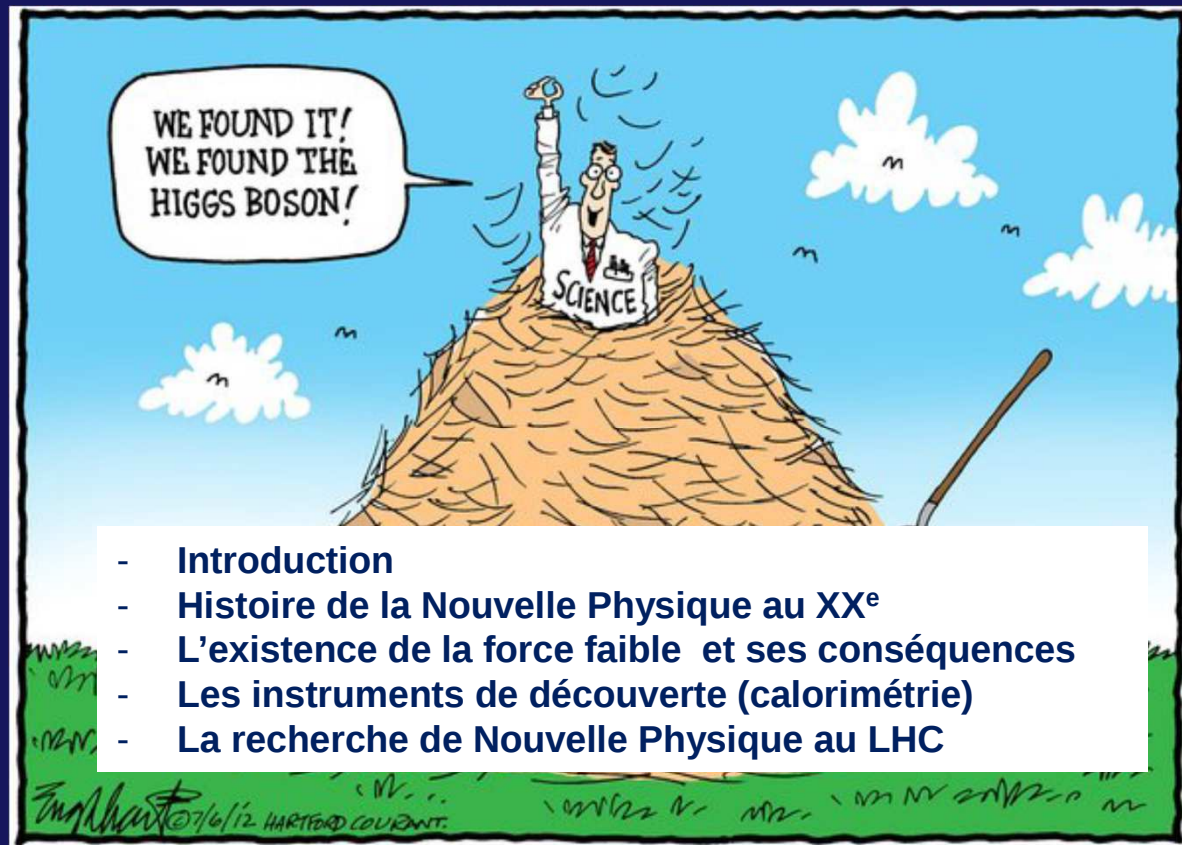


Recherche de Nouvelle Physique au LHC

Pascal Pralavorio

"Le savant n'est pas l'homme qui fournit les vraies réponses, c'est celui qui pose les vraies questions"
Claude Levi-Strauss (1964)

"Je suis applaudi, parce que tout le monde me comprend; vous êtes applaudis par que personne ne vous comprend"
Charlie Chaplin à Albert Einstein



- Introduction
- Histoire de la Nouvelle Physique au XX^e
- L'existence de la force faible et ses conséquences
- Les instruments de découverte (calorimétrie)
- La recherche de Nouvelle Physique au LHC



Luis Alvarez et son fils en Italie (1981)

La Méthode scientifique

Deux roches de couleurs différentes

→ Changement drastique il y a 65 millions d'années

Pourquoi ?

Etude chimique de la couche intermédiaire

→ Extinction massive des espèces

→ Un fort taux d'Iridium très rare sur terre

Pourquoi ?

Hypothèse: Collision d'une météorite sur la Terre ???

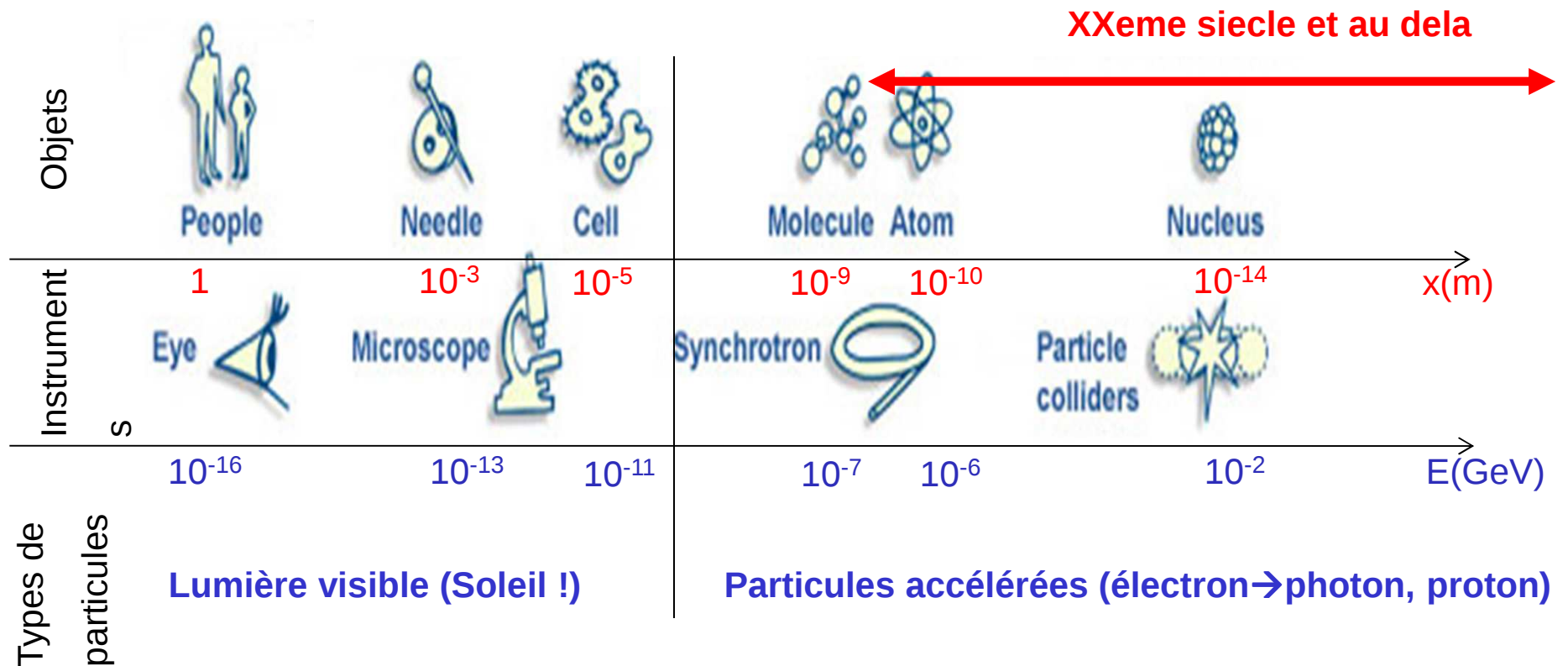
→ Ou est la météorite ? Dans le golfe du Mexique !

La science remplace du visible compliqué par de l'invisible simple (Jean Perrin)

Comment trouver de la Nouvelle Physique ? (1)

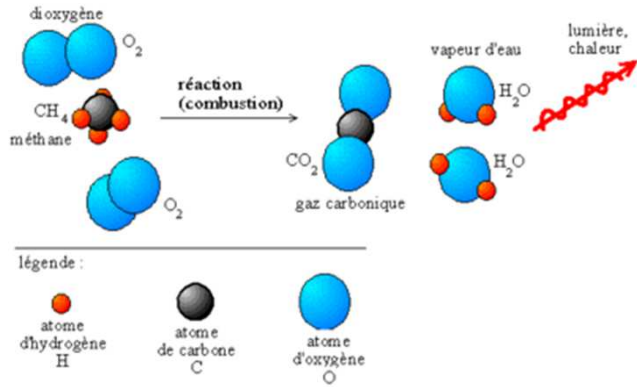
Etroitement liés aux progrès technologiques ...

