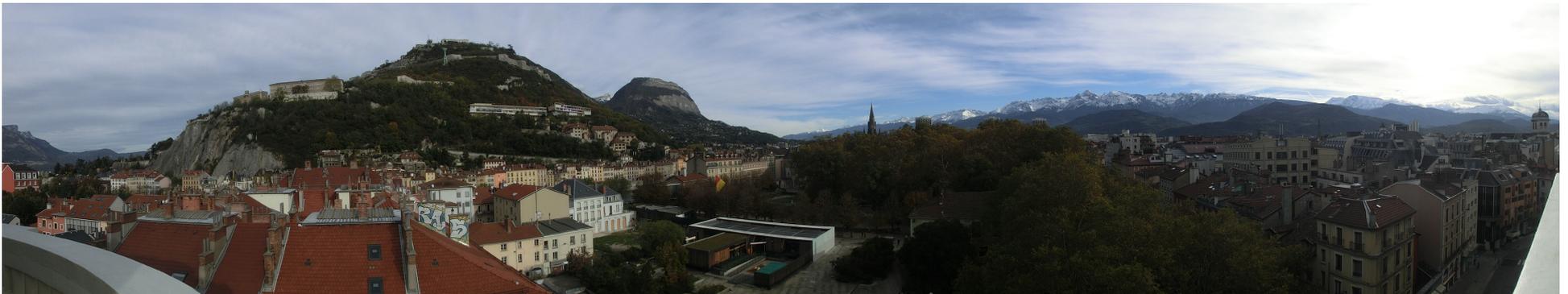


Ma vision du VHE-LHC

Jan Stark

Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie
Grenoble



Colloque Saint-Gervais, 4-5 septembre 2014

Projets, sigles

VHLC = Very Large Hadron Collider

Différents projets sont discutés dans notre communauté, dont :

- **HE-LHC** (“High Energy LHC”) :
pp à **33 TeV** dans le tunnel du LEP/LHC
- **VHE-LHC** (“Very High Energy LHC”) :
pp à **100 TeV** dans un nouveau tunnel (circonférence 100 km)
- **Etude de 2001 de Fermilab** :
pp à **~200 TeV** dans un nouveau tunnel (circonférence 233 km)

Cette présentation est centrée sur le VHE-LHC,
avec un clin d'oeil aux 200 TeV.

Les grandes questions

La discussion sur les trois transparents qui viennent suit l'exposé dans le chapitre "Energy Frontier" du 2013 Snowmass report.

Nous connaissons bien la liste de nos problèmes avec le modèle standard (MS) :

- pas de candidat pour la matière noire (soit 85% de la matière dans l'univers)
- pas assez de violation de CP pour expliquer l'asymétrie matière-antimatière
- difficile d'inclure les masses des neutrinos (nécessite de nouvelles particules)
- pourquoi ces grandes différences entre les masses des particules ?
- gravitation
- énergie noire ??
- ...

Deux facettes du MS :

- **Interactions de jauge (Yang-Mills)** des quarks, leptons et bosons vecteurs

Très contraints par leurs nombres quantiques et les constantes de couplage des bosons vecteurs de $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$.

- **Interactions des fermions SM avec le champs de Higgs et la dynamique du champs de Higgs**

Plus "parachutés", on écrit simplement le lagrangien le plus général permis par les symétries de jauge et la renormalisabilité. Ceci donne le potentiel suivant:

"Il contient tous ce qui nous laisse perplexe dans le MS."

$$V = \mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2 + \sum_{f, f'} [g_{\Phi f f'} \bar{f}_L f'_R \Phi + h.c.]$$

Naturalité (*Naturalness*)

Mais d'où est-ce qu'il vient, ce terme en μ^2 dans le potentiel de Higgs ?

Idéalement, le potentiel de Higgs serait calculable à partir des interactions du Higgs avec toutes les autres particules et avec lui-même. **Donc : quelles particules sont à l'origine du terme en μ^2 ?**

Pas les particules connues. Quelle est la masse de nouvelles particules à l'origine de ce terme ?

Version la plus simple du concept de la naturalité : les particules qui génèrent le terme en μ^2 devraient avoir une masse à l'échelle de μ^2 :

$$\mu^2 \sim (100 \text{ GeV})^2$$

On aurait dû les voir déjà.

Une autre approche à la naturalité considère les corrections radiatives à μ^2 dans le SM :

$$\delta\mu^2 = -\frac{3g_{Htt}^2}{8\pi^2}\Lambda^2 + \frac{3\alpha_w(3 + \tan^2 \theta_W)}{4\pi}\Lambda^2 + \frac{\lambda}{8\pi^2}\Lambda^2$$

Ces trois termes sont dus au top, aux W/Z et au Higgs respectivement.
 Λ est l'échelle d'énergie où le MS est remplacé par une théorie plus complète.

Ces termes divergent.

Ils doivent être contre-balançés par d'autres termes (dus à de nouvelles particules) pour avoir un résultat bien défini pour μ^2 .

