



Institut national de physique nucléaire et de physique des particules

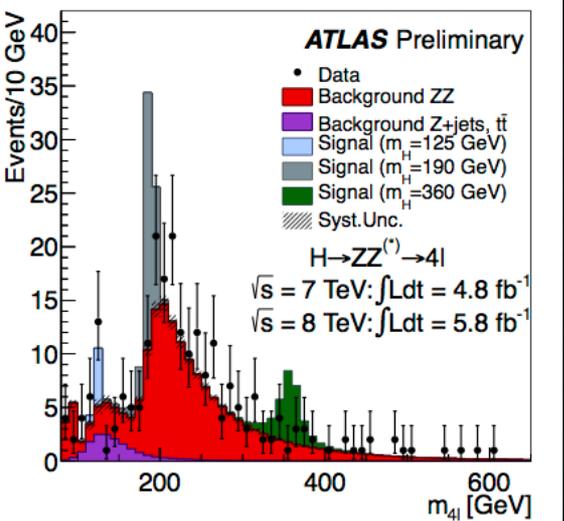
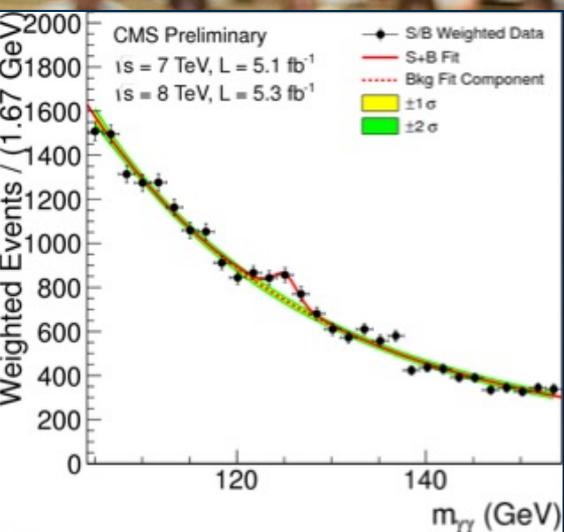
CQFD: Ce qu'il faut découvrir !

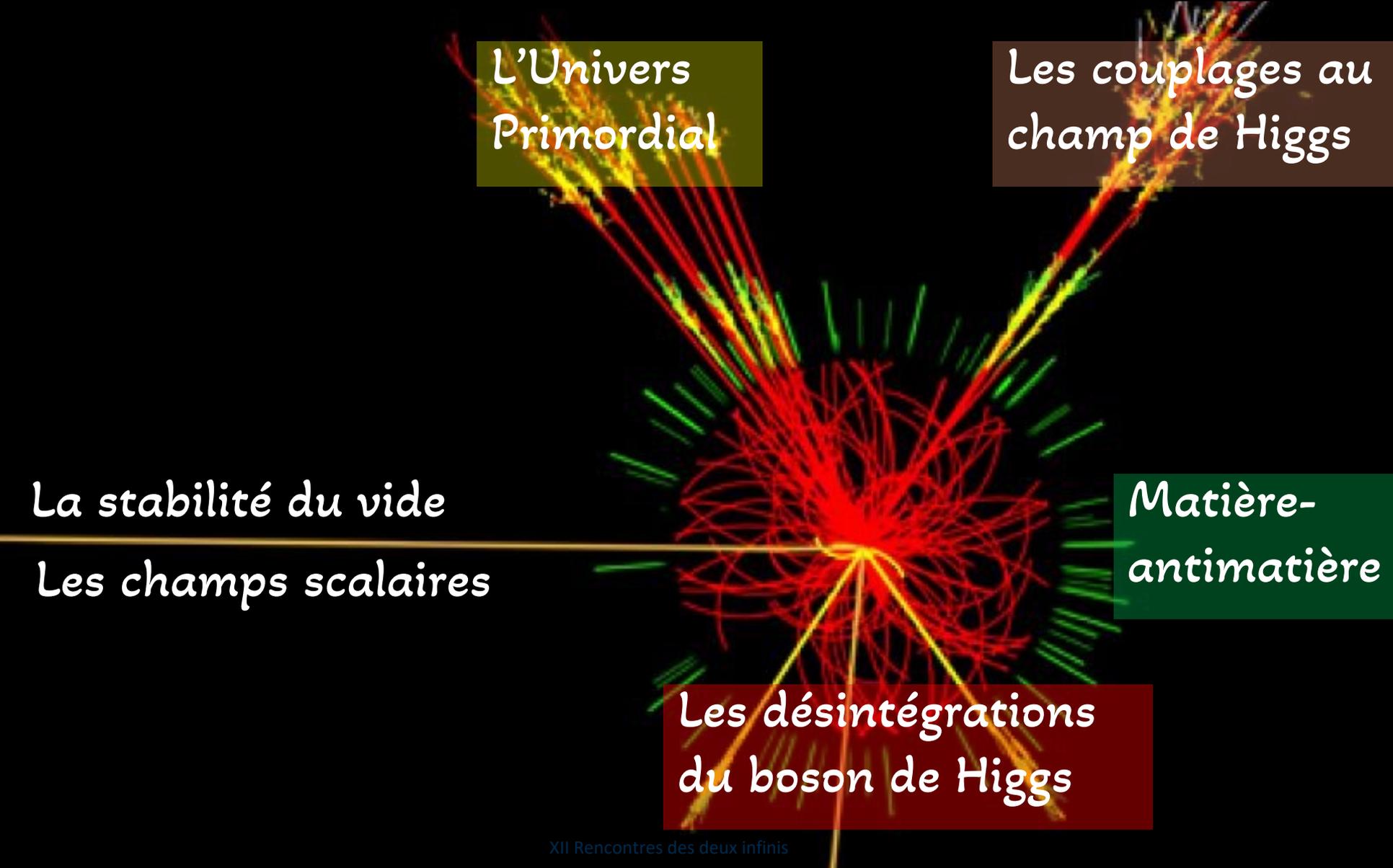
*(suite aux derniers) 12 ans de
découvertes en physique fondamentale...*



Ursula Bassler

Directrice adjointe scientifique IN2P3





L'Univers
Primordial

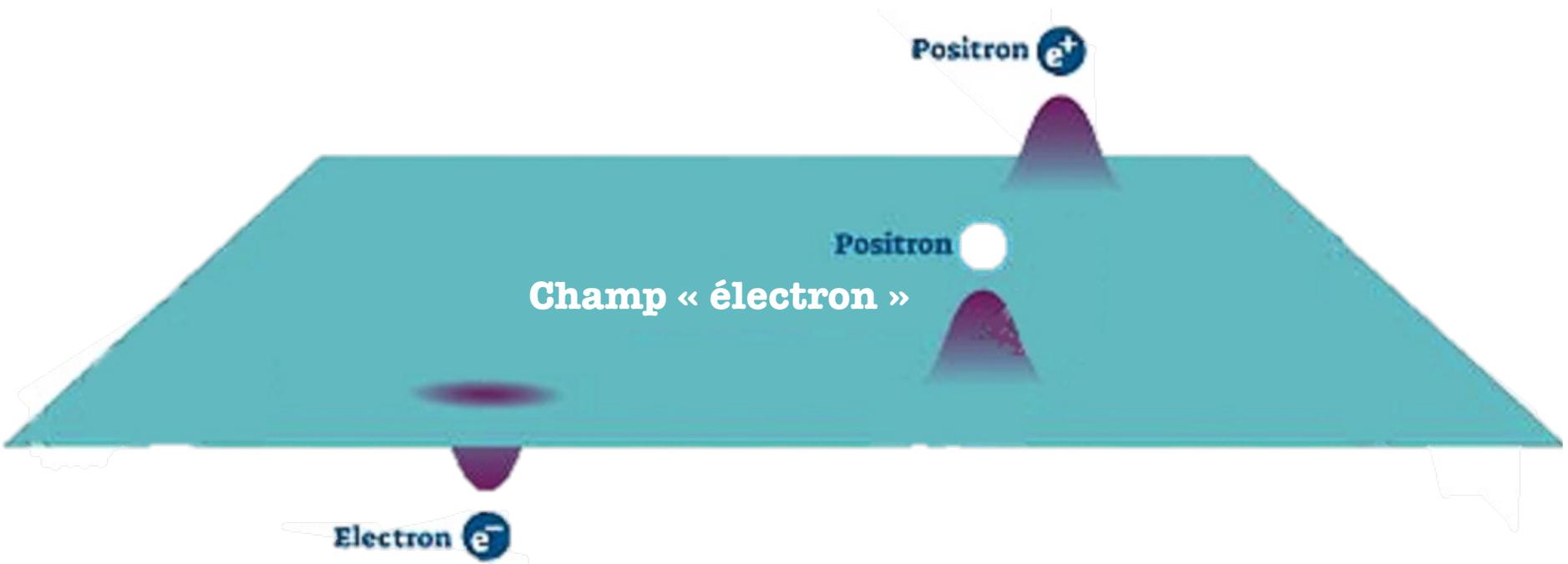
Les couplages au
champ de Higgs

La stabilité du vide
Les champs scalaires

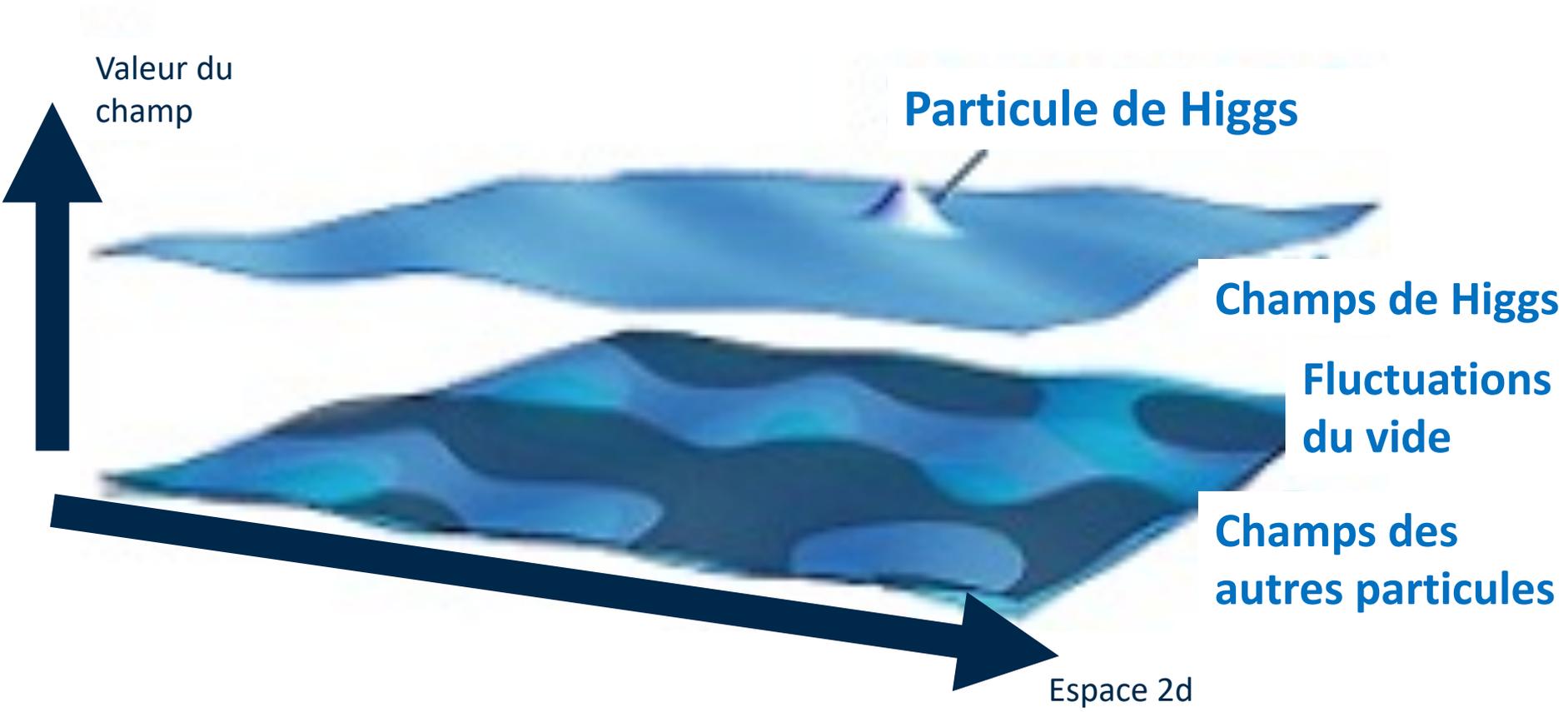
Matière-
antimatière

Les désintégrations
du boson de Higgs

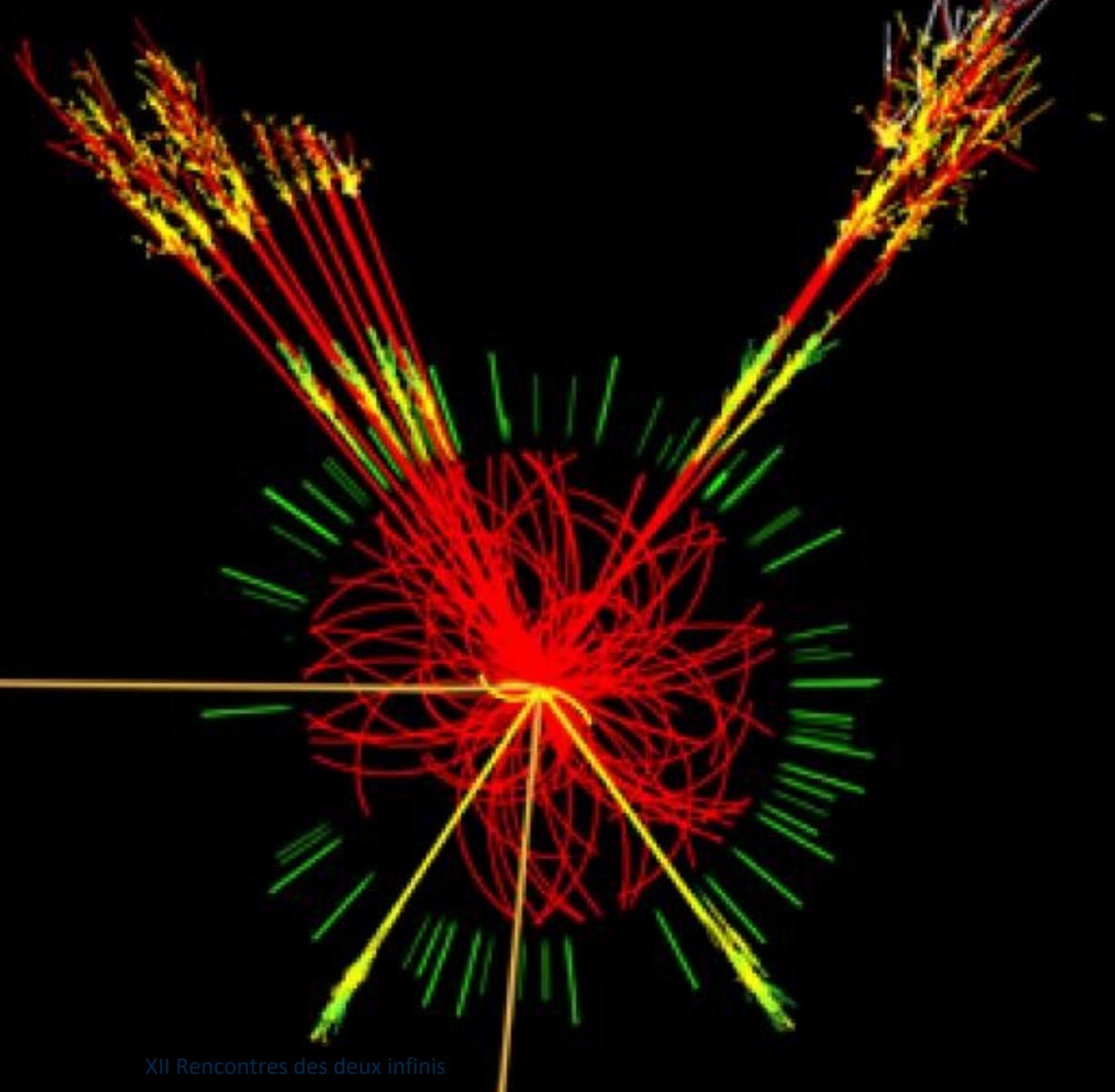
Qu'est-ce qu'une particule?



