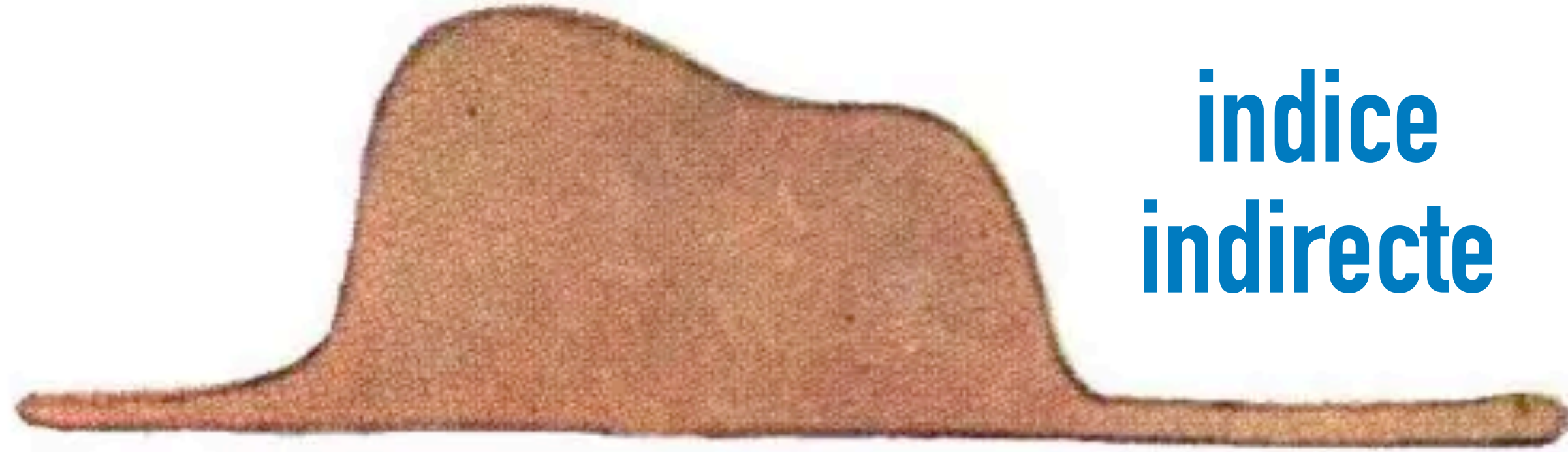


**indice  
directe**

Mon dessin numéro 2

Mon dessin numéro 1

**indice  
indirecte**

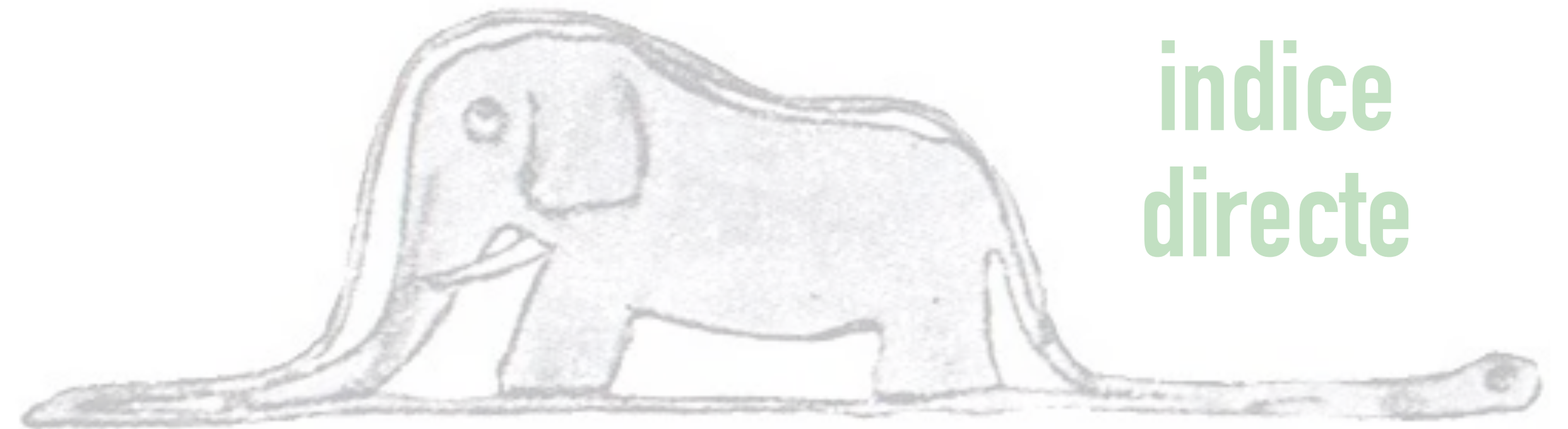


« Pourquoi un chapeau ferait-il peur ? »

*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

# 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

# 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

# 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



<https://free-press-v1-generations.3.us-east-1.amazonaws.com/images/665c051f5540-f3-185-d4a2a81c36.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*