Echelle en énergie de la nouvelle physique

$$\delta\mu^2 = -\frac{3g_{Htt}^2}{8\pi^2}\Lambda^2 + \frac{3\alpha_w(3 + \tan^2\theta_W)}{4\pi}\Lambda^2 + \frac{\lambda}{8\pi^2}\Lambda^2$$

Ces termes divergent.

Ils doivent être contre-balançés (annulés) par d'autres termes (dus à de nouvelles particules) pour avoir un résultat bien défini pour μ^2 .

Si nous acceptons des annulations accidentelles d'un grand nombre de décimales :
 Λ peut être arbitrairement grand (mais pas naturel !)

Mais si nous n'acceptons seulement des annulations d'une décimale : $\Lambda < 2$ TeV.

“Higgs et rien d'autre au LHC” :

ajustement fin de 1 %

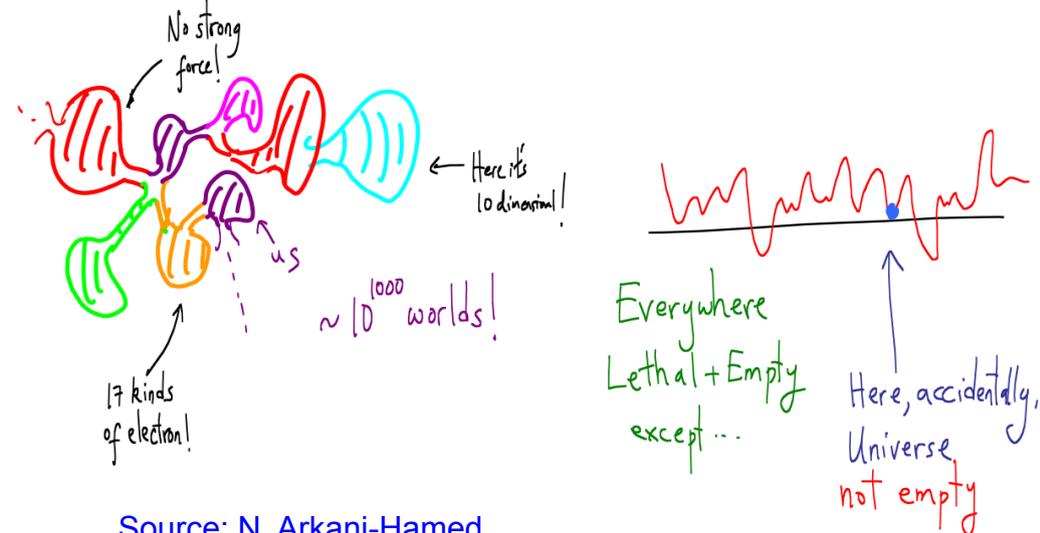
→ “et alors, pas de bol”

“Higgs et rien d'autre au VHE-LHC” :

ajustement fin de 10^{-4}

→ “met un point final à l'hypothèse de la naturalité”

L'un des scénarios alternatifs à la naturalité :



Source: N. Arkani-Hamed

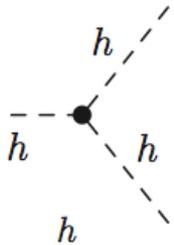
Auto-couplage du boson de Higgs

- In SM, Higgs self couplings follow from the Higgs potential after expanding the Higgs doublet field Φ around the electroweak symmetry breaking vacuum expectation :

$$V_H = \mu^2 \Phi^+ \Phi + \eta (\Phi^+ \Phi)^2 \rightarrow \frac{1}{2} m_H^2 h^2 + \sqrt{\frac{\eta}{2}} m_H h^3 + \frac{\eta}{4} h^4 \text{ with } :m_H^2 = \eta v^2 / 2 \text{ and } v^2 = -\mu^2 / \eta$$

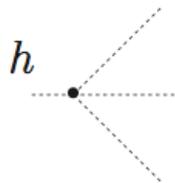
à noter :
la valeur de v est fixée par
les mesures précises de G_F

To fully reconstruct the Higgs potential one should have to:



Measure the 3 linear Higgs vertex,
via measurement on double Higgs production

$$\lambda_{SM} = \sqrt{\frac{\eta}{2}} m_H$$



Measure the quadratic Higgs vertex:
more challenging, not accessible to HL-LHC

Auto-couplage (tri-linéaire) du boson de Higgs

Table 18-22. Signal significance for $pp \rightarrow HH \rightarrow bb\gamma\gamma$ and percentage uncertainty on the Higgs self-coupling at future hadron colliders, from [102].

	HL-LHC	HE-LHC	VLHC
\sqrt{s} (TeV)	14	33	100
$\int \mathcal{L} dt$ (fb ⁻¹)	3000	3000	3000
$\sigma \cdot \text{BR}(pp \rightarrow HH \rightarrow bb\gamma\gamma)$ (fb)	0.089	0.545	3.73
S/\sqrt{B}	2.3	6.2	15.0
λ (stat)	50%	20%	8%

Il faut un VLHC pour obtenir un résultat éloquent.