- Pour voir des objets plus petits, il faut plus d'énergie
- Plus il faut d'énergie, plus les instruments sont grands

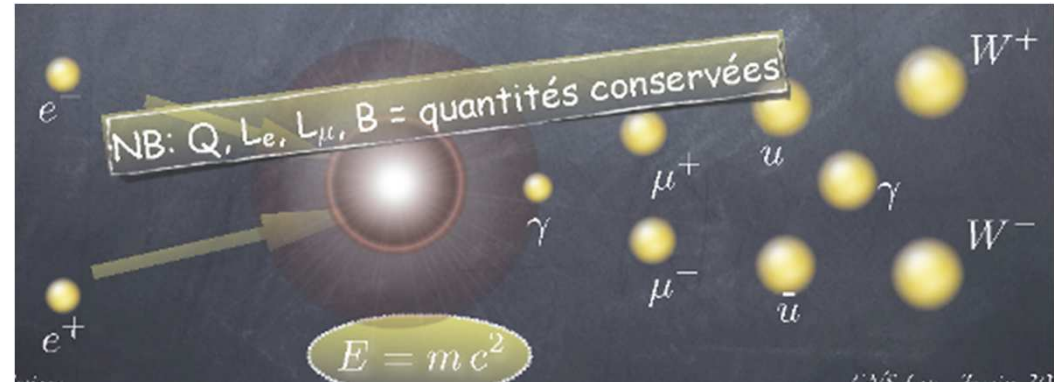


Comment trouver de la Nouvelle Physique ? (2)

Collisionneur → fait apparaître de nouvelles particules !



Combustion du Méthane:
les atomes sont réarrangés



Aussi invariant par translation/ rotation, ...

NOTA: Pourquoi si on collisionne des fraises ca ne donne pas des poires ?

$\lambda = h/mc$ = taille quantique. Fraise $m=30g \rightarrow \lambda = 10^{-42} m \ll 10 cm$;

Electron $m=10^{-30} kg \rightarrow \lambda = 10^{-12} m$ les effets quantiques s'appliquent

Recherche de Nouvelle Physique (Part I: Histoire au XX^e siècle)



Plongée entre 10^{-10} et 10^{-18} m,
à la découverte des particules

Qu'est-ce qu'on a trouvé ?

Les découvertes attendues et inattendues



Qui est cet homme ?



1. Darwin
2. Nicolas Sarkozy en 2012
3. Rip Van Winkle

Rip Van Winckle

- Personnage principal du roman de Irving Washington

“ The story takes place in the years **before and after** the American Revolutionary War (**1775-1783**). Rip is a lazy farmer that enjoys nature. One autumn day, Rip goes hunting to escape his wife's nagging. He met a man that ask for help to carry a small barrel of alcohol up to a place with bearded men who are playing nine-pins and know his name. He discreetly begins to drink some of their liquor, and soon falls asleep.

When he awakes his gun is rotted and rusty, his beard has grown a foot long. Rip returns to his village where he finds that he recognizes no one: he discovers that his wife has died and that his close friends have died in a war or gone somewhere else. Rip is also disturbed to find another man is being called Rip Van Winkle (though this is in fact his son, who has now grown up). Rip is told that he has apparently been away from the village for **twenty-seven** years. An old local recognizes Rip and Rip's now-adult daughter takes him in. Rip resumes his habitual idleness, and his tale is solemnly taken to heart by the Dutch settlers, with other hen-pecked husbands, after hearing his story, wishing they could share in Rip's good luck “.

→ Quel est le rapport avec la physique des particules ?

Histoire de la Physique des particules (1)

❑ Qu'est-ce que Rip Van Winkle comprendrait à une présentation sur la physique des particules s'il s'endormait / **se réveillait** 27 ans après en

• 1903/**1930** – rien!

Pourquoi?

Découvertes théoriques	Découvertes expérimentales	Prix Nobel % Part. Physics
Electromagnétisme (EM), Gravité, Thermodynamique Phys. Statistique	Electron, Radioactivité α , γ	~100%
Mécanique Quantique, Relativité, Interaction Forte	Proton, Compton ($\gamma \rightarrow \gamma e$) Radioactivité β	~50%

- Deux nouvelles théories
- Une dimension supplémentaire
- Une nouvelle interaction

- Naissance de la physique nucléaire
- Première exploration à l'échelle du picomètre

➔ Une nouvelle physique est née!

Histoire de la Physique des particules (2)

❑ Qu'est-ce que Rip Van Winkle comprendrait à une présentation sur la physique des particules s'il s'endormait / **se réveillait** 27 ans après en

• 1930/1957 – presque rien

Pourquoi?

Découvertes théoriques	Découvertes expérimentales	Prix Nobel % Part. Physics
Mécanique Quantique, Relativité, Interaction Forte	Proton, Compton ($\gamma \rightarrow \gamma e$) Radioactivité β	~50%
Neutrino, Antiparticules, Interaction Faible, QED*, Théorie de Jauge	Positron, neutron, pion, muon, strange part., neutrino, CP violation	~60%

- Deux nouvelles théories
- Plein de nouvelles particules
- Une nouvelle interaction

- 5 nouvelles particules
- Violation d'une symétrie fondamentale !
- Premiers accélérateurs

➔ **Grandes avancées mais pas de compréhension globale**

* QED= Quantum Electrodynamics, QCD=Quantum Chromodynamics

Histoire de la Physique des particules (3)

❑ Qu'est-ce que Rip Van Winkle comprendrait à une présentation sur la physique des particules s'il s'endormait / **se réveillait** 27 ans après en

• 1957/**1984** – presque rien

Pourquoi?

Découvertes théoriques	Découvertes expérimentales	Prix Nobel % Part. Physics
Neutrino, Antiparticules, Interaction Faible, QED*, Théorie de Jauge	Positron, neutron, pion, muon, part. étranges, neutrino, CP violation	~60%
QCD*+Unification Electro-Faible+Higgs=Modèle Standard !, SUSY, ...	Autres neutrinos, >100 particules (hadrons), J/Psi, τ , Y , gluon, W, Z	~50%

• Quatre nouvelles théories et plusieurs extensions !

• >100 nouvelles particules

→ Théorie complète! Premier liens avec l'astrophysique

* QED= Quantum Electrodynamics, QCD=Quantum Chromodynamics

Histoire de la Physique des particules (4)

❑ Qu'est-ce que Rip Van Winkle comprendrait à une présentation sur la physique des particules s'il s'endormait / **se réveillait** 27 ans après en

• **1984/2011** – presque tout !

Pourquoi?

Découvertes théoriques	Découvertes expérimentales	Prix Nobel % Part. Physics
QCD*+Unification Electro- Faible+Higgs=Modèle Standard !, SUSY, ...	Autres neutrinos, >100 particules (hadrons), J/Psi, τ , Y, gluon, W, Z	~50%
	3 familles, Top, neutrinos massifs	~30%

➔ **Dernières confirmations expérimentales ... Pas de nouvelles surprises**

* QED= Quantum Electrodynamics, QCD=Quantum Chromodynamics

Histoire de la Physique des particules (5)

❑ Qu'est-ce que Rip Van Winkle comprendrait à une présentation sur la physique des particules s'il s'endormait / **se réveillait 27 ans après en**

• 1903/**1930** – rien

• 1930/**1957** – presque rien

• 1957/**1984** – presque rien

• 1984/**2011** – presque tout

Pourquoi?

Découvertes théoriques	Découvertes expérimentales	Prix Nobel % Part. Physics
Electromagnétisme (EM), Gravité Thermodynamique Phys. Statistique	Electron, Radioactivité α , γ	~100%
Mécanique Quantique, Relativité, Interaction Forte	Proton, Compton ($\gamma \rightarrow \gamma e$) Radioactivité β	~50%
Neutrino, Antiparticules, Interaction Faible, QED*, Théorie de Jauge	Positron, neutron, pion, muon, part. étranges, neutrino, CP violation	~60%
QCD*+Unification Electro -Faible+Higgs=Modèle Standard !, SUSY, ...	Autres neutrinos, >100 particules (hadrons), J/Psi, τ , Y , gluon, W, Z	~50%
	3 familles, Top, neutrinos massifs	~30%

➔ **Enormément d'avancées en un siècle: exploration d'une physique complètement nouvelle dans un cadre théorique extrêmement solide**

* QED= Quantum Electrodynamics, QCD=Quantum Chromodynamics

Recherche de Nouvelle Physique (Part II : La force faible)



