

Autres possibilités au delà du « Modèle Standard »

- Higgs entre ~ 300 GeV et ~ 800 GeV: revoir les mesures de précision ? (cf premier cours, physique au LC, etc...) Autre signature de nouvelle physique au LHC ?
- « Pas de Higgs » : Diffusion $W_L W_L$ à haute énergie
- Higgs léger sans supersymétrie: Modèle « *petit Higgs* » pour résoudre le problème de hiérarchie (note: $m_h \sim 115$ GeV \Rightarrow nouvelle physique avant $\sim 10^5$ - 10^6 GeV sinon le vide n'est pas stable !)
- Dimensions supplémentaires: une manière d'escamoter le problème de hiérarchie (?)

(non exhaustif...)

« Pas de Higgs »

- Observe la diffusion $W_L W_L$ à haute énergie.

Décrit par un lagrangien effectif, généralisant le Modèle Standard =>
mesurer les paramètres de ce lagrangien ?

- 2 possibilités principales:

- Apparition de résonances pour régulariser la section efficace.

(Technicouleur :

- Technifermions -> condensat -> W_L, Z_L
- ~ QCD à échelle 1 TeV
- Problèmes avec mesures de précision, pas de modèle vraiment prédictif

)

- Pas de résonance observable (section efficace sature doucement la limite d'unitarité) , doit mesurer la section efficace $W_L W_L$. Référence: prédiction du Modèle Standard avec $M_H = 1$ TeV

Méthode « traditionnelle » : Utilise un lagrangien effectif (inspiré du Lagrangien chiral de QCD) pour les bosons de Goldstone mangés par les bosons longitudinaux (respectant symétries connues, par ex symétrie custodiale SU(2))

$$U = e^{i \frac{\vec{\pi} \cdot \vec{\tau}}{v}}$$

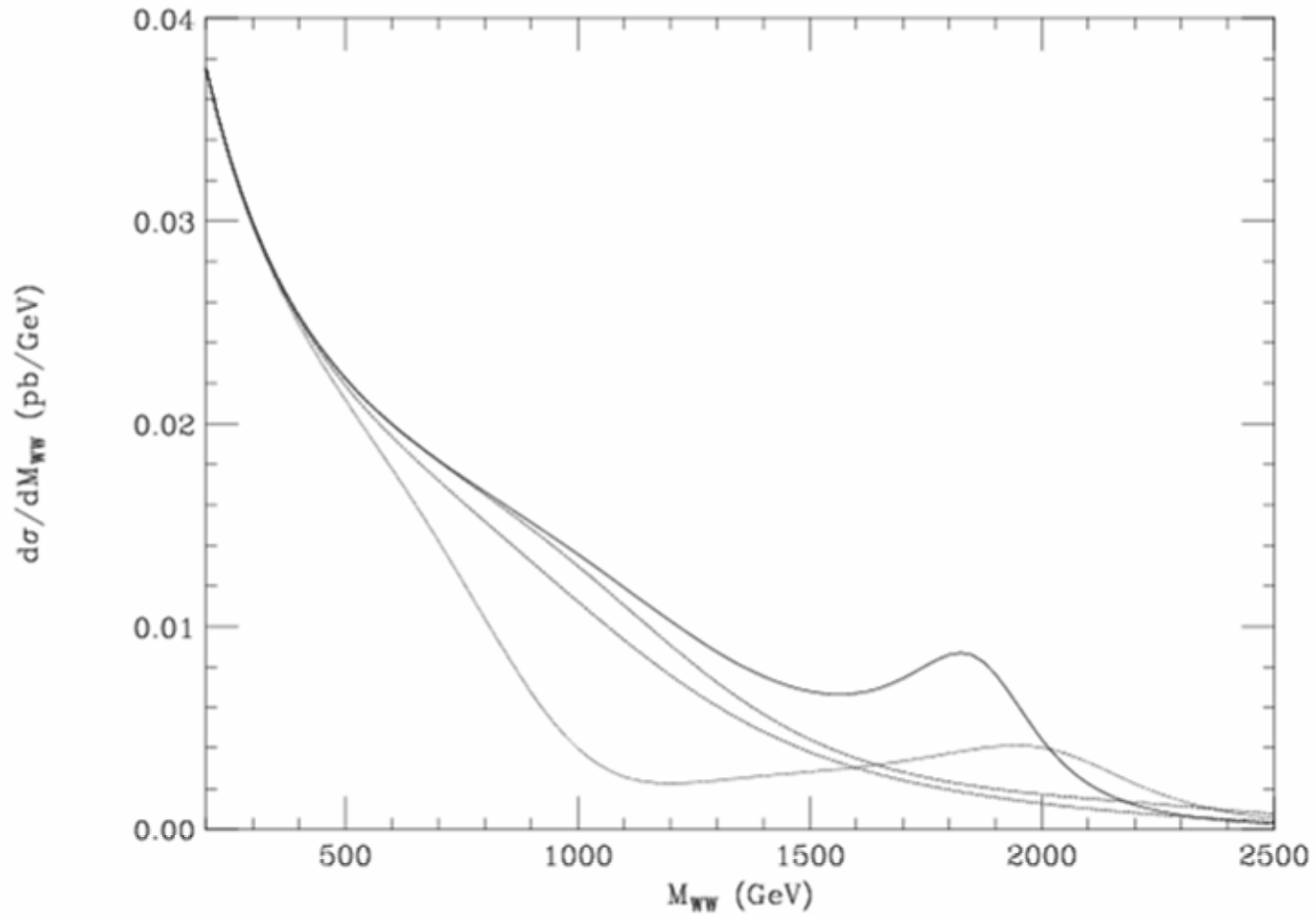
$$L = \frac{v^2}{4} \text{Tr}(D_\mu U D^\mu U^\dagger) + a_4 \text{Tr}(D_\mu U D_\nu U^\dagger) \text{Tr}(D^\mu U D^\nu U^\dagger) + a_5 \text{Tr}(D_\mu U D^\mu U^\dagger) \text{Tr}(D_\nu U D^\nu U^\dagger)$$

+ prescription pour respecter l'unitarité (techniques de décomposition en ondes partielles, ...) => permet de décrire les amplitudes de diffusion $V_L V_L$ en fonction de l'énergie ($V=W$ ou Z , dépendent de différentes combinaisons de a_4, a_5)

(voir Butterworth et al hep-ph/0210098 par exemple)

a_4, a_5 de l'ordre de ~ 0.01 ou moins semblent permis par les mesures de précision

$a_4=0.002$ $a_5=-0.001$



+ résonances $l=1, J=1$ pour certaines valeurs de a_4, a_5

Cas avec résonance:

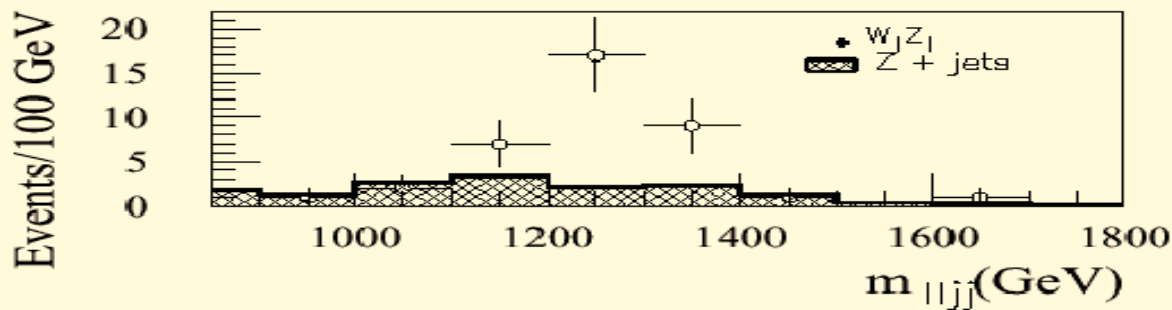
Canal possible $ZW \rightarrow l^+ l^- jj$ ($l=e$ ou μ)

Rapport S/B > 1

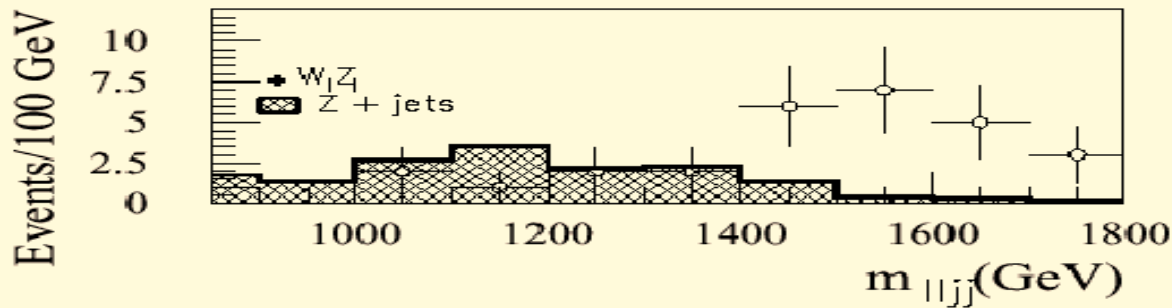
Taux d'événements faible => nécessite grande luminosité

Bruit de fond : $Z+2jets$, $Z \rightarrow l^+ l^-$

300 fb⁻¹, exemples pour 1.2 et 1.5 TeV



(TDR Physique Atlas)



(section efficace
après coupures ~0.1fb)

* Possibilité de taux d'événements plus grands avec $WW \rightarrow lljj$
(~ 1fb observable après coupures, avec bon S/B ?)

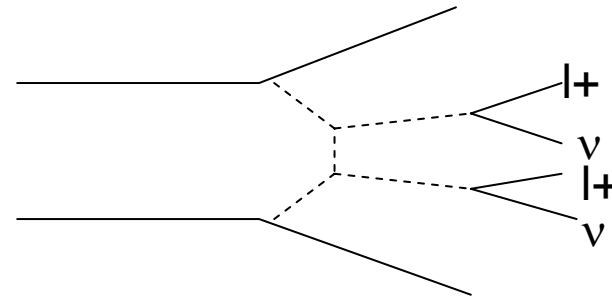
* Pour certains paramètres a_4, a_5 on peut avoir des résonances scalaires en ZZ, le mode 4lepton devient accessible à SLHC

Canal sans résonance

Exemple typique: Diffusion W^+W^+

Signature:

- 2 leptons de même signe
- Énergie transverse manquante
- jets vers l'avant
- pas de jet dans la région centrale



Pour 300 fb^{-1} LHC: (Masse(WW) > 600 GeV)

Signal ($M_H=1000 \text{ GeV}$) ~ 7 événements

(varie par ~facteur 2 suivant paramètres diffusion WW)

Bruit de fond (dominé par W transverses continuum) ~ 7 événements

Pour 3000 fb^{-1} (SLHC) (coupures/efficacités un peu différentes)

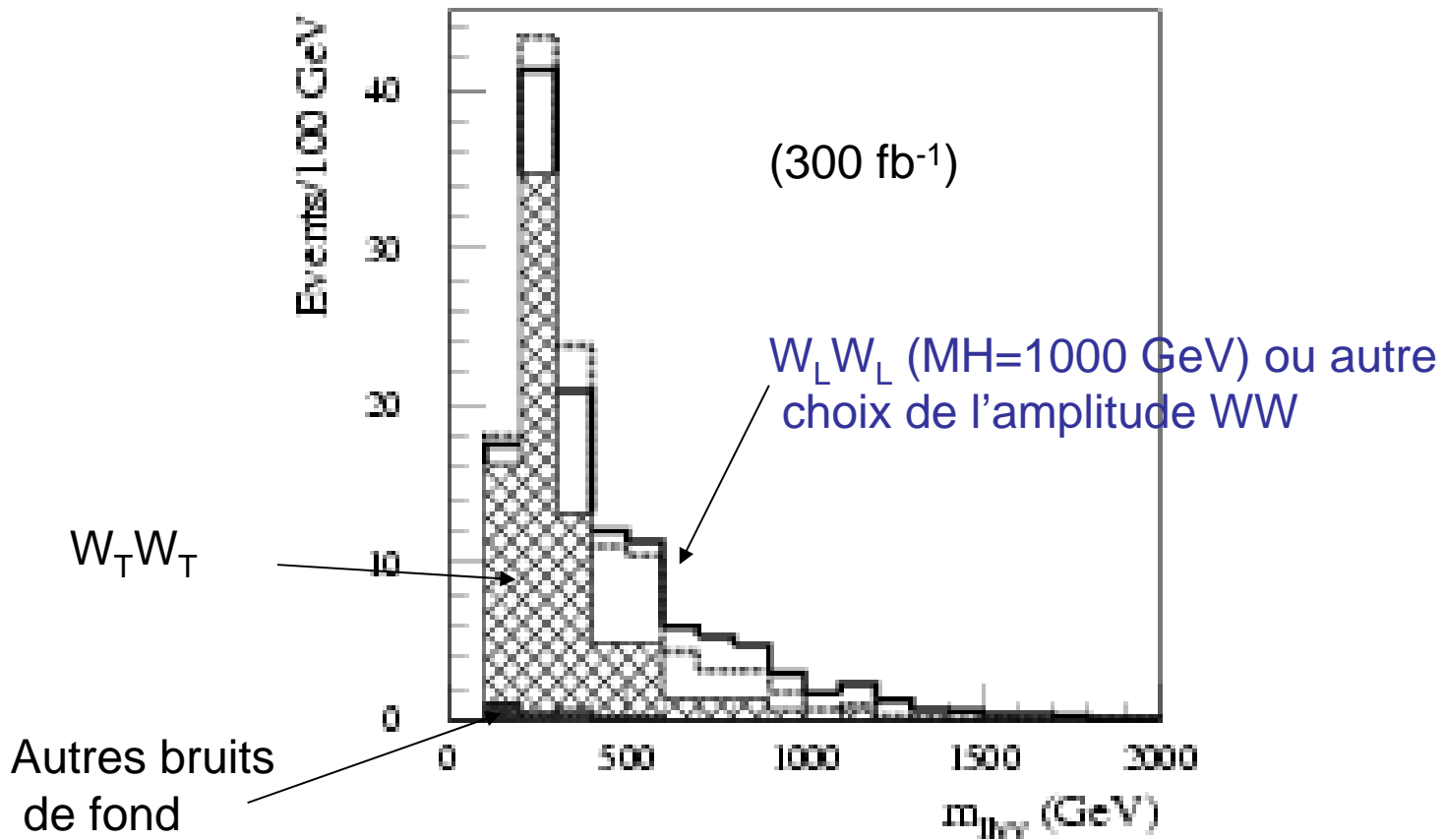
Signal ($M_H=1000 \text{ GeV}$) ~ 40 événements

