

Au delà du Modèle Standard: *Rêves et réalités*

Costas **BACHAS** (*LPENS, Paris*)

Journée SFP 2023

Champs et Particules: **La crise de la cinquantaine ?**



1. Quelques mots d'introduction

Par pur hasard, les 50 ans de la division "Champs et Particules" de la SFP coïncident avec le 50ème anniversaire de **l'achèvement théorique du Modèle Standard.**

1973 est en effet l'année de publication des articles sur la *liberté asymptotique*

D. J. Gross and F. Wilczek, Phys. Rev. D 8 (1973) 3633

H. D. Politzer, Phys. Rev. Lett. 30 (1973) 1346



ainsi que sur la *violation de CP* et la *3ème famille des quarks et leptons*

M. Kobayashi and T. Maskawa, Prog. Theor. Phys. 49 (1973) 652

Ces découvertes faisaient suite à une série de percées dans le développement du cadre théorique (*théorie quantique des champs*), guidées par les très nombreuses données des accélérateurs de particules.

C'était un alignement des astres !

De façon un peu **arbitraire** on peut distinguer les "bâtisseurs de modèles" de ceux qui ont mis en lumière les principes/mécanismes sou-jacents (*symétrie de jauge, brisure, renormalisation, anomalies*)

"bâtisseurs de modèles"



Murray Gell-Mann
1969



Sheldon Glashow
1979



Abdus Salam
1979



Steven Weinberg
1979



Makoto Kobayashi
2008

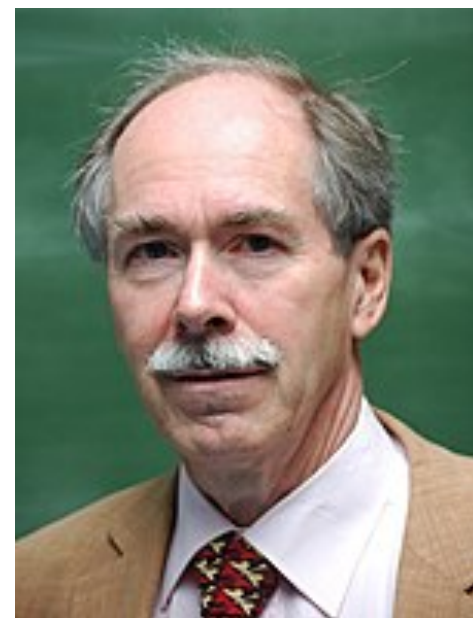


Toshihide Maskawa
2008

"principes/mécanismes"



Kenneth Wilson
1982



Gerard 't Hooft
1999



Martinus Veltman
1999



Yoichiro Nambu
2008



François Englert
2013



Peter Higgs
2013

Les décennies suivantes étaient celles de la **confirmation du MS**, grâce au travail des expérimentateurs et de ceux qui ont pu calculer ses conséquences avec grande précision (notamment celles de la QCD)

Dans un certain sens, pour quelqu'un qui commençait une thèse théorique à la fin des années '70 "la messe était (presque, et pour longtemps) dite."

Ce n'était pourtant pas le sentiment à l'époque: (1) les progrès théoriques étaient riches et rapides, et (2) personne ne s'attendait à la formidable *résilience du Modèle Standard* face aux nouvelles données expérimentales

Bien évidemment les **oscillations des neutrinos** sortent du cadre strict du MS; et toutes les prédictions de ce Modèle ne sont pas encore extraites (par ex. pour la matière dense hadronique)

Mais les plus "grandes" mises en cause du MS sont à l'heure actuelle indirectes, et proviennent de l'astrophysique et de la cosmologie:

nature de la matière et de l'énergie noire, baryogénèse, inflation

Ce n'est donc pas un hasard si les efforts des théoricien(ne)s se sont tourné plus vers une meilleure compréhension du cadre mathématique, en incluant la 4ème force (jusqu'alors négligée): celle de la **gravité**.

Il est bien sûr impossible de résumer en 40 minutes le travail de plusieurs décennies. Par idiosyncrasie je vais me restreindre aux trois idées qu'on pourrait qualifier de plus ambitieuses, car elles élargissent le cadre conceptuel du MS:

- Les théories de **grande unification**
 - La **supersymétrie**
- La théorie des **(super)cordes**

D'autres idées souvent plus anciennes (*axions, WIMPS, dimensions supplémentaires*) font partie de ces cadres, même si on peut les étudier séparément

2. **La Grande Unification**

Une idée simple et naturelle: **unifier les groupes de jauge du MS**
dans un groupe plus grand, par exemple:

Pati, Salam '73; Georgi, Glasow '74;
Fritzsch, Minkowski '75

$$SO(10) \supset SU(3)_c \times SU(2)_w \times U(1)_Y$$

$$45 \rightarrow (8,1)_0 + (1,3)_0 + (1,1)_0 \quad \leftarrow \text{gluons, W, Z, } \gamma$$

$$+ (3,2)_{1/6,-5/6} + c.c. \quad \leftarrow \text{leptoquarks}$$

$$+ (3,1)_{2/3} + c.c. + (1,1)_{\pm 1,0} \quad \leftarrow U(1)_{B-L}$$

La Grande symétrie doit être brisée à une énergie suffisamment haute pour éviter la désintégration trop rapide du proton.

Avantage des GUTs: *économie de paramètres par rapport au MS*

Quand on enseigne le MS, l'attribution des 3×5 valeurs de l' **hypercharge** paraît arbitraire:

1ère famille:

	$u (3, 1)_{4/3}$
$Q (3, 2)_{1/3}$	$d (3, 1)_{-2/3}$
$L (1, 2)_{-1}$	$e (1, 1)_{-2}$
	$\nu : (1, 1)_0$

neutrino sterile

et idem pour les deux autres familles.

Pourquoi ces valeurs ? *paraphrasant Rabi: who ordered that ?*

Table 15.1: The quantum numbers of the **16** dimensional representation of SO(10).

State	Y	Color	Weak
ν^c	0	- - -	- -
e^c	2	- - -	+ +
u_r	1/3	+ - -	- +
d_r	1/3	+ - -	+ -
u_b	1/3	- + -	- +
d_b	1/3	- + -	+ -
u_y	1/3	- - +	- +
d_y	1/3	- - +	+ -
u_r^c	-4/3	- + +	- -
u_b^c	-4/3	+ - +	- -
u_y^c	-4/3	+ + -	- -
d_r^c	2/3	- + +	+ +
d_b^c	2/3	+ - +	+ +
d_y^c	2/3	+ + -	+ +
ν	-1	+ + +	- +
e	-1	+ + +	+ -

Dans SO(10) les quarks et leptons de chaque famille sont unifiés dans **une seule irrep**

L'attribution des hypercharges du MS est automatique, ainsi que l'intégralité de q_{e1}

Cette dernière est testée avec précision:

$$q_{\text{proton}} + q_{\text{electron}} \lesssim 10^{-20} q_{\text{electron}}$$

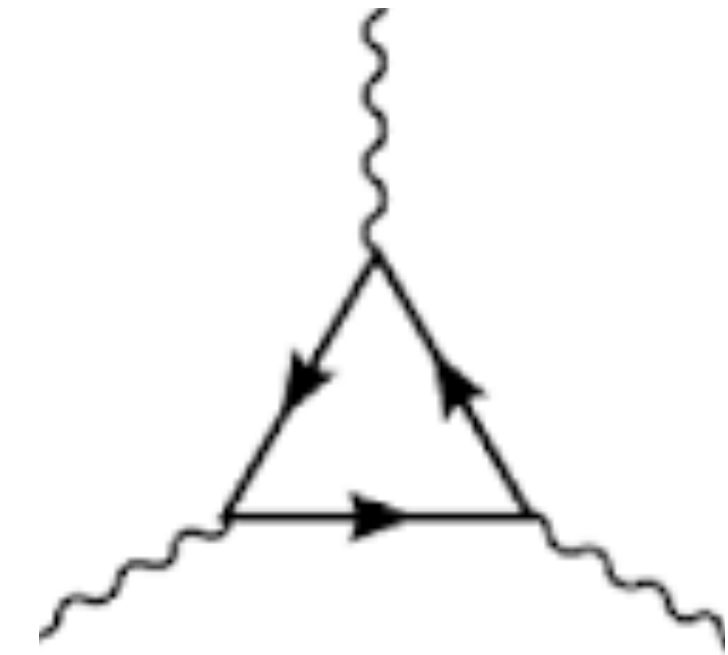
Bressi et al, 1102.2766

Ce qu'on a, en fait, par la suite compris que ce qui est déterminant est **l'intégralité de la charge électrique**. La raison est que **l'annulation des anomalies** (y inclus mixte gravitationnelle) impose quatre relations entre hypercharges:

C. Bouchiat, J. Iliopoulos and P. Meyer,
Phys. Lett. 38B, 519 (1972)

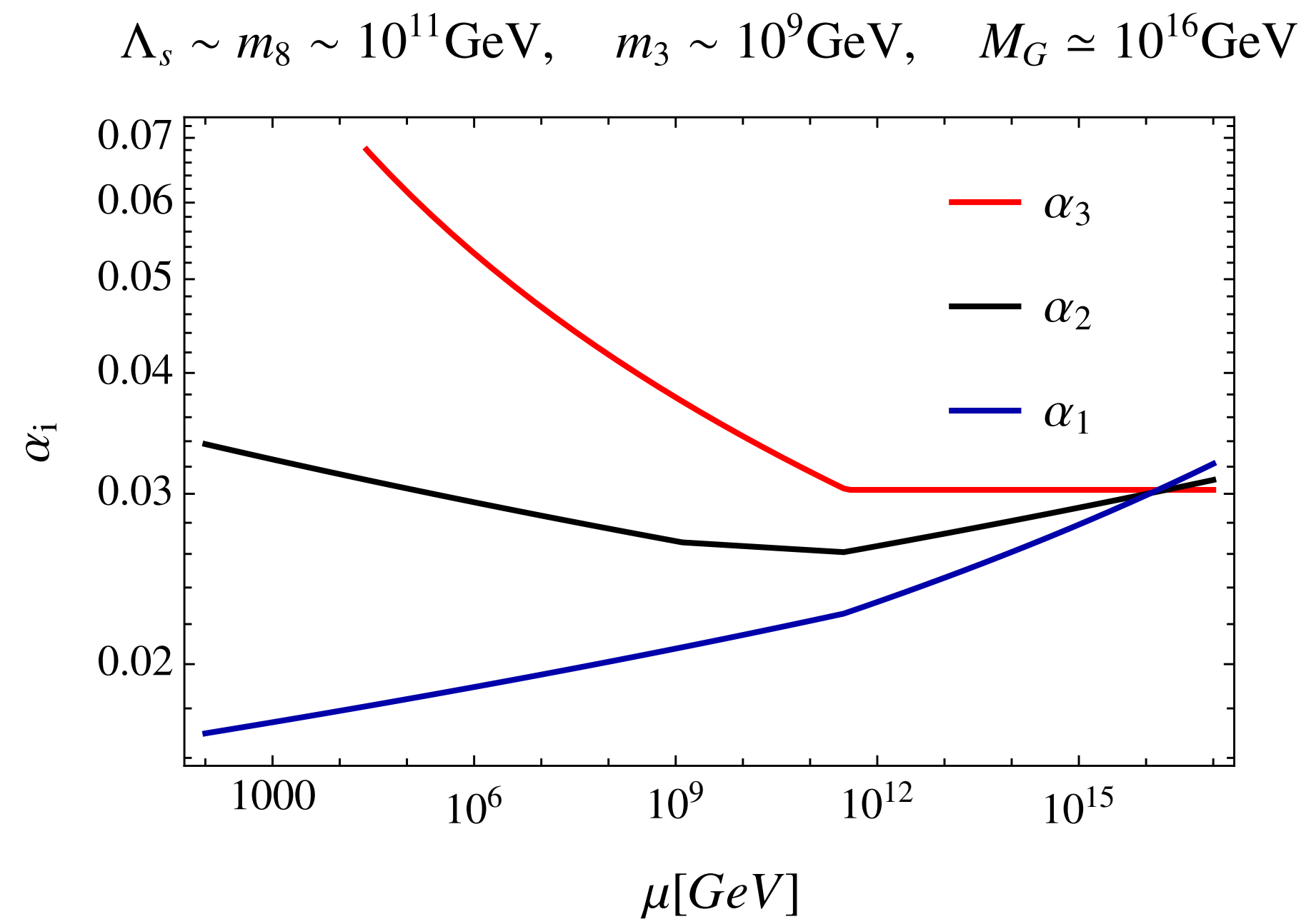
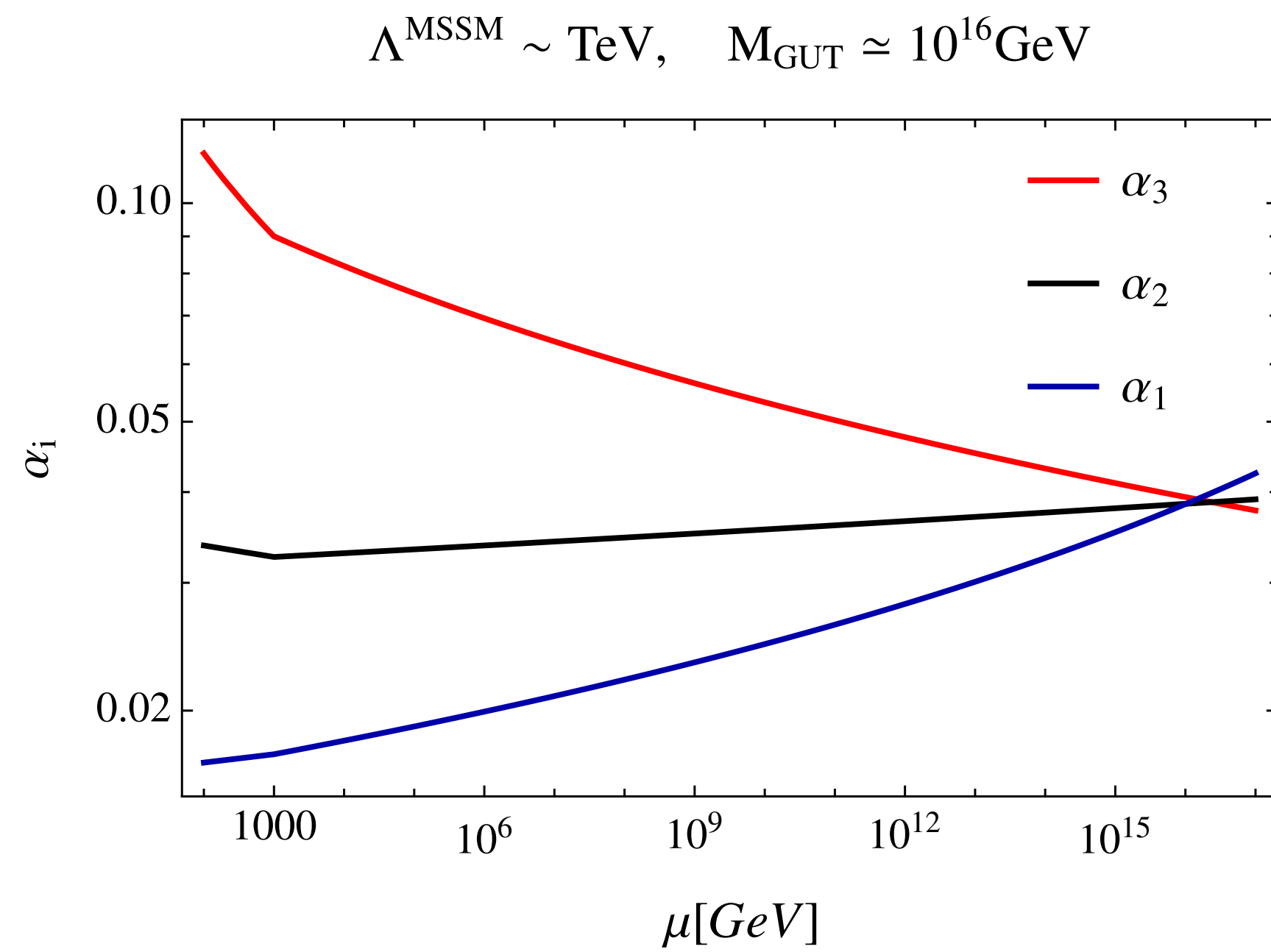
R. Delbourgo and A. Salam,
Phys. Lett. 40B, 381 (1972)

$$\sum Y = \sum Y^3 = \sum_{\text{doublets}} Y = \sum_{\text{triplets}} Y = 0$$



En supposant l'intégralité de la charge + trois familles identiques, ces relations n'admettent qu'une solution non-triviale, celle du MS.