Plongée entre 10^{-10} et 10^{-18} m,
à la découverte des particules

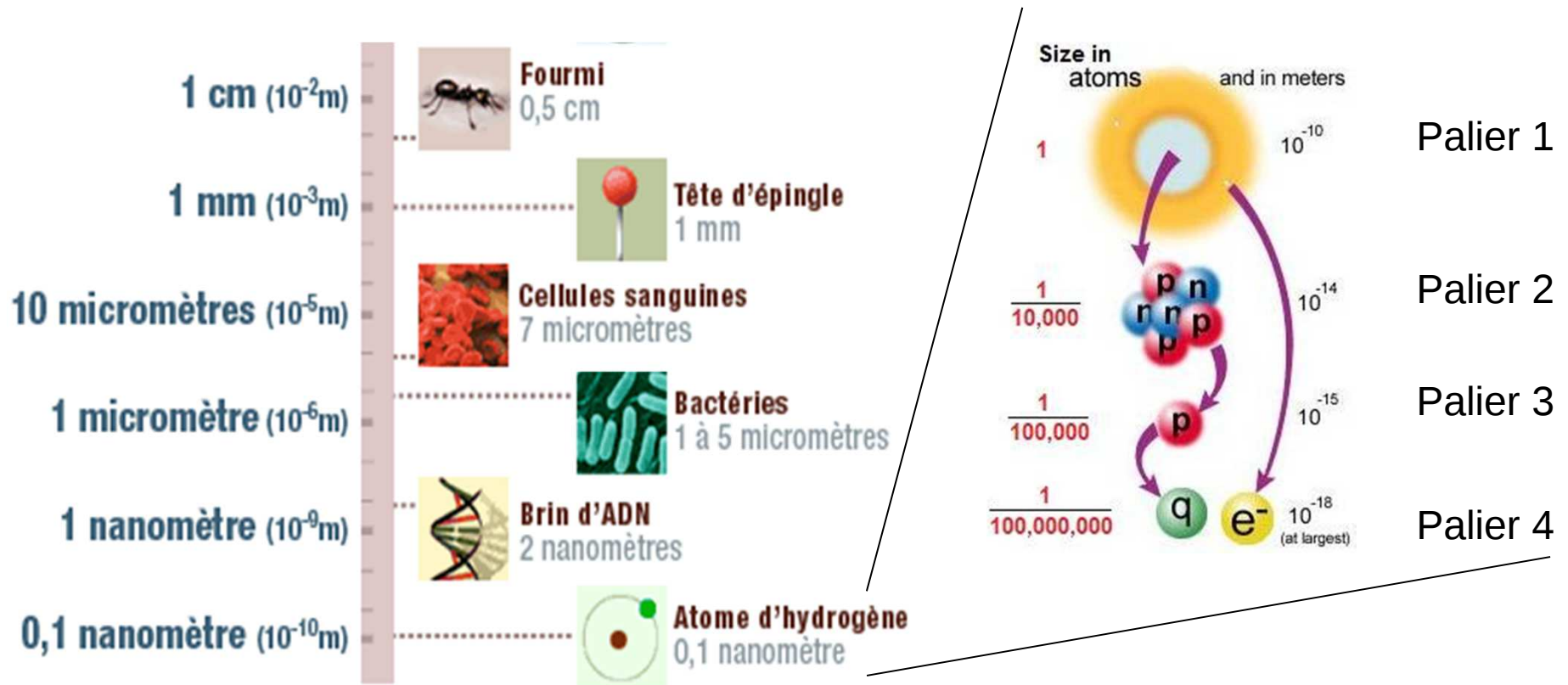
Qu'est-ce qu'on a trouvé ?

Les découvertes attendues et inattendues



Les paliers de la plongée

Quelles dimensions allons-nous explorer dans l'infiniment petit ?



NOTA: Il y a $\sim 10^{28}$ atomes dans le corps humain

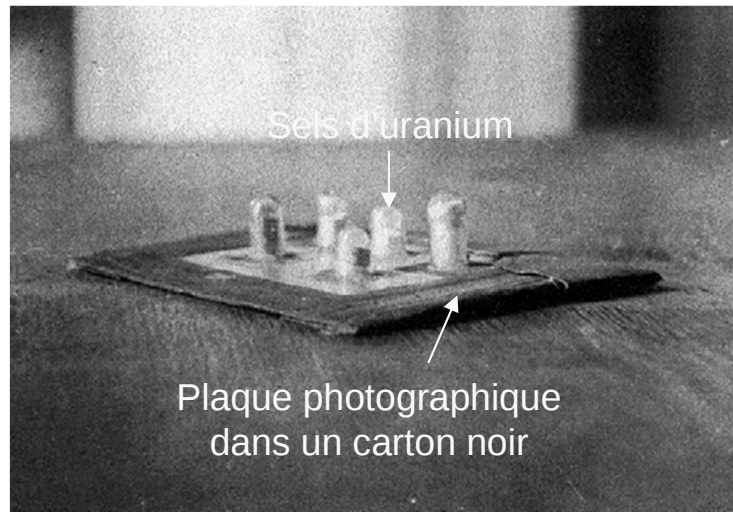
8 ordres de grandeur de 10^{-10} à 10^{-18} m

La force faible (1)



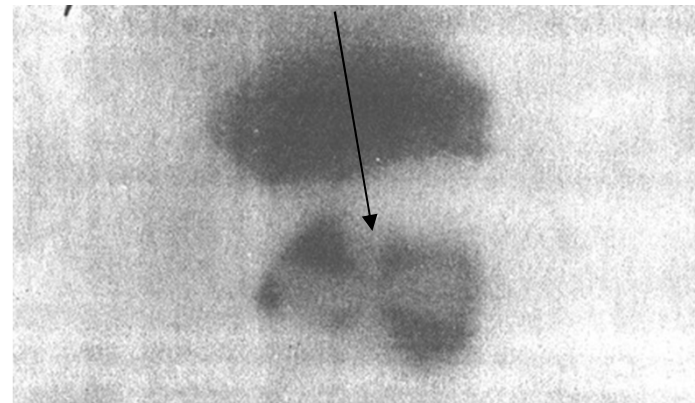
Découverte fortuite de la radioactivité naturelle par Henri Becquerel

- Laisse des sels d'Uranium dans un tiroir pendant 2 jours
- Développe les plaques par conscience professionnelle



Expérience

« Si, entre la lamelle du sel d'uranium et la lame d'aluminium ou le papier noir, on interpose un écran formé d'une lame de cuivre ... par exemple en forme de croix, on observe dans l'image la silhouette de cette croix, en plus clair... »

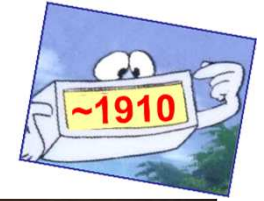


Développement de la plaque photographique

Découverte : l'uranium émet spontanément des rayons pénétrants !

Palier 2
Profondeur
 10^{-14} m

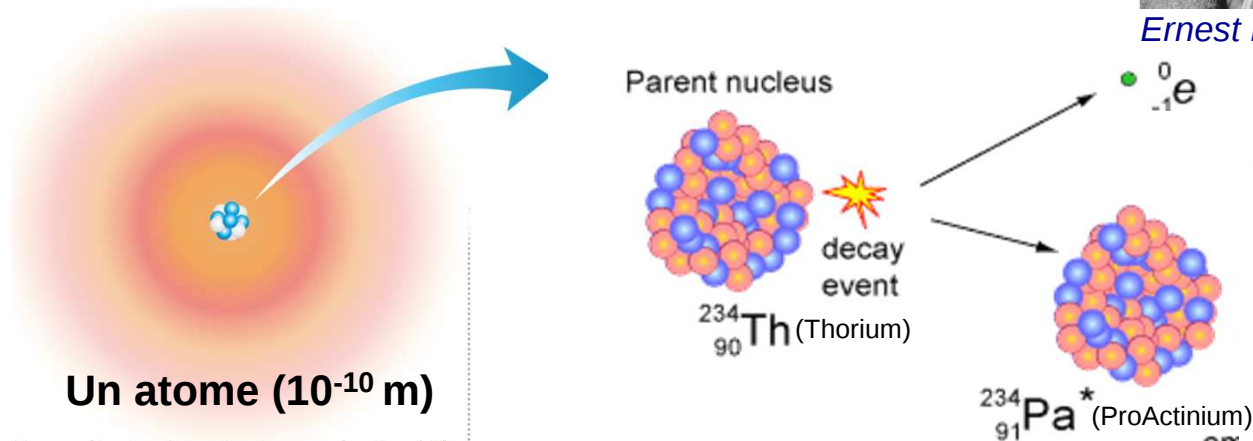
La force faible (2)



- « Radiations actives » → Radioactivité (Marie Curie)
- Les rayonnements sont en fait des électrons
- Un atome est formé d'un noyau et d'électrons
- Les rayonnements sont dus à la transmutation des noyaux



Ernest Rutherford Marie Curie



Découverte : Une force (inconnue !) agit au niveau du noyau de l'atome (noyau = nucleus → nucléaire)