Bruit de fond ~ 40 événements

Systematiques sur le bruit de fond difficiles (pas de pic de masse...)

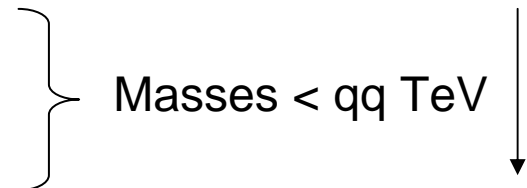
Mesure à la limite des possibilités du LHC

Exemple distribution masse (WW)
(approximation $p_z(\nu) = 0$)
pour diffusion $W+W+$



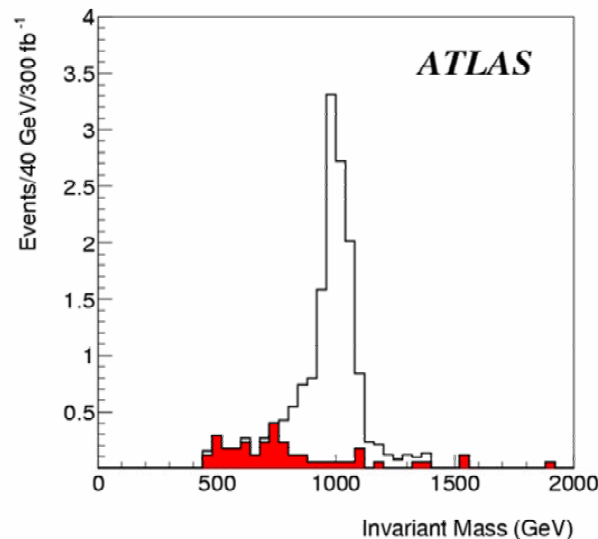
« Petit » Higgs

- Higgs léger
 - Nouvelle physique ≥ 10 TeV
=> *problème de « petite » hiérarchie*
 - Résout le problème en insérant le MS dans un groupe plus grand -> Higgs pseudo boson de Goldstone d'une symétrie brisée
 - Ingénierie de théorie de groupe assez compliquée
 - Prédiction: Nouvelles particules entre Higgs et Échelle de nouvelle physique pour compenser les divergences quadratiques à la masse du Higgs
 - effet du top <-> nouveau quark
 - effet W/Z <-> nouveaux bosons de jauge
 - effet Higgs <-> nouveaux scalaires
 - Modèles le plus simple a des problèmes avec corrections radiatives, Modèles un peu plus compliqués ont des phénoménologies assez proches
- (ne pas prêter trop d'attention aux détails des paramètres du modèle)



Nouveau quark T

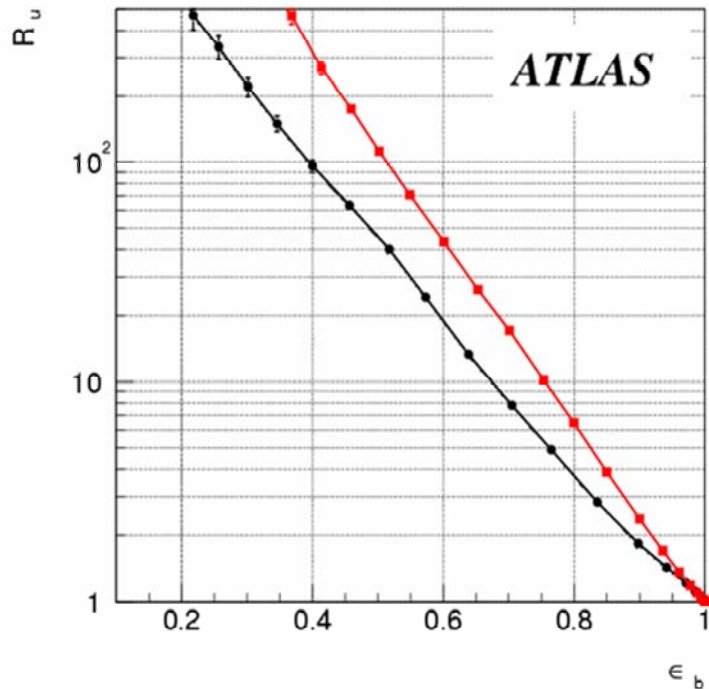
- Singlet Electrofaible \leftrightarrow mélange avec top (1 paramètre en plus de masse T)
- Masse $< 2 \text{ TeV}$ $(mh/200\text{GeV})^2$
- Désintégrations $T \rightarrow bW, tZ, th$ (1:1/2:1/2)
- Production $qb \rightarrow q'T$ dominante
- Exemple signature $T \rightarrow tZ$ ($t \rightarrow b \ell \nu$) \Rightarrow 3 leptons + E_{miss} + b-jet.
Coupure sur M_Z pour une paire de leptons.
Peut reconstruire la masse du T \Rightarrow découverte jusqu'à $\sim 1 \text{ TeV}$
- Canal $T \rightarrow bW$ accessible jusqu'à $\sim 2 \text{ TeV}$
- Canal $T \rightarrow th$ $h \rightarrow bb$ observable pour confirmer les caractéristiques du Modèle