Le champ de Higgs



Excursion
dans le
monde du
Spin



Expérience de Stern–Gerlach:
mesure du moment magnétique quantique

Les particules se comportent comme si leur charge tournait et créait un moment magnétique:

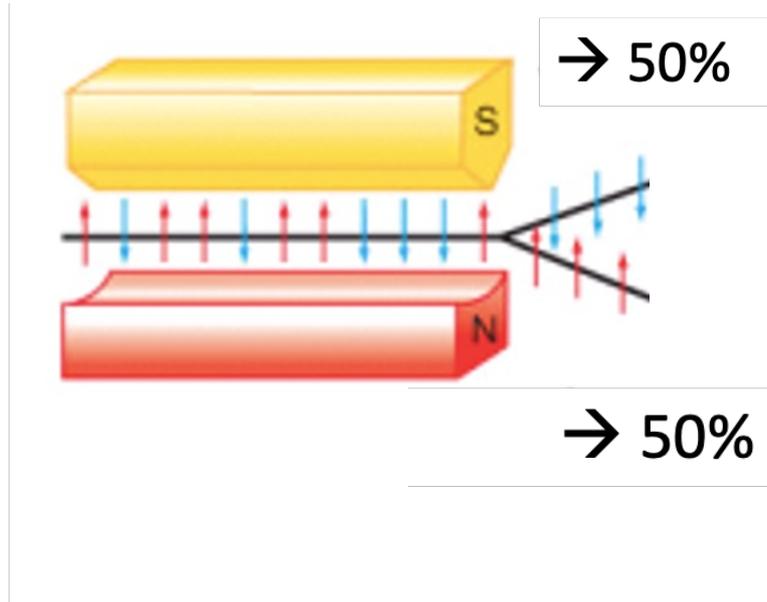
le Spin

Sauf que:

- Taille des particules: $< 10^{-19}$ m:
elles devraient tourner plus vite que la lumière

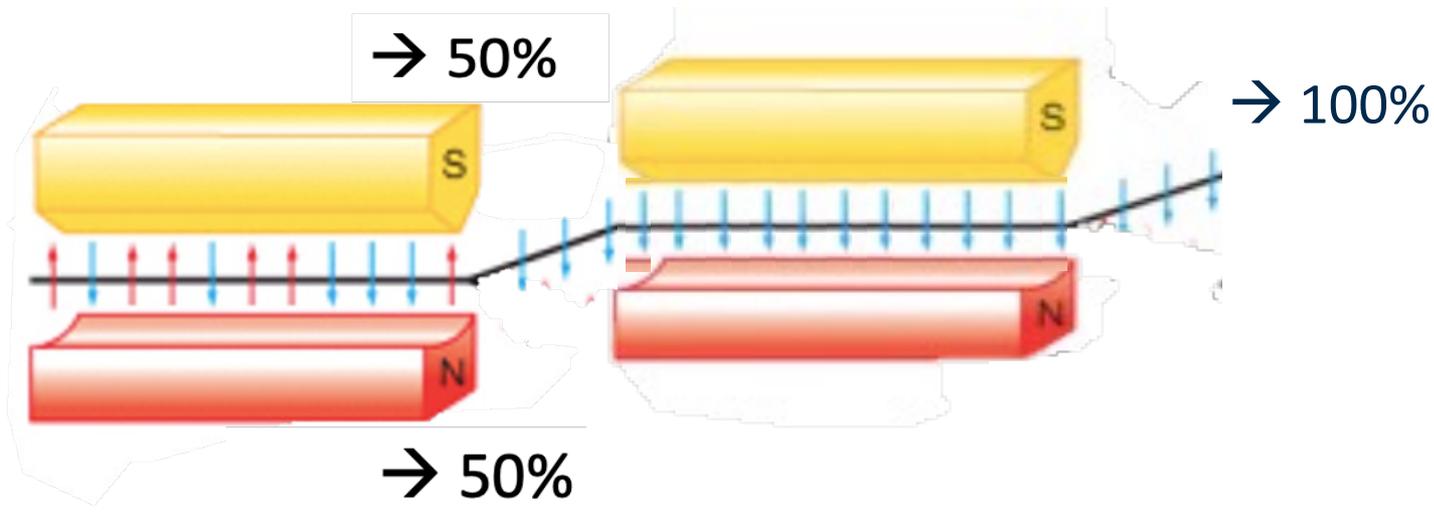
Ou bien:

- être beaucoup plus grand!



→ Propriétés intrinsèques de particules ponctuelles: charge, masse, nature, spin....

Expérience de Stern–Gerlach:
mesure du moment magnétique quantique

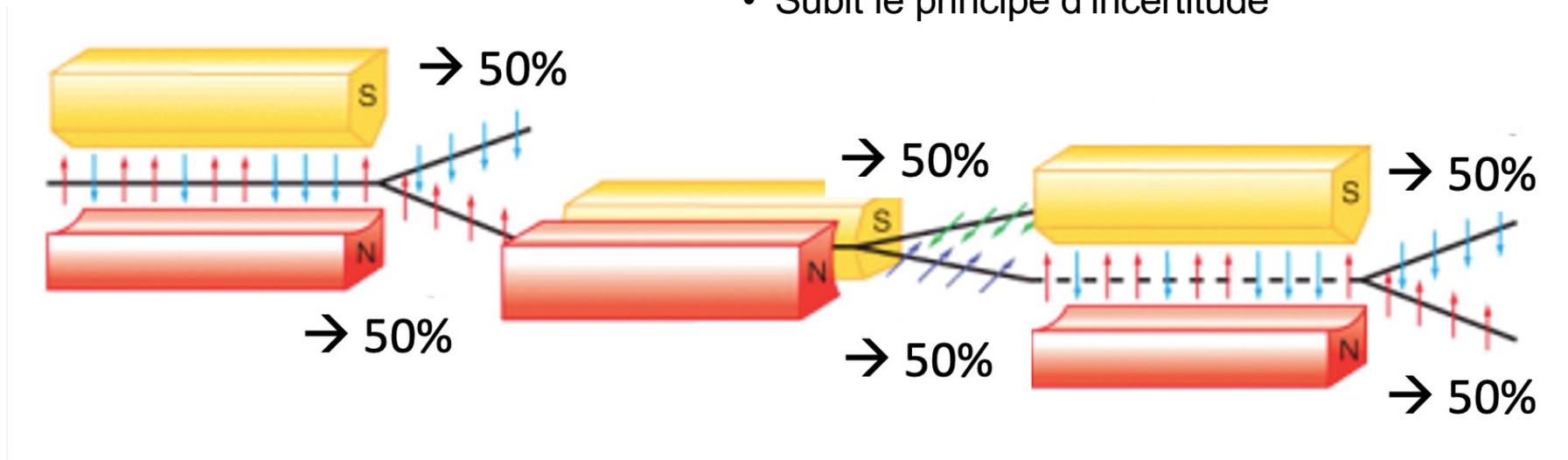


On peut manipuler le Spin des particules!

Expérience de Stern–Gerlach:
mesure du moment magnétique quantique

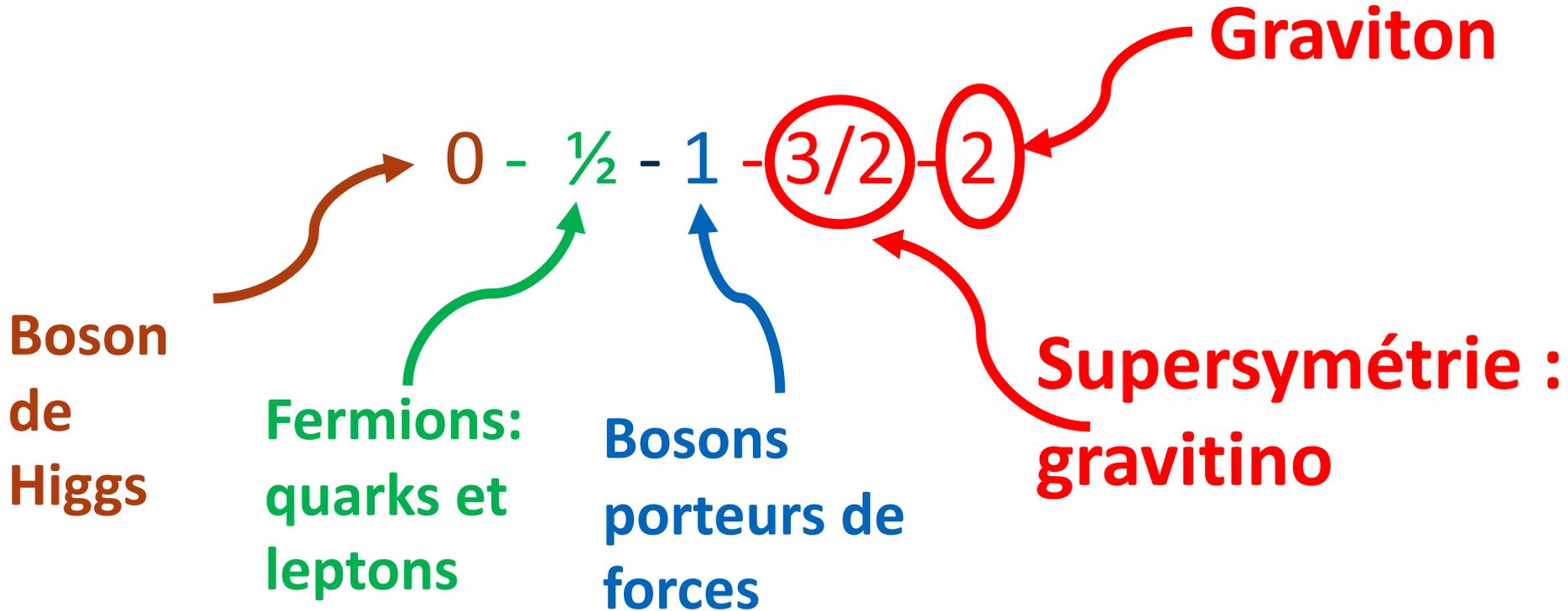
Le spin est une propriété quantique

- Variation du spin par unité entre la valeur positive et négative
- Subit le principe d'incertitude



Mécanique quantique + relativité générale:

→ Spins possibles des particules élémentaires:



Dualité onde-particule pour des ondes gravitationnelles

- Quantification du champ de gravitation
- Quantification de l'espace

Propriétés supposées des Gravitons:

- Interagissent seulement par gravitation
- A priori sans masse: limite sur la masse $< 1.6 \times 10^{-22} \text{ eV}/c^2$
- Limite sur la vitesse de « gravitation » : vitesse de la lumière - $1/10^{15}$

Peut-on les détecter directement?

- **Production dans un collisionneur: accélérateur de la taille de l'orbite de Pluto**
- **Détection des gravitons cosmiques: détecteur de la taille de Jupiter**

Mais prérequis : gravitation quantique

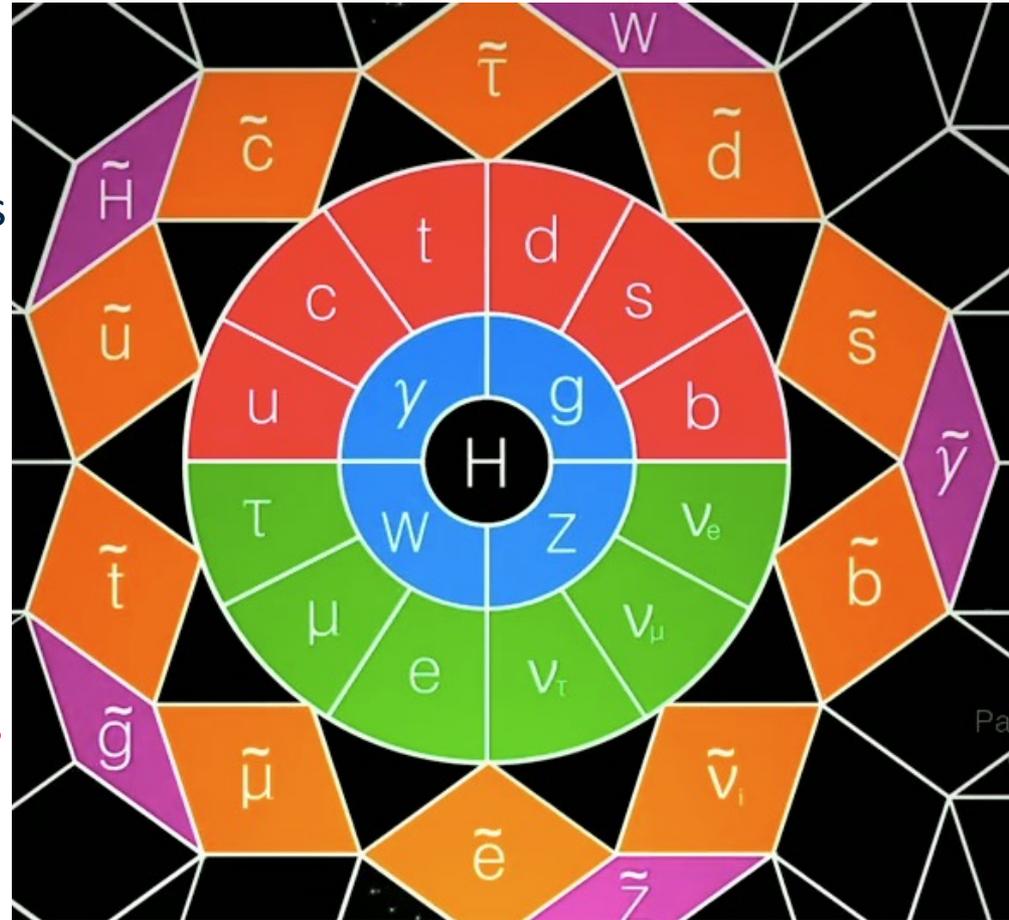
- **Observation des effets quantiques dans la fusion de 2 trous noirs**
- **Détecteurs d'ondes gravitationnelles au niveau de la picoseconde**

Découvrir le gravitino....

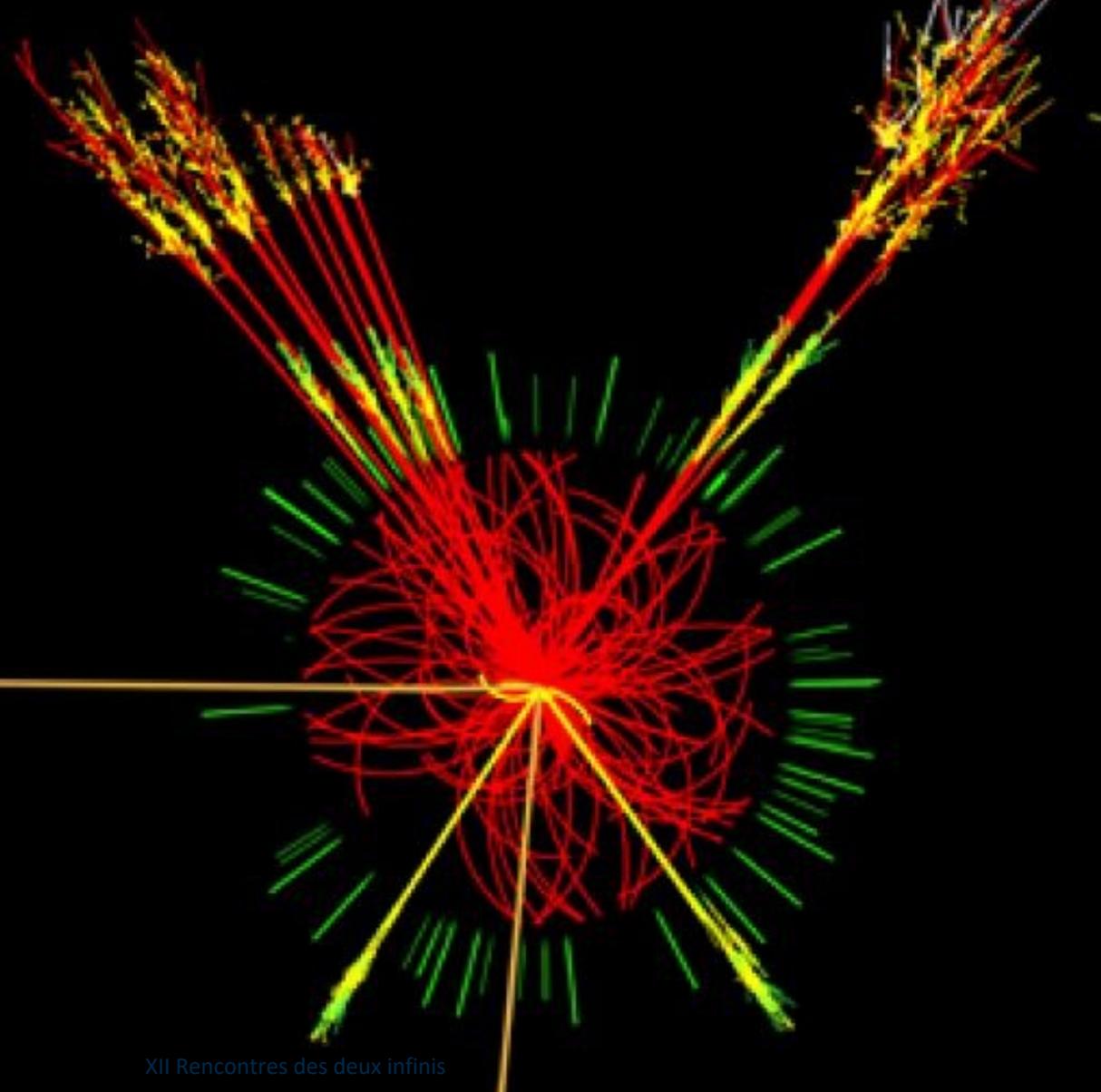
Mais prérequis : la supersymétrie

- Symétrie additionnelle entre fermions et bosons
- Fait partie d'autres modèles: Théorie de la grande unification, supergravité, théorie des cordes,

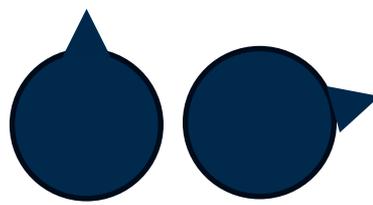
- **Modèle minimal de Supersymétrie quasiment exclu au LHC:**
 - **Mais multitude de modèles restant...**
 - **Etudes de Signature plus complexes au HL-LHC et aux futurs collisionneurs**



Et le boson
de Higgs ?