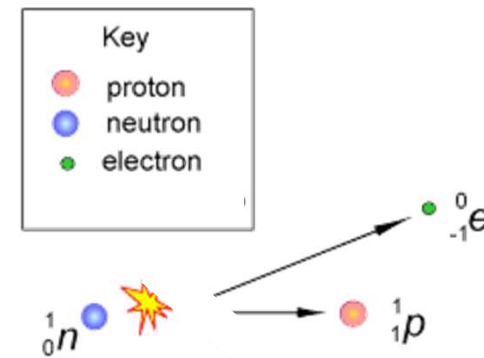
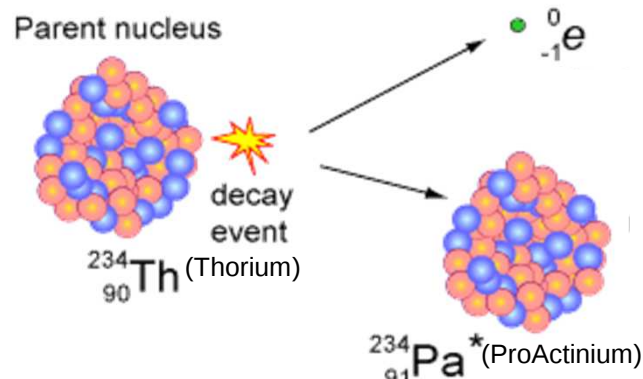
La force faible (3)



- Le noyau est constitué de protons et de neutrons
- Les protons sont des particules de charge opposée à celle des électrons qui gravitent autour du noyau
- Les neutrons sont neutres et stabilisent le noyau

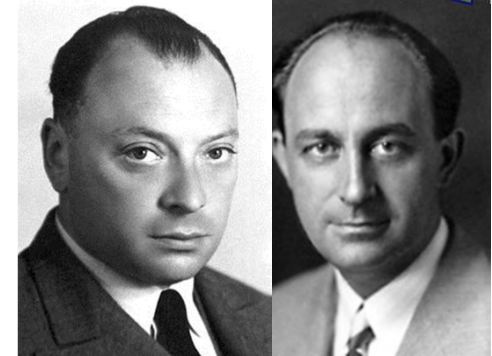


James Chadwick Ernest Rutherford



Découverte : Le neutron se désintègre (rarement) en un proton et un électron

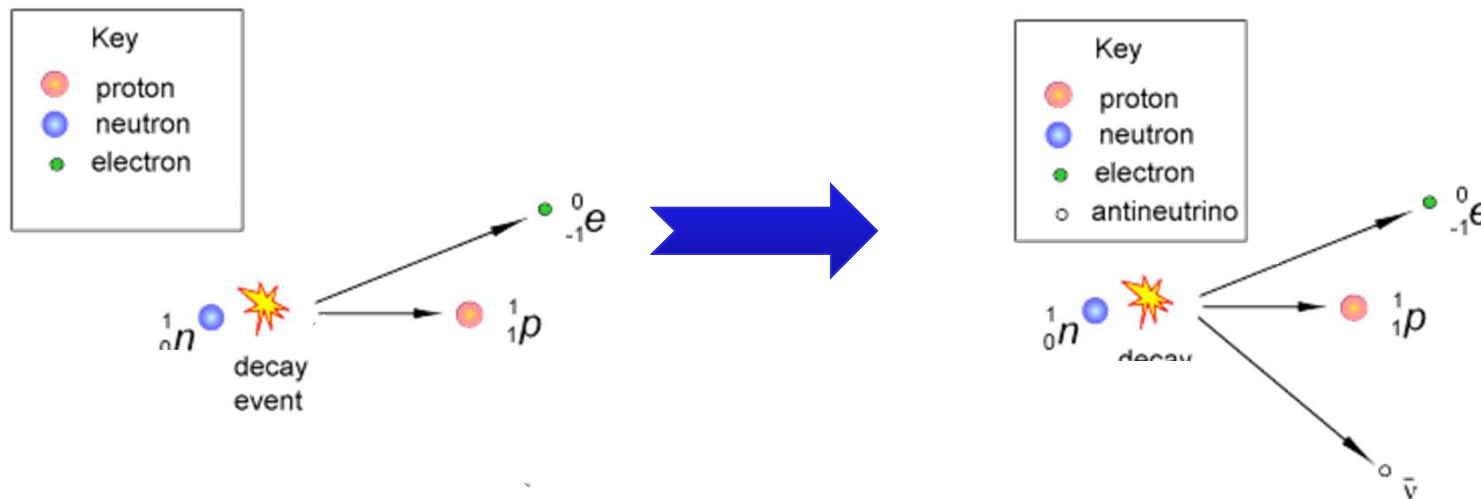
La force faible (4)



Wolfgang Pauli Enrico Fermi

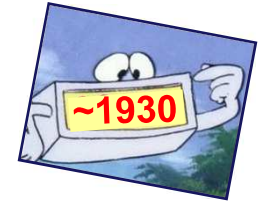
Pourquoi cette force ne conserve pas l'énergie ?

- L'énergie de l'électron devrait être constante, mais ne l'est pas !!
- Il existe une autre particule qui emporte une partie de l'énergie
 - ✓ Il est appelé « neutrino » (« petit neutre » en italien)
 - ✓ il est « indétectable »



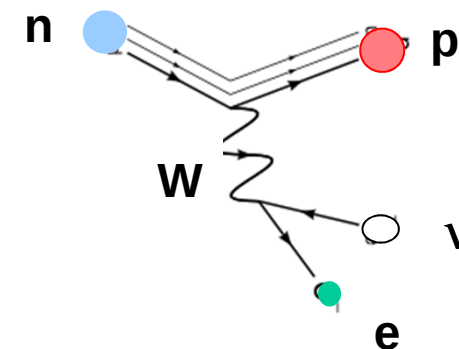
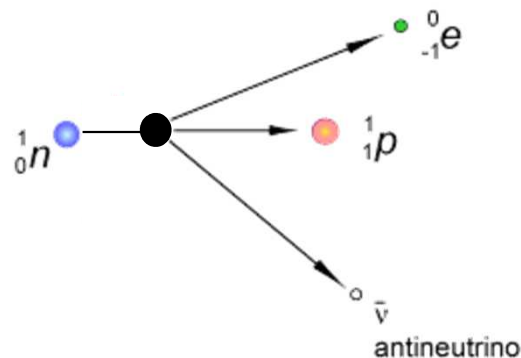
**Prédiction d'une particule ``sans masse'' le neutrino (ν),
observée 26 ans plus tard !**

La force faible (5)



Pour cette force est-elle si faible (d'où son nom) ?

- La force électromagnétique agit quelque soit la distance:
 - ✓ Macroscopique ~ foudre
 - ✓ Microscopique ~ atome
 - ✓ La particule responsable de la force électromagnétique est de masse nulle (le photon)
- La force faible agit seulement à très petite distance (dans le noyau) :
 - ✓ La particule responsable de la force doit être très lourde



Prédiction d'une particule « massive » chargée (W pour Weak, faible), observée 53 ans plus tard !

La force faible (6)

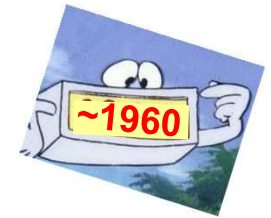


❑ Pourquoi la force faible n'aime pas les lois de conservations ?

- **Lois de conservation:** Les propriétés physique d'un système ($n \rightarrow p e \bar{\nu}$) doivent rester constante quelque soit les changement du système.
 - ✓ La parité (P): $\vec{p} \rightarrow -\vec{p}$, ou la même expérience dans un miroir
 - ✓ La Conjugaison de charge (C): $\bar{n} \rightarrow \bar{p} e^+ \nu$ la même expérience avec des antiparticules
 - ✓ Le produit des deux (CP): la même expérience dans un miroir avec des antiparticules !
- Pour l'interaction faible, aucune des trois transformations **n'est conservée** car:
 - ✓ L'antineutrino gauche et le neutrino droit n'existe pas
 - ✓ Il existe plusieurs familles de leptons et de quarks qui se mélangent

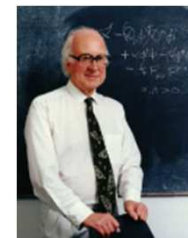
**Prédiction de 3 Familles de particules élémentaires,
observés dans les années 1970-1990 !**

La force faible (7)

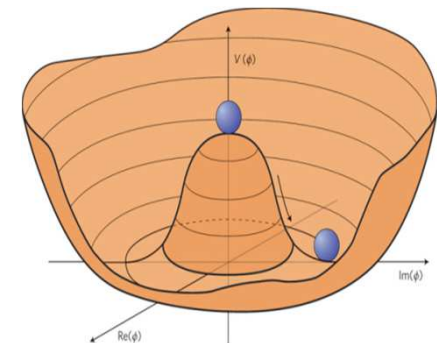


Mais comment produire une particule si massive (le W) ?

- Problème théorique extrêmement ardu !
 - ✓ ... mais possible! grâce au mécanisme de Higgs-Brout-Englert



- Quelques prédictions du mécanisme:
 - ✓ Le champ de Higgs : le vide a une énergie !!!
 - ✓ Une nouvelle particule massive: le boson de Higgs (**H**)
- Un Avantage et un bonus :
 - ✓ Préserve les symétries fondamentales de la physique (seul le vide est asymétrique)
 - ✓ Le champs de Higgs donne une masse aux autres particules élémentaires



**Le vide a une énergie non nulle,
explique aussi pourquoi le **W** et les particules ont une masse !**

Une pause ?