Bruit de fond: WZ, tbZ

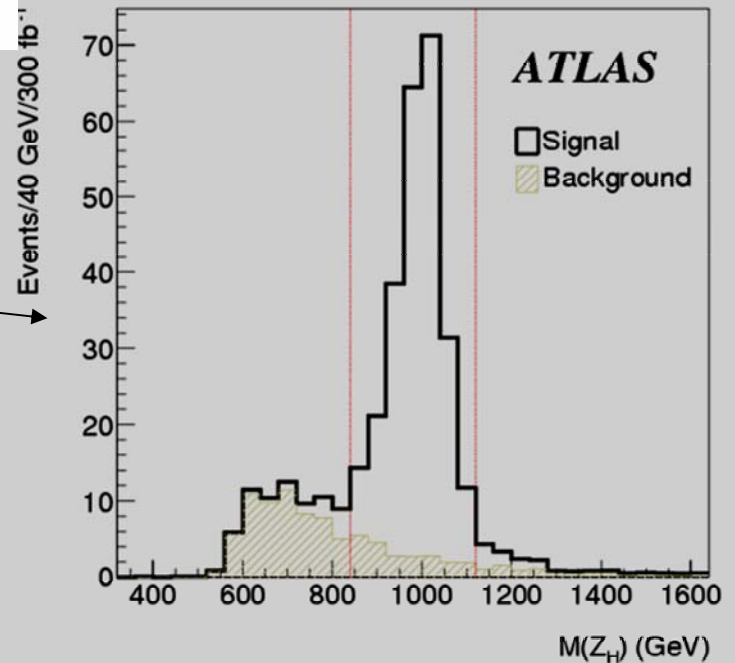
Nouveaux bosons (Z_H, A_H, W_H)

- Paramètres (M, θ)
- Désintégrations $\rightarrow e^+e^-$ ou $\mu^+\mu^-$ possibles en général \Rightarrow canaux de découverte \sim masse de 4 TeV (sauf valeurs particulières de θ) pour Z_H, A_H (et W_H par $\rightarrow e \nu$)
- Test du Modèle $Z_H \rightarrow Z h, W_H \rightarrow W h$ (h déjà observé)
 - **$Z \rightarrow l+l, h \rightarrow bb$** : utilise contrainte masse du Z et du h
 - bruit de fond Z+jets
 - Difficultés: $pt(b) \sim 0.25M(ZH)$ Jets très collimés. Efficacité d'étiquetage ?
 - $Pt(h) > m(h)$: Les jets de b peuvent se confondre un 1 seul jet (\rightarrow résolution en masse dégradée)
 - Problèmes similaires pour **$Wh, W \rightarrow l\nu, h \rightarrow bb$**
 - Autre possibilité **$W/Z \rightarrow jj, h \rightarrow \gamma\gamma$**
 - jj souvent reconstruits comme 1 seul « gros jet »
 - peut se voir aussi comme un excès de $\gamma\gamma$ avec m_h à très grands pt (production h standard est un « bruit de fond »)
- Peut observer ces modes dans une partie de l'espace des paramètres du Modèle (masse nouveaux bosons ~ 1 à 2 TeV)

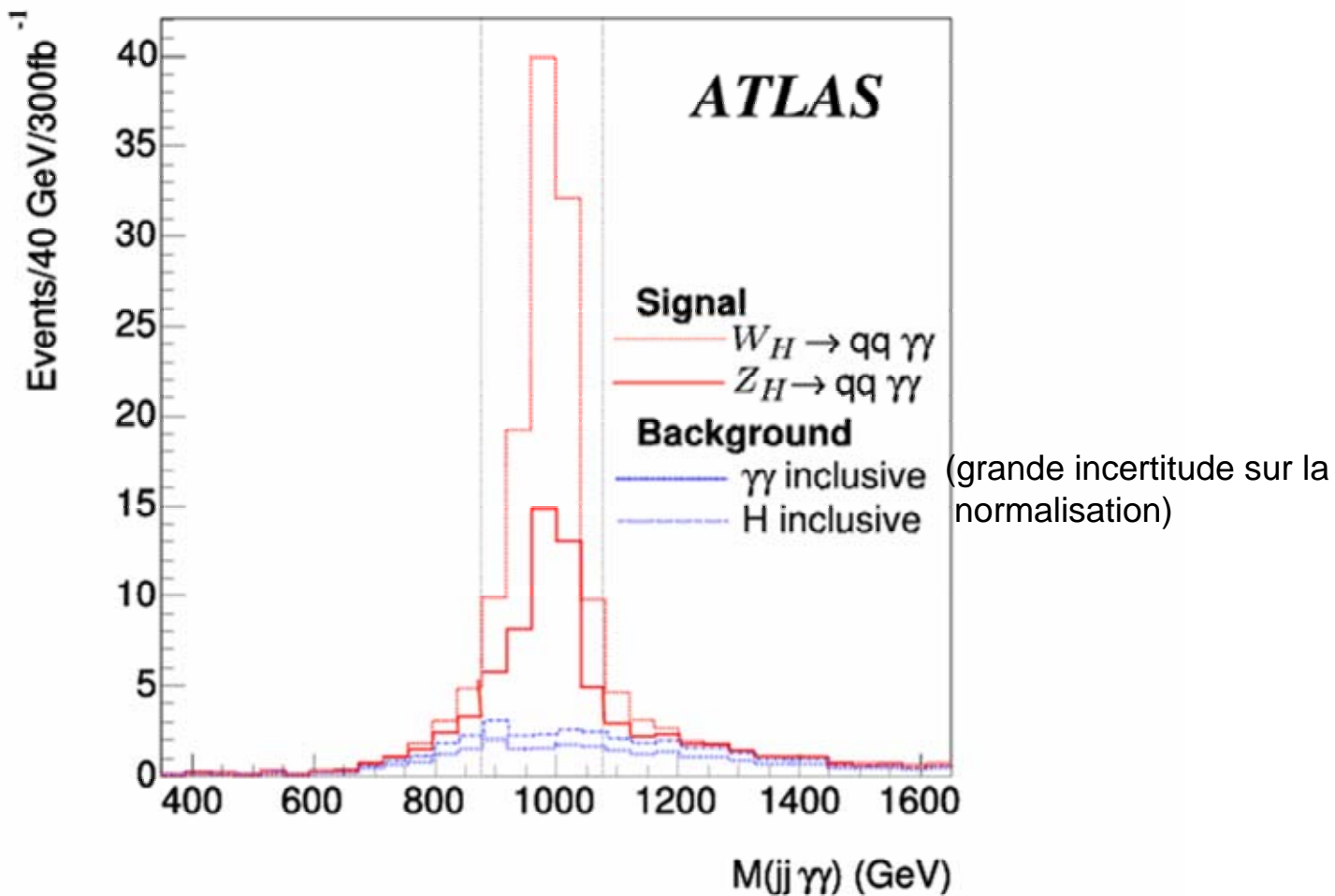


Effacité d'étiquetage de b
de $\sim 100\text{-}200$ GeV et provenant
de Z_H de 2 TeV

$M(l+l^- b b\bar{b})$
(Z_H de 1 TeV)
pour $m(b-b\bar{b}) \sim m_h$



Canal jet-jet- γ - γ (avec $m(\gamma\text{-}\gamma) = m_h \pm \text{resolution}$)
Pt(paire de jets) > 200 GeV, masse $\sim m_W, m_Z$