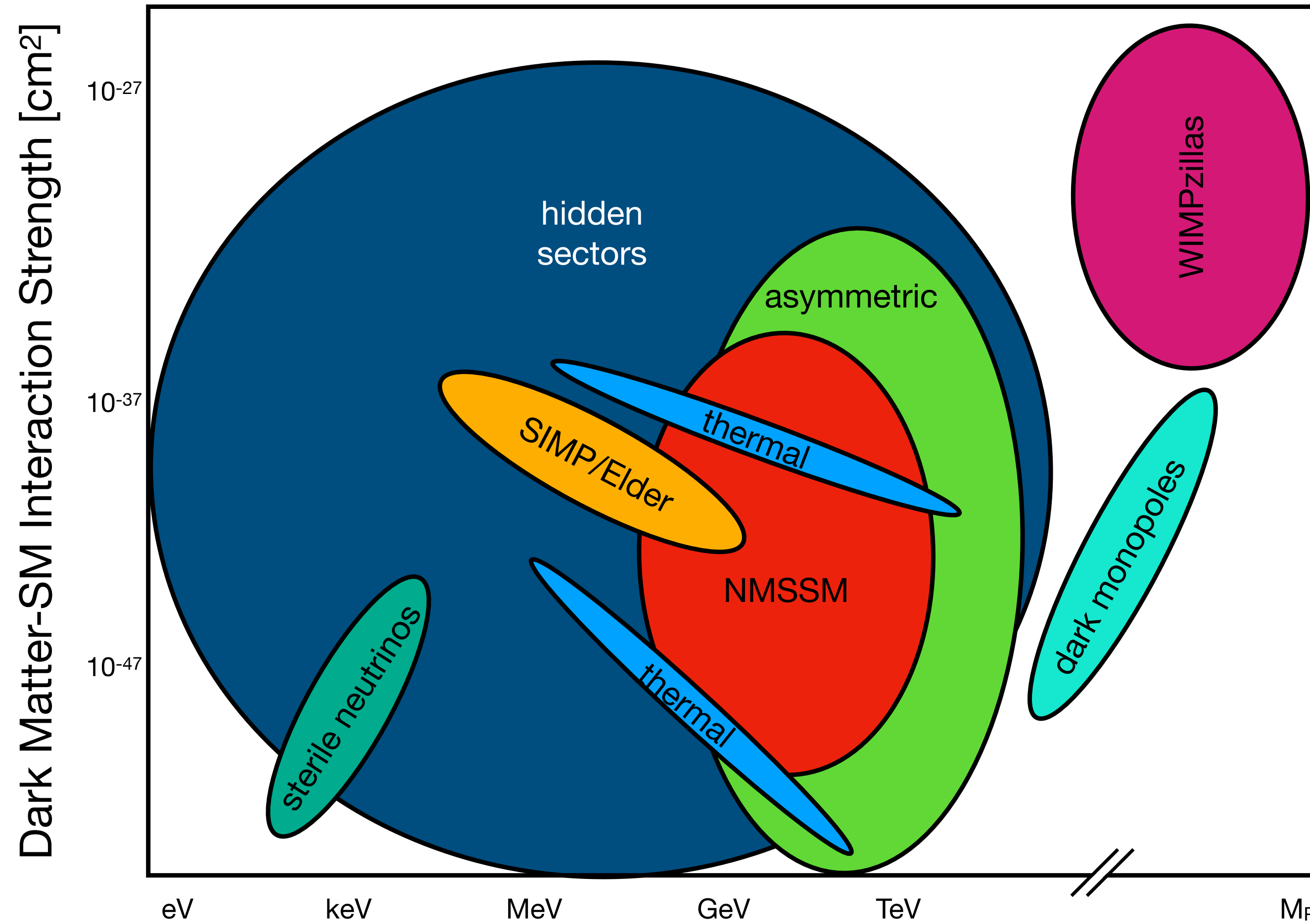
*Merci, les physiciens des particules*

*ps: svp, pas de solutions anthropiques*

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