Table 18-23. Estimated experimental percentage uncertainties on the double Higgs production cross sections and Higgs self-coupling parameter λ from e^+e^- linear colliders. The expected precision on λ

	ILC500	ILC500-up	ILC1000	ILC1000-up	CLIC1400	CLIC3000
\sqrt{s} (GeV)	500	500	500/1000	500/1000	1400	3000
$\int \mathcal{L} dt$ (fb ⁻¹)	500	1600 [‡]	500+1000	1600+2500 [‡]	1500	+2000
$P(e^-, e^+)$	(-0.8, 0.3)	(-0.8, 0.3)	(-0.8, 0.3/0.2)	(-0.8, 0.3/0.2)	(0, 0)/(-0.8, 0)	(0, 0)/(-0.8, 0)
$\sigma(ZHH)$	42.7%		42.7%	23.7%	-	-
$\sigma(\nu\bar{\nu}HH)$	-	-	26.3%	16.7%		
λ	83%	46%	21%	13%	28/21%	16/10%

Cette mesure est difficile auprès des collisionneurs e^+e^- :
ZHH est peu sensible à λ , et $\nu\bar{\nu}HH$ nécessite un grand \sqrt{s} pour avoir un taux d'événements correct.

Tableaux extraits du *Snowmass 2013 report*.

Et le couplage quadri-linéaire ?

Très peu d'études dans la littérature. L'une des rares études – au niveau générateur - est montrée ici.

Plehn et Rauch, hep-ph/0507321

Ce sera dur; peut-être un VLHC à 200 TeV pourrait fournir des résultats.

Il me semble important de quantifier ceci (notamment : l'énergie \sqrt{s} nécessaire) plus précisément.

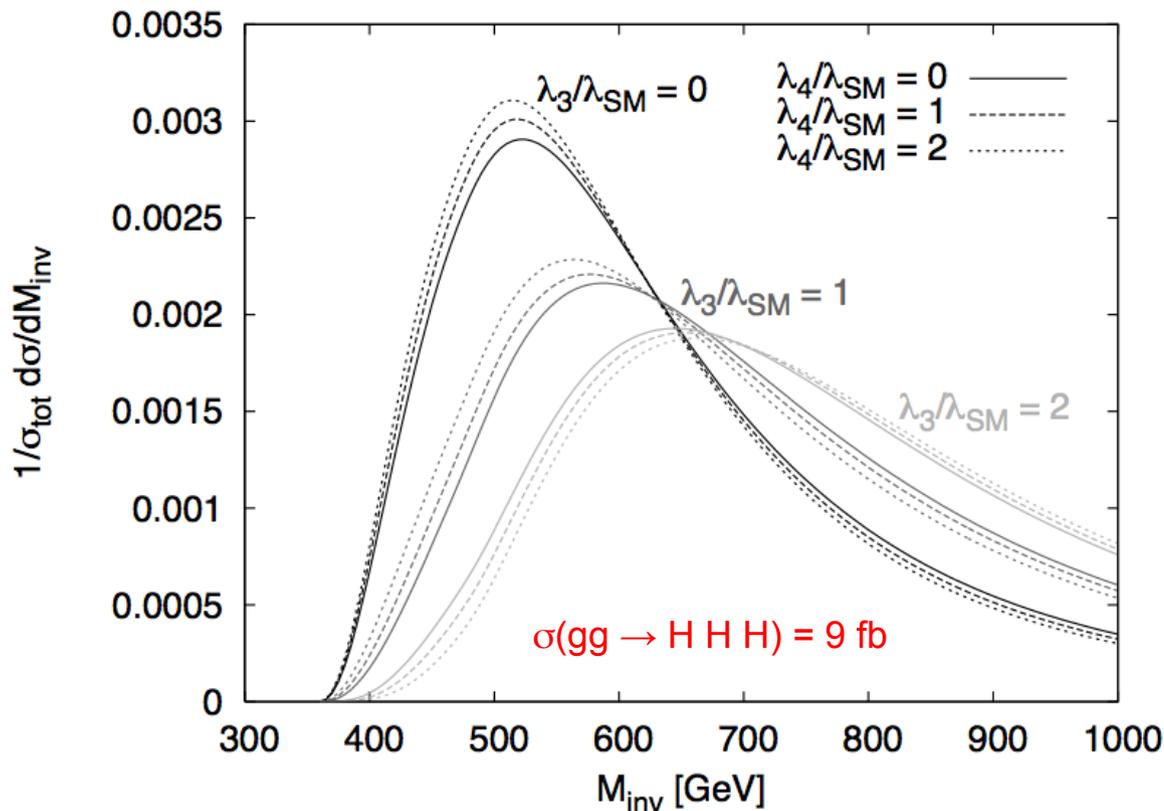


Figure 4: Normalized partonic center-of-mass energy distributions for $gg \rightarrow HHH$ at the LHC (left) and at the 200 TeV VLHC (right). The Higgs mass is fixed to 120 GeV. The trilinear and quartic Higgs self-couplings are varied independently.