Dimensions supplémentaires

- « Théorie Ultime » : Cordes => nombreuses dimensions supplémentaires
- Si taille $\sim 1/M(\text{Planck})$ pas d'effet sur la physique au LHC
- Certaines dimensions peuvent-elles être plus grande ?
Différentes configurations suivant:
 - Taille des dimensions supplémentaires
 - Quelles particules se propagent dans ces dimensions ?
 - « Forme » de ces dimensions
- Discute 3 possibilités:
 - « grande » dimensions supplémentaires
 - Dimensions supplémentaires TeV^{-1}
 - Géométrie « warped » (Randall-Sudrum)
- *Plus exotique: production de mini trous noirs...*

(Voir revue S.Ferrag ICHEP04)

Tours de Kaluza-Klein:

Si particule se propage dans dimension de taille compacte R :
Impulsion dans cette dimension quantifiée n/R

Apparaît comme un terme de masse dans notre monde à 4 dimensions
 $M^2 = M_0^2 + (n/R)^2$

⇒ Tour de Kaluza-Klein

Écart entre les états dépend de R

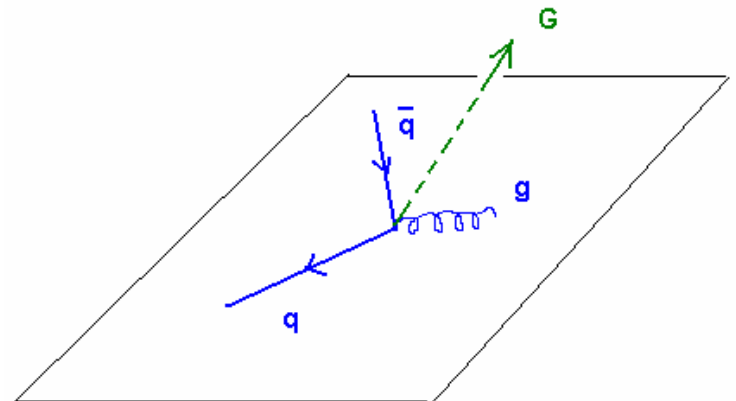
$$R = 1\text{mm} \quad \leftrightarrow \quad M = 2 \cdot 10^{-4} \text{ eV}$$

$$R = 2 \cdot 10^{-16} \text{ mm} (2 \cdot 10^{-4} \text{ fm}) \quad \leftrightarrow \quad M = 1 \text{ TeV}$$

Grandes dimensions supplémentaires

- Seulement la gravité se propage dans ces n dimensions
- Faiblesse de la gravité expliquée par propagation dans ces dimensions
- $M(\text{Planck } 4+nD)^2 = M(\text{Planck } 4D)^{(n+2)} * R^n$
- **Permet d'obtenir $M(\text{Planck } 4+nD) \sim 1 \text{ TeV}$**
 - $n=1 \Rightarrow R \sim 10 \text{ milliards km}$ exclu
 - $n=2 \Rightarrow R \sim \text{mm}$ (marginal)
 - $n=3 \Rightarrow R \sim \text{nm}$ OK
- **Signal: production de gravitons**
 - *Graviton -> Tour de KK de Gravitons* => section efficace multipliée par nombre d'états ($\sim E_{\text{LHC}} * R$) => devient mesurable
 - **Signal** : Production de graviton, graviton inobservable (-> grande énergie transverse manquante)

$$\left. \begin{array}{l} \bar{q}q \rightarrow gG^{(k)}, \gamma G^{(k)} \\ qg \rightarrow qG^{(k)} \\ gg \rightarrow gG^{(k)} \end{array} \right\} \text{jets} + \cancel{E}_T, \gamma + \cancel{E}_T$$



Bruits de fond (cf SUSY)

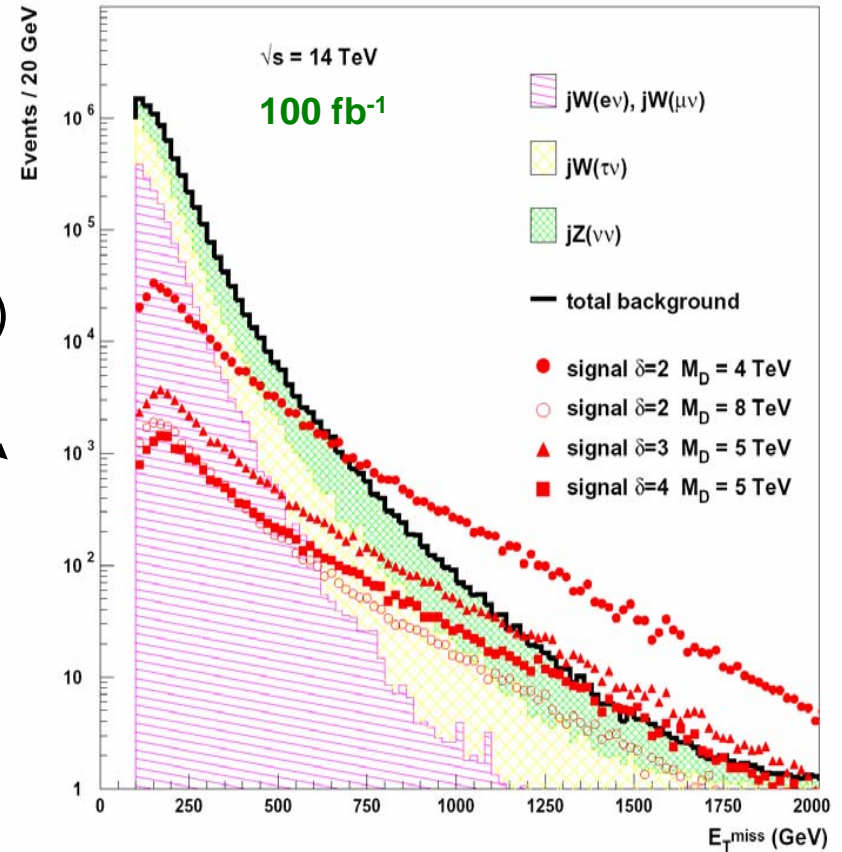
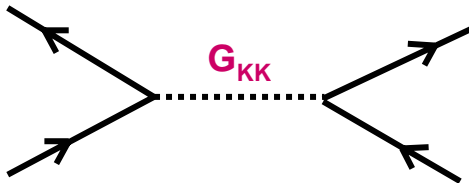
- W, Z + jets ($\rightarrow \nu$)
- Bruits de fond instrumentaux

Sensibilité:

$M(\text{Planck } 4+nD) \sim 5-9 \text{ TeV}$
(pour 2-4 dimensions supplémentaires)
(*Maitrise des queues du bruit de fond*)