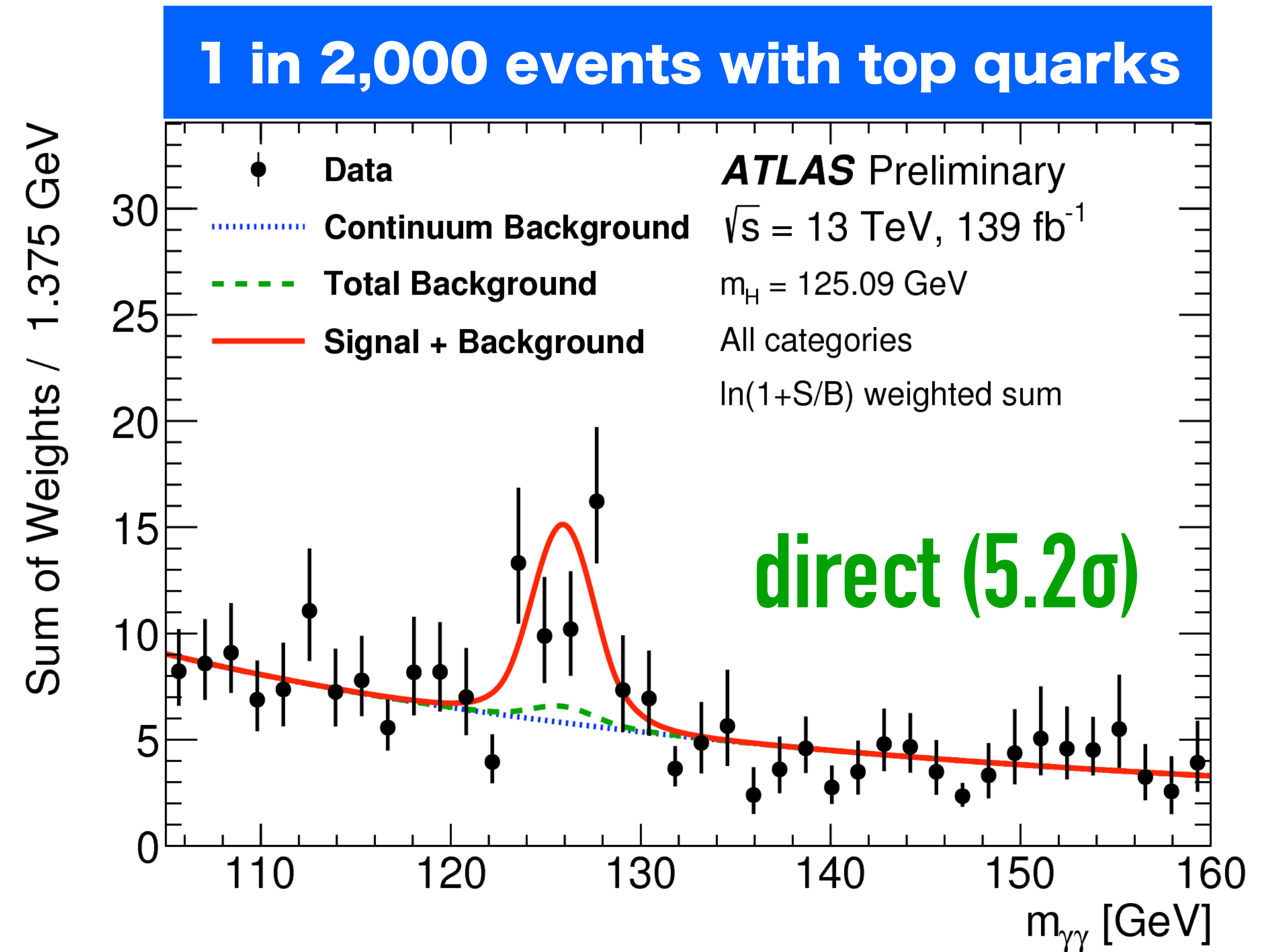
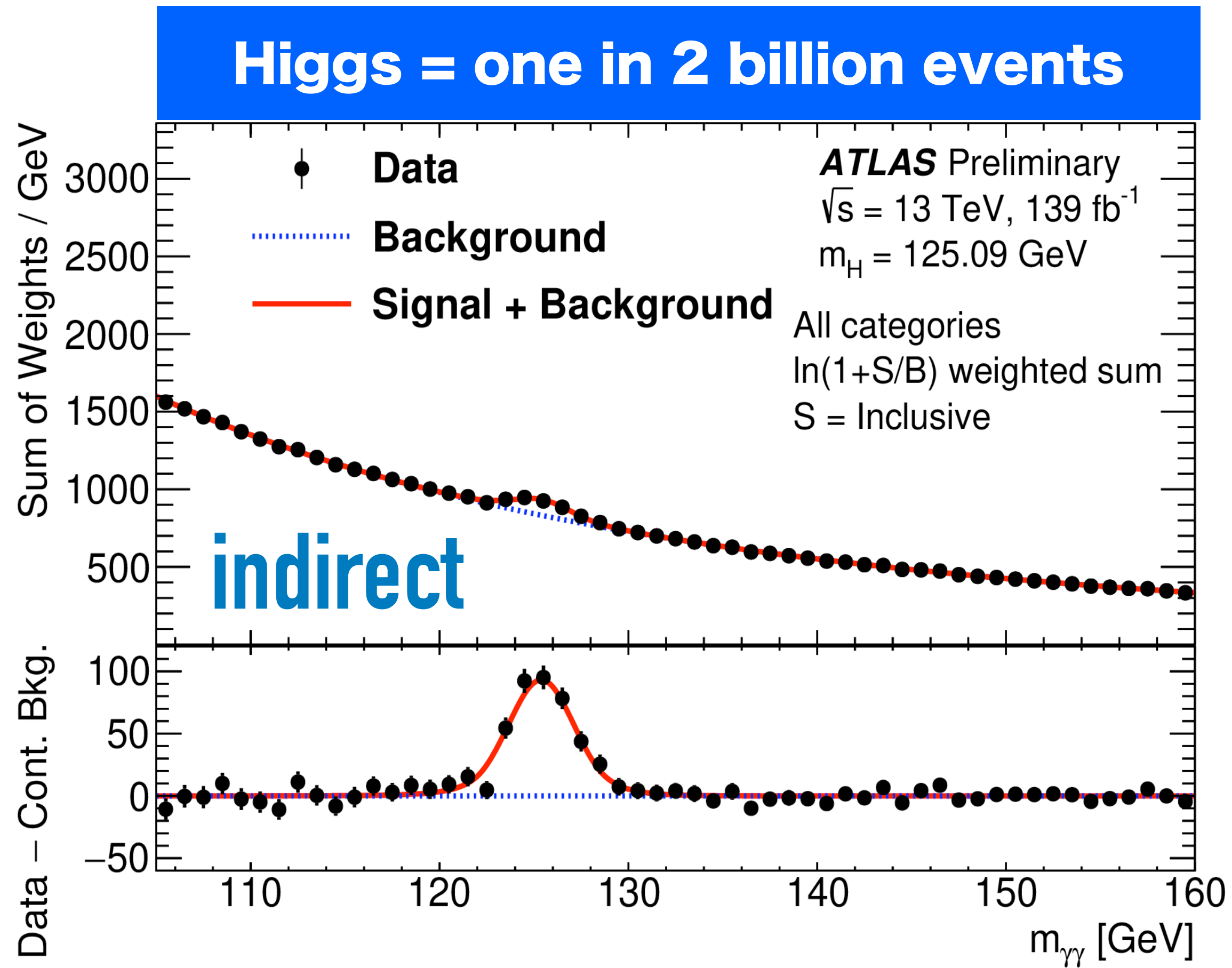
# Snowmass Dark Matter report, 2209.07426