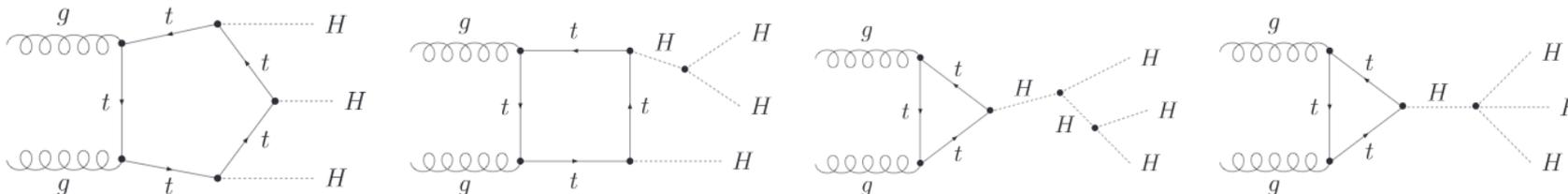


Figure 1: Examples of Feynman diagrams contributing to the process $gg \rightarrow HHH$.

VHE-LHC : machine(s)

	LHC	HL-LHC	HE-LHC	VHE-LHC
c.m. energy [TeV]	14		33	100
circumference [km]	26.7			
dipole field [T]	8.33			20
dipole coil aperture [mm]	56			≤ 40
beam half aperture [mm]	18 (x), 22 (y)		≤ 13 (x & y)	
no. bunches	2808			8420
av. bunch population [$\cdot 10^{11}$ ppb]	1.15	2.2	0.94	0.97
initial transverse norm. emittance [$\mu\text{m rad}$]	3.75	2.5	1.38	2.15
β_x^* [m]	0.55	0.15 (min.)	0.35	1.1
RF voltage [MV]	16			22
longitudinal emittance [eVs]	2.5		3.8	13.5
rms momentum spread [$\cdot 10^{-4}$]	1.13		0.74	0.85
no. IPs contributing to tune shift	3	2		
max. total beam-beam tune shift	0.01	0.015	0.01	
beam circulating current [A]	0.584	1.12	0.478	0.492
stored beam energy [GJ]	0.362	0.694	0.701	6.61
SR power per ring [kW]	3.6	7.3	96.2	$2.9 \cdot 10^3$
arc heat load [$\text{W m}^{-1}/\text{aperture}$]	0.17	0.33	4.35	43.4
energy loss per turn [keV]	6.5		201.3	$5.9 \cdot 10^3$
critical photon energy [eV]	44		575	$5.5 \cdot 10^3$
transverse SR damping time [h]	12.9		1.01	0.32
longitudinal SR damping time [h]	25.8		2.02	0.64
initial horizontal IBS rise time [h]	103	20.4	20.1	157
initial longitudinal IBS rise time [h]	57	23.3	40.0	396
peak luminosity [$\cdot 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]	1.0	5.0 (leveled)	5.0	
crossing angle [μrad]	285	590	185	72
max. number of events per crossing	27	135	147	171
total/inelastic cross section [mb]	111 / 85		129 / 93	153 / 108
beam lifetime due to proton burn-off [h]	40.2	15.4	5.7	14.8
optimum run time [h]	16.9	10.2	5.8	10.7
integrated luminosity per day [fb^{-1}]	0.53	2.8	1.43	2.08

Il nous faut un nouveau tunnel.

bunch crossing time: 25 ns

Ceci nécessite de la R&D.

"A large R&D effort on superconducting magnets is still required to achieve - in industrial production – the targeted 20 T operating magnetic field for this project, but the current state of the art and recent progress with Nb_3Sn , Nb_3Al and HTS materials bode well."

Nécessite des mesures (actives) contre l'énergie déposée par le flux des photons.

Faut aussi un nouvel injecteur (énergie SPS trop basse).

Source : Dominguez et Zimmermann, *Proceedings of IPAC2013, Shanghai.*

VHE-LHC : détecteurs

Une bonne présentation à ce sujet :