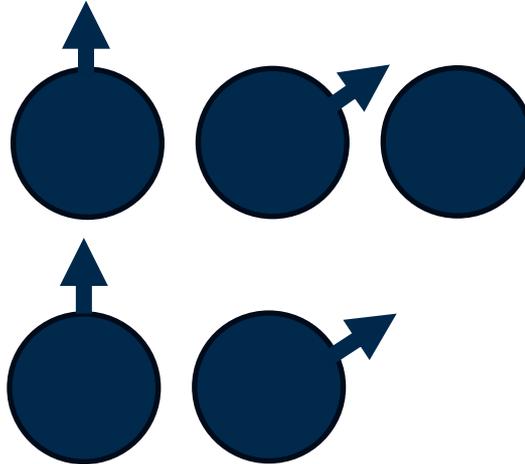


Spin 1/2



Électrons, quarks..... : 2 états
→ 2 taches

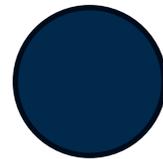
Spin 1



Bosons massifs
W, Z bosons : 3 états
→ 3 taches

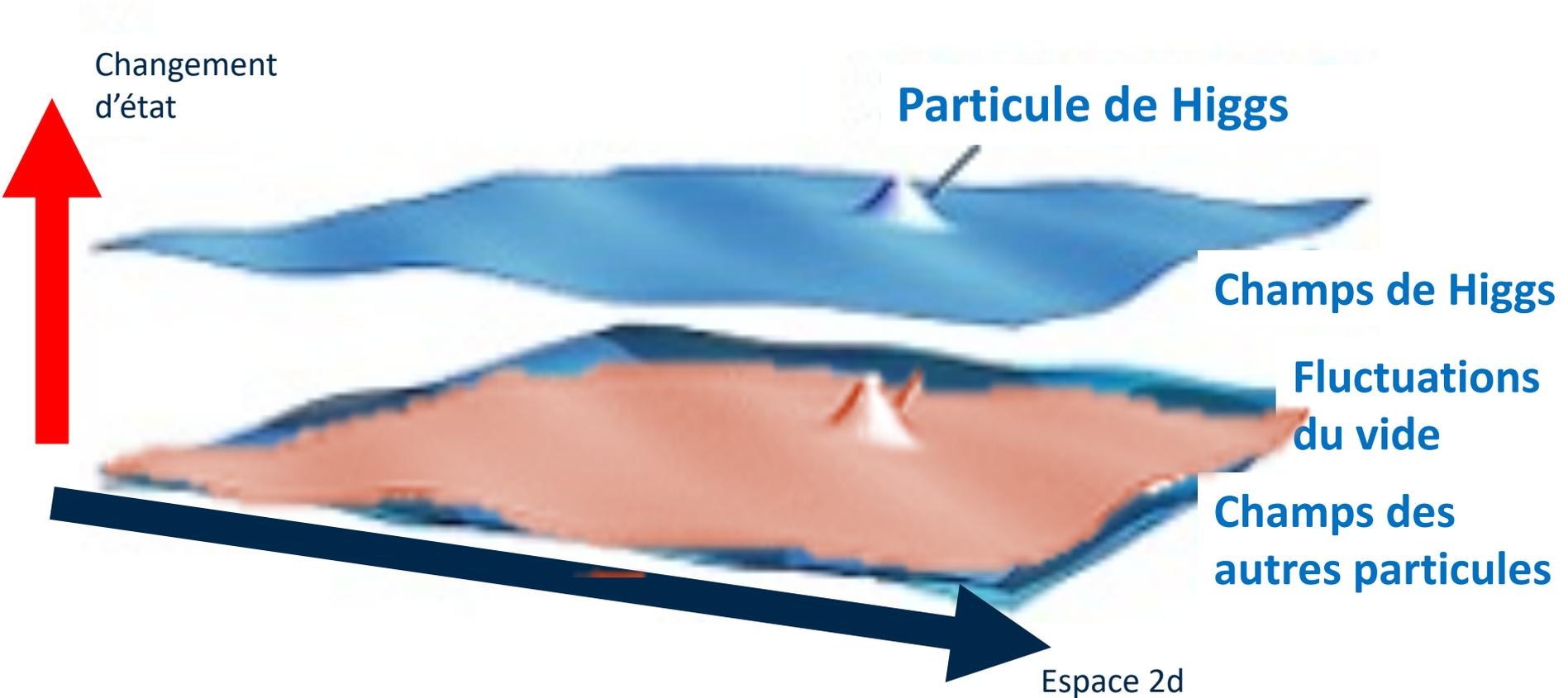
Bosons sans masse
photons: 2 états
→ 2 taches

Spin 0

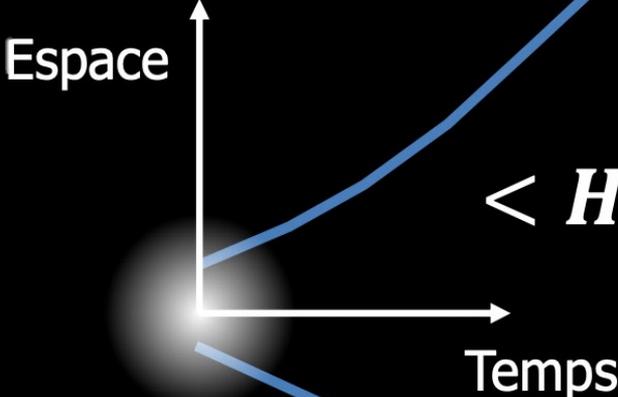


Bosons de Higgs:
1 état
→ Une tache
avec ou sans masse!

Transition d'un champ scalaire

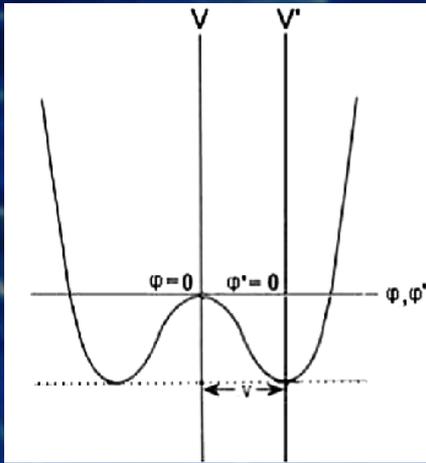
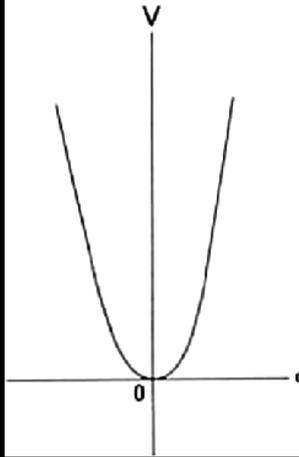


10⁻¹²s Transition de phase électrofaible



$\langle H \rangle \sim 0$

$\langle H \rangle \neq 0$



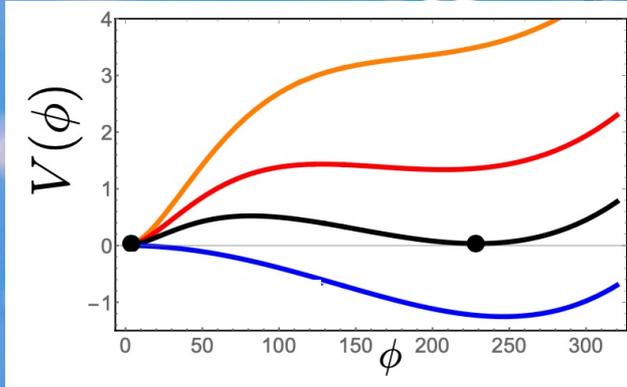
Masse uniquement par interaction forte

Masse propre des particules

Champ de HIGGS

Merci à Y. Sirois!

À DÉCOUVRIR: Transition de phase



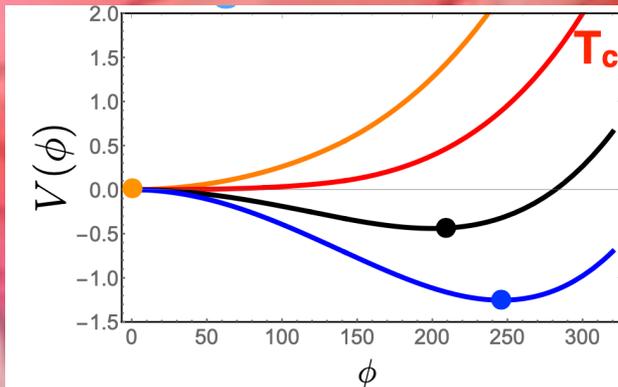
Transition de phase du 1^{er} order :

→ formation de « bulles de notre vide » et effets tunnel:

→ baryo-/leptogénèse possible

→ nécessite physique au-delà du modèle standard

→ **ondes gravitationnelles primordiales!**



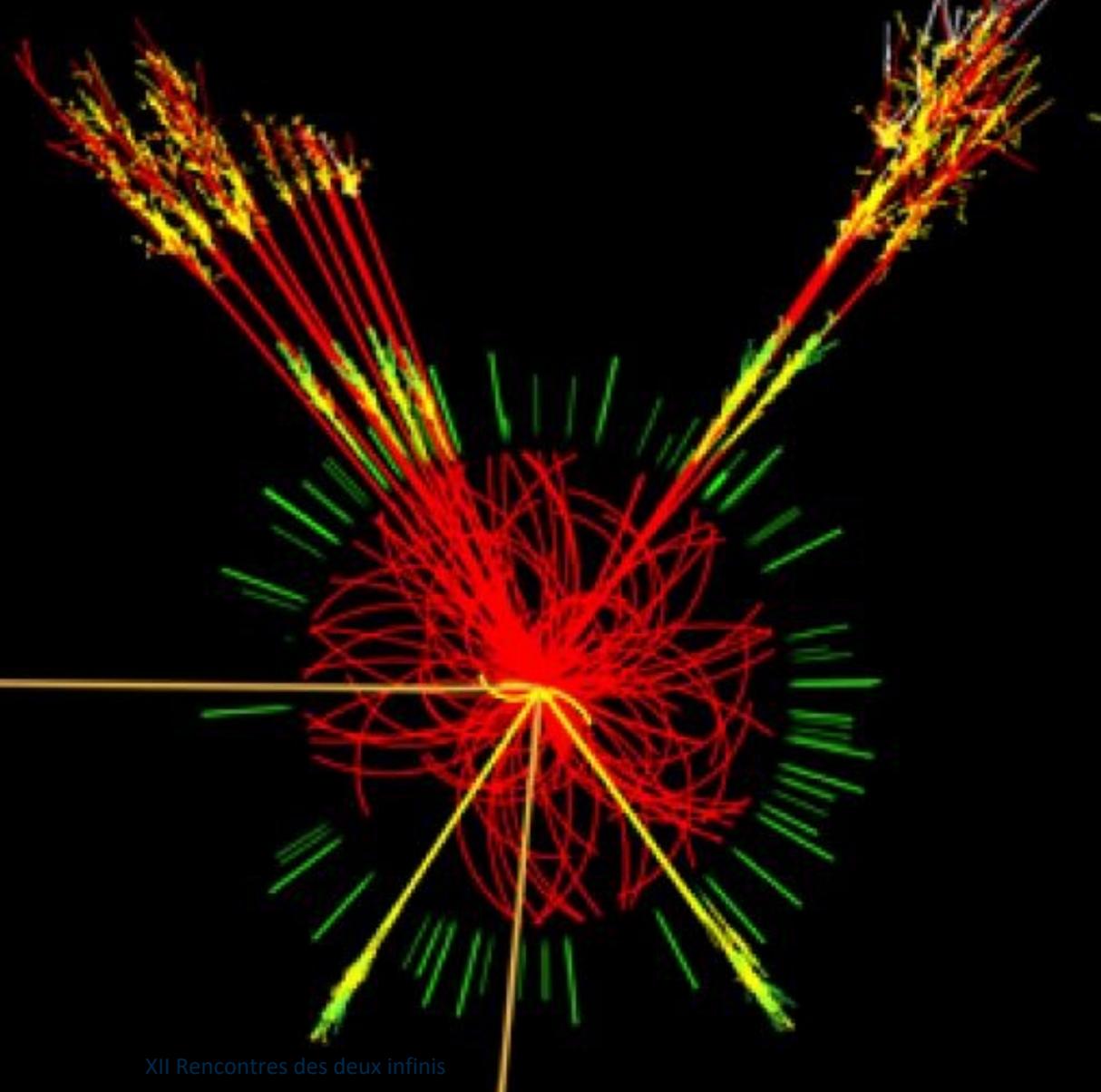
Transition de phase du 2nd order :

état d'équilibre thermique

→ scénario favorisé par le modèle standard avec $m_H > 70$ GeV

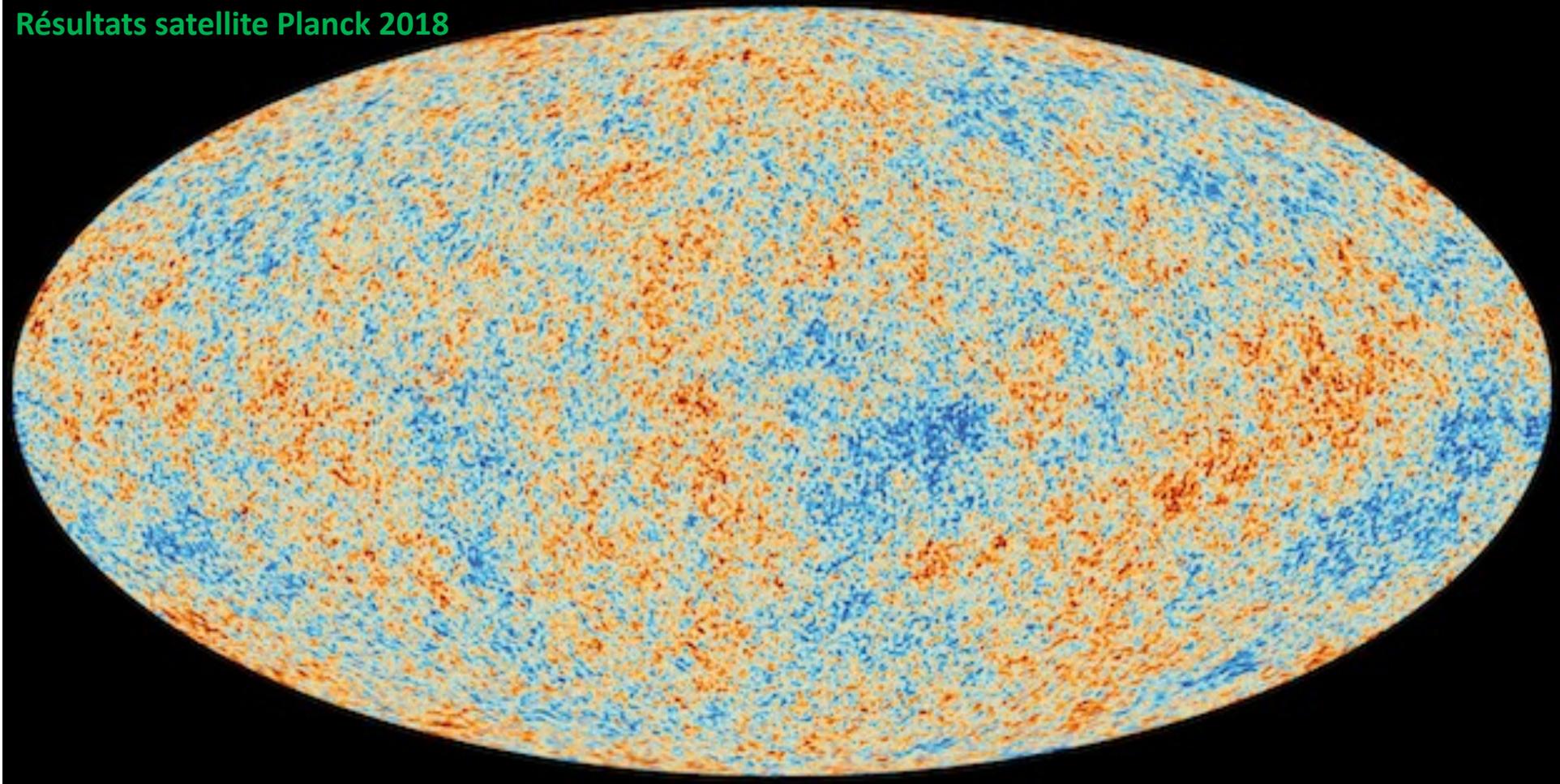
→ pas de création de la matière par baryogénèse/leptogénèse