**30 orders of magnitude in interaction strength**

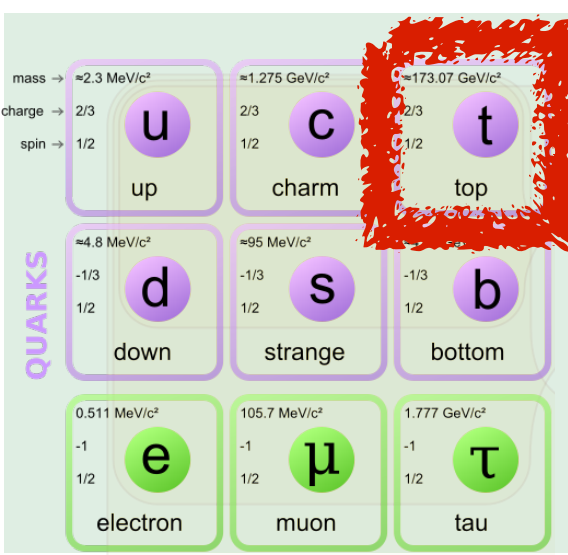


**30 orders of magnitude in mass**

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




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





*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*

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



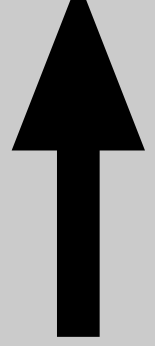
*flavour*



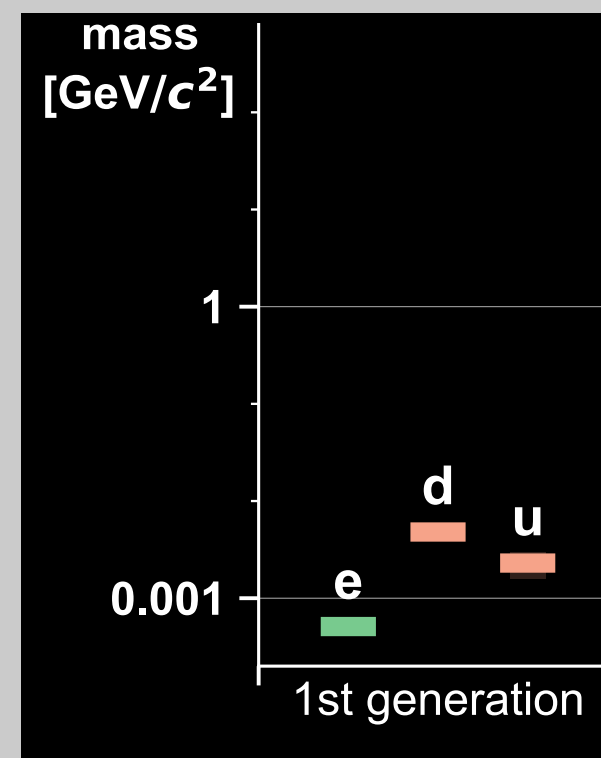
*naturalness*



*stability*



*cosmological  
constant*

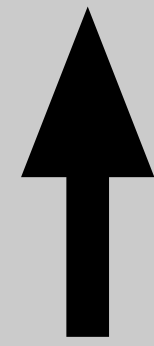


*Almost every problem of the Standard Model originates from Higgs interactions*

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



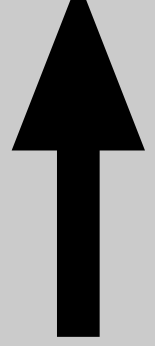
*flavour*



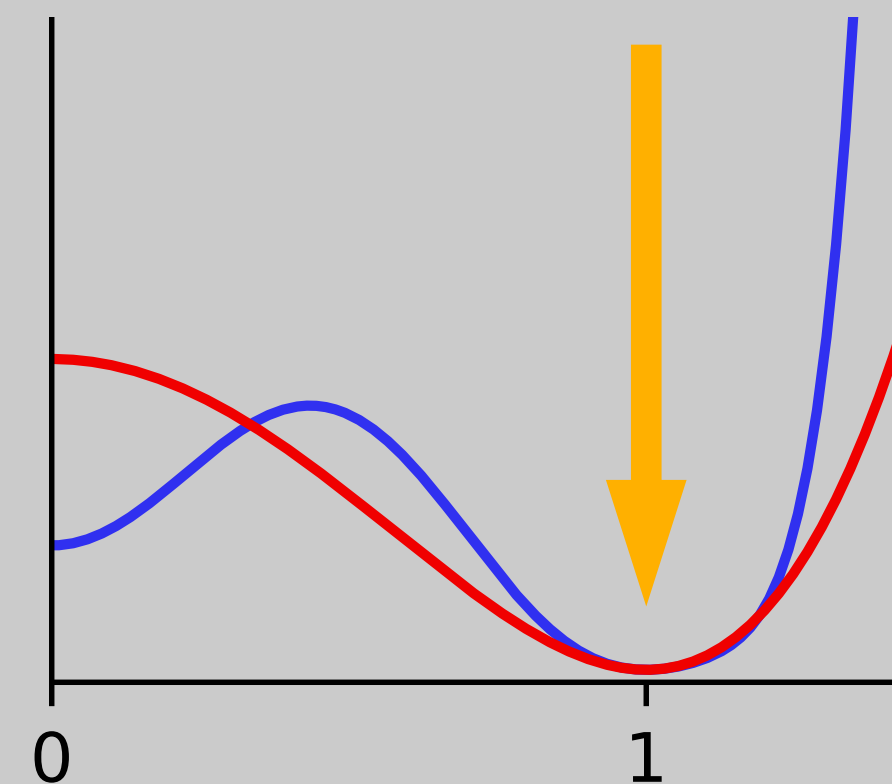
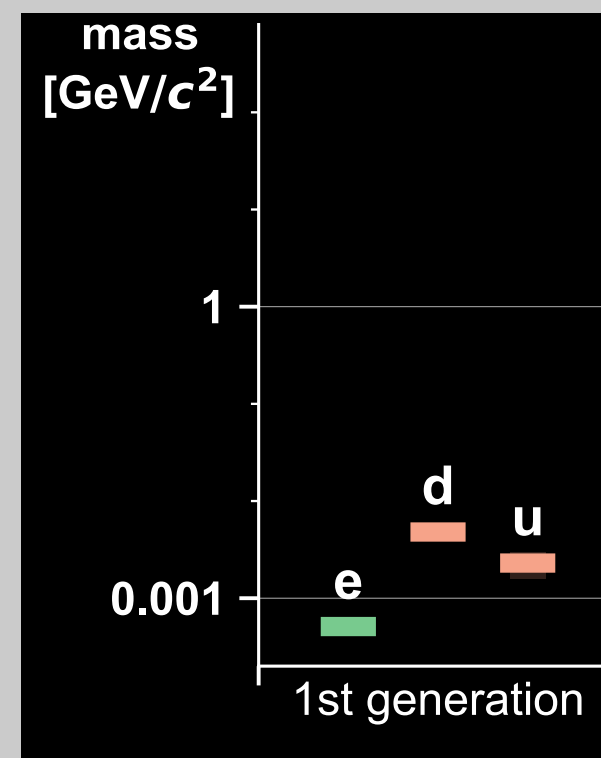
*naturalness*