D. Denisov, *SLHC/VLHC workshop*, Fermilab, octobre 2003

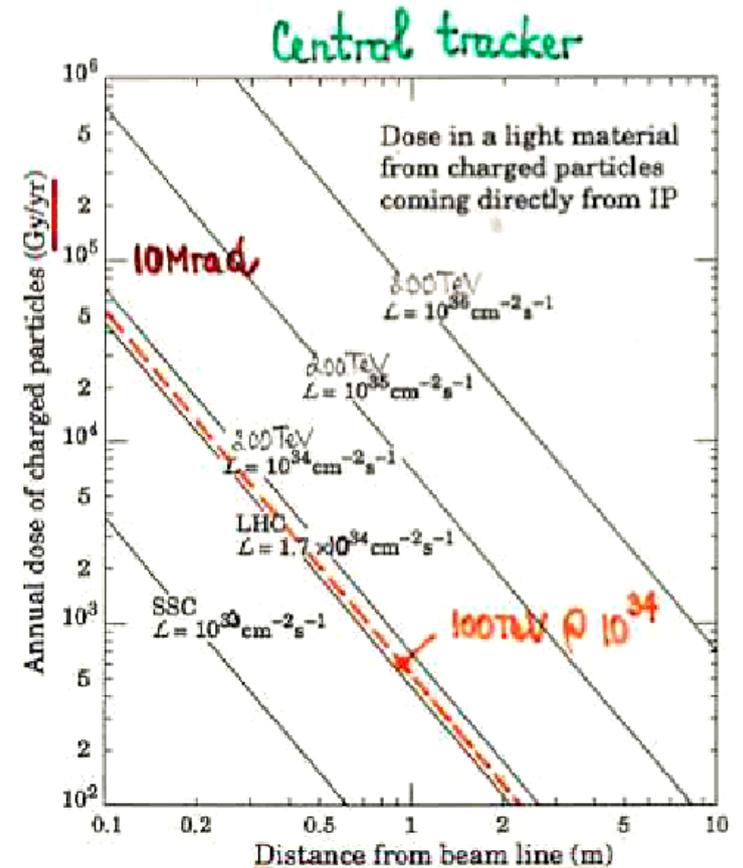
Les doses d'irradiations dépendent relativement faiblement de l'énergie dans le centre de masse, et ils sont ~ proportionnelles à la luminosité.

Pareil pour le taux d'occupation dans le trajectographe : pas tellement plus grand qu'au LHC.

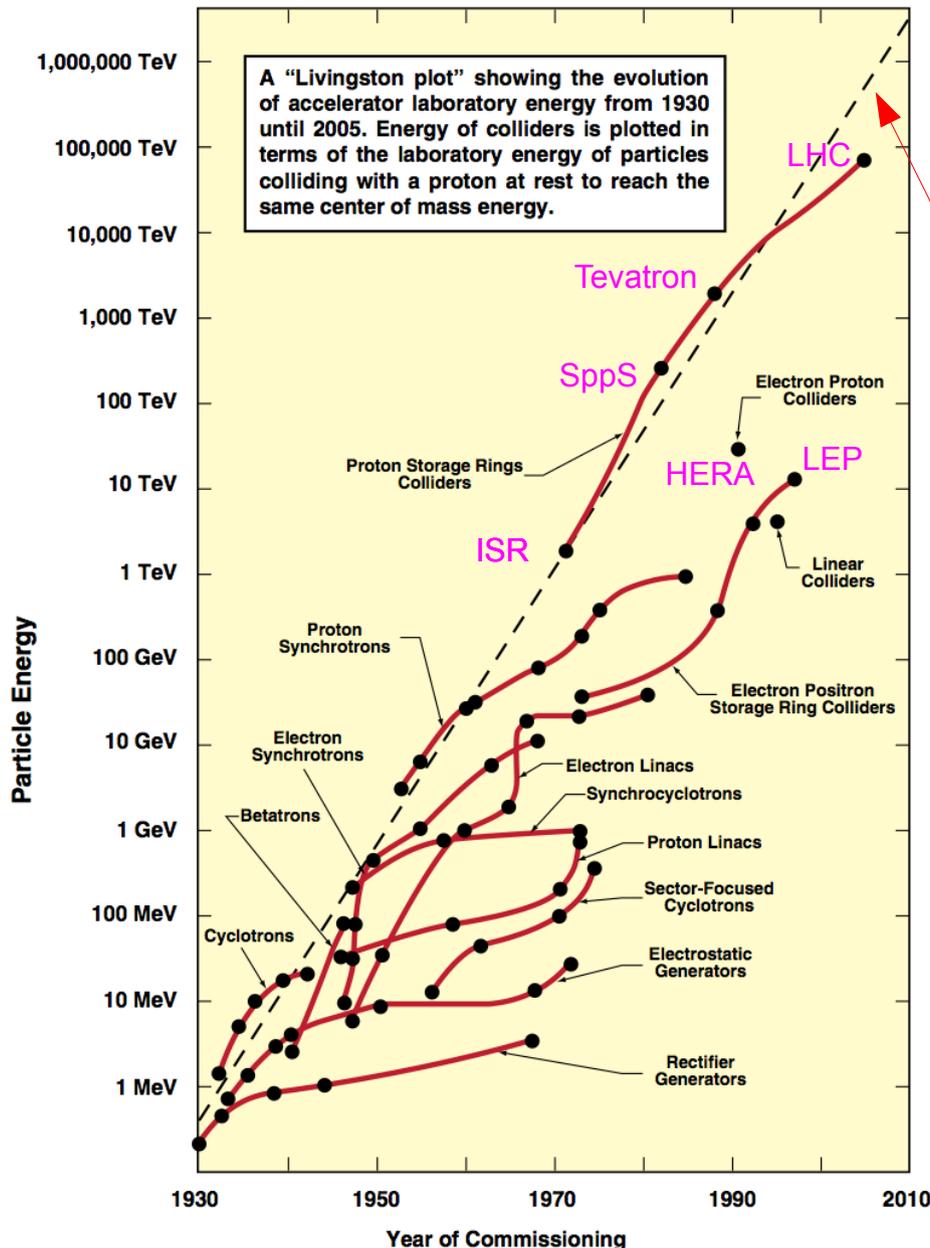
Calorimètres : légèrement plus grands que au LHC.
Temps de croisement : 25 ns, comme au LHC.