La Grande Unification impose l'intégralité d'office, ne permet pas de différencier les 3 familles, et *incorpore naturellement le neutrino sterile*.



Senjanovic, Zantedeschi,
hep-ph/2304.07932

Figure 2: *Left:* Standard Model running with super-partners around TeV scale. *Right:* Minimal supersymmetric $SU(5)$ running. An example with high scale.

*2 autres indices
encourageants:*

- l'unification (approximative) des couplages de jauge
- B-L est une symétrie de jauge

mais un secteur scalaire moins élégant.

Deux prédictions robustes:

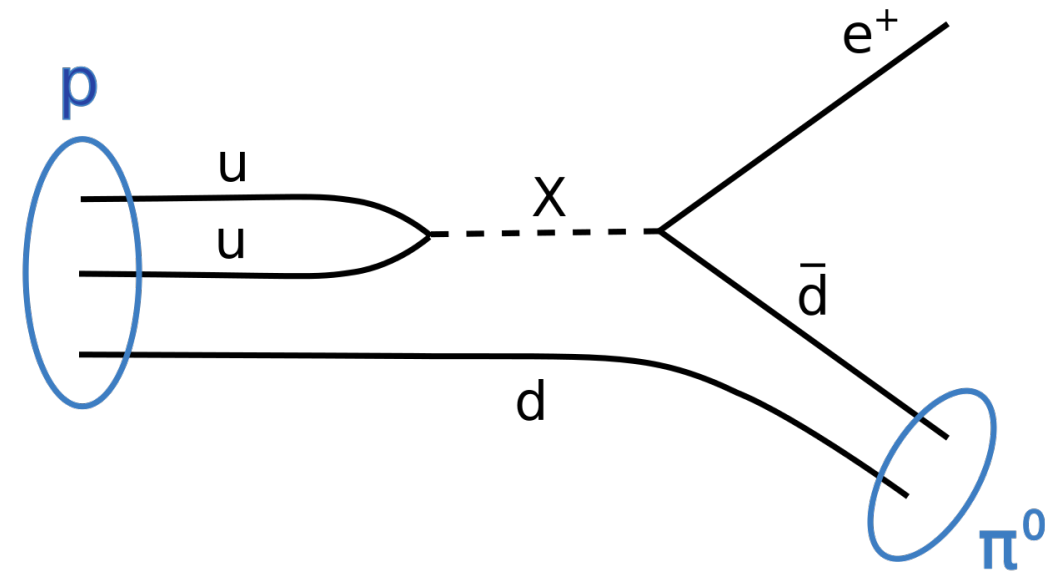
(a) les **monopoles magnétiques**

$$M_{\text{mon}} \simeq \frac{4\pi M_X}{g^2} \sim 10^{15-18} \text{ GeV}$$

*recherchés dans la matière, les rayons cosmiques,
par effet Callan-Rubakov: **pas de détection***

(b) la **désintégration du proton**

$$\tau_p \sim \frac{M_X^4}{g^2 m_p^5} \sim 10^{34-38} \text{ yrs}$$



si $M_X \sim 10^{16} \text{ GeV}$ et R -parité

*G. Farrar and P. Fayet,
Phys. Lett. B76, 575 (1978)*

pas vu limites Super-Kamiokande :
90 % CL

$$\tau_{p \rightarrow \pi^0 e^+} > 2.1 \times 10^{34} \text{ yrs}$$

$$\tau_{p \rightarrow K^+ \bar{\nu}} > 5.5 \times 10^{33} \text{ yrs}$$

$$\tau_{n \rightarrow e^+ \pi^-} > 2 \times 10^{33} \text{ yrs}$$

Bhattiprolu et al, hep-ph/2210.07735

Le cas des GUT est emblématique de la "crise de la cinquantaine", pour reprendre le titre de cette journée spéciale:

- (1) sur le plan purement théorique, l'idée est bien motivée, voire aléchante,
- (2) mais l'échelle caractéristique M_{GUT} est hors portée des collisionneurs,
- (3) les tests indirects dépendent des détails des modèles (secteur scalaire, susy ou pas susy, corrections de seuil, orbifolds). Etant négatifs ils limitent l'espace de paramètres mais sans écarter l'idée définitivement.

Hyper-Kamiokande, JUNO, DUNE, THEIA (un ordre de grandeur ?) restent parmi les recherches "d'exotica" les mieux motivées.

2. **La supersymétrie**

Le cas de la susy est différent. Si les GUTs "expliquent" certains faits du MS, la susy est a priori moins motivée sur le plan phénoménologique:

multiplication des paramètres, sans indice même indirect de son existence

Les arguments en faveur de la susy sont purement théoriques:

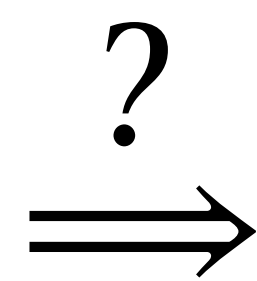
- Seule extension possible de la symétrie de Poincaré
(élude le théorème "no go" de *Coleman-Mandula*)
- **nécessaire pour l'unification de la gravité** (supercordes)
- **Protège l'hierarchie** $m_{\text{BEH}} \ll M_{\text{U}}$

si $m_{\text{susy}} \sim m_{\text{BEH}}$

C'est ce dernier argument qui a mis la susy au devant de la scène, puisque sa vérification expérimentale semblait être à la portée du LHC

La prédiction la plus directe de la susy est que spectre du MS est doublé
(*gauginos, squarks, sleptons, . . .*)