*stability*

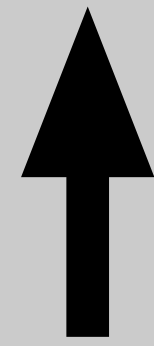


*cosmological constant*

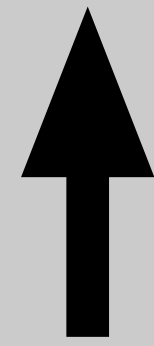


*Almost every problem of the Standard Model originates from Higgs interactions*

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



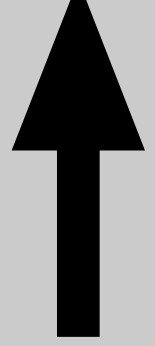
*flavour*



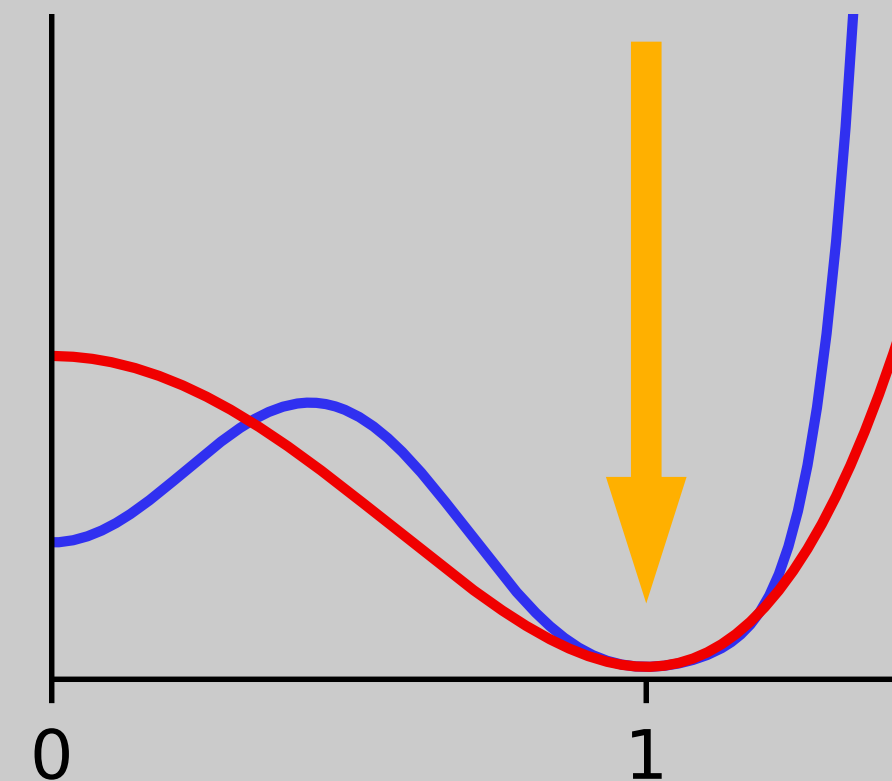
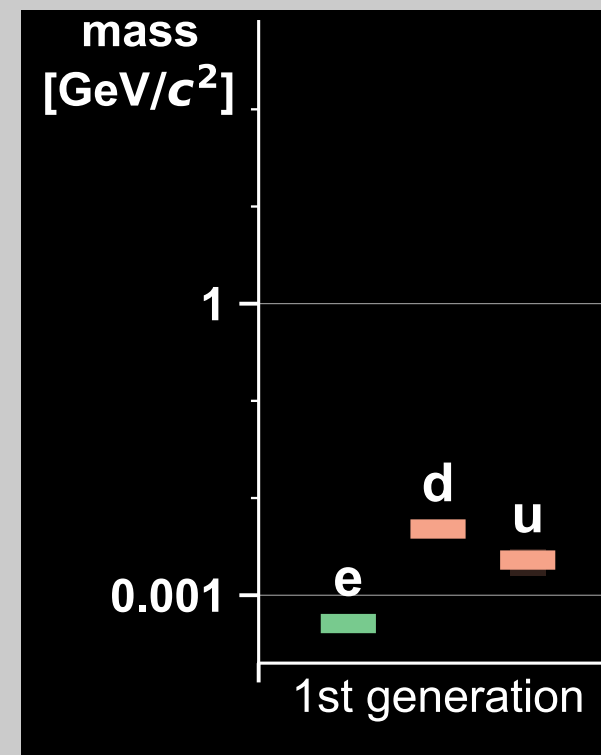
*naturalness*