Le boson de Higgs et l'Univers

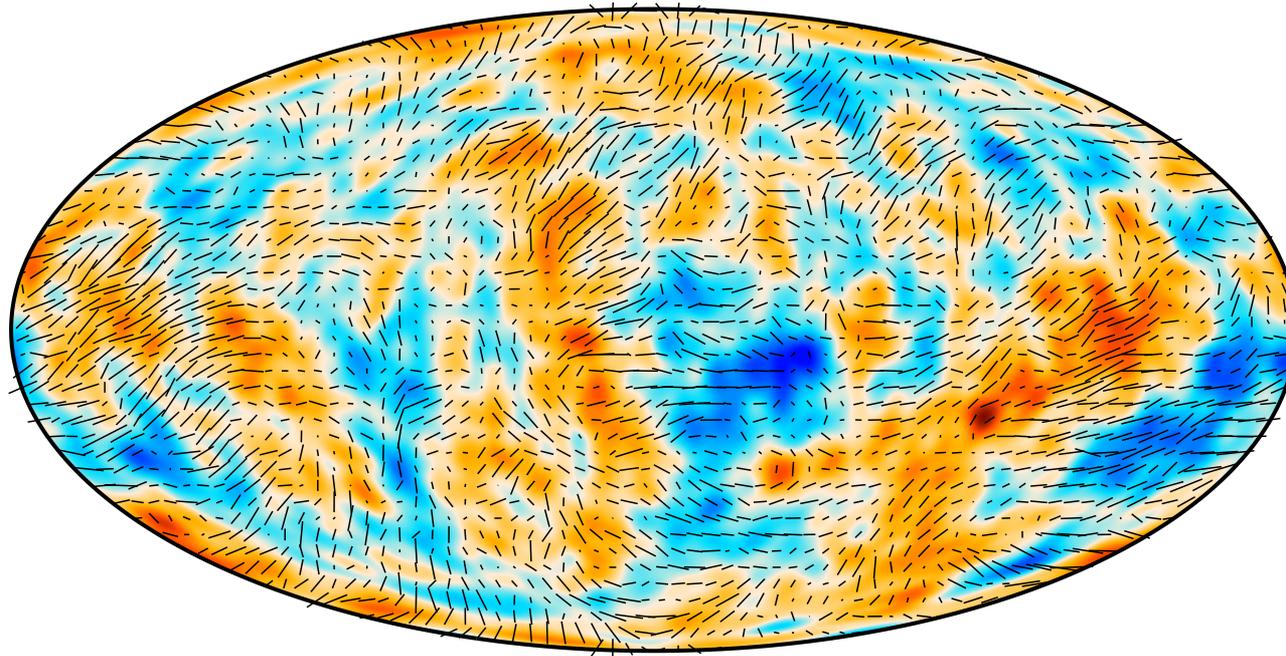


CMB: Fond diffus cosmologique

Résultats satellite Planck 2018



À DÉCOUVRIR: CMB Polarisation mode B



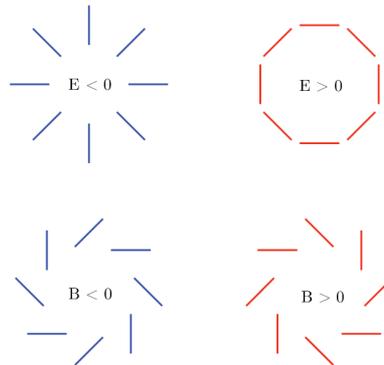
- Rechercher par des corrélations «en 4 points »
- Polarisation observée directement corrélée aux densités de matière
- Limites sur les Ondes Gravitationnelles Primordiales

E-mode:

Diffusion élastique de Thompson:

$(E\gamma \ll m_e)$

→ polarisation dans des régions dense en matière

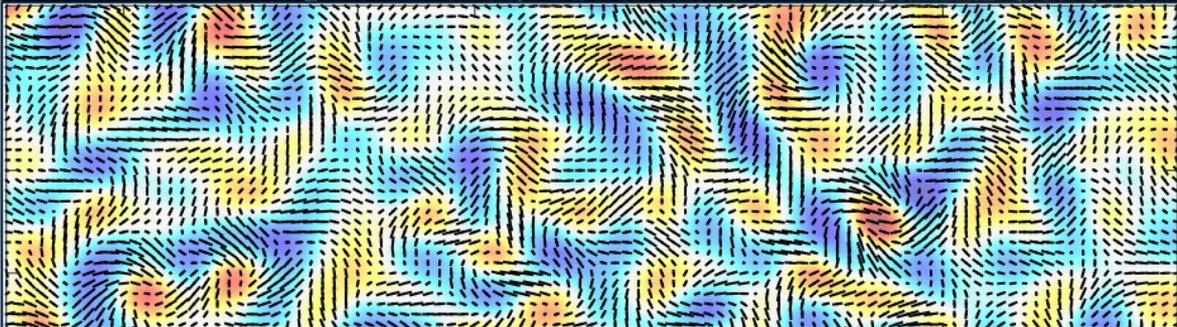
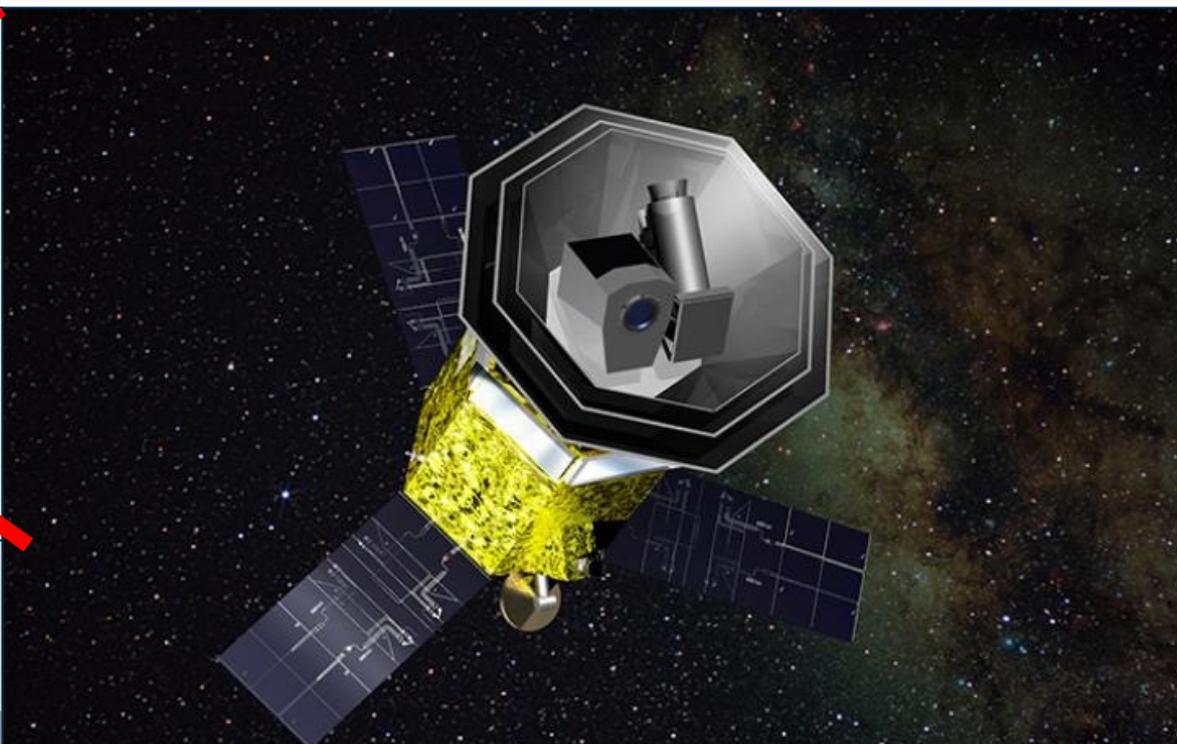
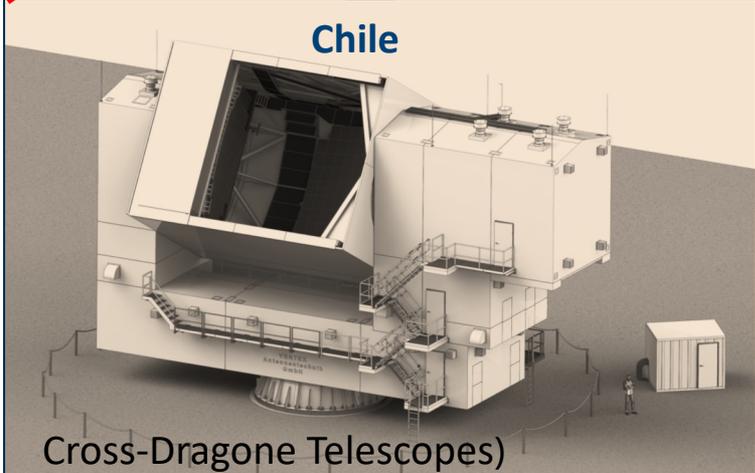
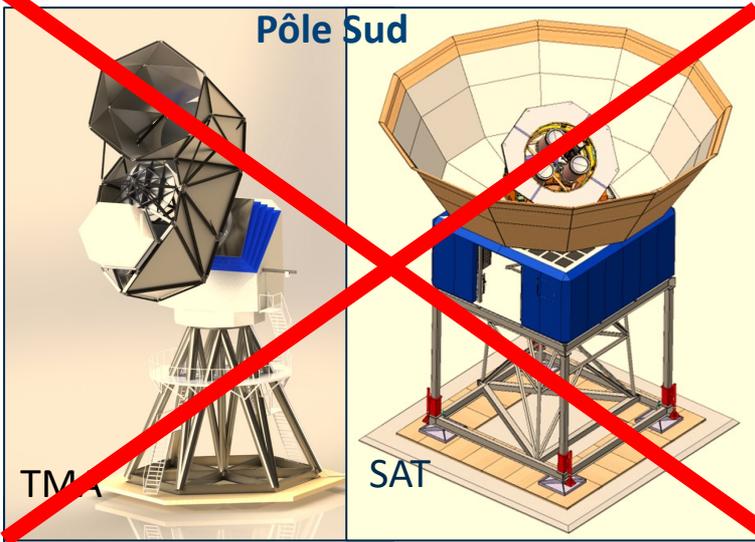


B-mode:

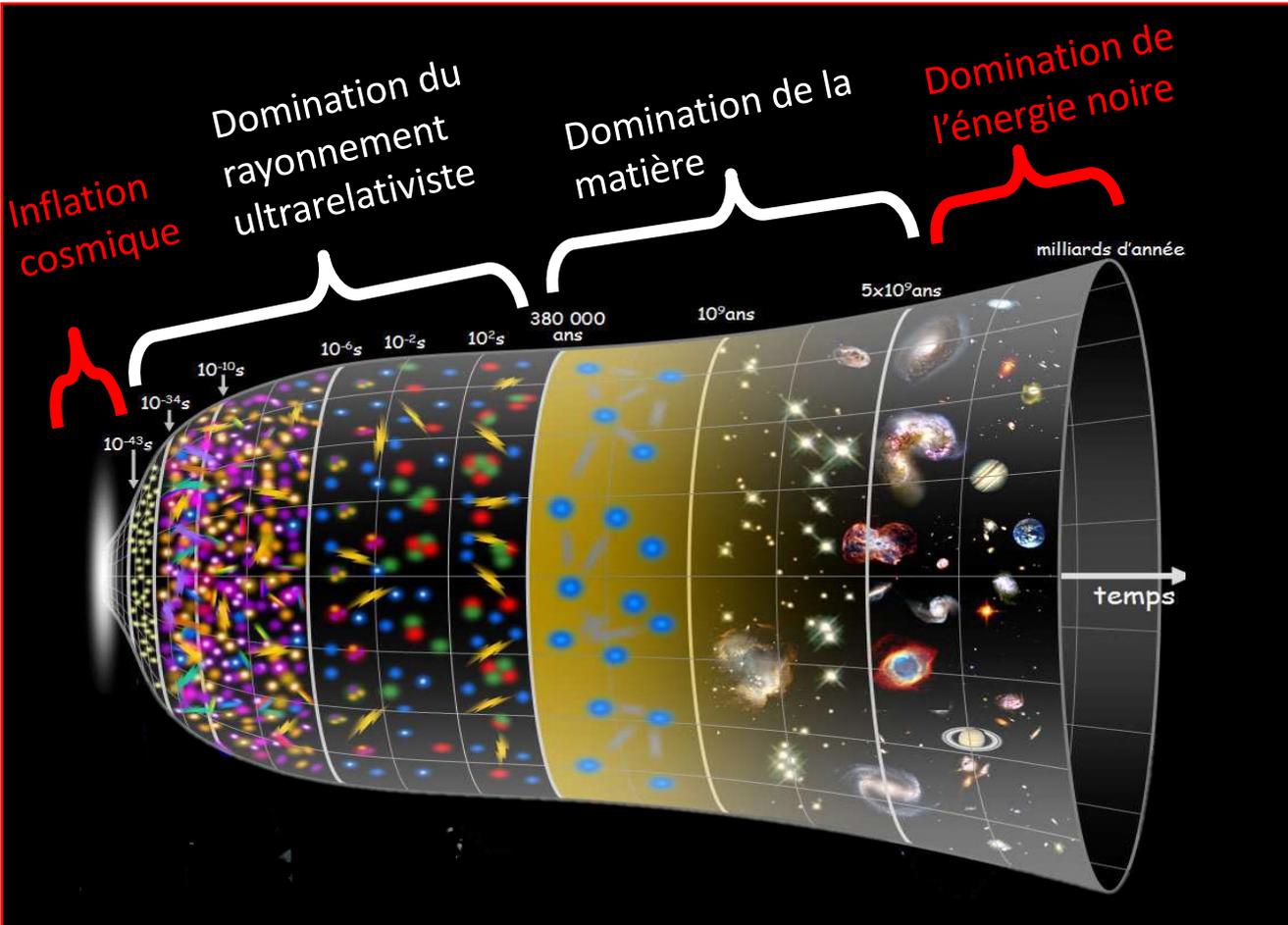
générés par des ondes gravitationnelles primordiales

→ effet lentille des galaxies

Instruments à venir: CMB-S4, Litebird



À COMPRENDRE: Expansion de l'Univers



Inflation cosmique et l'énergie noire

→ du à une « pression négative » :