Puisque rien n'a été vu au LHC
doit on conclure que

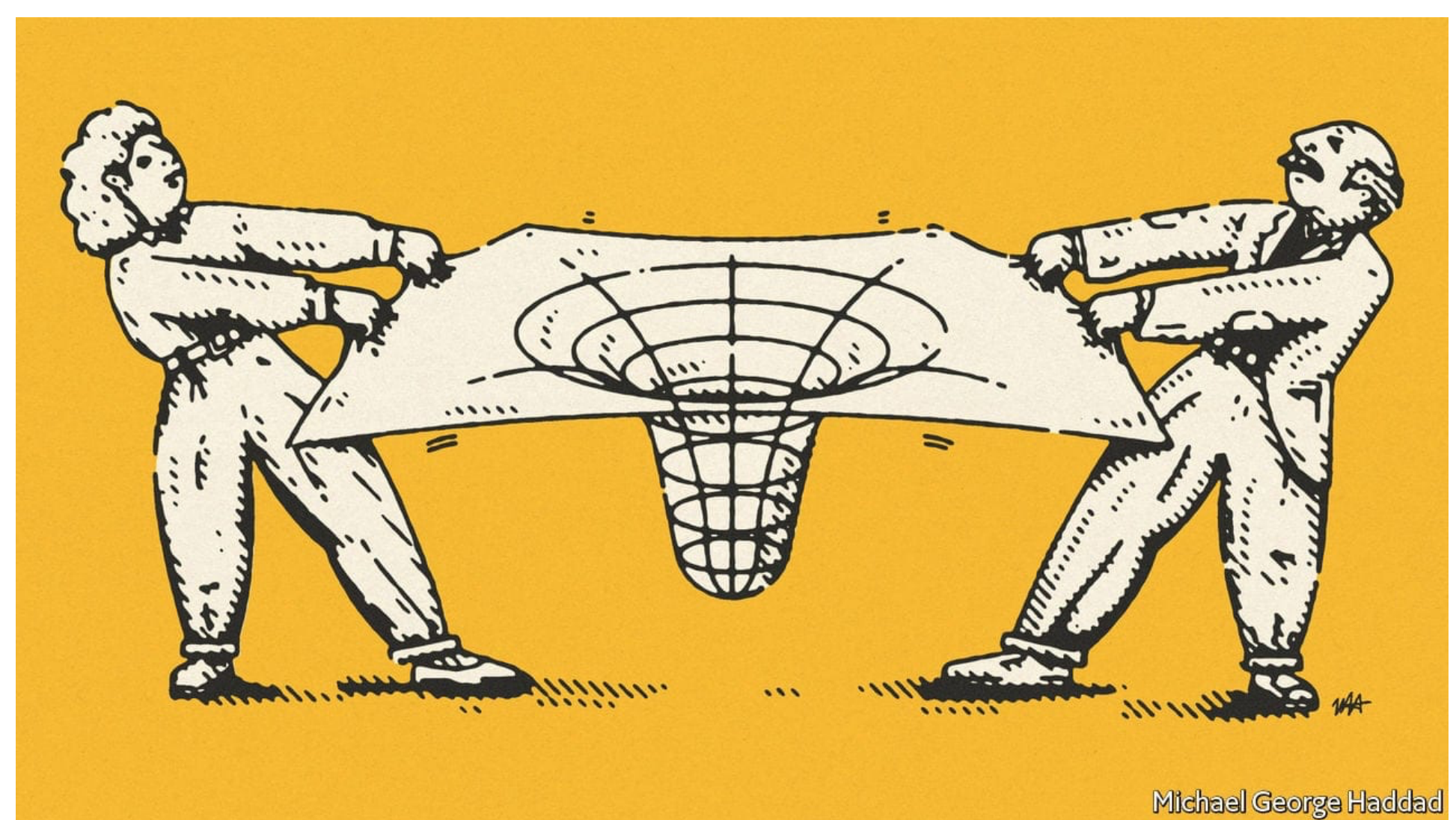


l'argument d'hiérarchie est fallacieux;
la valeur de m_{BEH} ne peut être comprise
que par des considérations **anthropiques**

Science & technology | Life, the universe and everything

Physics seeks the future

Bye, bye, little Susy



Michael George Haddad

Aug 25th 2021

Share

"forever", ou
"et à bientôt" ?

L'histoire de comment la question d'hierarchie en est arrivée à jouer un si grand rôle est intéressante; elle est racontée avec brio par [Giudice: <https://arxiv.org/pdf/0801.2562>]:

➔ principe totalitaire de **Gell-Mann** (?) : “Everything which is not forbidden is compulsory”

➔ **Wilson** (1970, plus tard retracté):

"It is interesting to note that there are no weakly coupled scalar particles in nature; scalar particles are the only kind of free particles whose mass term does not break either an internal or a gauge symmetry"

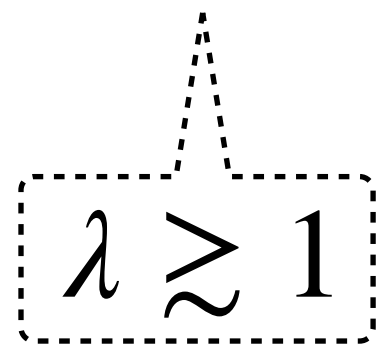
➔ **Maiani, 't Hooft, Susskind** : le boson de Brout-Englert-Higgs n'arrivera pas tout seul
(1979) aux énergies $\sim \text{TeV}$

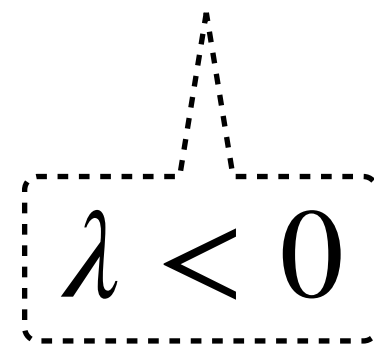
Deux idées pour expliquer, ou au moins protéger l'hierarchie $m_{\text{BEH}} \ll M_{\text{U}}$:

- le higgs est composite (technicouleur)
- le higgs est élémentaire mais supersymétrique

Pourtant, les nouvelles particules (superpartenaires, technipions, . . .) ne sont **pas aussi inévitables** que ne l'étaient les bosons W^\pm, Z et le higgs, car le **MS minimal** pouvait s'étendre jusqu'à très haute énergie

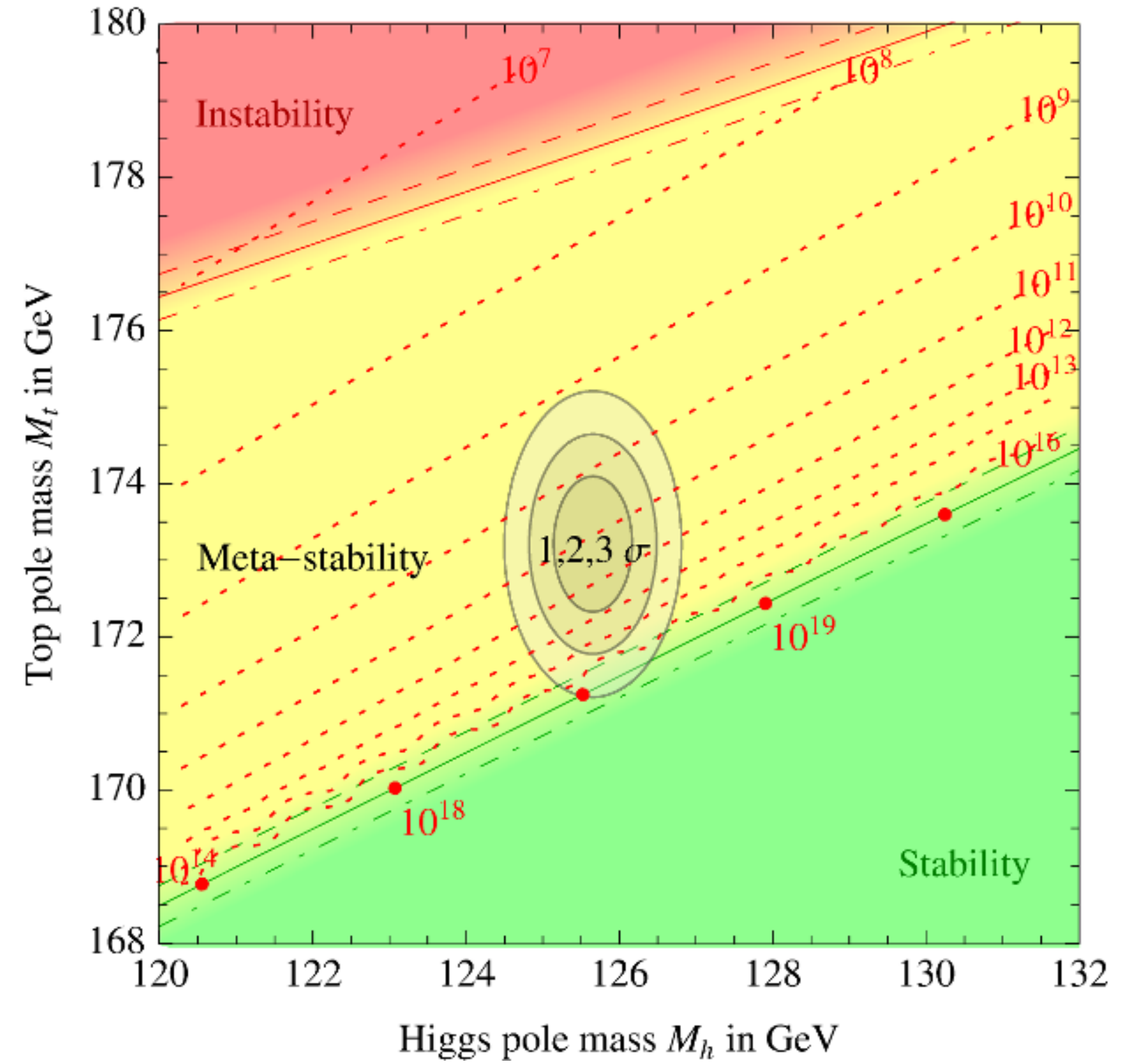
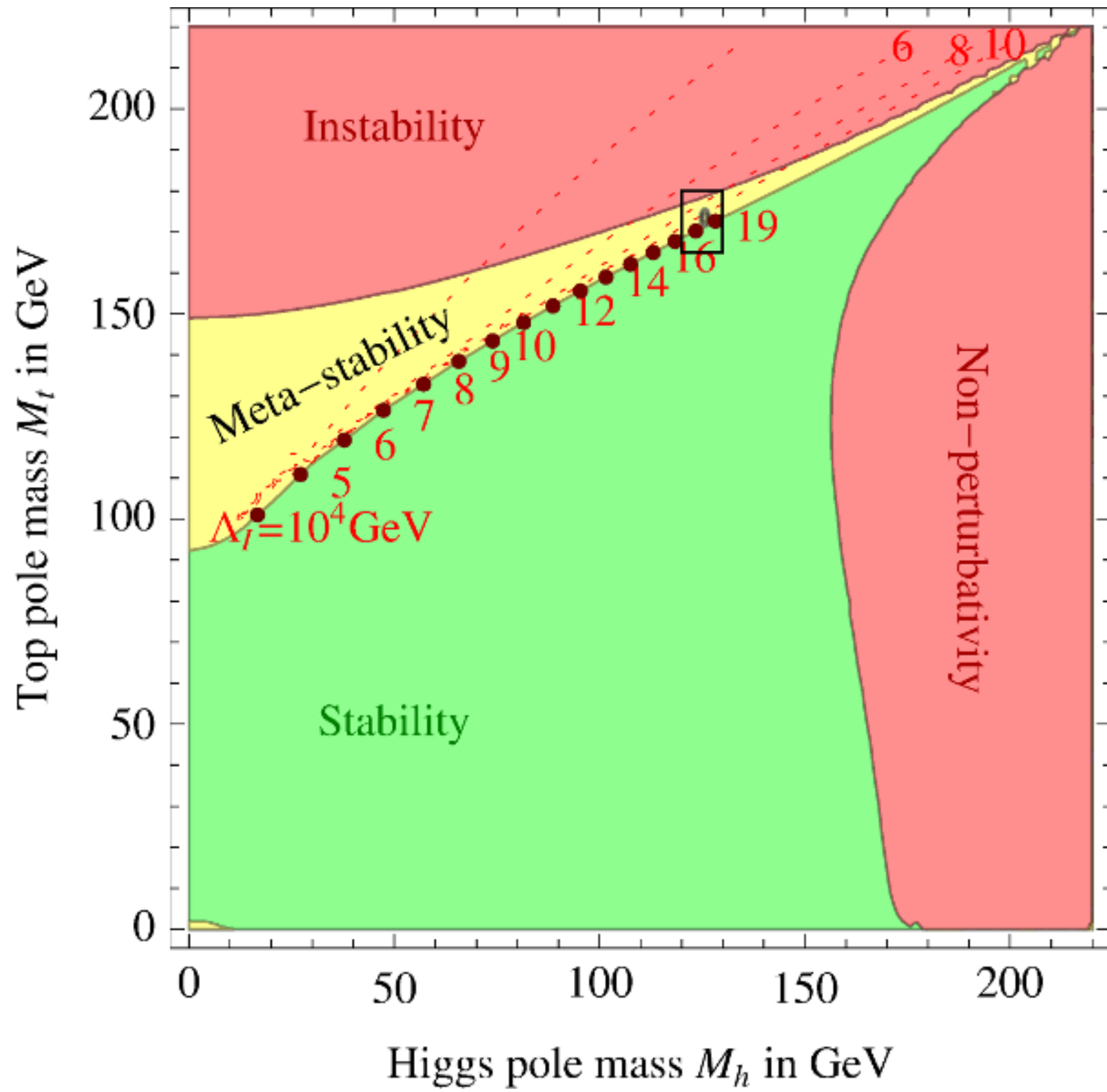
En effet, même si le MMS est une théorie renormalisable, sa validité serait menacée si l'évolution logarithmique conduisait à un régime de **couplage fort, ou d'instabilité**