Le challenge : résolution en p_T pour les muons à grand p_T !
... et de façon plus générale : pour les traces de grand p_T .

Globalement : vu ce que nous avons déjà accompli pour les expériences passées/imminentes, les détecteurs ne semblent pas être le facteur limitant.



Plot de Livingston



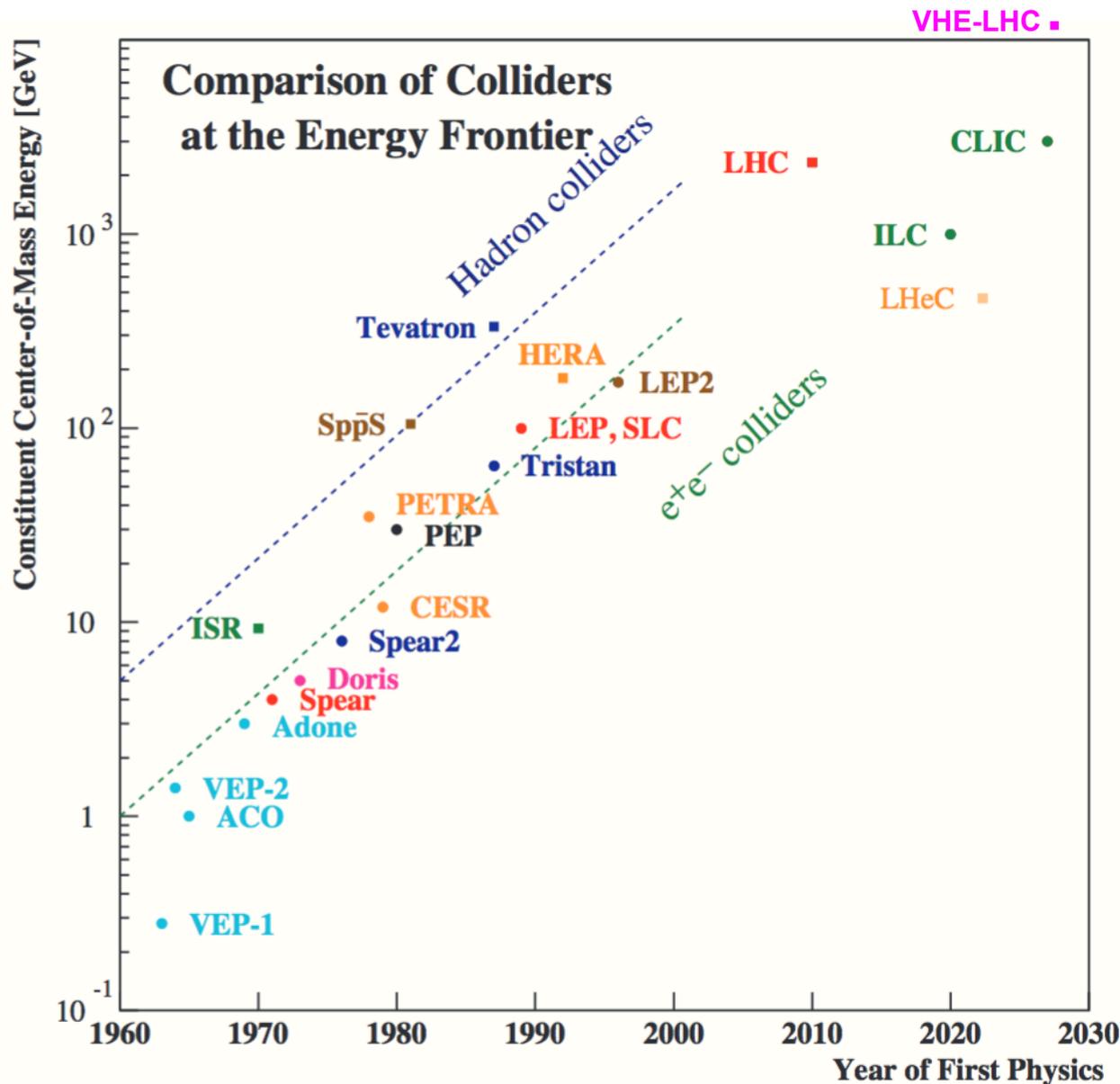
Plot fait pour la première fois par M. Stanley Livingston en 1954.