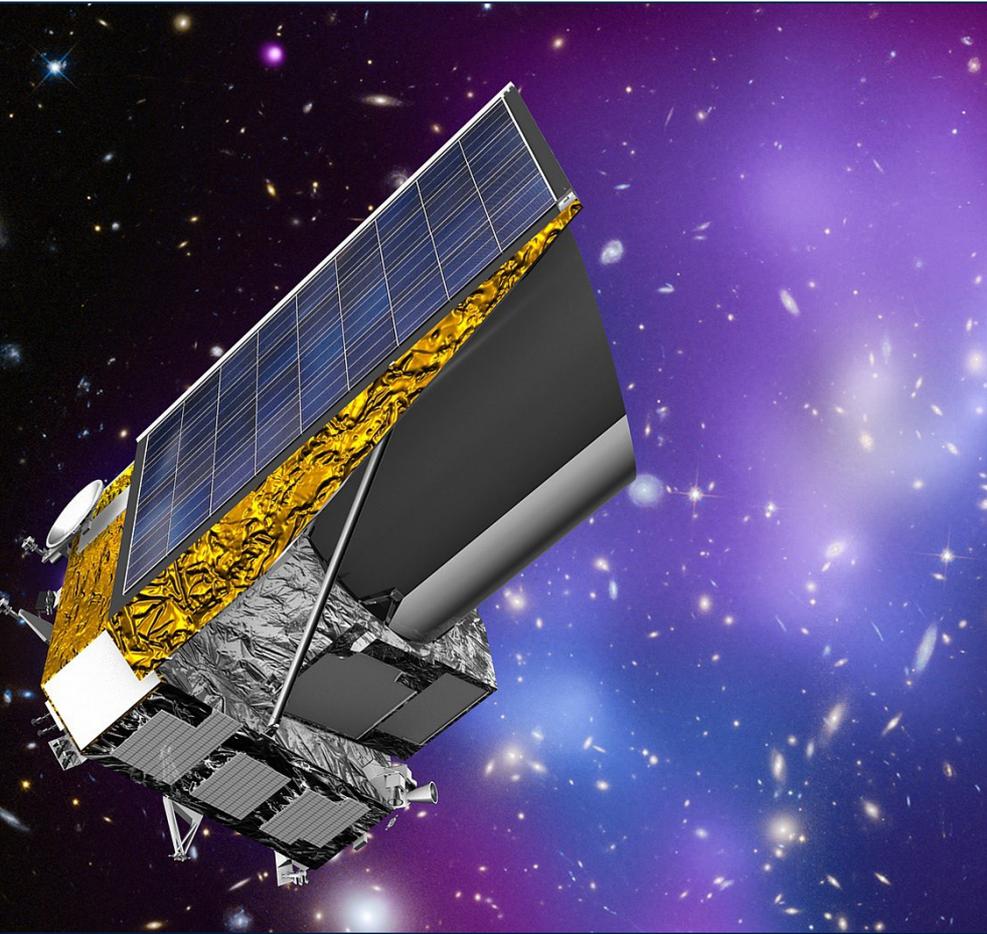
champ scalaire

→ le seul champ scalaire connu est le champ de Higgs

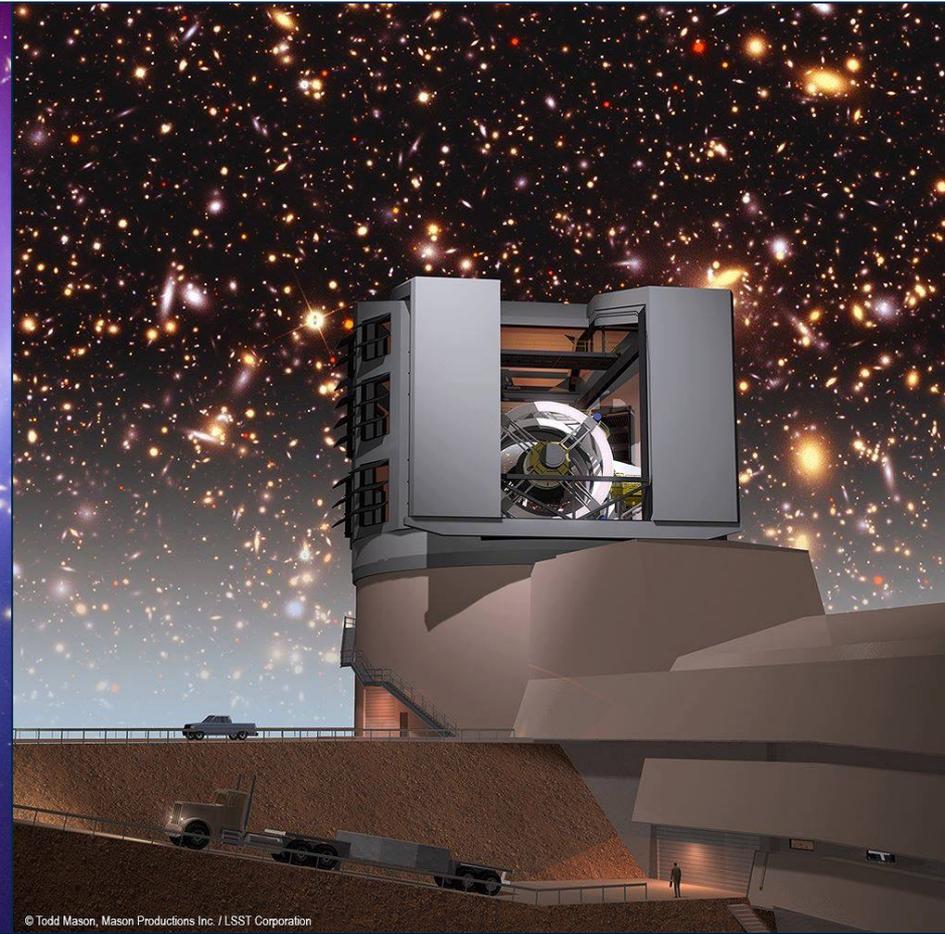
→ **Energie du vide:**

Valeur estimée à partir du modèle standard 10^{120} trop élevée !

Les nouveaux instruments



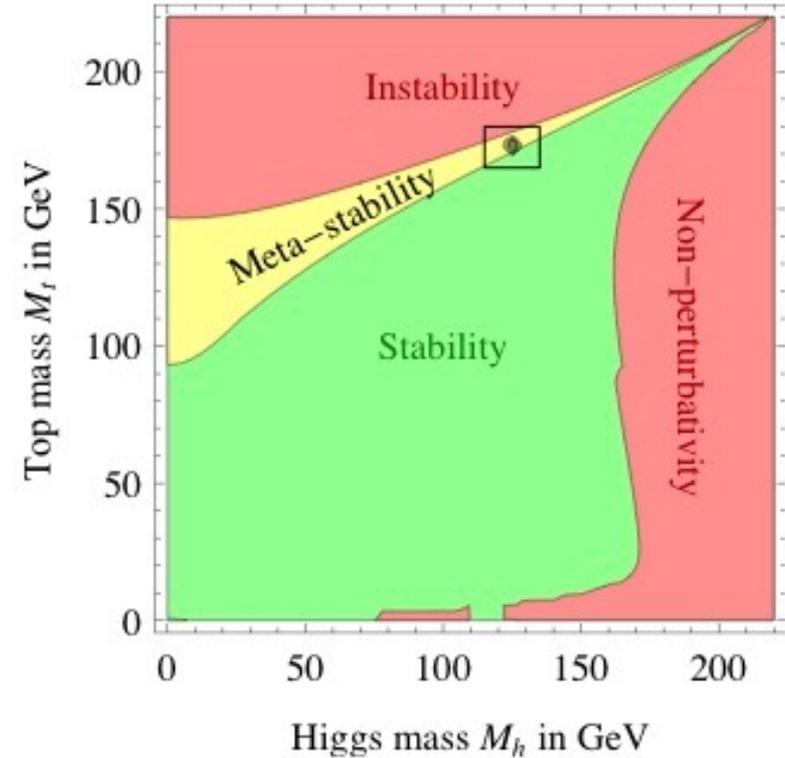
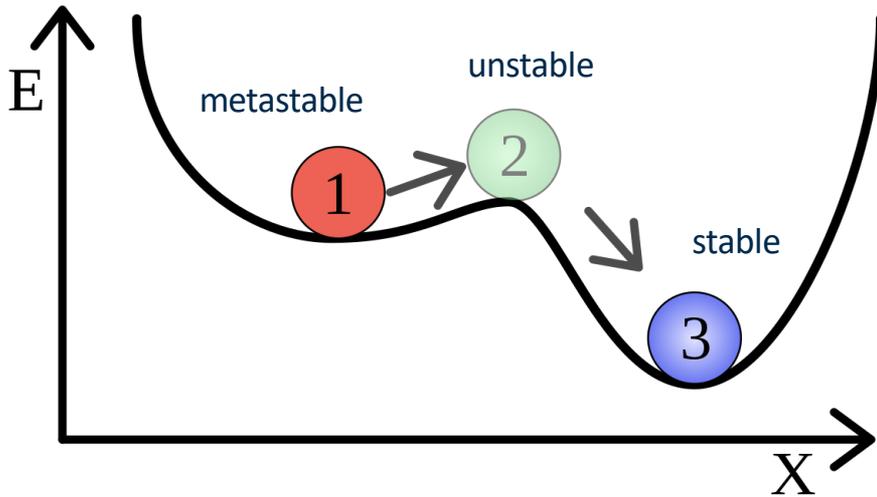
EUCLID: lancé le 1^{er} juillet 2023



© Todd Mason, Mason Productions Inc. / LSST Corporation

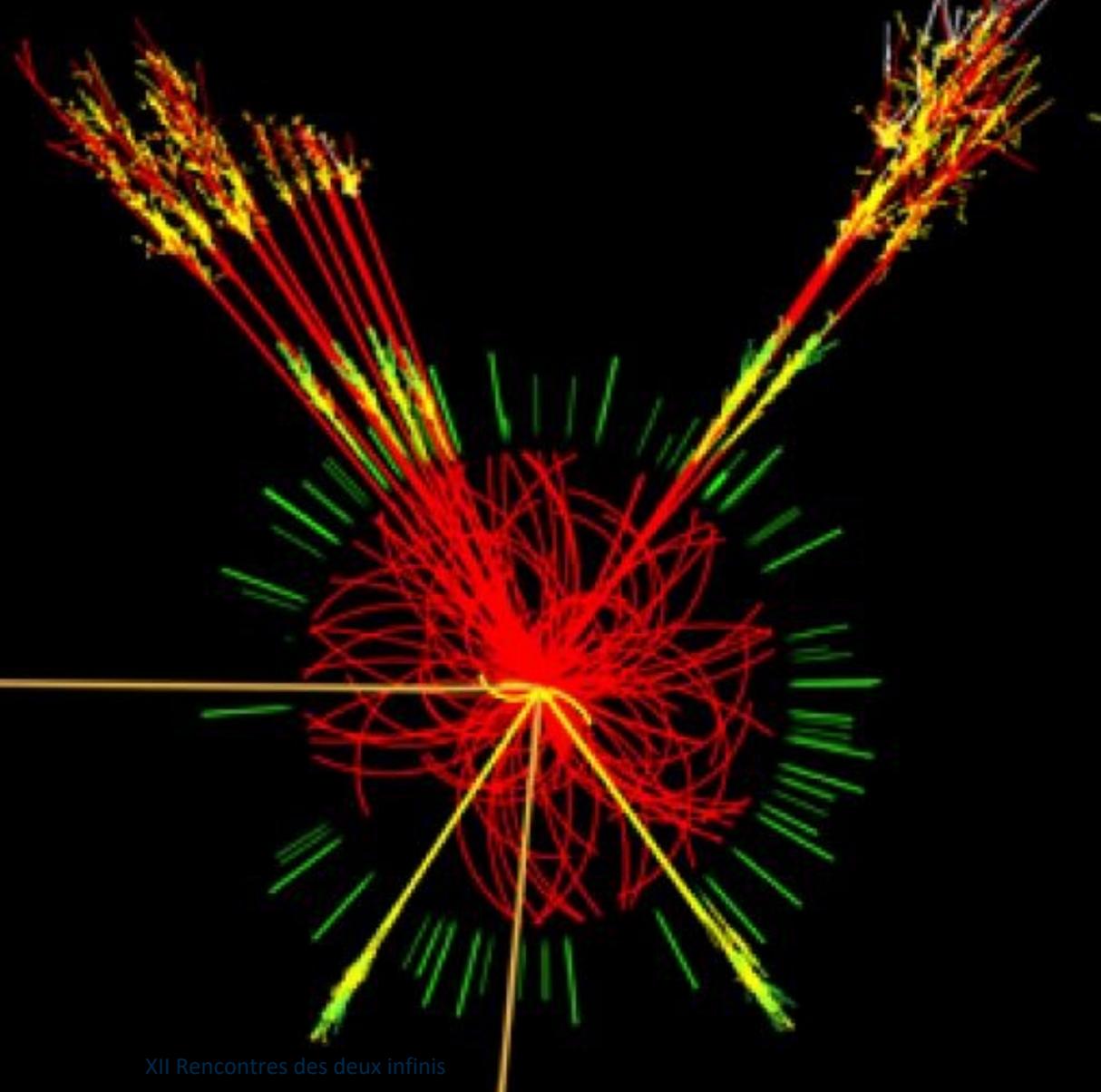
Vera Rubin Observatory – LSST : 1^{er} lumière janvier 2025

La stabilité du vide est déterminée par les masses des particules lourdes :
boson de Higgs et quark top → Calcul actuels indiquent une métastabilité

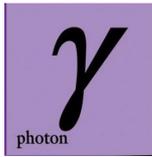


**Transition vers un autre vide?
Ou nouvelle physique?**

Interagir
avec le
champ de
Higgs

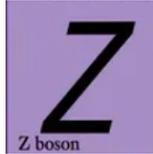
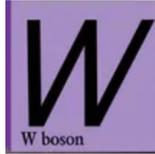


Interactions champs de Higgs



Interaction électromagnétique: photons, portée infinie décroissant, $m_\gamma = 0$

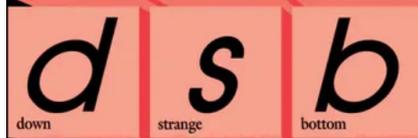
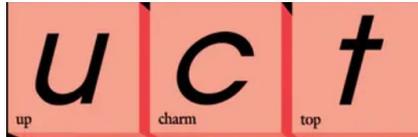
Interaction forte: gluons \rightarrow « portée infinie croissant avec auto-couplage » $\rightarrow m_g = 0$



Interaction faible : W et Z \rightarrow portée fini avec autocouplage $\rightarrow m_{W,Z} \neq 0$

Couplage au champ de Higgs: mécanisme de Brout, Englert, Higgs

$$L = gM_W W^{+\mu} W_{\mu}^{-} H + \frac{gM_Z}{\cos \theta_W} Z^{\mu} Z_{\mu} H + \dots$$

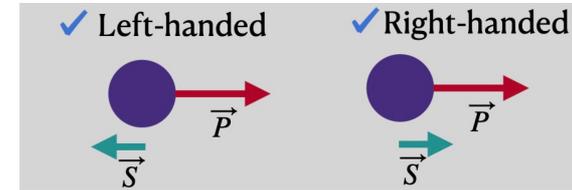


quarks et leptons: $m \neq 0$

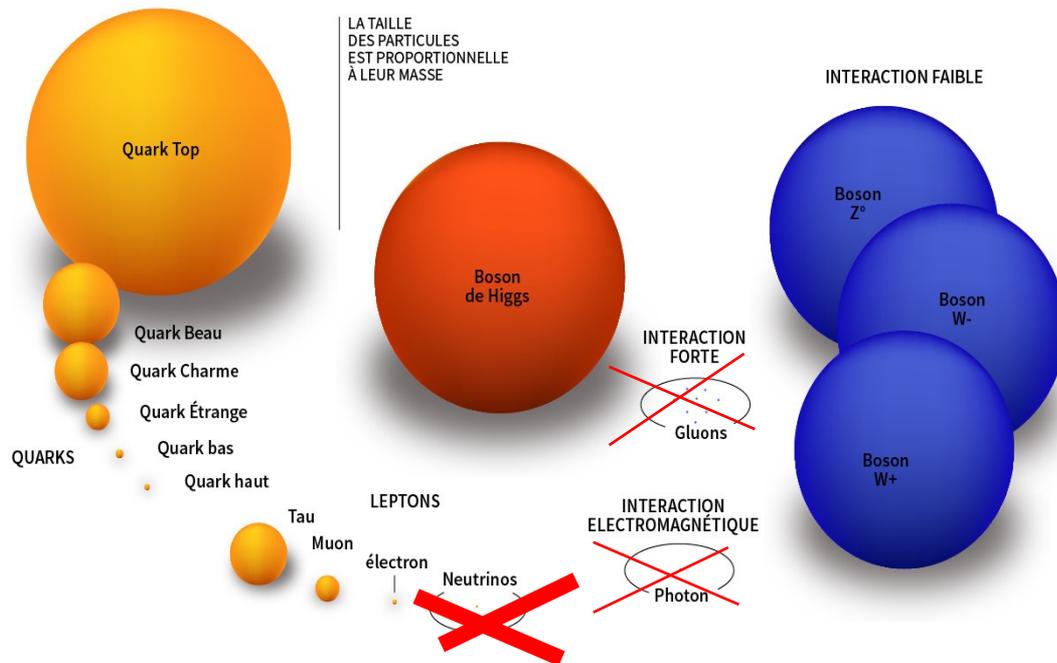
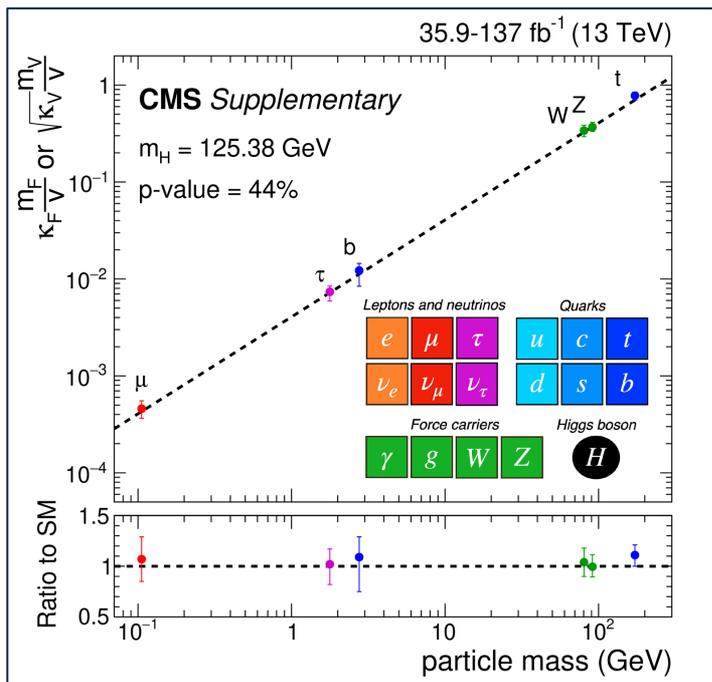
couplage au champs de Higgs : couplage de **Yukawa** entre un champ scalaire et un champ fermionique



$$L = -\frac{m_f}{v} (\bar{f}_L f_R + \bar{f}_R f_L) H$$



À FAIRE: Couplages au champ de Higgs



- Précision des couplages : $\approx 10\%$ → objectif $< 1\%$
- 1^{ère} génération couplage $\sim O(10^{-9})$: mesure (peut-être) par la production du Higgs dans un collisionneur e^+e^- "monochromatique"

La seule distinction entre les particules d'une famille est leur couplage au champ de Higgs:

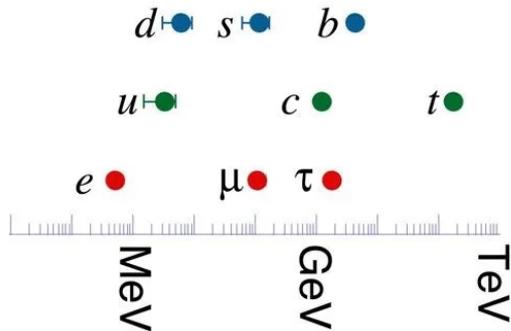
Y a-t-il une structure subjacente? Ou coïncidence numérique?