On a prédit puis découvert **3** nouvelles particules en étudiant la force faible :
l'électron, le neutrino et la particule W



Prêt pour la suite ?

Recherche de Nouvelle Physique (Part III: ATLAS et son calorimètre)

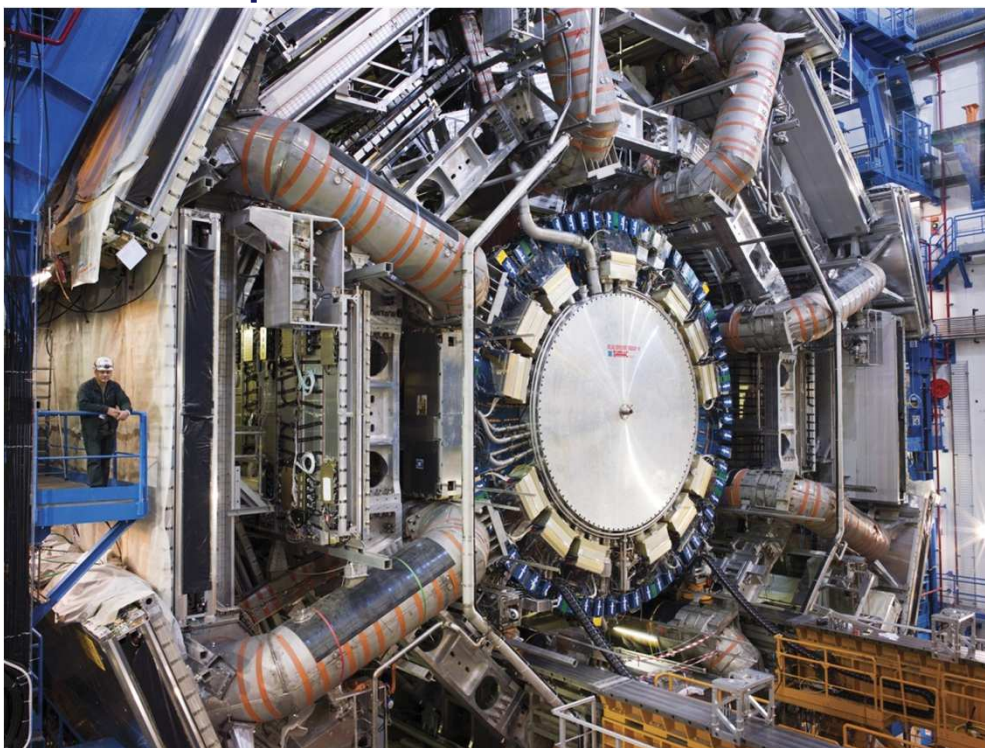


Les instruments pour la découverte et leur fonctionnement



L'expérience ATLAS (1)

- Collaboration mondiale sur des dizaines d'années
- Utilise la quintessence de la connaissance/technologie et beaucoup de personnes !



Labos: **174 (7 français)**
Pays: **38**
Personnes: **3000**
Canaux: **80 millions**

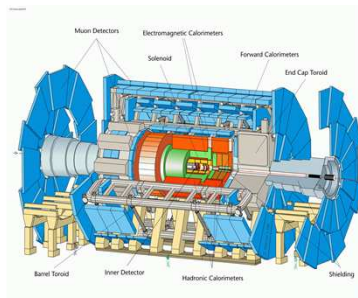
Site: **Genève (Suisse)**
Démarrage: **1988**
Fabrication+exploitation: **40 ans**
Responsables : **2 (pour l'instant)**
Dimensions (Lxlxh): **44x22x22 m³**



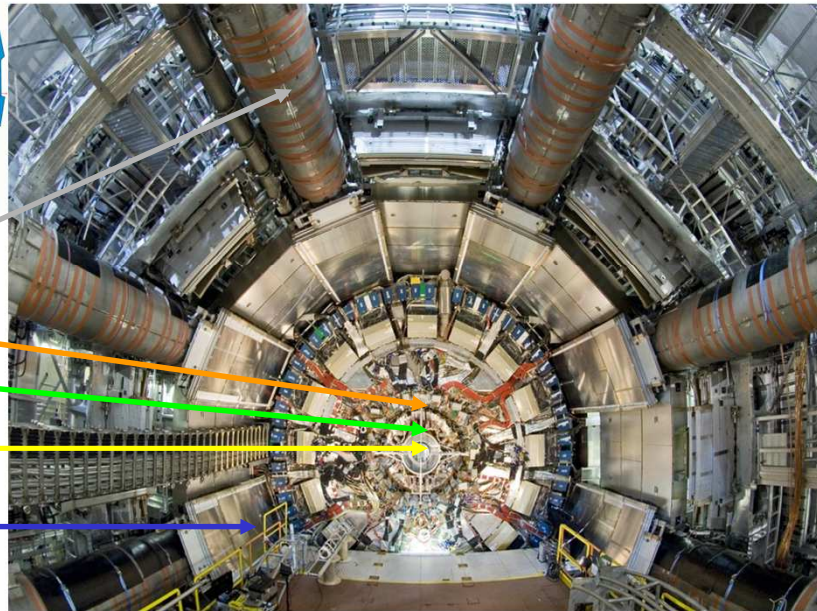
Site: **Reims (France)**
Démarrage: **1211**
Fabrication: **64 ans**
Architectes: **4**
Dimensions(Lxlxh):**150x30x40 m³**

L'expérience ATLAS (2)

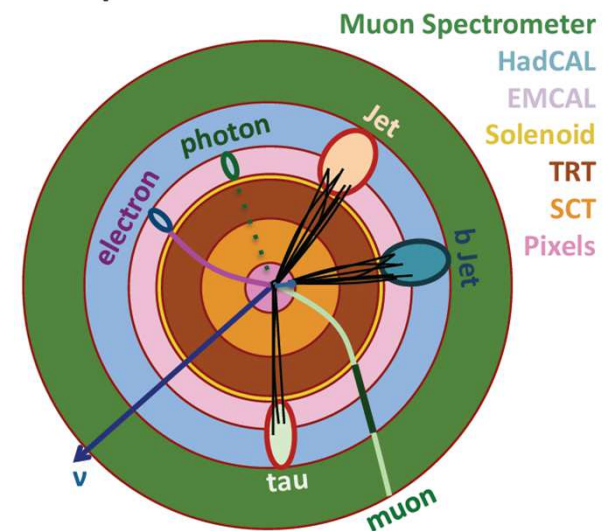
- ❑ Reconstituer les particules produites lors de la collision
 - C'est à dire reconstruire leur vecteur (E , $\vec{p}$)