“Droite de Livingston” : loi de croissance exponentielle.

Pour comparaison : la “loi de Moore” (puissance de calcul des circuits intégrés) a été énoncée pour la première fois en 1965.

Source : 2001 Snowmass accelerator R&D report

Plot de Livingston



Ceci représente la partie récente du plot, limitée aux collisionneurs.

“La vie est belle sur la ligne de Livingston”

Spear : co-découverte du J/Psi

Doris : découverte du gluon

SppS : découverte du W et du Z

Tevatron : découverte du top

LHC : découverte du Higgs

[ISR : pas les bons détecteurs, mais énormément de développements accélérateur]

VHE-LHC : découverte

de la SUSY ?

des dimensions supplémentaires ?

de la chose à laquelle on aurait dû penser ?

Un peu de polémique ?

It's not 1995....
"Discover SUSY@LHC,
precision study@500 GeV
ILC"

Nima Arkani-Hamed,
Fermilab Wine&Cheese seminar,
31 janvier 2014

* What we already know from
LHC makes it implausible that
we'll see whole spectrum of new
physics, even if it's relatively natural:

e.g. $m_{\tilde{1},2} \sim 5 \text{ TeV}$ EDM bounds
e.g. "natural SUSY"
 $m_{\tilde{t}} \sim 600 \text{ GeV}$
LHC no way, 100 TeV piece of cake

Un peu de polémique (bis) ?

* EVERY student/post-doc/
person with a pulse (esp. under
35) I know is ridiculously
excited by even a glimmer of
hope for a 100 TeV pp collider

These people don't suffer
from SSC PTSD

Nima Arkani-Hamed,
5th TLEP workshop,
Fermilab, 25-26 juillet 2013

PTSD
= posttraumatic stress disorder
= trouble de stress post-traumatique

Résumé

Même si nous trouvons de la nouvelle physique au LHC, ce ne sera probablement pas le spectre complet (p.ex. l'une des particules SUSY). Le VHE-LHC serait la machine naturelle pour “chercher le reste du spectre” et pour produire les particules BSM en grandes quantités (“usine”).

Naturalité / fine tuning :

- Higgs et rien d'autre au LHC : possible, niveau de fine tuning pas trop inquiétant.
- Higgs et rien d'autre au VHE-LHC : met un point final à l'hypothèse de la naturalité.

Le VHE-LHC semble être la meilleure machine pour étudier l'auto-couplage du Higgs (et donc pour “réconstruire” le potentiel du Higgs). Est-ce que 100 TeV sont assez pour le couplage quadri-linéaire ?

La machine VHE-LHC nécessite des investissements :

- tunnel (→ synergie avec une possible machine $e^+ e^-$ circulaire)
- aimants supra

Matériel supplémentaire



Very Large Hadron Collider

	Stage 1	Stage 2
Total Circumference (km)	233	233
Center-of-Mass Energy (TeV)	40	175
Number of interaction regions	2	2
Peak luminosity (cm⁻²s⁻¹)	1 x 10³⁴	2.0 x 10³⁴
Luminosity lifetime (hrs)	24	8
Injection energy (TeV)	0.9	10.0
Dipole field at collision energy (T)	2	9.8
Average arc bend radius (km)	35.0	35.0
Initial Number of Protons per Bunch	2.6 x 10¹⁰	7.5 x 10⁹
Bunch Spacing (ns)	18.8	18.8
?* at collision (m)	0.3	0.71
Free space in the interaction region (m)	± 20	± 30
Inelastic cross section (mb)	100	133
Interactions per bunch crossing at L_{peak}	21	58
Synchrotron radiation power per meter (W/m/beam)	0.03	4.7
Average power use (MW) for collider ring	20	100
Total installed power (MW) for collider ring	30	250

May 21, 2001

Fermilab Accelerator Advisory Committee

P. Limon Intro

16

Potentiel de découverte

Dans le chapitre “*New Particles*” du 2013 Snowmass report :