$$\lambda \gtrsim 1$$


$$\lambda < 0$$

$$V(H) = \frac{\lambda}{4}(H^\dagger H - v^2)^2$$

Le BEH a été découvert dans la **fenêtre étroite** où ces problèmes sont absents

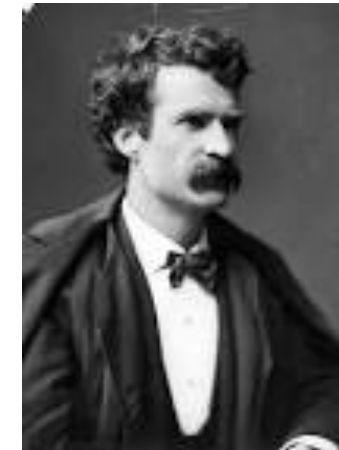


de: Degrassi et al, 1205.6497; Butazzo et al, 1307.3536

Cette résilience du MMS est pour l'instant la leçon la plus étonnante du LHC

Cependant, il ne faut pas enterrer si vite la susy

"The reports of my death are greatly exaggerated"

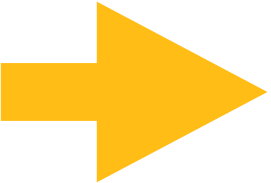


- (1) le MSSM dépend d'un **grand nombre de paramètres** (*une centaine si on est agnostique*) et ces extensions (nMSSM, . . .) de bien plus. Même si cet espace de paramètres rétrécit, on est loin d'exclure l'idée de low-E susy.

- (2) Le LHC aurait pu, en fait, enterrer la supersymétrie. Car une prédiction robuste est que **le Higgs le plus léger est "léger"**.

Pour être plus précis, le MSSM contient **deux doublets** de Higgs avec potentiel

$$V = V_D + V_F + V_{\text{soft}}$$


$$V_D = \frac{g_2^2}{8} \left(4 |H_1^\dagger H_2|^2 - 2 |H_1|^2 |H_2|^2 + |H_1|^4 + |H_2|^4 \right) + \frac{g_1^2}{8} \left(|H_1|^2 - |H_2|^2 \right)^2$$

" λ " déterminé
par couplages de jauge

$$V_F = \mu^2 \left(|H_1|^2 + |H_2|^2 \right)$$

$$V_{\text{soft}} = m_1^2 |H_1|^2 + m_2^2 |H_2|^2 + B\mu (H_1 \cdot H_2 + c.c.)$$

Fayet, Farrar

...

cf. A. Djouadi et al, hep-ph/9901246

le secteur du higgs a donc **deux** paramètres de plus que le MMS, et **cinq** particules scalaires:

2 CP-pairs, 1 CP-impair, 2 chargés

h, H A H^\pm

Au niveau classique (des arbres):

$$m_h^2 \leq m_Z^2 (\cos 2\beta)^2$$

$$\tan \beta = \frac{v_1}{v_2}$$

$$v_1^2 + v_2^2 = (246 \text{ GeV})^2$$

[la limite est saturée quand $m_H \simeq m_{H^\pm} \simeq m_A \gg m_Z$]

Ces relations élimineraient la susy, si elles ne recevaient pas d'importantes **corrections radiatives**, provenant de boucles des quarks et squarks de la 3ème génération

Pour le MSSM celles-ci poussent la limite à $m_h \leq 135 \text{ GeV}$

La pousser bien au delà paraît très difficile, par exemple pour le nMSSM

$$m_h \leq 140 \text{ GeV} \quad \text{Ellwanger, Hugonie hep-ph/0612133}$$

On peut donc aussi voir le verre à moitié plein:

le LHC aurait pu enterrer la susy, et ne l'a pas fait
même si il a rendu le "model-building" moins confortable

[et comme il n'est pas loin d'enterrer la techicouleur]

Sommes nous au seuil de découverte au High Luminosity LHC ?

4. **Gravité quantique & supercordes**

Jusqu'au début des années '70 la gravitation et la physique des particules ne se parlaient pas. La théorie classique d'Einstein suffit pour décrire les phénomènes aux échelles cosmiques, et les quelques efforts balbutiants pour la traiter comme une théorie quantique de champs butait sur le problème de **divergences ultraviolettes**.

"There was a separate interlude in the mid-fifties when several people (Klein, Landau, Pauli, and I) independently suggested that QG might be a universal regulator for the infinities then ravaging matter loop calculations, but nothing came of it. My foolhardy attempt . . . at the first conference devoted to GR at Chapel Hill, in 1957, was rapidly shot down by Feynman."