Toroids
Had Calo
EM Calo
Inner Detector
 μ spectrometer



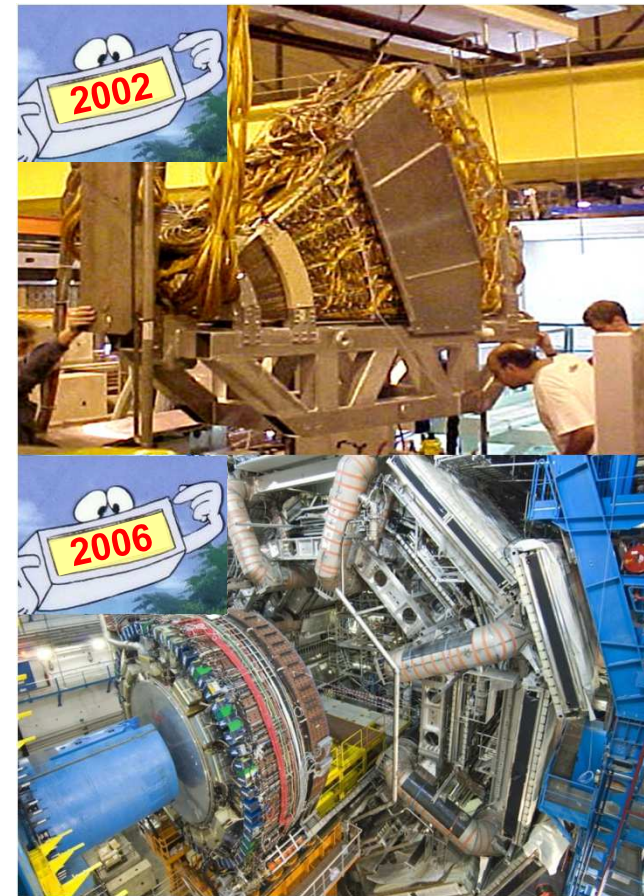
Simplified Detector Transverse View



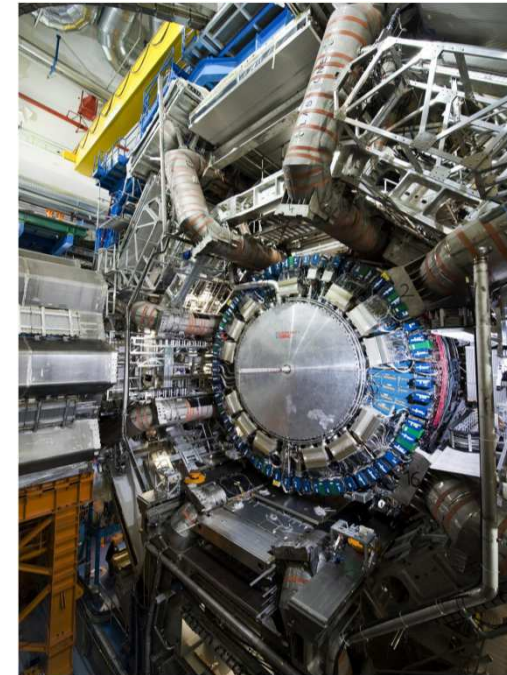
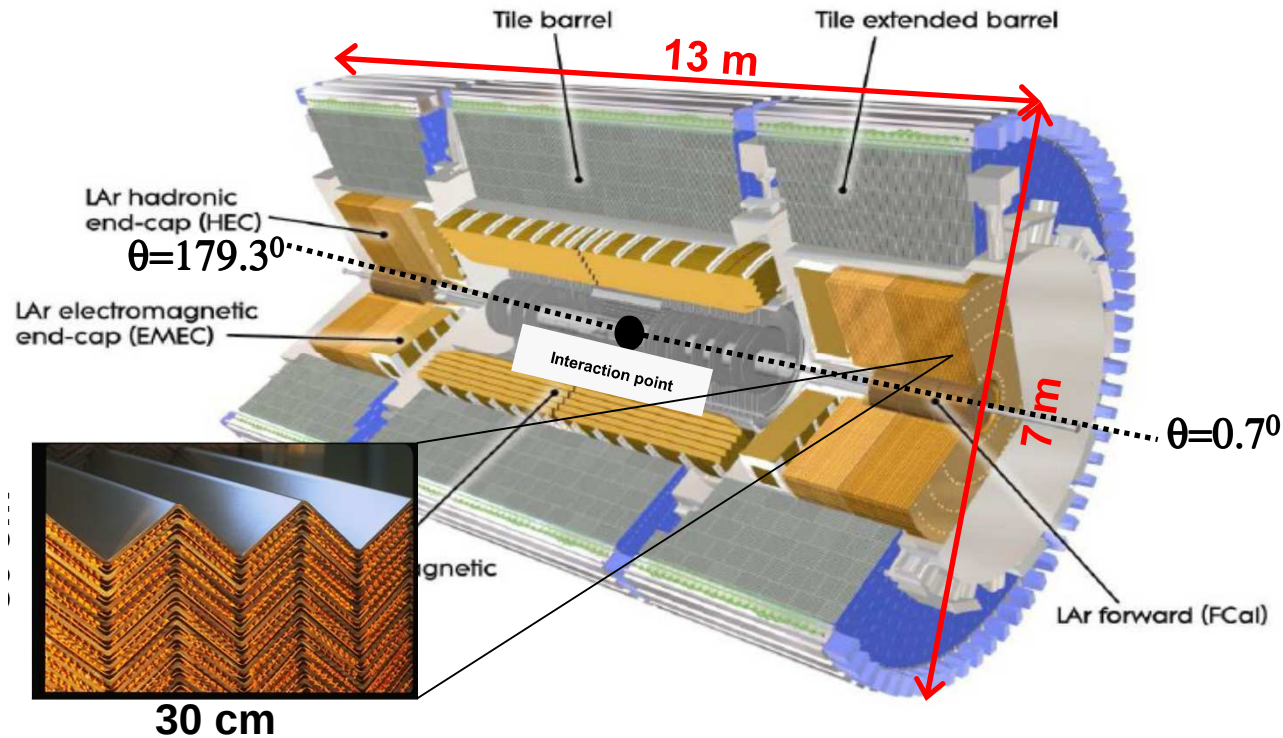
Le Calorimètre d'ATLAS (1)

La calorimètre (~10 ans de ma vie !)

- Retrouve-moi sur trois des quatre photos !



Le Calorimètre d'ATLAS (2)



- **Très granulaire** : EM (173 500), HAD (14000 = 5 000 Tile + 5500 HEC + 3500 FCal)
- **Hermétique** : EM (22-35 X_0), EM+HAD (11-15 λ), $0.7^\circ < \theta < 179.3^\circ$

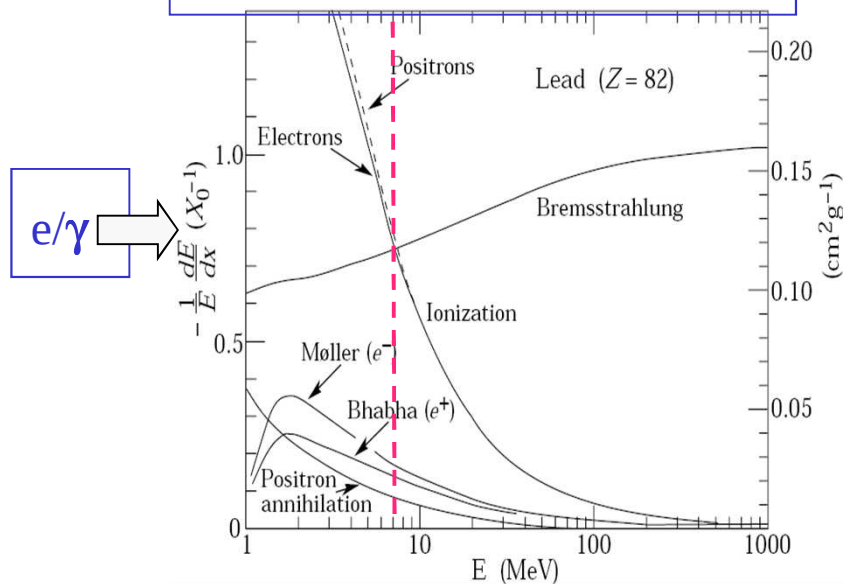
Le Calorimètre d'ATLAS (3)

❑ L'électron perd toute son énergie dans le calorimètre ...

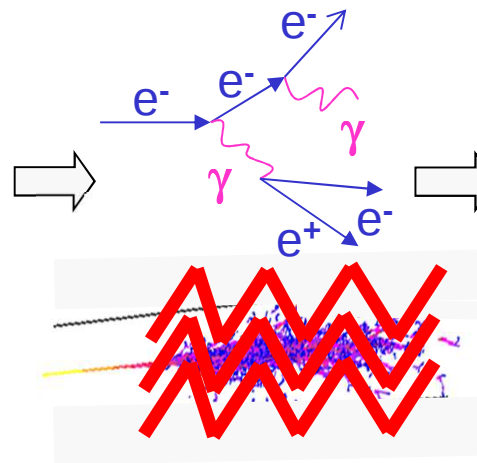
- Il interagit avec l'absorbeur → gerbe EM → Electrons secondaires
- Les électrons secondaires ionisent l'argon liquide → Electrons d'ionisation



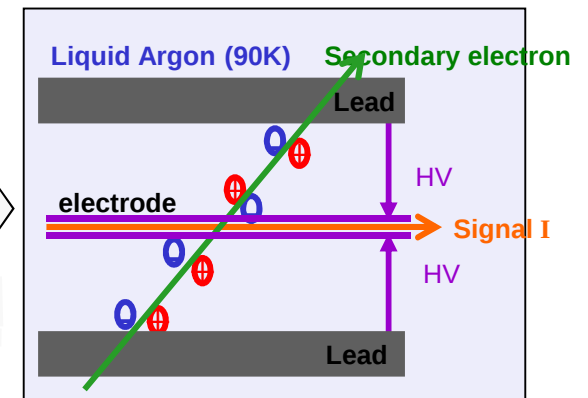
Interagit dans le plomb ...



Crée une gerbe ...