*stability*

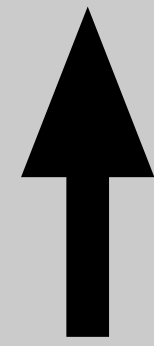


*cosmological constant*

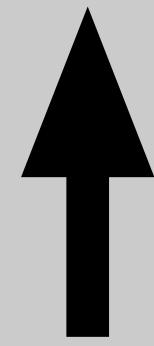


*Almost every problem of the Standard Model originates from Higgs interactions*

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



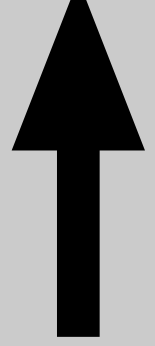
*flavour*



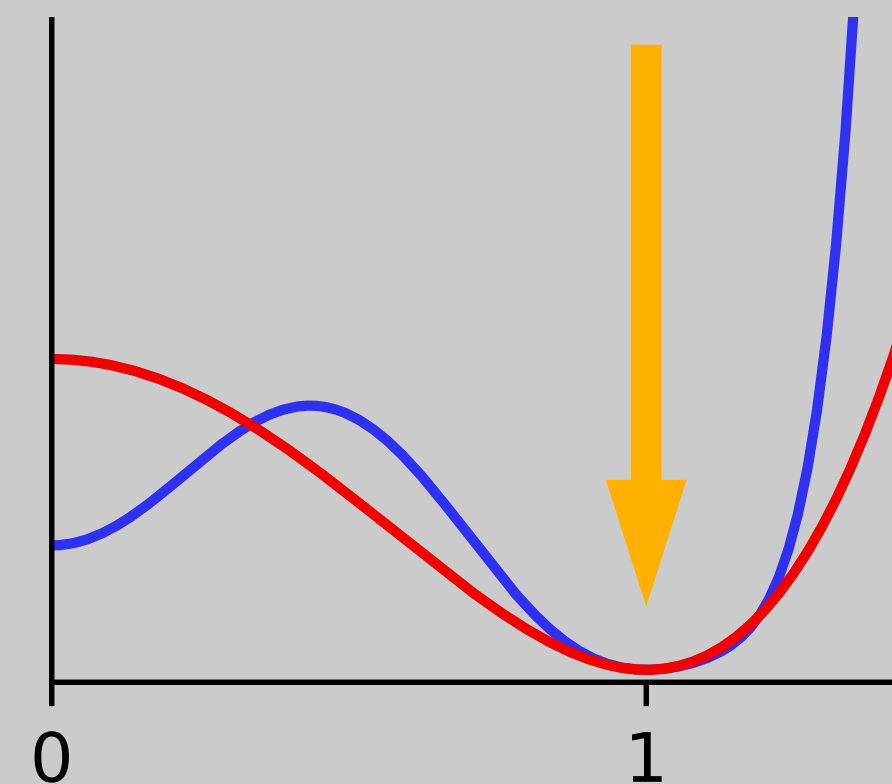
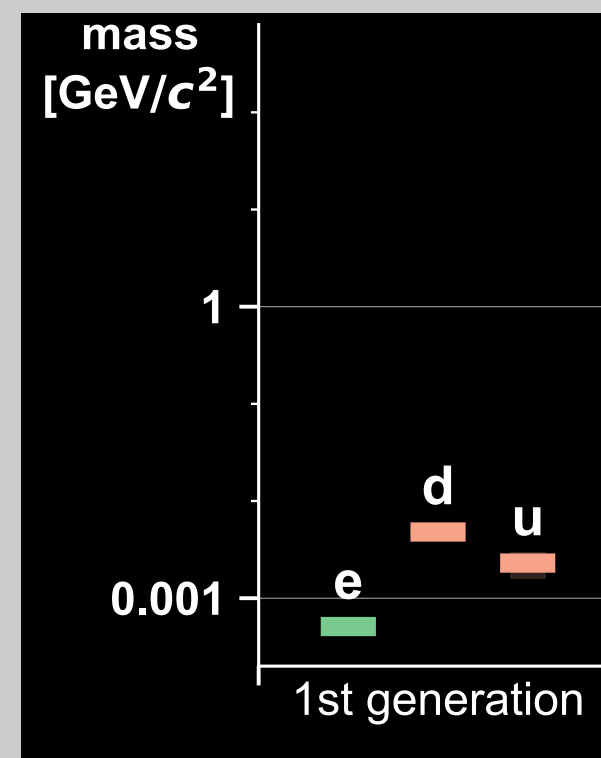
*naturalness*