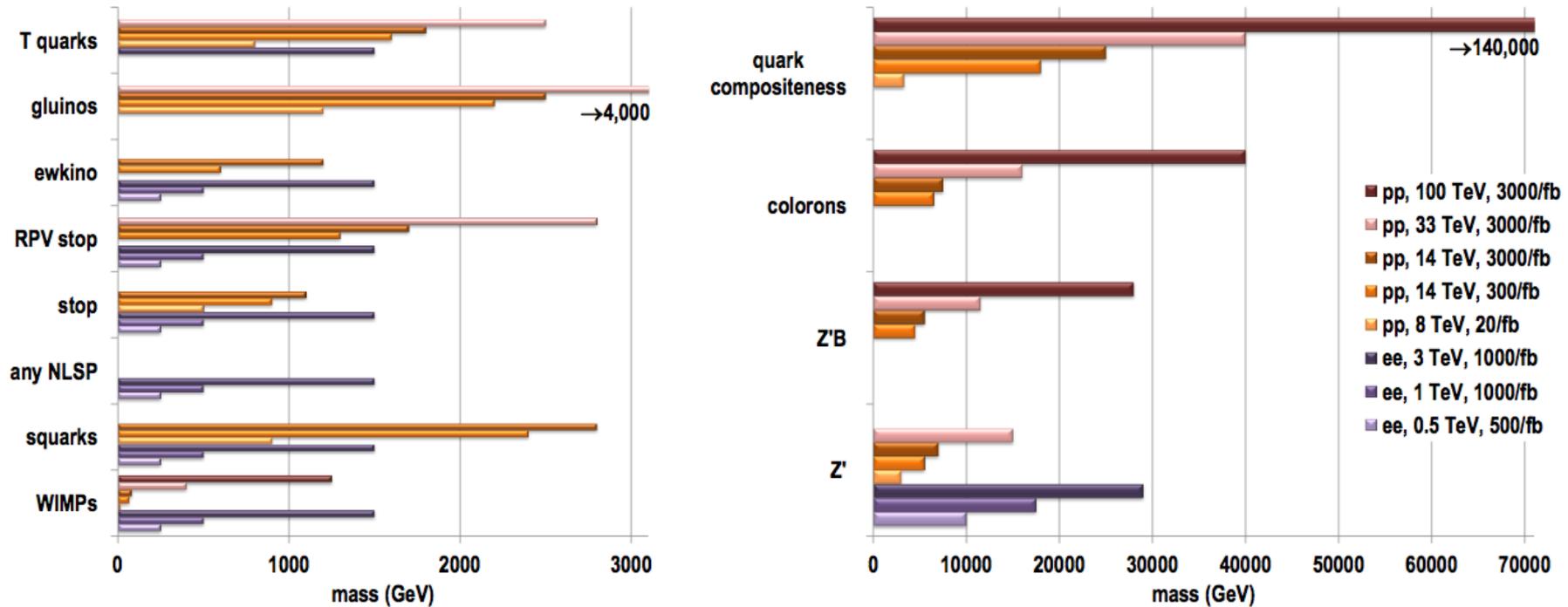


Figure 22-1. 95% confidence level upper limits for masses of new particles beyond the standard model expected from pp and e^+e^- colliders at different energies. Although upper mass reach is generally higher at pp colliders, these searches often have low-mass loopholes, while e^+e^- collider searches are remarkably free of such loopholes.

Potentiel de découverte

Dans le chapitre “*New Particles*” du *2013 Snowmass report* :

SUSY avec un stop léger.

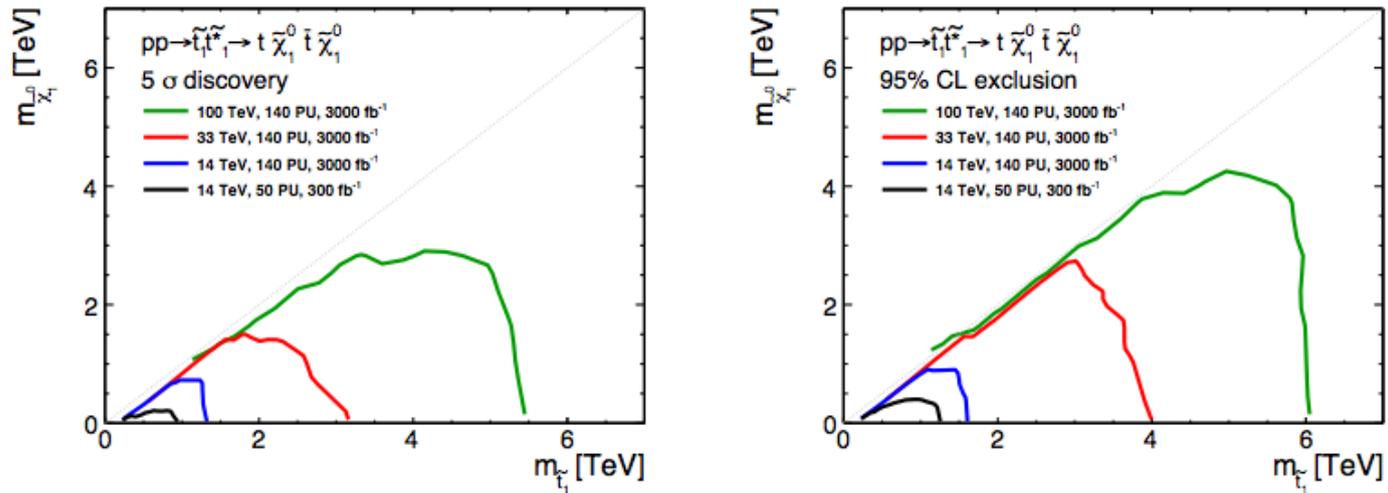


Figure 22-24. Reaches for stop-neutralino simplified model using the single lepton channel [71]. The left [right] panel shows discovery reach [95% CL exclusion].