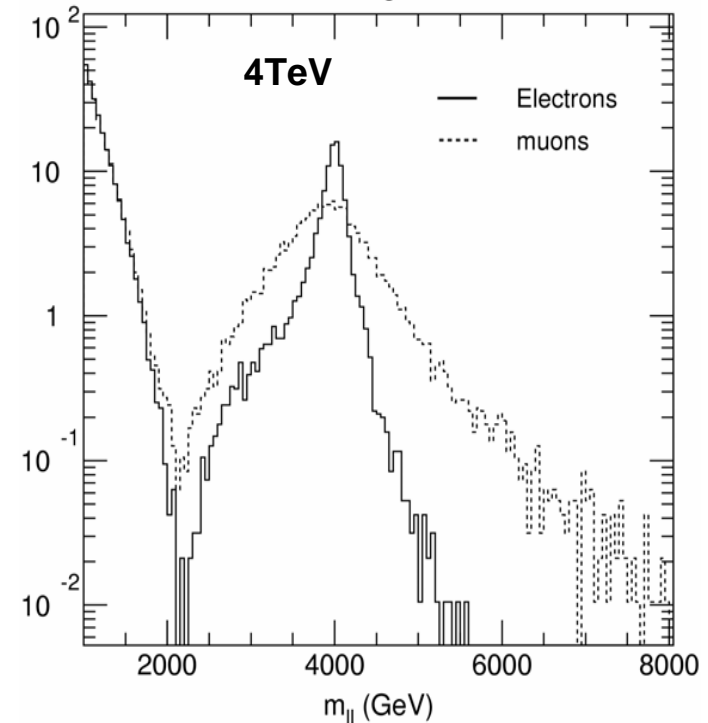
Autre signature:

Échange virtuel graviton dans la voie s
Excès à grandes masses invariantes
($\gamma\gamma, l^+l^-, \dots$)



Dimensions supplémentaires TeV⁻¹

- Bosons de jauge peuvent se propager dans ces dimensions
- => Excitations de Kaluza-Klein des $W/Z/\gamma$ apparaissent comme de nouveaux bosons de jauge à des masse \sim TeV
- Effets d'interférence avec Drell-Yan possibles
- (si chanceux, observe 2 états de la tour Kaluza-Klein ?)
- **Sensibilité jusqu'à masse ~ 5 à 10 TeV**
(sensibilité plus grande en étudiant déviation par rapport au Drell-Yan dans région d'interférence => **$\sim 15-20$ TeV pour SLHC**)
- (Attention saturation de la gamme dynamique pt ~ 3 TeV pour électrons dans calorimètre EM Atlas)



$$\sigma_E/E \rightarrow 0.7\%$$
$$\sigma_p/p \rightarrow 10\% * (pt/1 \text{ TeV})$$

(Commentaires généraux sur Z')

- Apparaît dans de nombreuses extensions du Modèle Standard (« petit Higgs », certains scénarios avec dimensions supplémentaires, groupe de jauge U(1) provenant de grande unification, ...)
- Signature $Z' \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$
- e^+e^- plus favorable (résolution meilleure à haute énergie)
- Pour Z' = couplage du Modèle Standard, sensibilité jusqu'à **5 TeV**
(SLHC => **+ 0.8 TeV**)
- Distinction entre les Modèles : Largeur et Distribution angulaire
 - différence en largeurs peuvent être supérieures à 2 entre modèles.

Note sur asymétrie avant-arrière \leftrightarrow distribution angulaire $\cos(\Theta^*)$

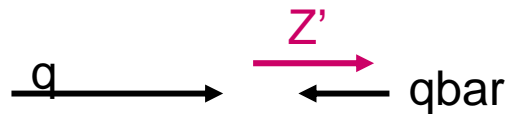
$q \bar{q} \rightarrow Z' \rightarrow e^- e^+$

« Bonne » variable = angle (e^-, q) (à la LEP)

De quel proton vient le q ? (on est en p-p pas p-pbar)

angle (e^-, p) n'a pas d'asymétrie par définition

\Rightarrow Trouve la direction du quark par la direction du Z' dans le labo
(hypothèse q = quark de valence, \bar{q} = quark de la mer,
 $x(\text{valence}) > x(\text{mer})$)



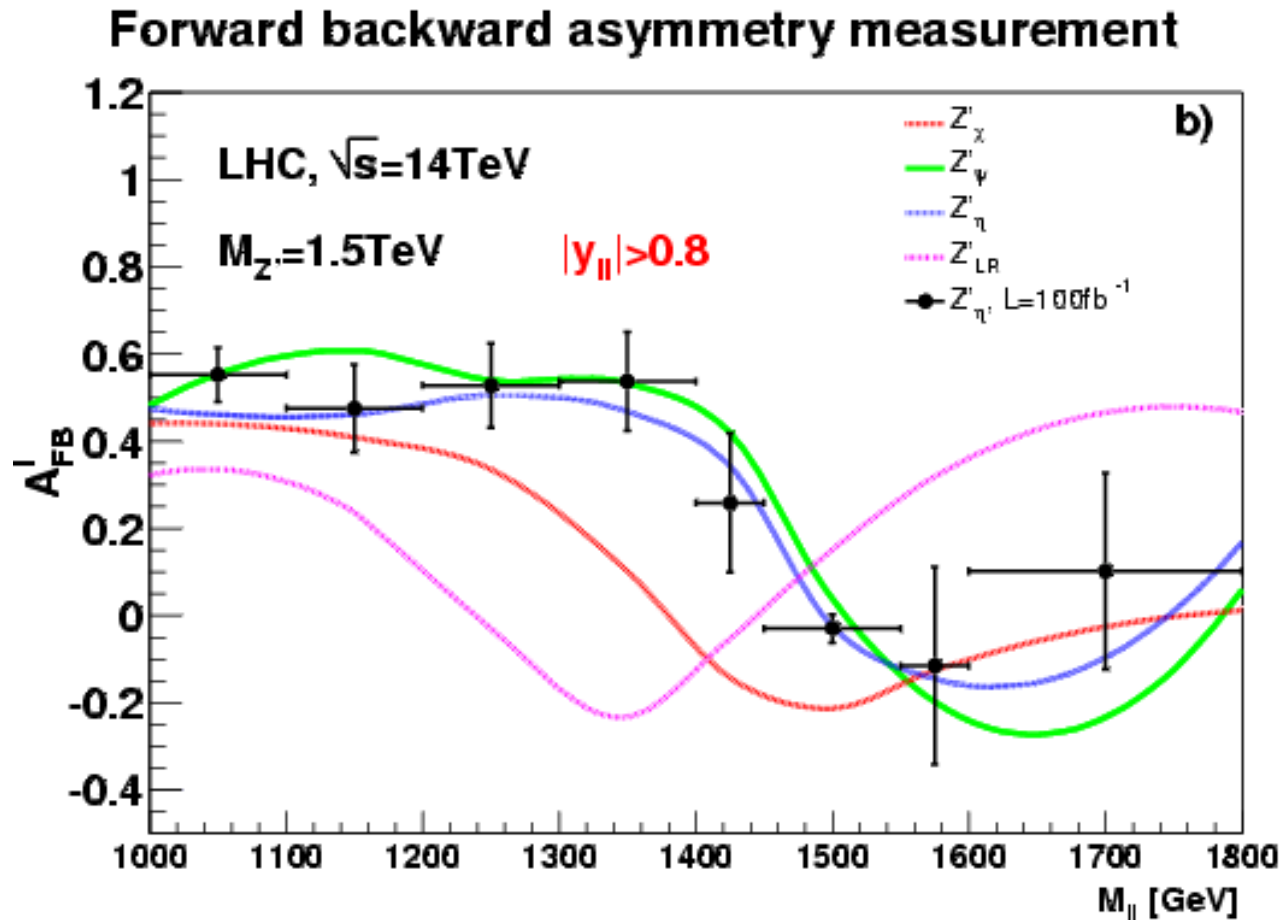
Faux dans $\sim 25\%$ des cas (choix au hasard: 50% faux)