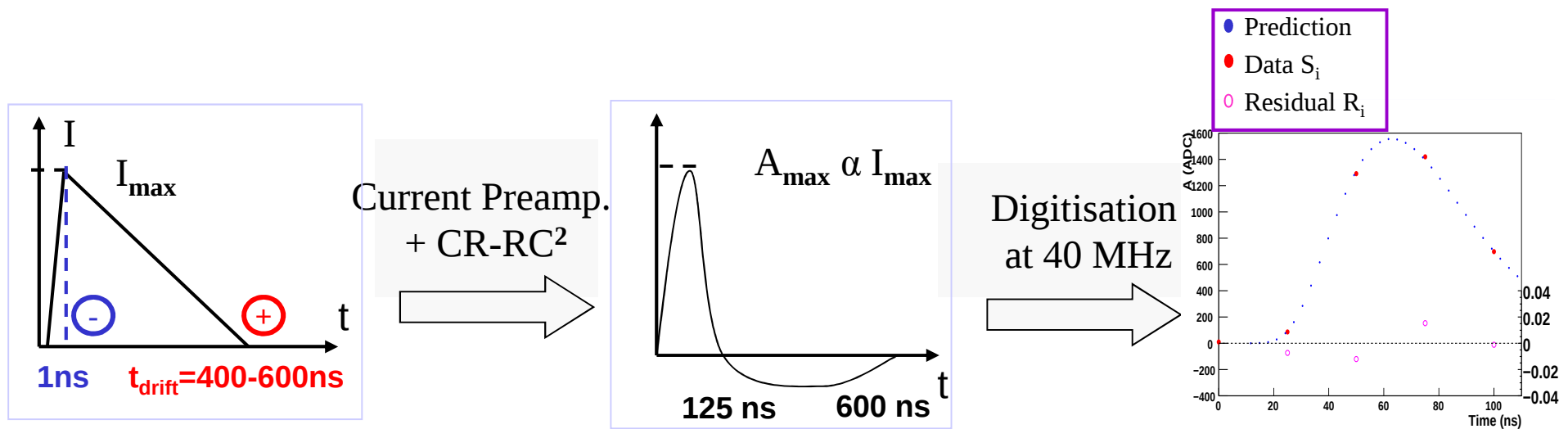
Ionise l'argon liquide ...



Le Calorimètre d'ATLAS (4)

□ ... et le signal de sortie est lu avec une électronique rapide ...

- Sous champs électrique (1kV/mm), les électrons d'ionisation dérivent ...
- ... créent un signal triangulaire sur l'électrode
- ... traite par l'électronique frontale (sur le cryostat)



▪ Electronique externe :

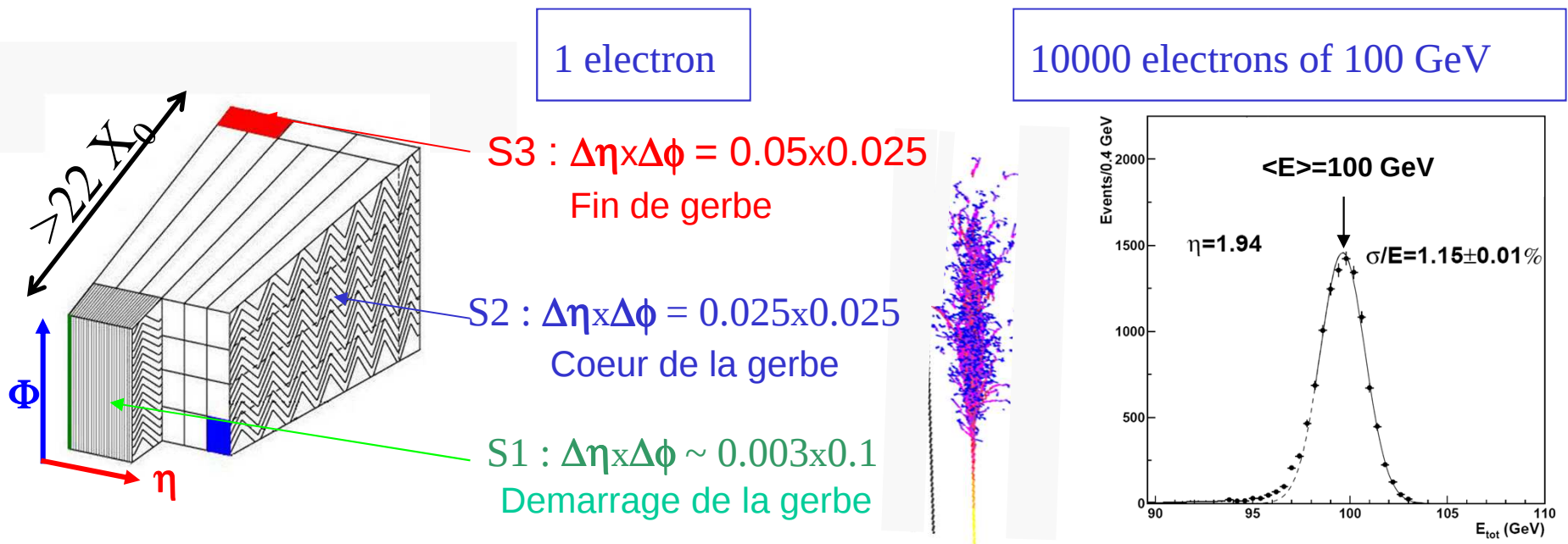
$$A_{\max} = \sum_{i=1}^5 a_i (S_i - P) \longrightarrow E = F \times g \times A_{\max}$$

Le Calorimètre d'ATLAS (5)

❑ Reconstruction de l'énergie des électrons (id. pour photons)

- Un électron dépose son énergie dans plusieurs cellules du calorimètre EM
- On regroupe ses cellules par couche pour calculer son énergie :

$$E = E(S1) + E(S2) + E(S3) \rightarrow \sim 60 \text{ cellules}$$



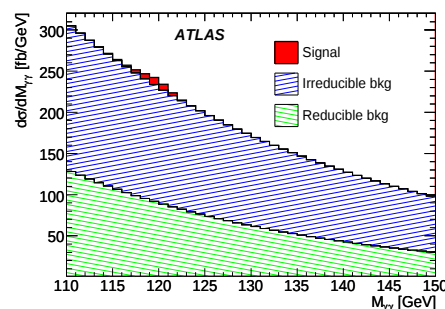
➔ A maîtriser sur toute la couverture angulaire du calorimètre !

Le Calorimètre d'ATLAS (6)

□ Mesure de l'énergie (E) et des directions (η , ϕ) de e/γ :

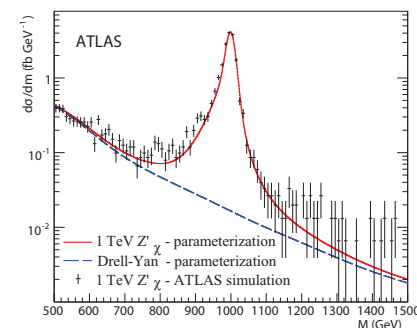
$\langle E_{\gamma,e} \rangle \sim 100$ GeV

- $H \rightarrow \gamma\gamma$
- $H \rightarrow 4e$



$E_e > 500$ GeV

- $W' \rightarrow e\nu$
- $Z' \rightarrow ee$



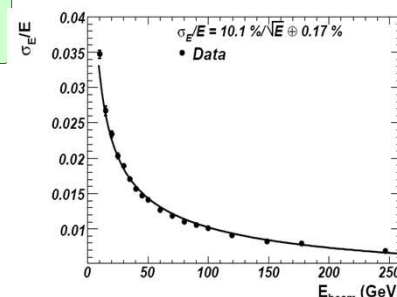
□ ... avec grande précision sur E

- Terme stochastique
- Terme constant

$$a \sim 10\% \sqrt{\text{GeV}}$$

$$c < 1\%$$

$$\sigma_E/E = a/\sqrt{E} \oplus c \oplus n/E$$



□ ... calibration correcte $\forall E$

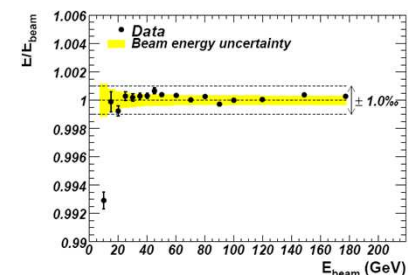
- Résolution en masse $H \rightarrow \gamma\gamma$, $4e$

Linéarité $< 0.5\%$

□ ... et grande précision sur η , ϕ

- Faible contribution à la résolution en masse $H \rightarrow \gamma\gamma$

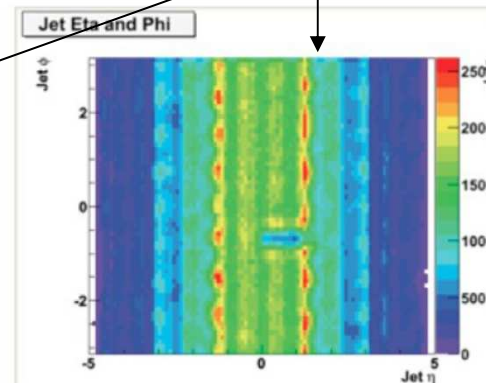
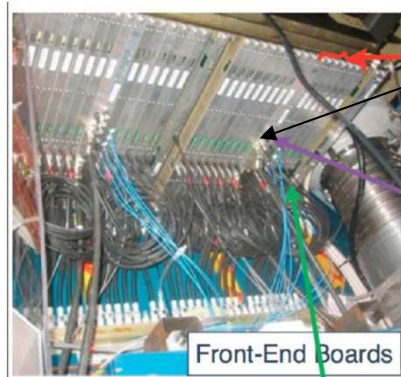
$$a_\theta \sim 50 \text{ mrad}/\sqrt{E}$$



Le Calorimètre d'ATLAS (7)

❑ Condition du succès: ne pas avoir de «trous» dans le détecteur!