1981 Yoshio Koide: recherche de substructures

- électron: $511 \text{ keV}/c^2$,
- muon: $105.7 \text{ MeV}/c^2$,
- tau: $1.777 \text{ GeV}/c^2$.

$$Q = \frac{m_e + m_\mu + m_\tau}{\left(\sqrt{m_e} + \sqrt{m_\mu} + \sqrt{m_\tau}\right)^2} = 0.666661(7) \approx \frac{2}{3}$$

La valeur doit être entre 1/3: les masses sont égaux et 1: une masse domine



Quarks lourds:

- charm: $1.28 \text{ GeV}/c^2$
- bottom: $4.18 \text{ GeV}/c^2$
- top: $173.0 \text{ GeV}/c^2$

$$Q_{\text{heavy}} = \frac{m_c + m_b + m_t}{\left(\sqrt{m_c} + \sqrt{m_b} + \sqrt{m_t}\right)^2} \approx 0.669 \approx \frac{2}{3}$$

Quarks légers:

- up: $2.32 \text{ MeV}/c^2$
- down: $4.71 \text{ MeV}/c^2$
- strange: $92.9 \text{ MeV}/c^2$

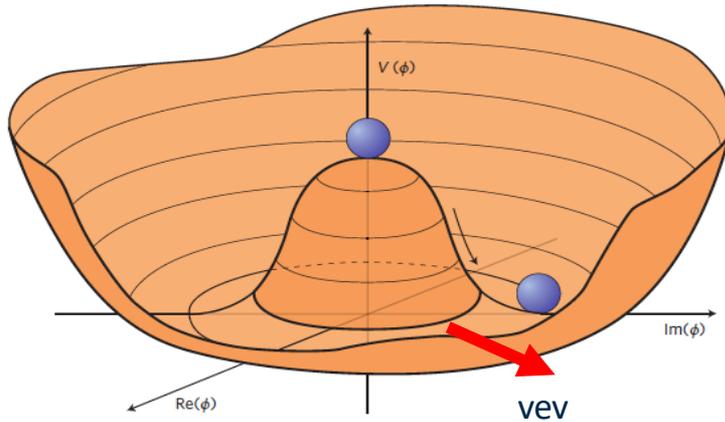
$$Q_{\text{light}} = \frac{m_u + m_d + m_s}{\left(\sqrt{m_u} + \sqrt{m_d} + \sqrt{m_s}\right)^2} \approx 0.57 \approx \frac{5}{9}$$

À FAIRE: auto-couplage du boson de Higgs

Le boson de Higgs a une masse

→ il couple à lui-même : $V(H) = \frac{1}{2} m_H^2 H^2 + \frac{1}{4} \lambda H^4$

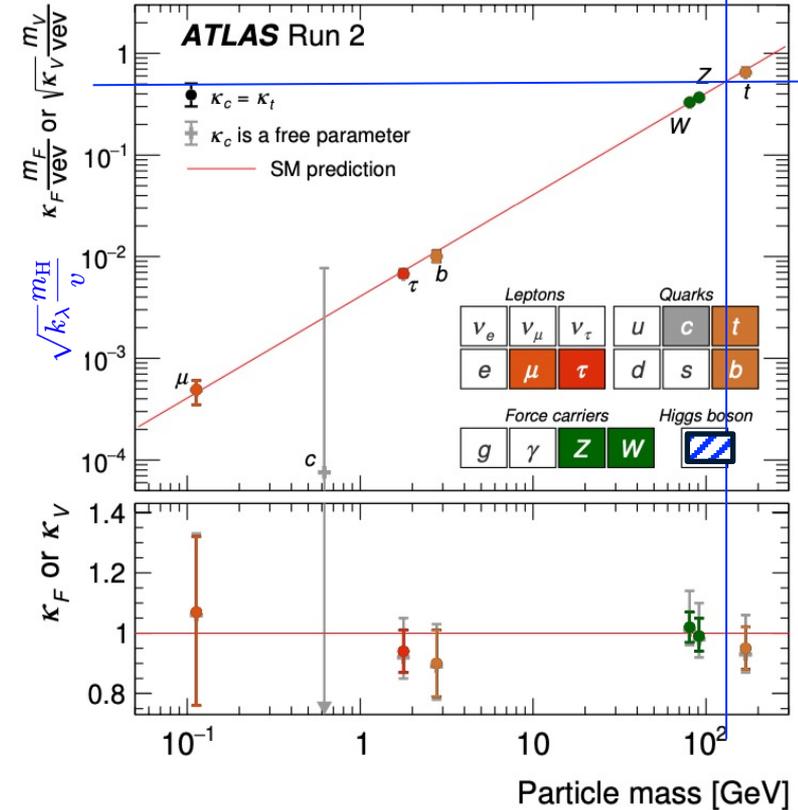
Higgs potential



Minimum du potentiel:

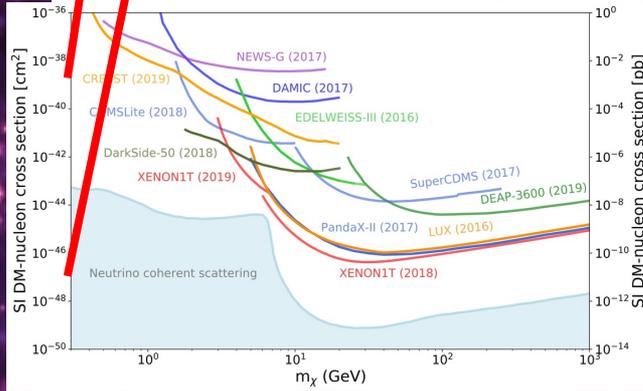
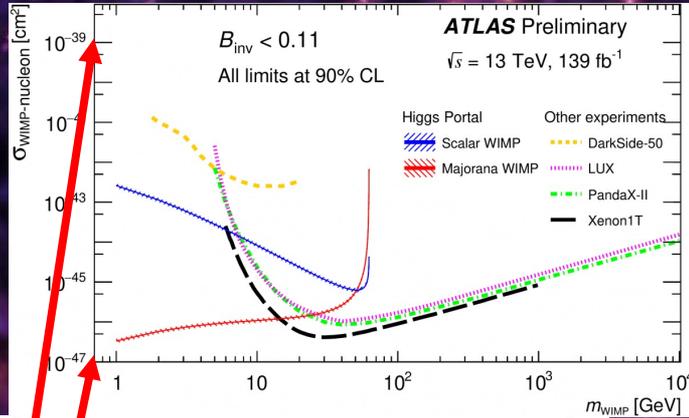
valeur d'expectation du vide (vev)

$$v = \frac{2MW}{g} = \sqrt{\frac{m_H^2}{\lambda}}$$



→ mesure du processus d'auto-couplage pour contraindre la forme du potentiel

À MESURER: couplages invisibles!



Matière noire : couplage au boson de Higgs?

Recherche des processus $H \rightarrow XX$:

Exclure $\mathcal{B}(H \rightarrow Z_d Z_d)$ as low as $2-8 \times 10^{-5}$

Couplage du boson de Higgs à la matière noire:

$\mathcal{B}(H \rightarrow \text{inv}) < 11\%$ at 90% CL

Futur collisionneur: $\mathcal{B}(H \rightarrow \text{inv}) < 1\%$

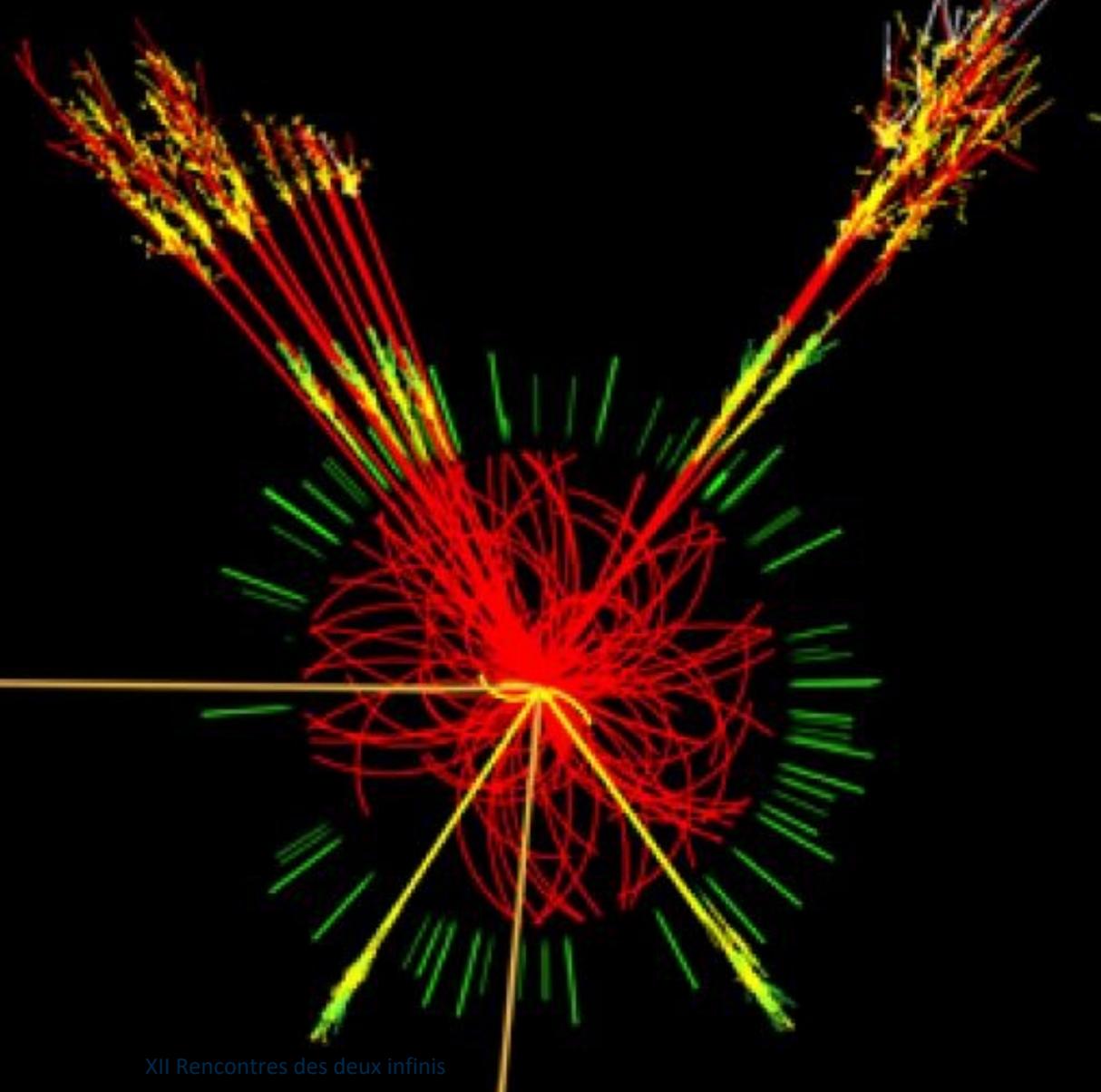
Recherches directe de matière noire:

- à haute masse vers le recul des noyau

à basse masse vers le recul d'électrons

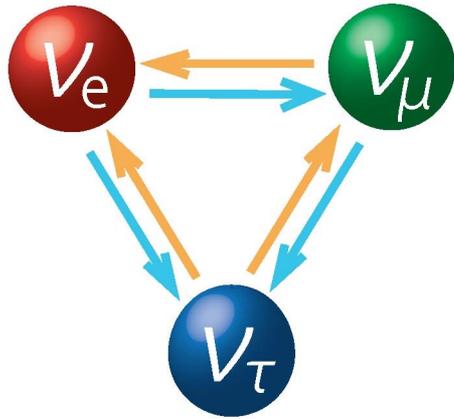
→ Recherches directes vont atteindre le fond de neutrinos !

La masse des neutrinos



Les neutrinos « oscillent »:

Phénomène quantique de superposition des états
→ De plus petit la masse, de plus d'oscillation



Paramétrisation d'oscillation des neutrino: Matrice de PMNS

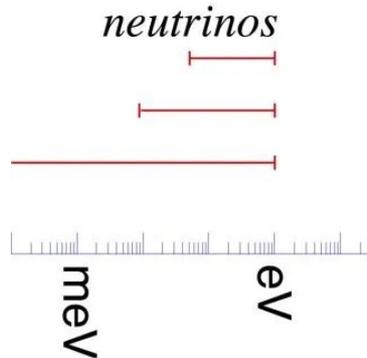
3 angles: θ_{12} , θ_{13} , θ_{23}

2 différences de masse: m_{12} , m_{23}

1 phase: δ

→ Mesurer avec précision ces paramètres

→ Possible violation de symétrie matière-antimatière

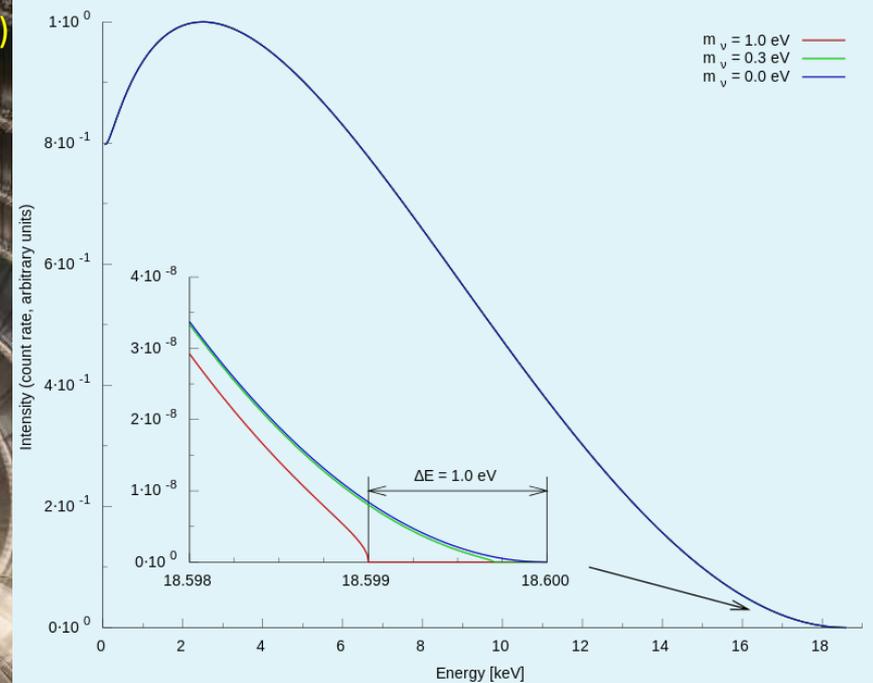


Conséquence:

Les neutrinos ont une masse !

... mais elle est très faible et difficile à mesurer

À MESURER: la masse des neutrinos

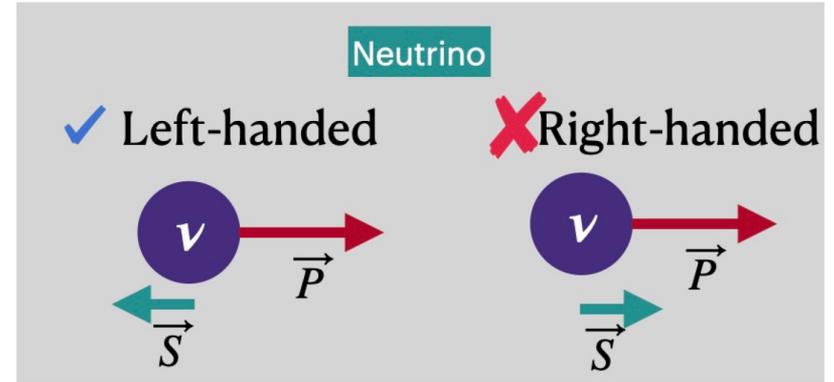
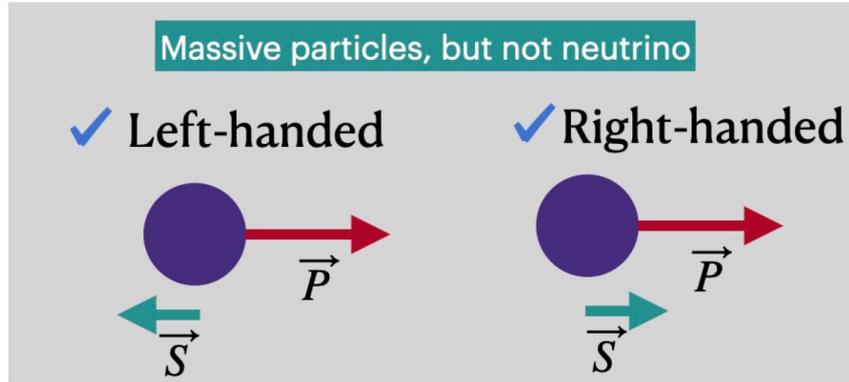


Mesure directe de la masse des neutrinos:

Résultat de 2022: $m < 0.8 \text{ eV}$

Contraintes cosmologiques: $m < 0.12 \text{ eV}$

A COMPRENDRE: la masse des neutrinos



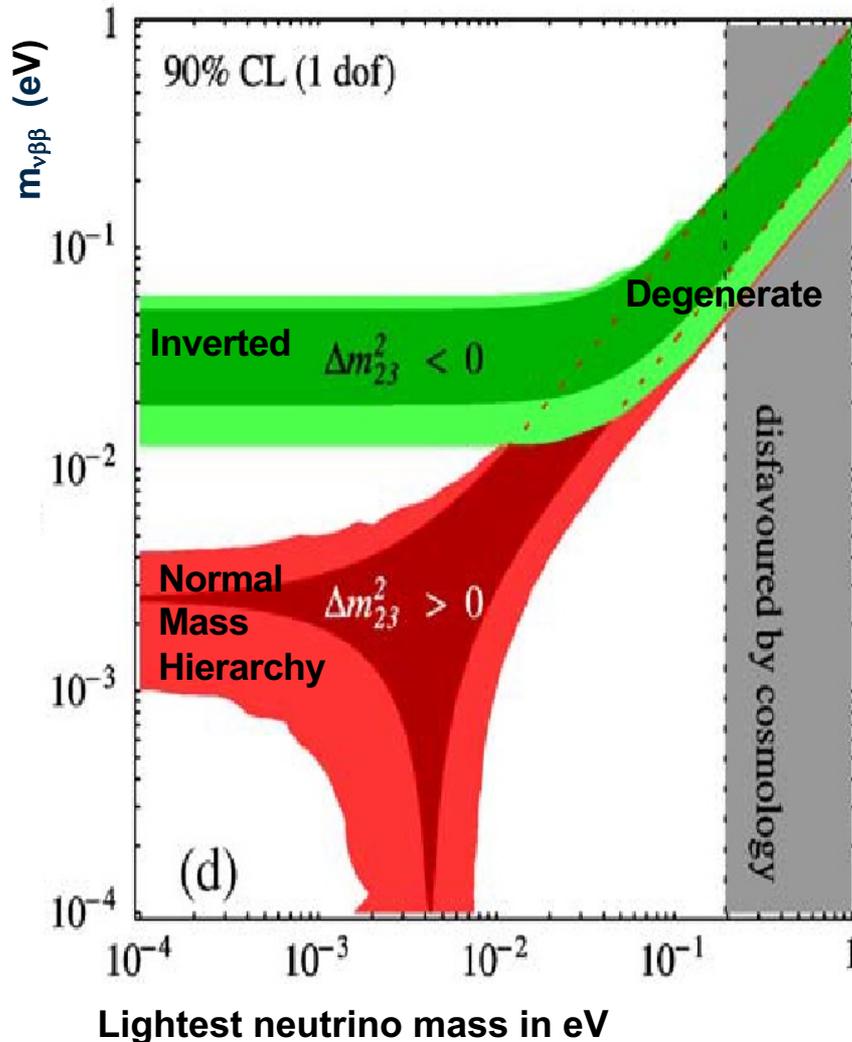
$$L = -\frac{m_f}{v} (\bar{f}_L f_R + \bar{f}_R f_L) H$$

Modèle Standard:

Pas de neutrinos droits !

→ Les neutrinos ne peuvent pas se coupler au champ de Higgs par le couplage de Yukawa

Recherche de neutrinos de Majorana



Limites actuelles

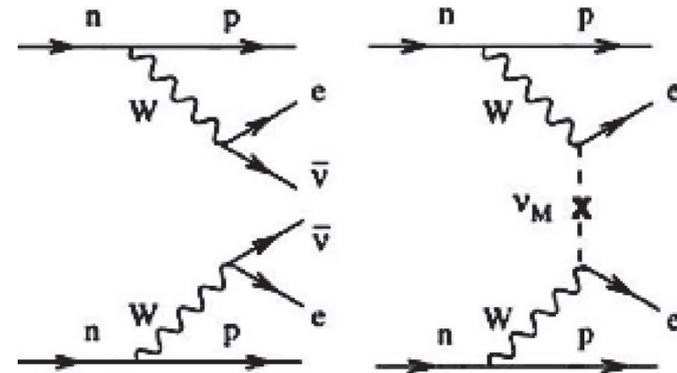
Expériences 5 à 10 ans

Expériences 10 à 15 ans

Expériences dans 20 ans

Hypothèse:

Les neutrinos sont leurs propres antiparticules
 → neutrino de type « Majorana »



Éléments avec désintégrations $2\beta\beta$:

^{48}Ca , ^{78}Ge , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{136}Xe , ^{150}Nd

Hypothèse:

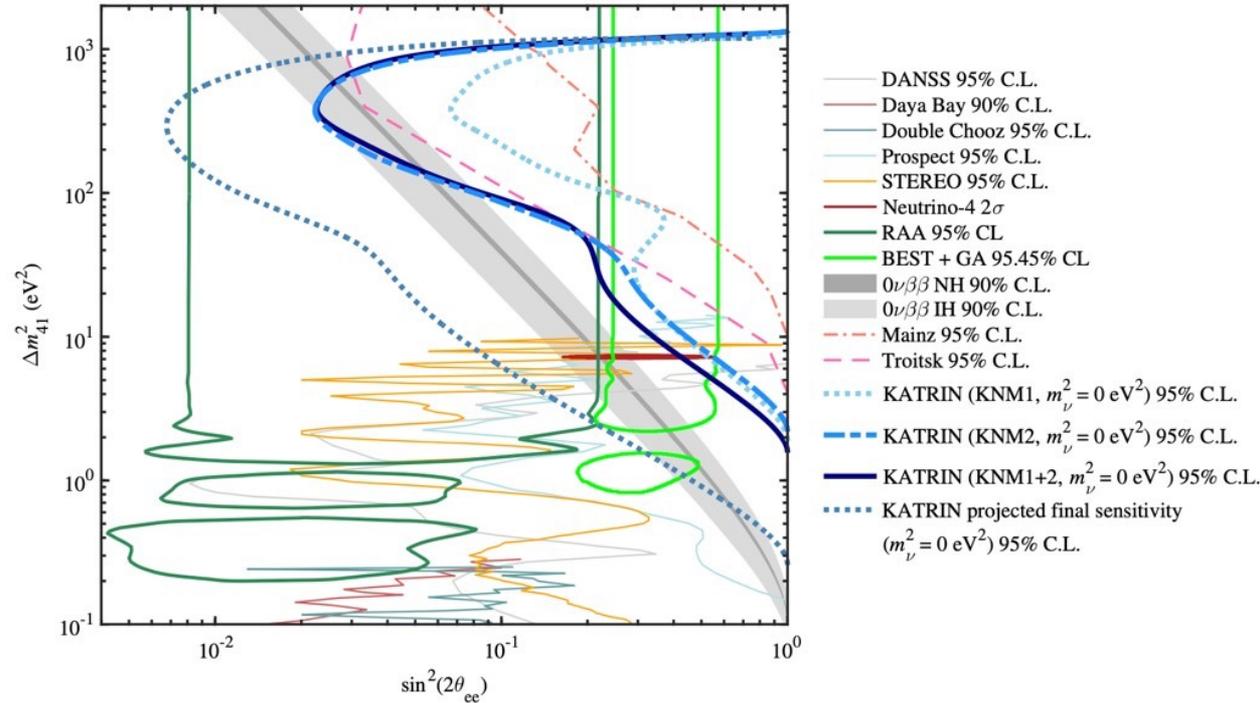
neutrinos droits ou antineutrinos gauches n'interagissent que par la gravitation

→ Les neutrinos participent au mécanisme de Higgs

Masses possibles:

1 eV à 10^{24} eV

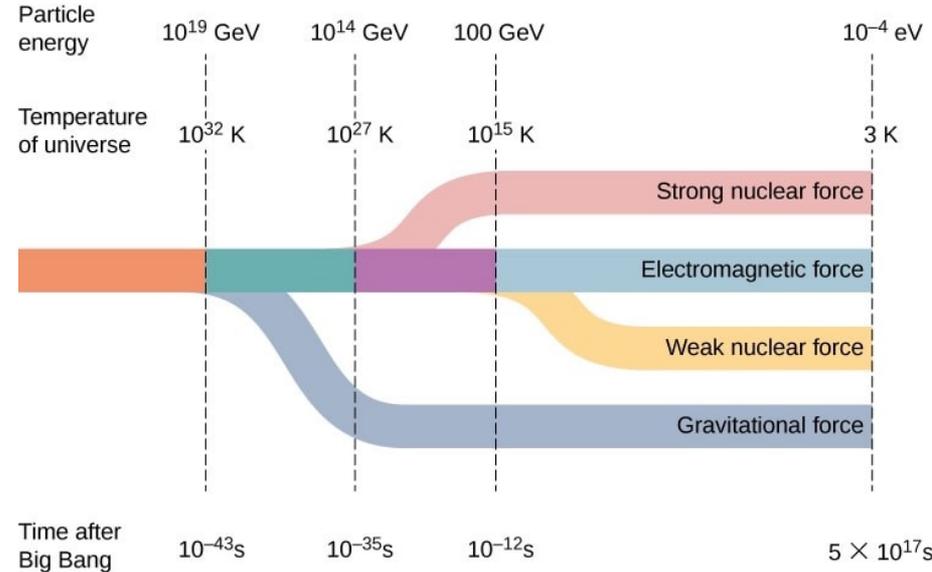
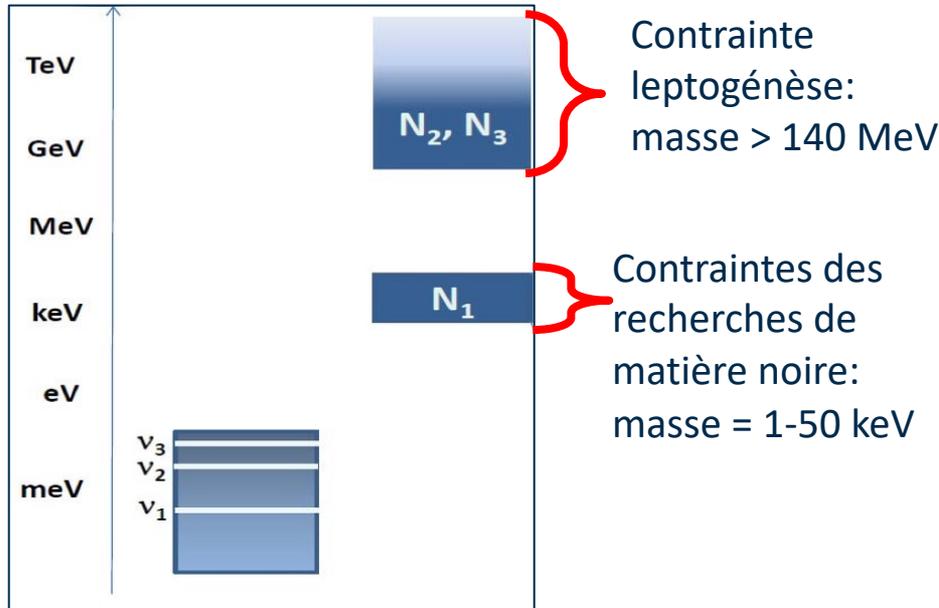
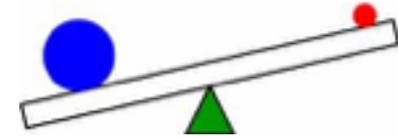
→ Rechercher depuis plus de 40 ans !



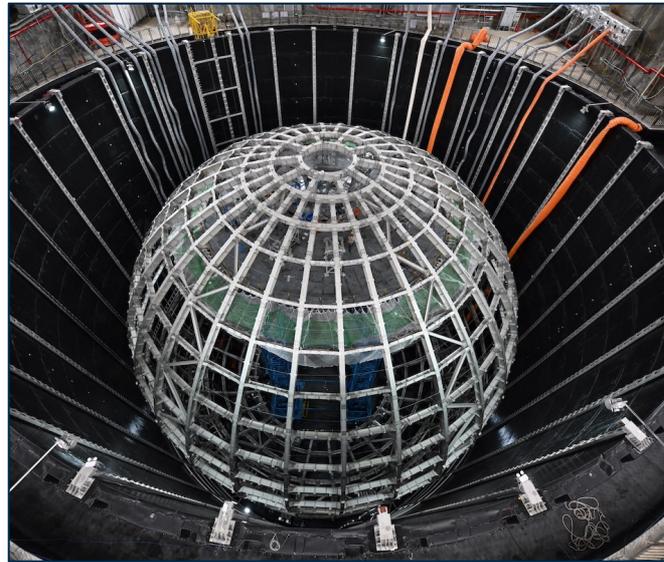
Recherche de neutrinos superlourds

“See-saw” mécanisme:

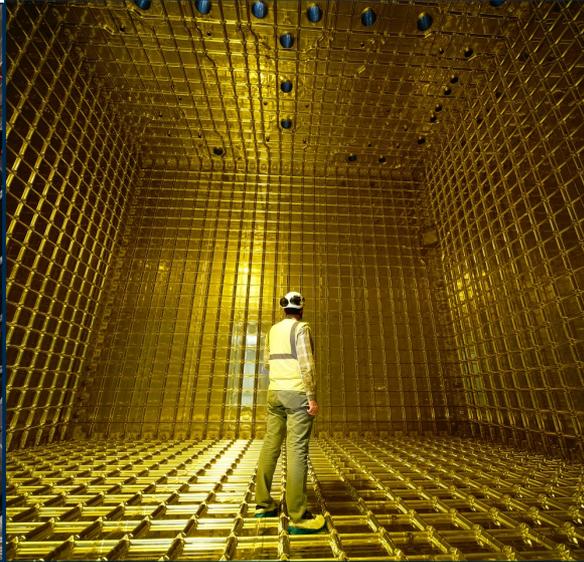
- les neutrinos droits seraient très lourds $\approx 10^{20}$ eV
- Motivé par les théories de grand unification



EN CONSTRUCTION: expériences neutrinos



JUNO (CN)



DUNE (US)



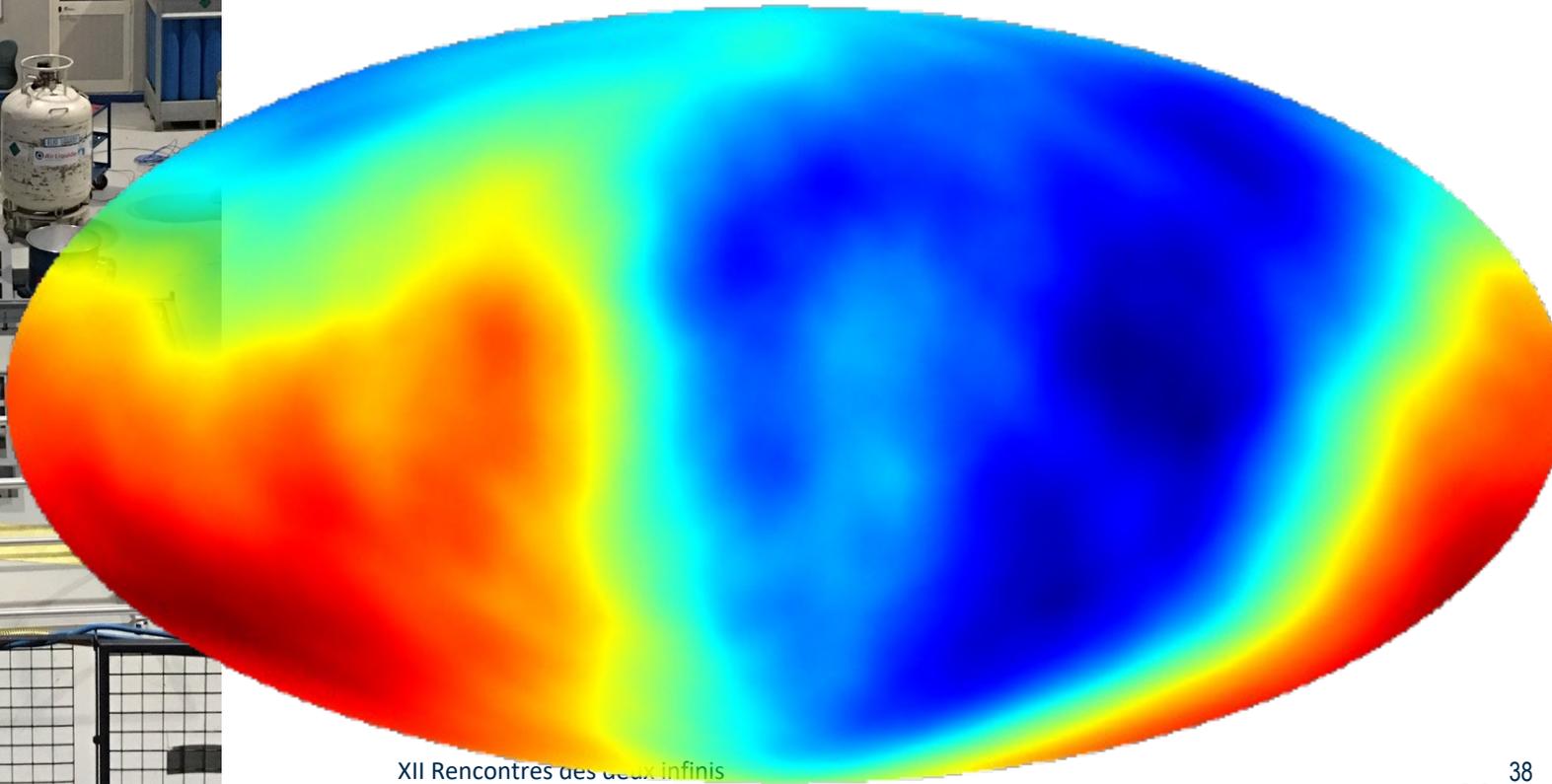
HYPER-K (JP)

Résultats majeurs attendus dans les prochains 10 ans!