*stability*

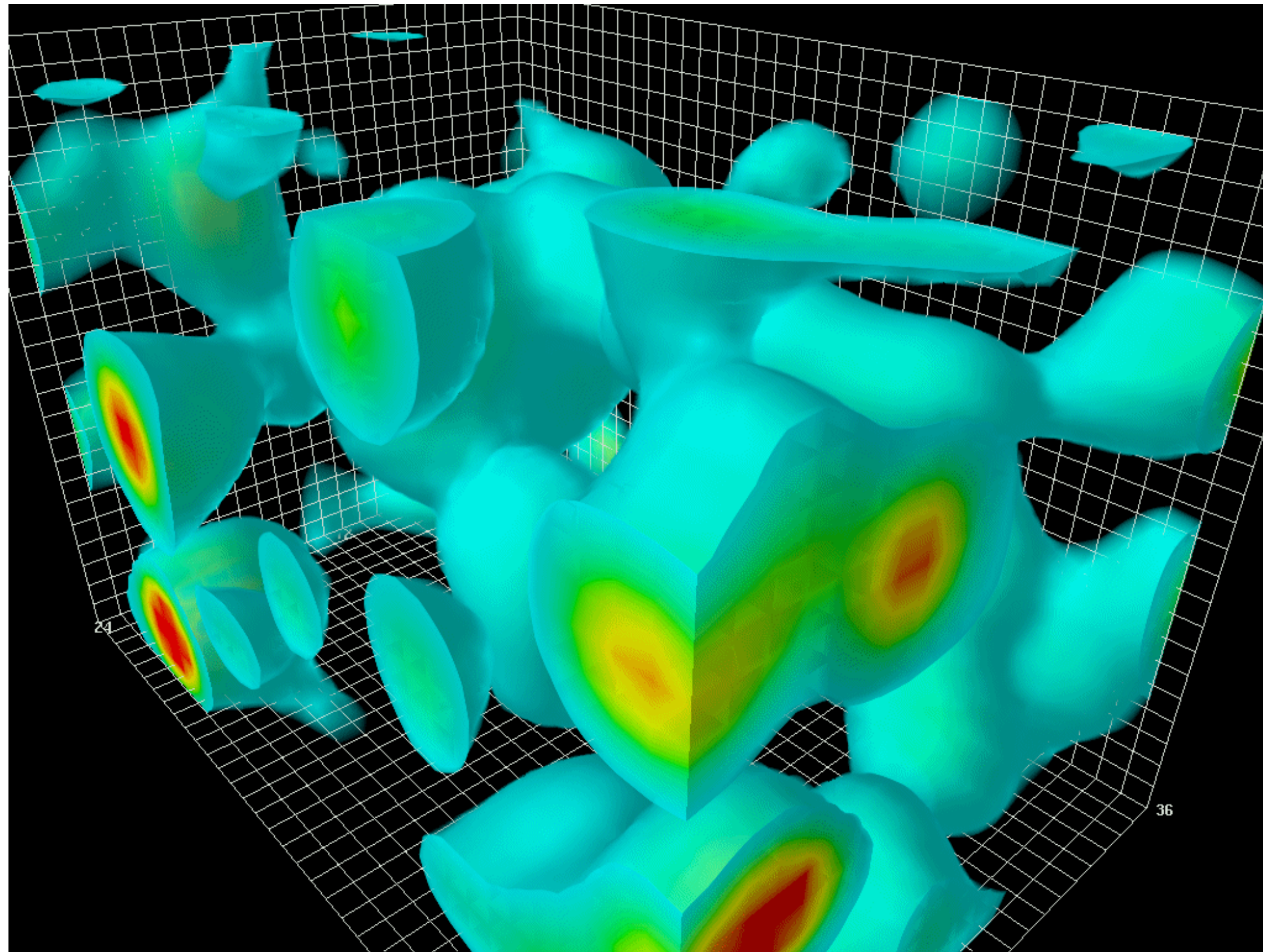


*cosmological constant*



# Naturalité en physique des particules

---



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

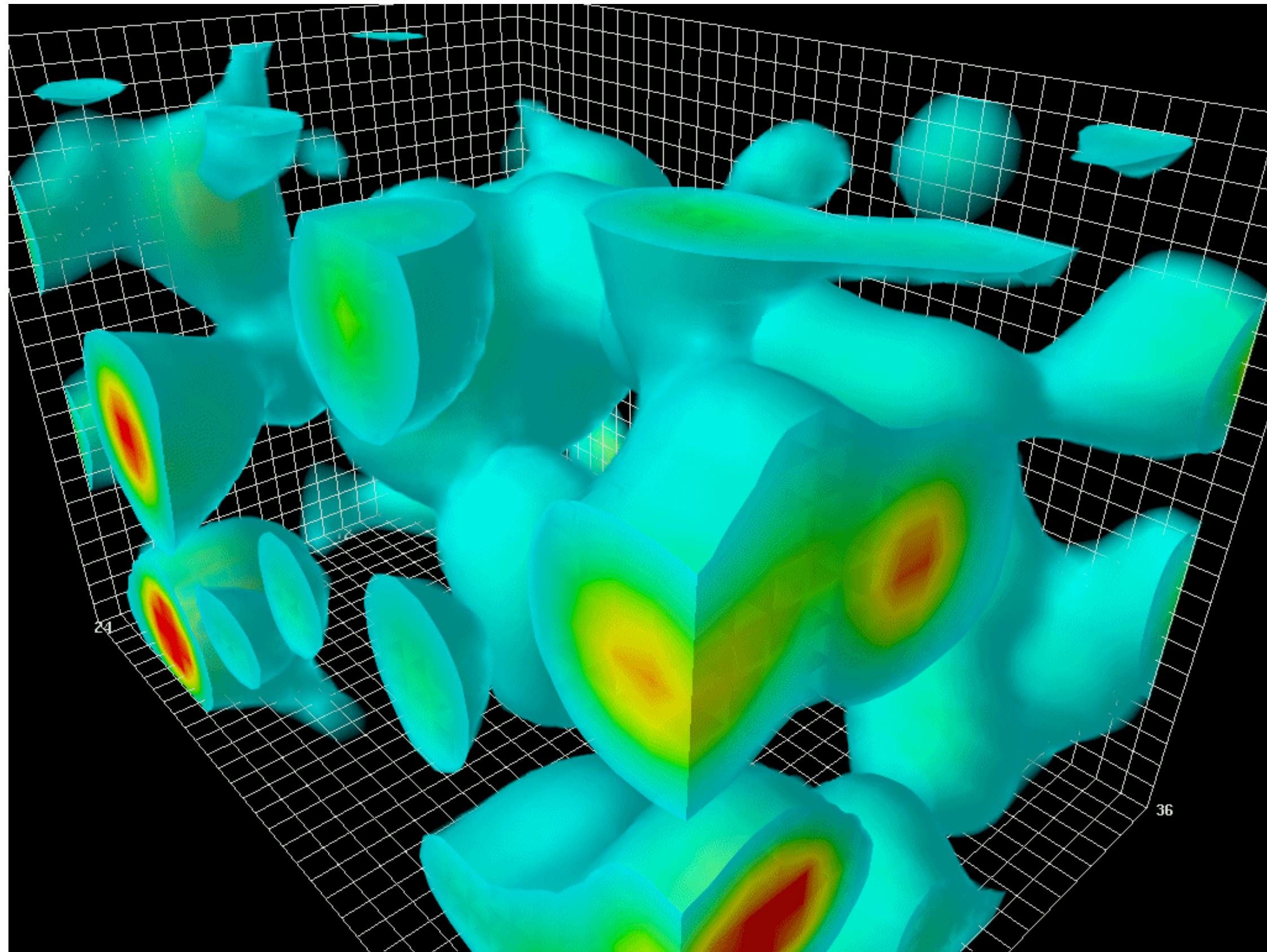
NB: shows QCD quantum fluctuations, so not directly those connected with the Higgs mass