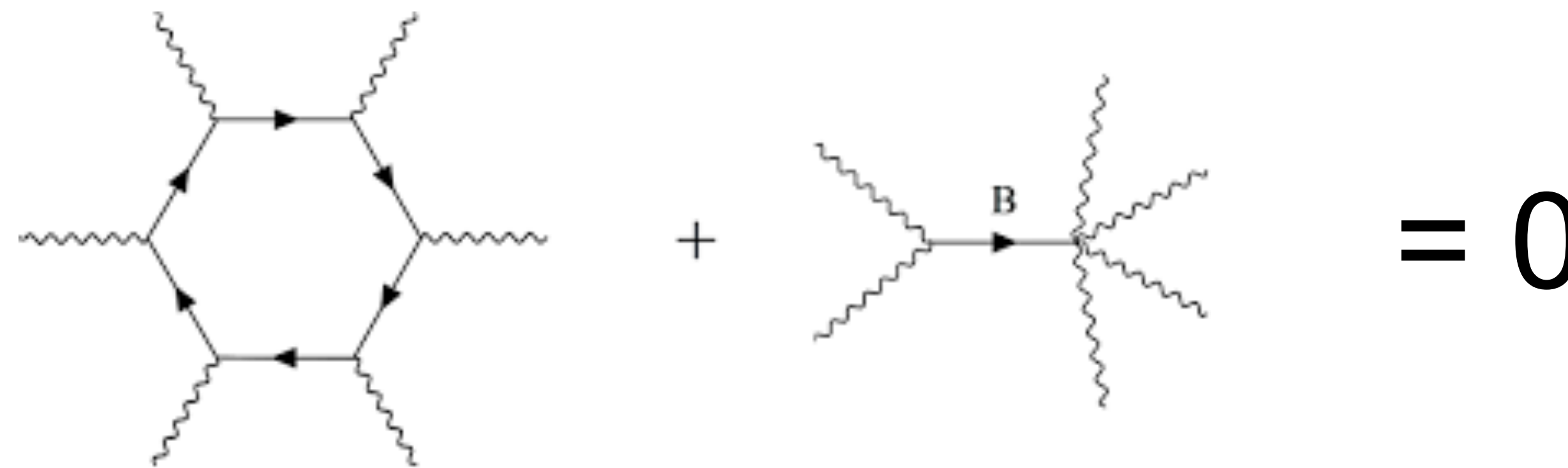
"Quite separately from this line is the lesson Heisenberg drew from Fermi's weak interaction model which, unlike quantum electrodynamics, had a dimensional coupling constant. He noted that any theory of this type would be beset by infinities of rising virulence with each perturbative order. This applied to GR with Newton's constant cast a complete pall on QG. What Heisenberg told us was that perturbative QG was guaranteed to lose all predictive power as soon as one left its classical, tree, level. On the other hand, GR's quantization is mandated because Einstein's equations have matter as the source of gravity (I mercifully do not cite some feeble attempts to circumvent this.)"

*S. Deser, American Journal of
Physics 90, 249–250 (2022)*

La théorie des cordes, dont le bût initial était de décrire les interactions fortes, a proposé une solution du problème. Elle a été construite dans les années '70

Veneziano, Schwarz, Scherk, Yoneya, Neveu, Ramond, . . .

avec comme point culminant le nouveau **mécanisme d'annulation des anomalies de Green et Schwarz ('84)** et la construction de la **corde hétérotique**.



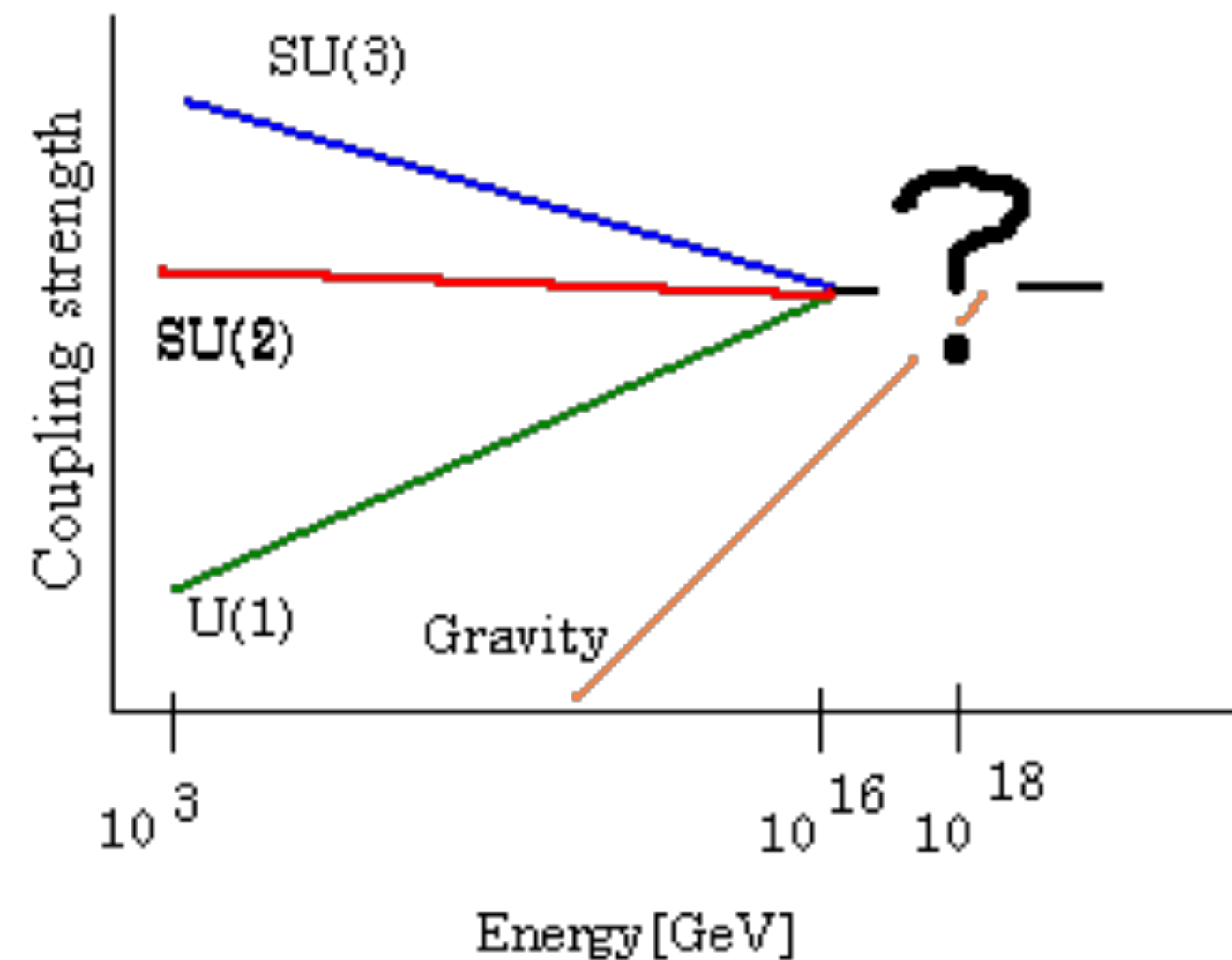
citant [Polchinski](#) (on "why string theory"):

"It could be that we suffer from a failure of imagination, and that there are other solutions. However, we see from the example of the weak interaction that if we can find even one solution to a short-distance problem we should take it very seriously and see where it leads."

La cohérence UV impose que l'espace-temps ait **10 dimensions**, où le groupe de

jauge est $E_8 \times E_8$ ou $SO(32)$ et la théorie est **supersymétrique**.

$$\begin{array}{c} \cup \quad \cup \\ SO(10) \end{array}$$



La susy, la Grande Unification et les dimensions supplémentaires n'étaient pas ajoutées a posteriori, il s'agit d'ingrédients indispensables.

Cette unicité étonnante a fait croire au tout début que la cohérence UV conduirait à de prédictions & tests conclusifs aux énergies accessibles.

Cet espoir a été vite déçu :

- Le processus de "**compactification**" fait paraître de nombreux **paramètres dynamiques** qui, du point de vue de 4 dimensions, s'apparentent aux valeurs des champs scalaires dans le vide (dilaton, volume interne, . . .).

La théorie est quasi-unique à 10 dimensions, mais pas à 4 !

- Nos outils mathématiques sont inadéquats pour analyser la dynamique dans ce **paysage de vides** classiques, notamment **la brisure spontanée de la susy**.

Cette brisure déstabilise l'état du vide, car contrairement aux modèles précédents on ne peut plus négliger la force gravitationnelle [elle fait partie intégrante de la théorie des cordes]. *Même l'échelle de brisure de la susy reste incertaine.*

Les efforts pour extraire des conséquences phénoménologiques, avec les moyens de bord, continuent: en faisant le lien avec les modèles phénoménologiques de la susy, mais aussi en émettant d' autres hypothèses (**Univers branaire, grandes dimensions**).