(meilleur pour des grands $p_z(Z')$) \Rightarrow dilution de l'asymétrie (réduite si on coupe sur la rapidité du Z' produit)

Distinction entre Modèles est assez grande pour être observable pour des masses pas trop grandes (statistique)

Fin de la parenthèse Z'

Asymétrie pour différents modèles de Z'
(masse = 1.5 TeV, 100 fb^{-1})



Géométrie « Warped » (Randall Sundrum)

Métrique exponentielle entre 2 membranes
pour expliquer faiblesse de la gravité dans
notre monde à 4 dimensions

Gravitons KK avec masse \sim échelle faible
+ couplage avec la matière

Paramètres: masse du premier état KK
courbure métrique/ M (Planck eff)

Signatures possibles:

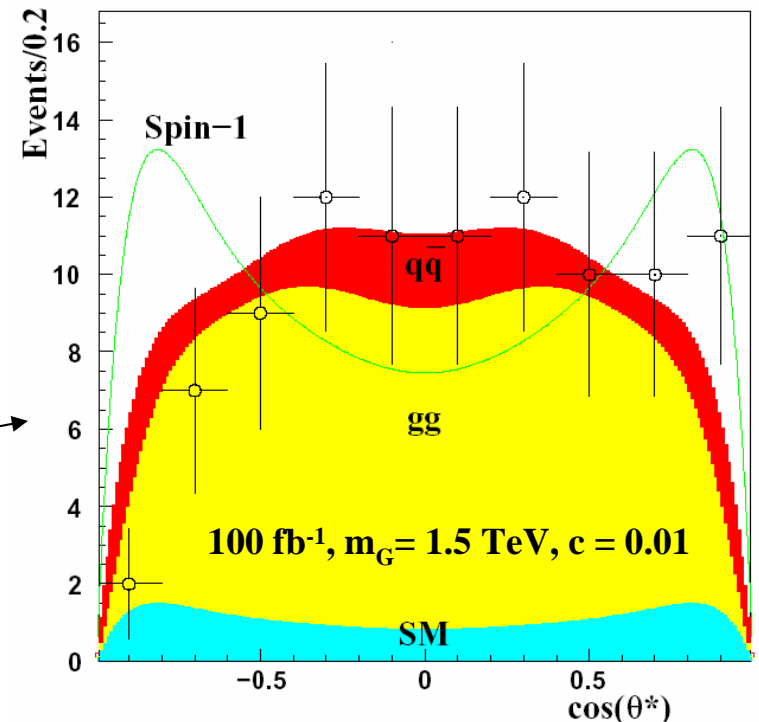
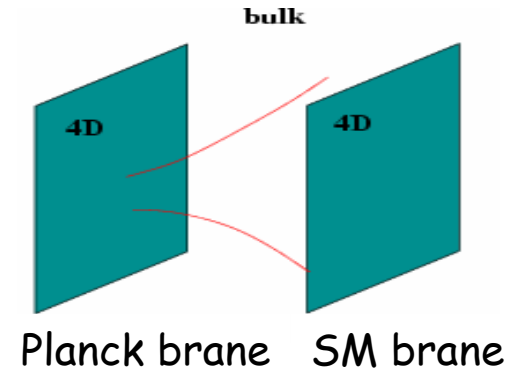
radion= scalaire pour stabiliser la distance
entre ces deux membranes

$\phi \rightarrow hh \rightarrow bb\tau\tau$ ou $bb\gamma\gamma$

Excitation du graviton $G^{(1)} \rightarrow e^+e^-$

Signature $\sim Z'$

Distribution angulaires caractéristique (spin 2) !



Plus exotique dans les X-dimensions: production de trous noirs au LHC

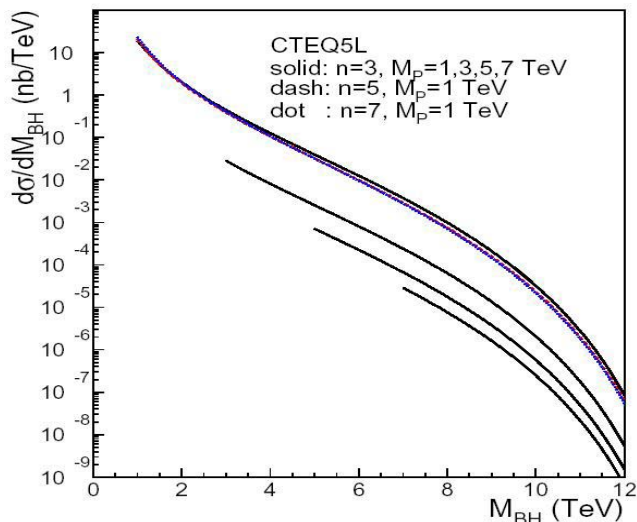
- Si $M(\text{Planck}) \sim 1 \text{ TeV}$, on peut imaginer de produire des trous noirs de masse $\sim \text{qqs TeV}$

- Horizon du trou noir:

$\sim 10^{-20} - 10^{-19} \text{ m}$

$$R_S = \frac{1}{\sqrt{\pi} M_P} \left[\frac{M_{\text{BH}}}{M_P} \left(\frac{8\Gamma(\frac{n+3}{2})}{n+2} \right) \right]^{\frac{1}{1+n}}$$

- Section efficace de production: $\pi R_S^2 \sim 1-100 \text{ pb}$



Pour $E \gg M(\text{Planck}) \Rightarrow$ limite
« classique » de relativité générale

$$T_H = M_P \left(\frac{M_P}{M_{\text{BH}}} \frac{n+2}{8\Gamma(\frac{n+3}{2})} \right)^{\frac{1}{n+1}} \frac{n+1}{4\sqrt{\pi}}$$

Température de Hawking => évaporation du trou noir:

Ordre de grandeur ~300-500 GeV

Évaporation rapide (particules produites avec énergie donnée par T_H) jusqu'à atteindre $M \sim M_P$ ou il se passe des choses plus compliquées

Production « démocratique » de particules dans l'état final (quarks, gluons, W, Z, H, etc..) ~ Nombre de degrés de liberté (spin*couleur) (+lois de conservation)

Particle	Degree of Freedom	Assigned Probability
g (gluon)	8	0.0690
W	6	0.0517
Z	3	0.0259
γ	2	0.0172
lepton (e, μ, τ)	4	0.0345
neutrino (ν_e, ν_μ, ν_τ)	4	0.0345
quark (u, d, c, s, t, b)	12	0.1034
Higgs	1	0.0086

Multiplicité totale ~ $M(\text{trou noir})/T_H$

État final : assez grande multiplicité de particules (jets,e,m,g)
avec grands ET, topologie sphérique.