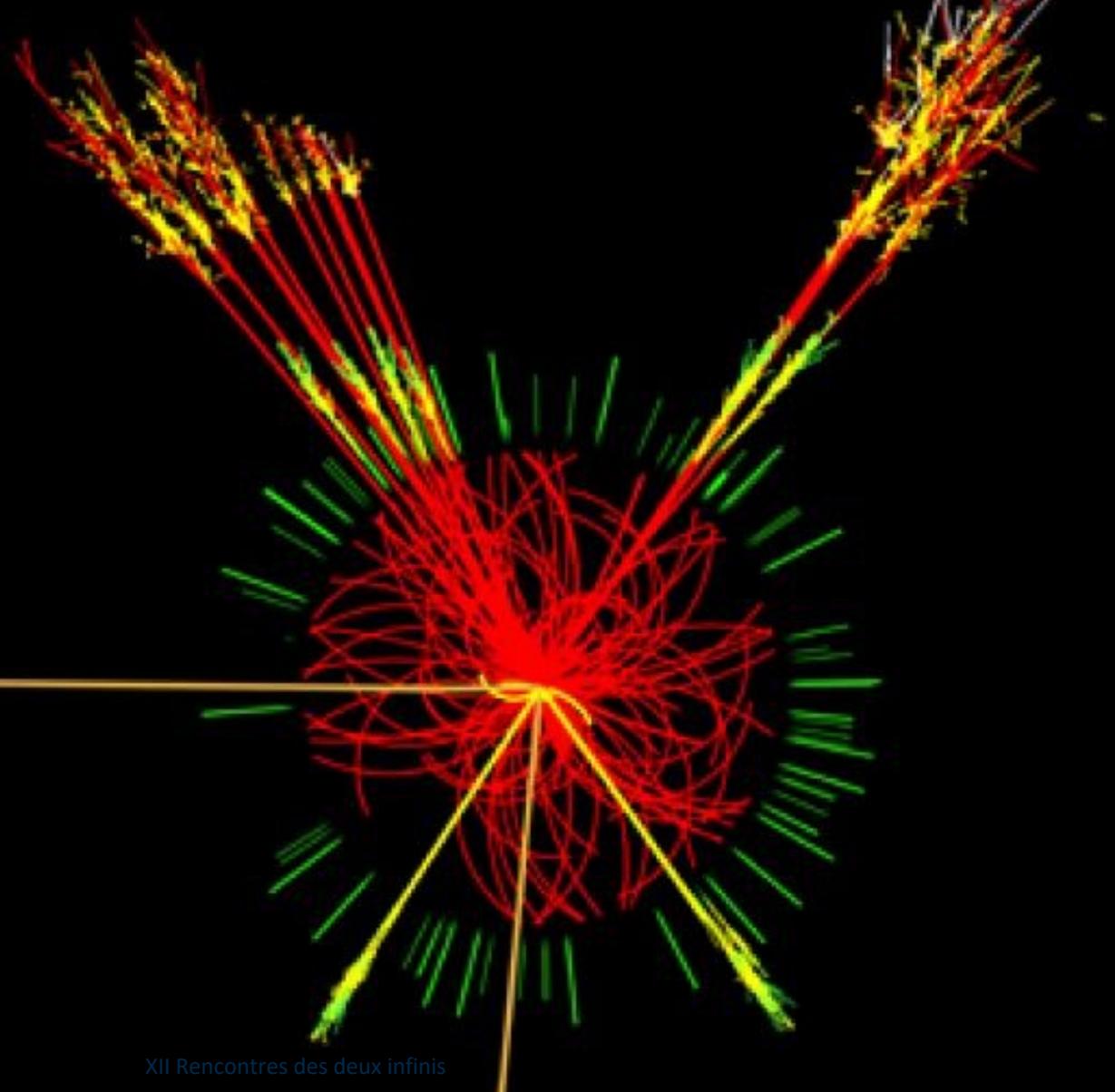
À TENTER: Cosmic Neutrino Background

Expérience Ptolemy au Gran Sasso

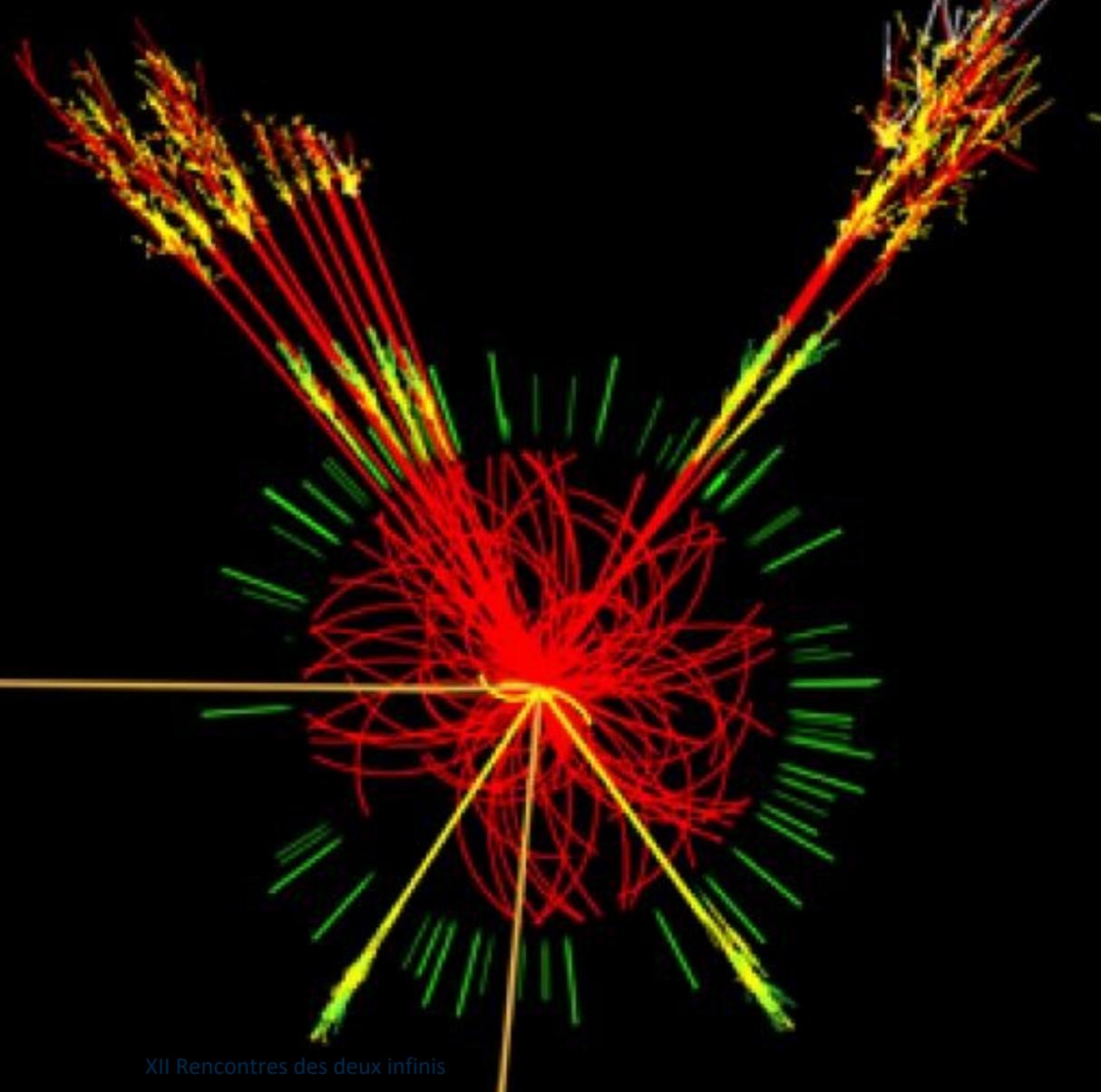
- La première lumière : émis 380 000 années après le « Big Bang »
- Les premiers neutrinos : émis 1s après le « Big Bang »
- Densité: 112 nu/cm^3
- Température: 1.95 K

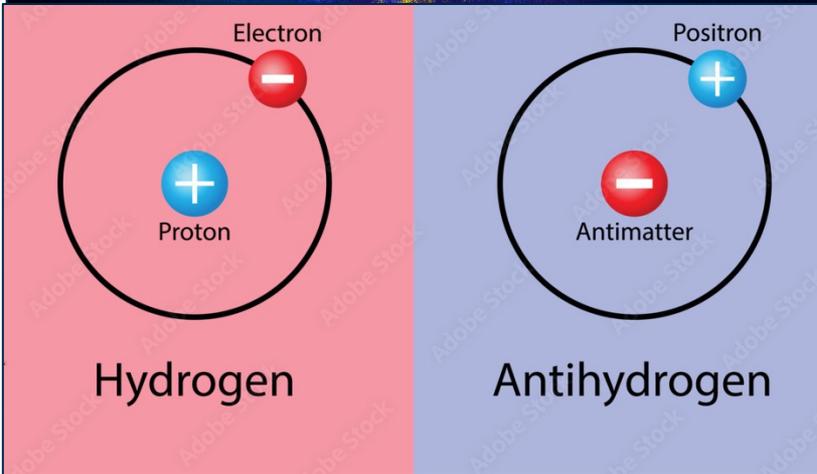


Et pourquoi
il y a-t-il
quelque
chose?



~~comment~~
Et pourquoi
il y a-t-il
quelque
chose?





« Big Bang »

→ autant de matière que d'antimatière

Aujourd'hui :

≈ 10^9 photons 1 proton et 0 antiprotons

Avant de $1 \mu\text{s}$:

→ 500 000 001 quarks et 500 000 000 antiquarks
se sont annihilés

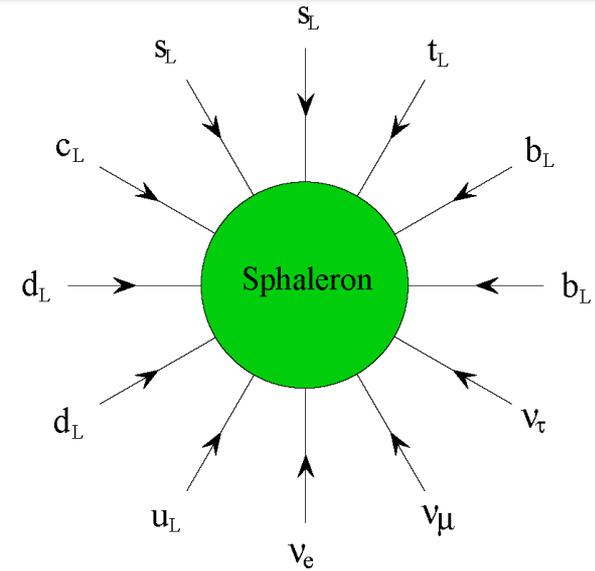
Pourquoi cet excès de quarks ?

Baryogénèse: entre 10^{-32} et 10^{-12} s

- Théorisé dans différents contextes:
Théorie de grand unification, Modèle standard)
- Conditions de Sakharov
 - Désintégration du proton:
temps de vie mesuré $> 10^{34}$ ans
 - Violation de CP: trop faible
 - Type de transition de phase électrofaible: à voir!

Leptogénèse:

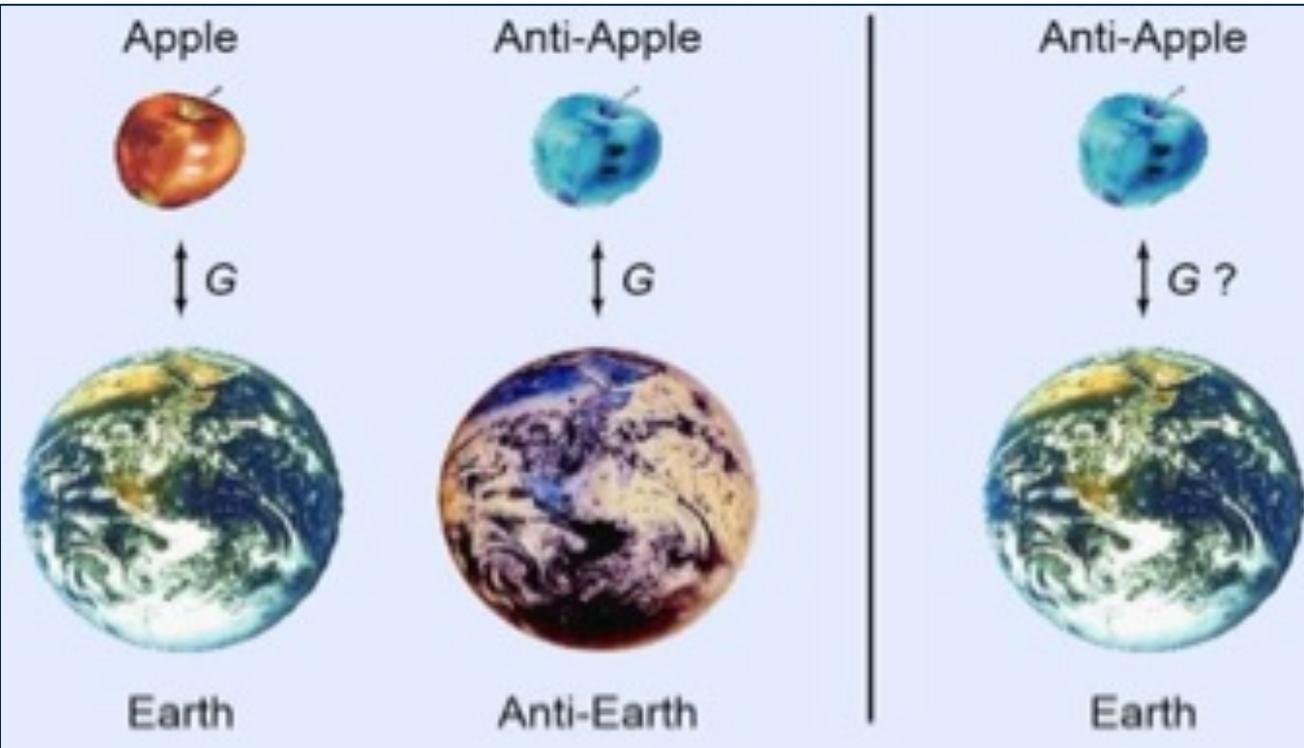
- Asymétrie entre leptons et antileptons dans les mêmes proportions que pour les baryons
 - violation de CP dans le secteur des neutrinos



Transition entre leptons et baryons dans le modèle standard : Sphalérons

- énergie du Sphaléron:
9 TeV sur un rayon 10^{-17} m
- Densité d'énergie produite trop faible au LHC !

À DÉCOUVRIR: Antigravitation



Si l'antimatière se comportait différemment que la matière dans un champ de gravitation ...?



Le CERN est le seul endroit au monde de production de l'antihydrogène !

Quelques exemples:

- Supersymétrie ou Physique « exotique » : HL-LHC (2030-2040), Futur collisionneur à haute énergie (2060...)
- Antigravitation: dans les 10 ans
- Ondes gravitationnelles primordiales: 15 ans
- Neutrinos : Majorana dans les 20 ans
- ...
- Graviton: 500 ans

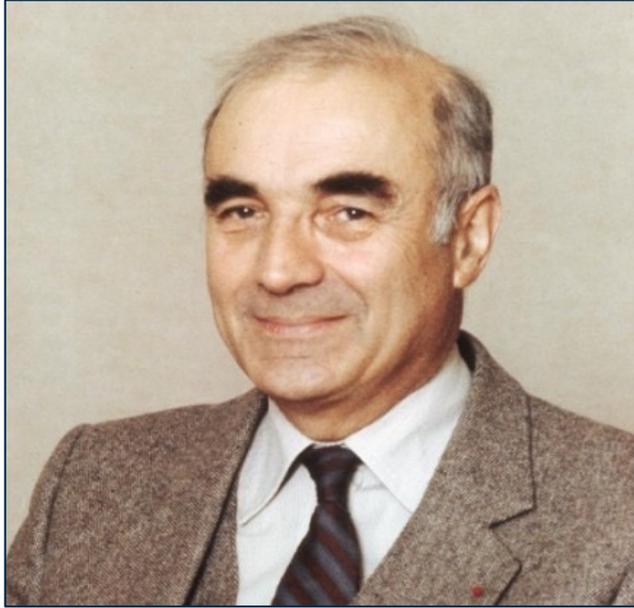
→ Les échelles de temps sont longues, mais nous progressons!

→ Libido sciendi : avons-nous envie de savoir?

sommes-nous intéressé aux grandes questions ?

Pouvons-nous convaincre que cela vaut la peine?

**Il faut une nouvelle génération de chercheurs avec
de nouvelles idées!**



« Je voudrais revenir sur terre, un instant, dans mille ans, juste le temps de voir ce que trente générations de savants auront su découvrir, et entendre ce que les hommes de science seront alors en humeur de dire. »

Hubert Curien

Ministre de la Recherche
DG CNRS

Président du CNES

Président de l'ESA

Président du conseil du CERN

...