Notons qu'une prédiction générale de la théorie est que le **secteur gravitationnelle est étendu**, notamment par l' échange de particules scalaires (*modules*).

Mais de quelle portée ?

La recherche d'une cinquième force, par des expériences de type Cavendish (torsion balance) et autres a repoussé la limite aux alentours de $\sim 100 \mu m$

Impossible à nouveau de dire si on est proche, ou non, du seuil de détection.

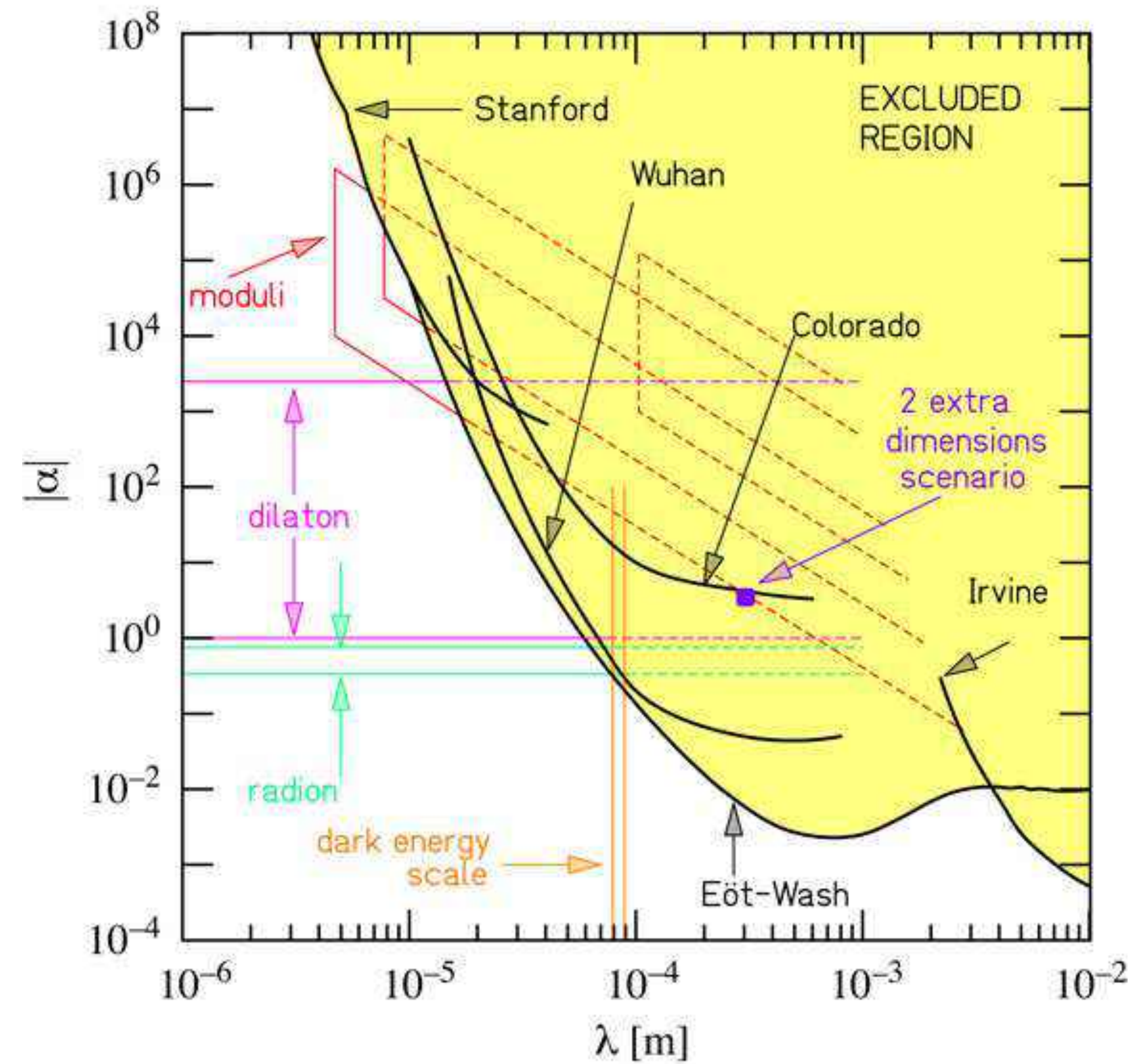


Fig. 9. Constraints on Yukawa violations of the gravitational $1/r^2$ law for $\lambda \leq 1$ cm. The shaded region is excluded at the 95% confidence level. Heavy lines labeled Eöt-Wash, Irvine, Wuhan, Colorado and Stanford show experimental constraints from Refs. [61,62,69,70,59,71–73], respectively. Lighter lines show various theoretical expectations summarized in Ref. [2].

Vu cette situation, l'effort principal s'est surtout porté sur le développement d'outils mathématiques dont certains (*réécriture des règles de Feynman, S-matrix bootstrap, . . .*) font partie des codes utilisés au LHC.

Mais je vais ici conclure avec deux mots sur l'outil de loin le plus surprenant et le plus "puissant": la **dualité AdS/CFT**, aussi appelée **principe holographique**.

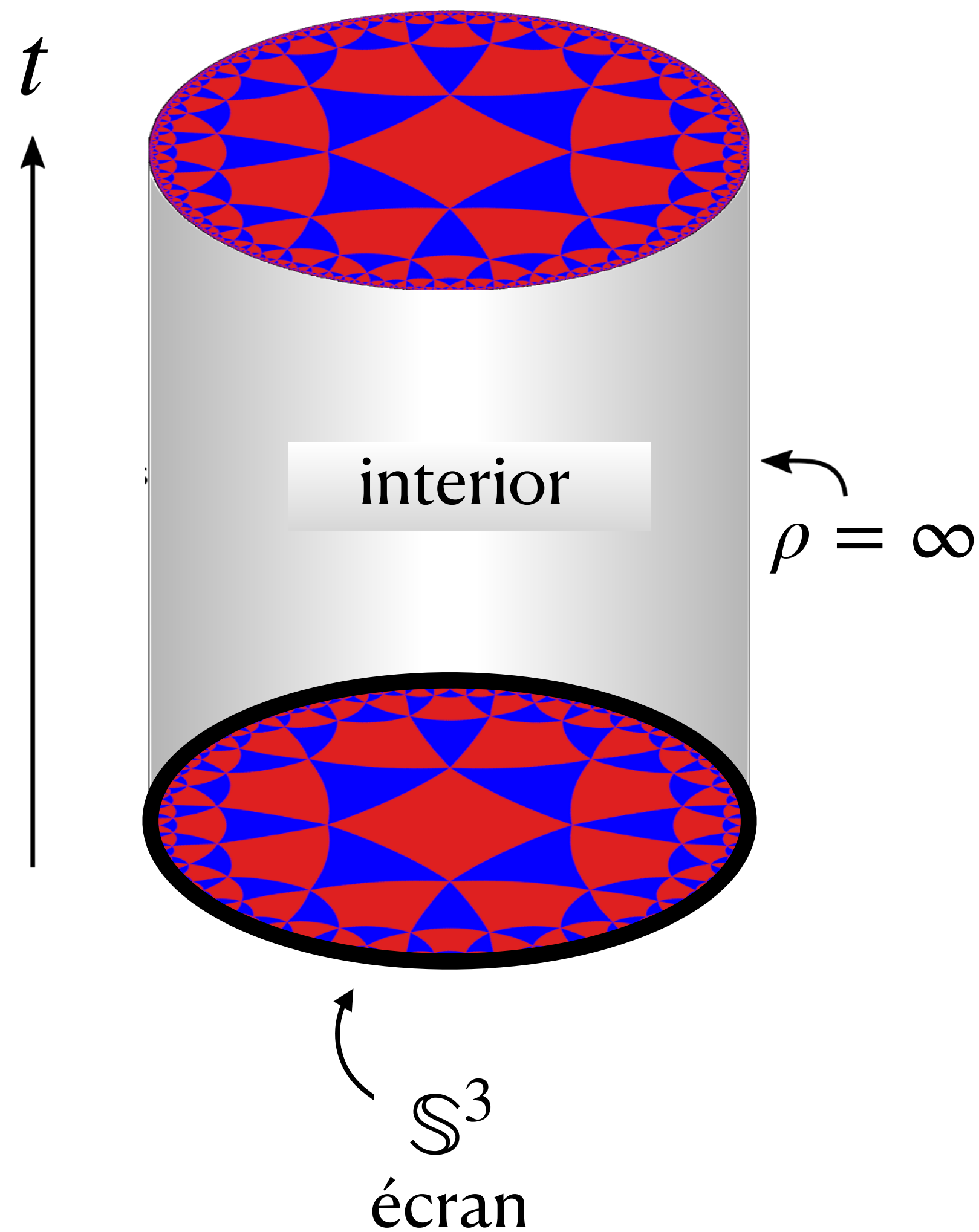
Maldacena '97

Gubser, Klebanov, Polyakov '98

Witten '98

Il s'agit d'une équivalence mathématique (soumise à de nombreux tests avec succès) entre la théorie des cordes dans **une boîte réfléchissante**, et les théories de Yang-Mills "banales" comme celles du MS.