Reconstruit masse totale pour avoir \sim la masse du trou noir
(spectre en masse)

\Rightarrow Signal assez spectaculaire, $S/B > 1$
Assez visible si cela existe...

Autres possibilités (bref catalogue)

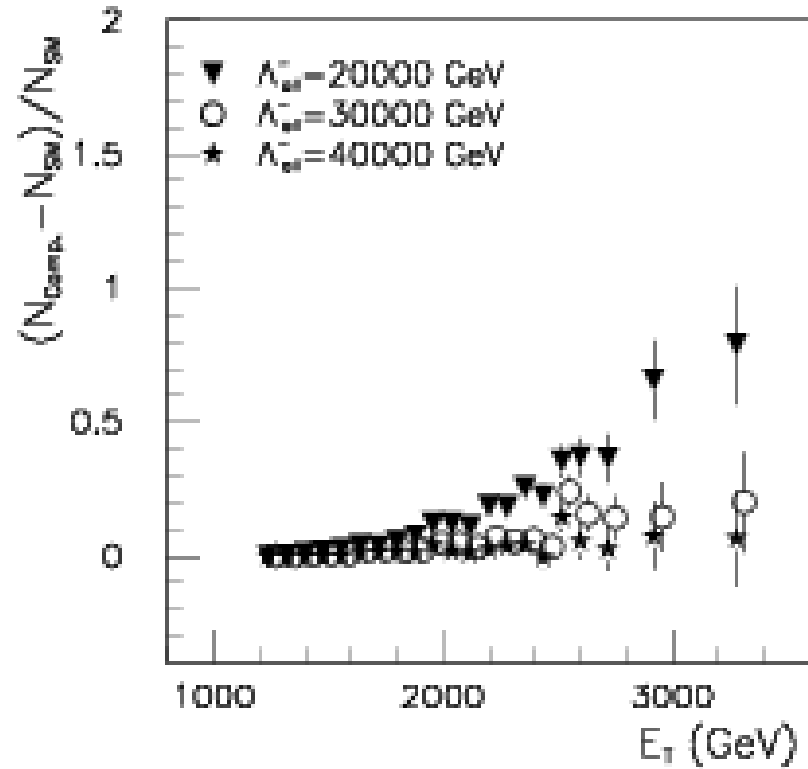
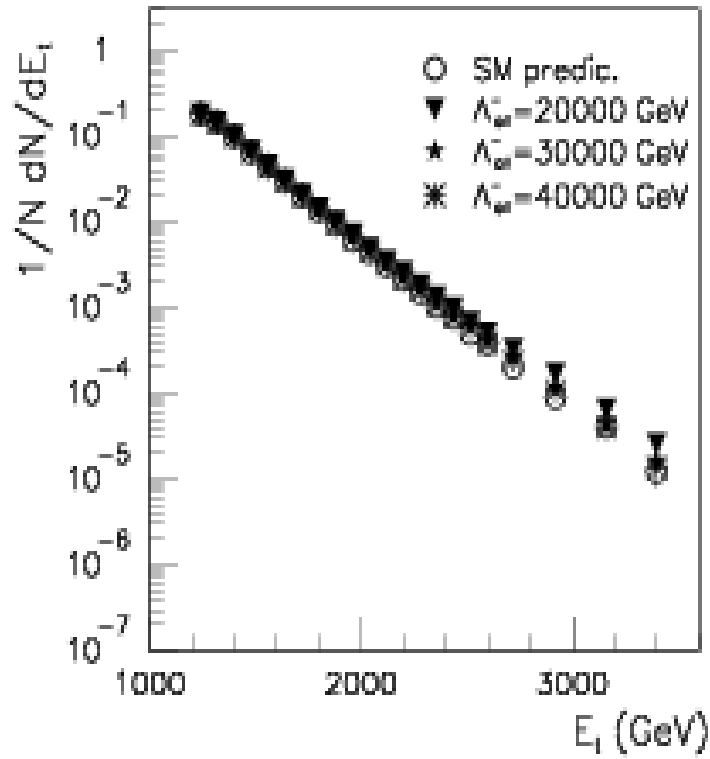
- **Supersymetrie avec violation de R parité:**
 χ^0_1 se désintègre (\rightarrow qqg ou llv ou qq ℓ , qqv) \Rightarrow beaucoup de jets (+leptons). Masses invariantes possibles
- **Quarks excités:** $qg \rightarrow q^* \rightarrow qg \Rightarrow$ pic dans la masse(g-jet).
Masses \sim plusieurs TeV (dépend du couplage)
- **Leptoquarks:** $LQ \rightarrow eq \Rightarrow$ pic masse(e-jet). Production par paires ($=f(\text{masse})$) ou isolé ($=f(\text{masse}, \text{couplage})$). Sensibilité ~ 1.5 TeV
- **Sous-structure:** \Rightarrow déviation dans la section efficace a très grande énergie (petite distance) \Rightarrow excès d'événements à grand pt dans les jets inclusifs. Sensibilité ~ 25 à 40 TeV. Attention aux systématiques (mesure des jets, fonction de structure...) La distribution angulaire peut aider

Etc... Etc...

(désintégrations rares de top, violation du nombre leptonique)

Prenez les paris...

Sous-structure avec 300 fb⁻¹



En guise de conclusions

- Boson de Higgs « standard » ne peut pas échapper au LHC. Variantes Susy sont aussi ~ toujours accessibles (modulo quelques régions délicates à investiguer dans des variantes non-minimales). Mesure des caractéristiques du Higgs nécessite la pleine luminosité (+SLHC)
- Diffusion $W_L W_L$: si pas de Higgs léger. Difficile, taux d'événements limité mais on devrait voir quelque chose.
- Supersymétrie: Potentiel jusqu'à ~ 3 TeV en masse => découverte possible (si non: peut-on vraiment tuer Susy ? Voir Higgs). Étape suivante : mesure des paramètres, complémentarité avec collisionneur linéaire
- Riche potentiel de découvertes pour d'autres scénarii de nouvelle physique vers ~1 TeV (ou plus)
- SLHC augmente régions accessibles en masse (~0.5 TeV pour Susy, ~0.8 TeV pour Z' , etc...) + précision des mesures
- + toute la physique du Modèle Standard
 - **on doit forcément comprendre les processus standards qui sont en bruit de fond à la « nouvelle physique » => outils théoriques adéquats (de nombreux développements récemment) + utilisation des données (ne pas dépendre que du MC)**

Pour explorer ce potentiel, la machine et les détecteurs doivent atteindre leurs performances nominales.