- 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>

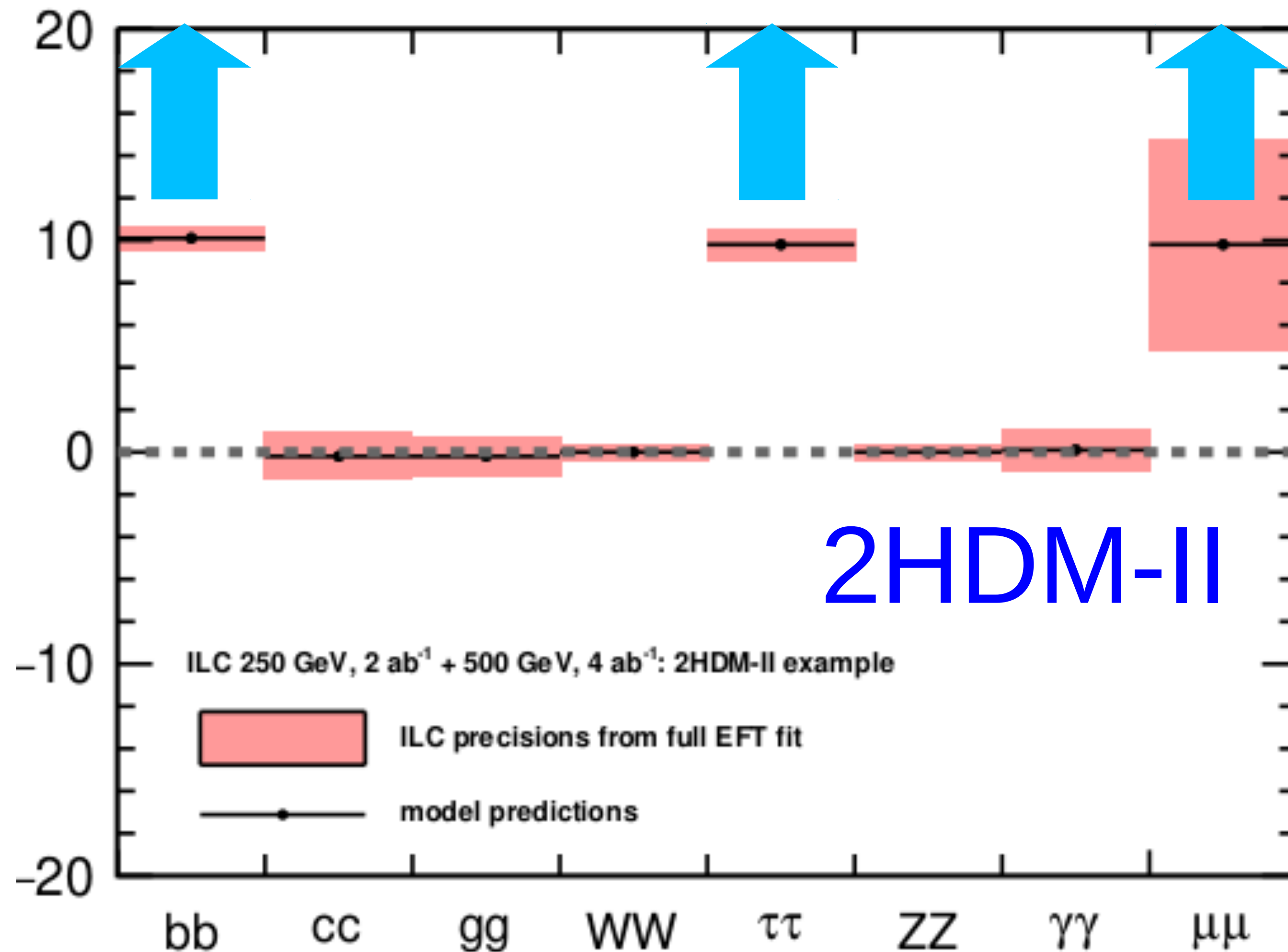
NB: shows QCD quantum fluctuations, so not directly those connected with the Higgs mass

- 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]

# 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