 retour aux racines



AdS comme **boîte gravitationnelle**:

les états massifs sont confinés à l'intérieur
tandis que les champs de masse nulle au bord
fournissent les données holographiques

la métrique de AdS₅ :

$$ds^2/L^2 = -(\cosh \rho)^2 dt^2 + d\rho^2 + (\sinh \rho)^2 ds^2[S^3]$$

*La théorie de YM duale vit sur l'écran
holographique $S^3 \times R_t$*

AdS régularise les **problèmes infrarouges** de la gravité quantique, et permet ainsi d'étudier son comportement aux courtes échelles, sans la contrainte de la susy.

Pour faire une analogie, c'est comme si on mettait la QCD dans une boîte de taille ~ 0.1 fm :

*on pourrait étudier la liberté asymptotique, mais ni le confinement
ni la brisure de la symétrie chirale.*

De même, AdS/CFT n'a pas encore permis à adresser les questions
préssantes de la cosmologie et l'astrophysique

Mais en établissant un lien étroit entre la théorie de YM et les équations d'Einstein elle a ouvert de nouveaux champs d'application de ces équations, comme par exemple pour la physique du **plasma de quarks-gluons**



Hydrodynamics of strongly-coupled SYM from dynamics of BH horizon

\implies near-ideal fluid

$$\frac{\text{shear viscosity}}{\text{entropy density}} = \frac{1}{4\pi} \left(1 + \frac{135 \zeta(3)}{8(g^2 N)^{3/2}} + \dots \right)$$

Policastro, Son, Starinets 2001

Buchel, Liu, Starinets 2005

cf. with quasi-particle models: $\frac{\eta}{s} \sim \frac{\ell_{\text{mfp}}}{\lambda} > 1$

Seems to be much closer to quark-gluon plasma at RHIC, ALICE

≈ 0.08

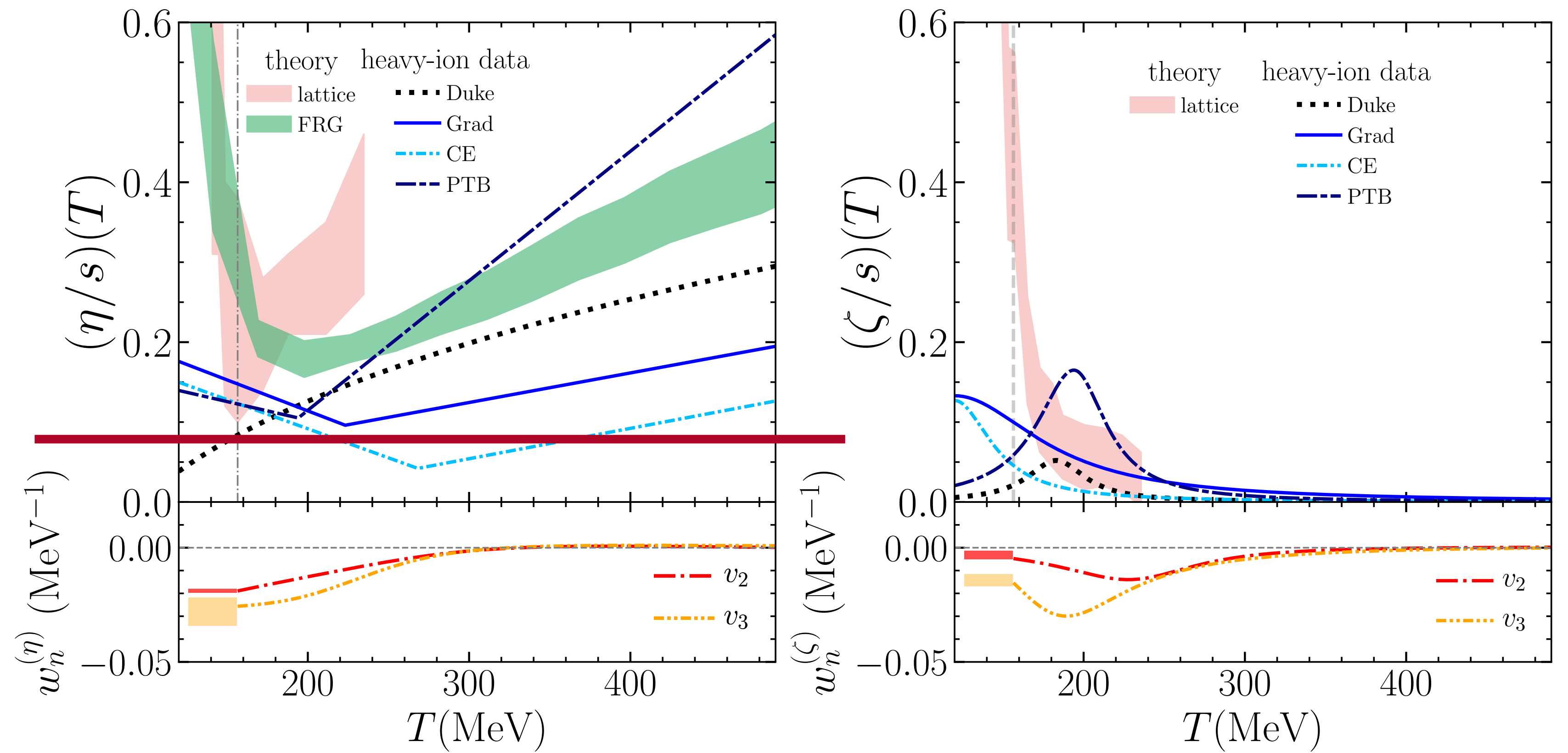


Fig. 1. Top panel: Shear (left) and bulk (right) viscosity over entropy ratios versus temperature. Bands correspond to lattice QCD [13, 14] or FRG calculations [15], where we set $T_c = 156$ MeV [16]. Lines correspond to global analyses of heavy-ion data by the Duke group [7] and the JETSCAPE Collaboration [9]. The latter includes three different prescriptions for the emission of particles at freeze-out, referred to as Grad, Chapman-Enskog (CE) and Pratt-Torrieri-Bernhard (PTB). Bottom panel: Values of the weights entering Eq. (1) for v_2 and v_3 . The shaded boxes represent the magnitude of the discrete part $\propto \delta(T - T_f)$, corresponding to the viscous correction at freeze-out.

5. Conclusions

Dépuis la construction du MS la compréhension de nos théories de base et de leurs possibles extensions a bien progressé. Mais nous ne sommes pas capables de dire avec certitude à quelle énergie les nouveaux phénomènes se manifesteront, tandis que les expériences se font plus coûteuses et plus rares.

Ce n'est pas sans rappeler l'histoire de la découverte du top:

Liss, T.M.; Tipton, P.L. (1997). Scientific American. Vol. 277, no. 3. pp. 54–59

In the early 80s it was widely believed that the discovery of the top quark at CERN was imminent. . . . It had to wait for another 15 years

L'extrait optimiste d'un cours de Polchinski aux Houches '94 reste à mon avis d'actualité



Polchinski, Les Houches 94

"One can ask whether the situation today in string theory is really as favorable as it was for field theory in the early 60's. It is difficult to know. Then, of course, we had many more experiments to tell us how quantum field theories actually behave. To offset that, we have today more experience and greater mathematical sophistication. As an optimist, I make an encouraging interpretation of the history, that many of the key advances in field theory—Wilson's renormalization group, the discovery of spontaneously broken gauge symmetry as the theory of the electroweak interaction, the discovery of general relativity itself—were carried out largely by study of simple model systems and limiting behaviors, and by considerations of internal consistency. These same tools are available in string theory today."