- Rappel: 187500 cellules regroupées en cartes de 128 canaux
- 1er mai 2011: 6 cartes perdent leur horloge 25 ns
- ➔ Trous dans le nombre de jets reconstruits, queues de E_T^{miss}



Débranche

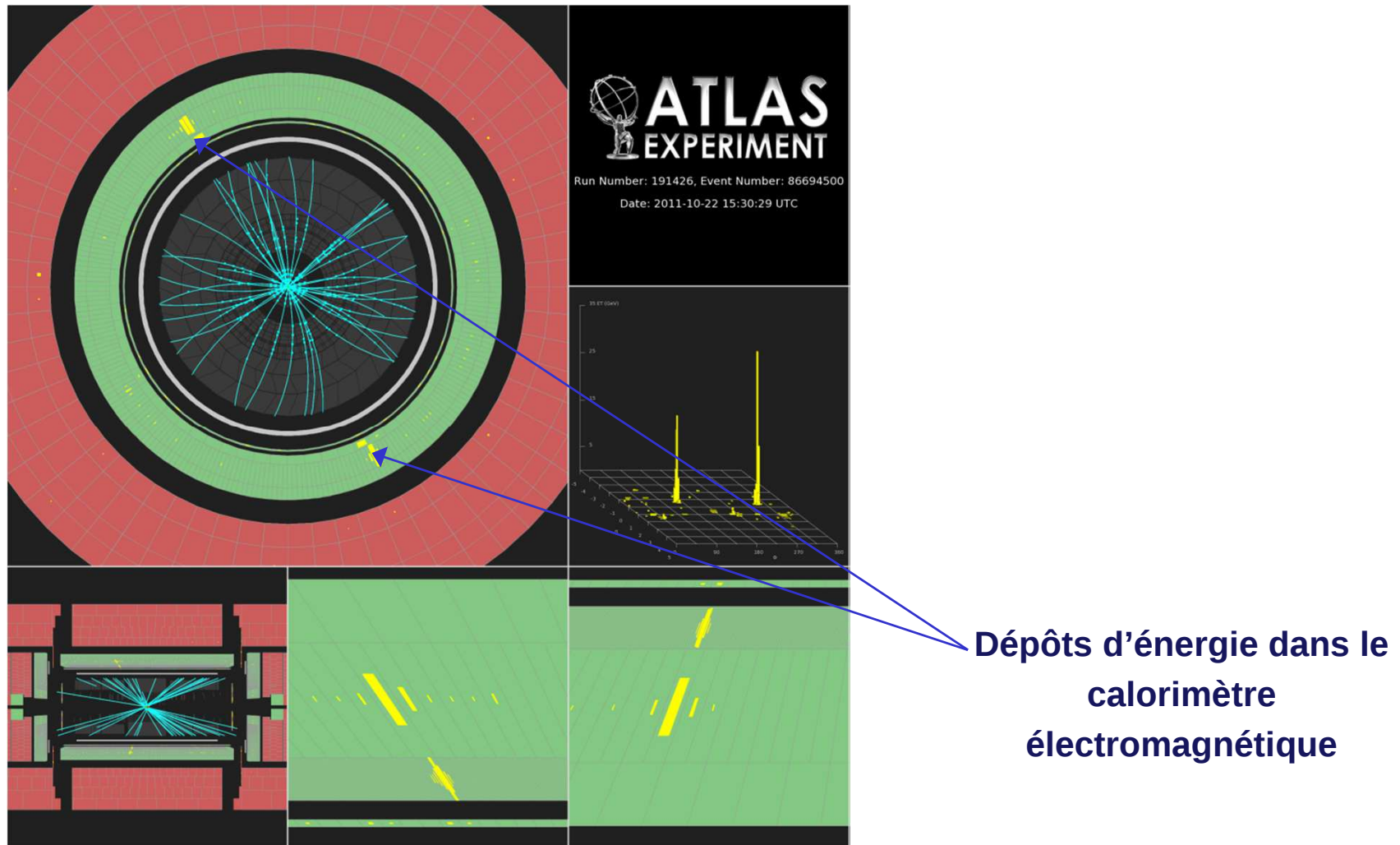
Rebranche

- Intervention acrobatique/téleguidée et couronne de succès pendant l'arrêt faisceau (02 juillet-10 juillet)

➔ **Le suivi constant du calorimètre essentiel au succès de l'expérience**

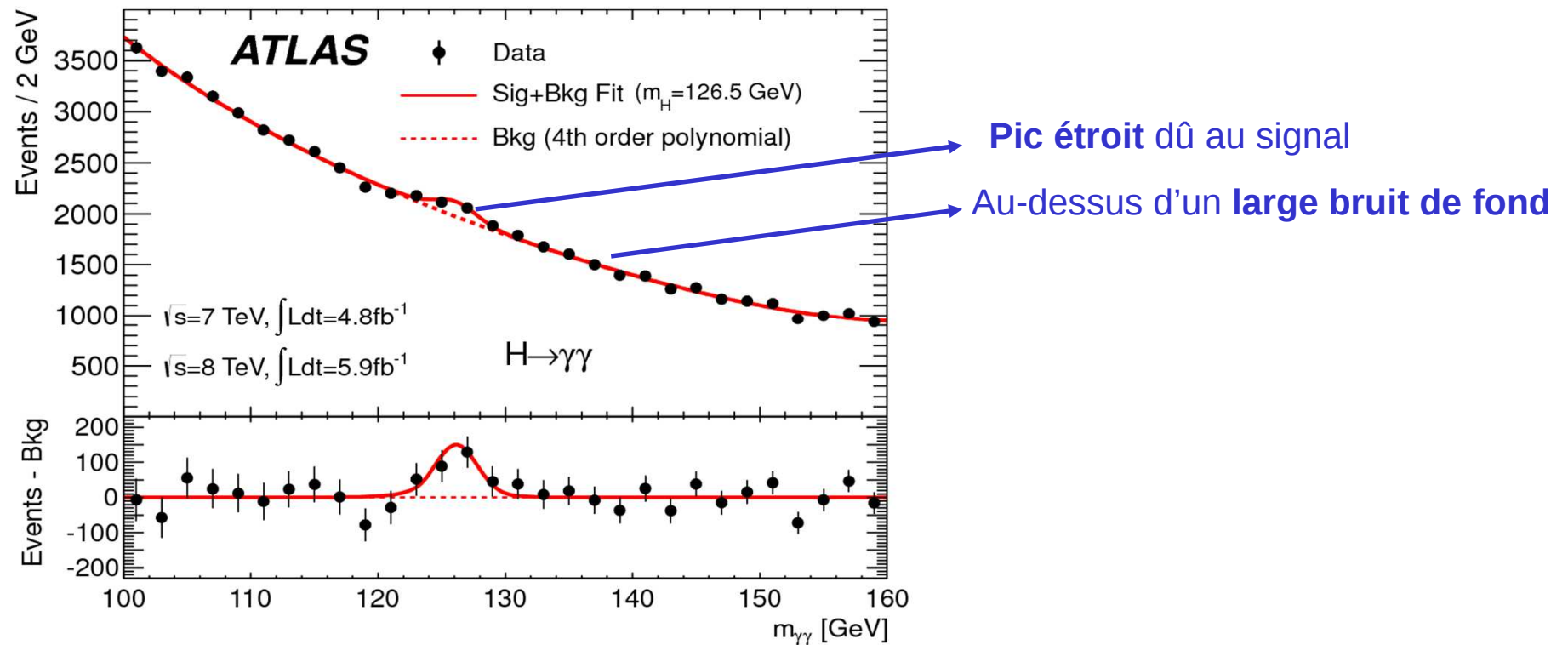
Le Calorimètre d'ATLAS (8)

Un candidat Higgs



Le Calorimètre d'ATLAS (9)

Masse des deux photons $\rightarrow$ Chercher le pic !



Il y a ~ 300 événements supplémentaires dans la région $m_{\gamma\gamma} \sim 125$ GeV

Recherche de Nouvelle Physique (Part IV: Aujourd'hui !)

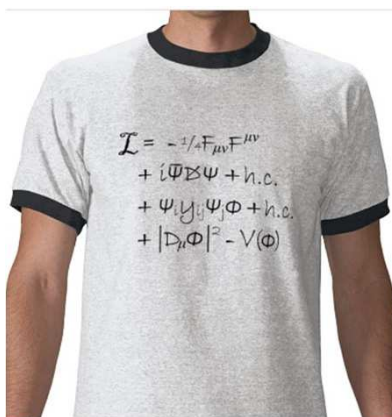
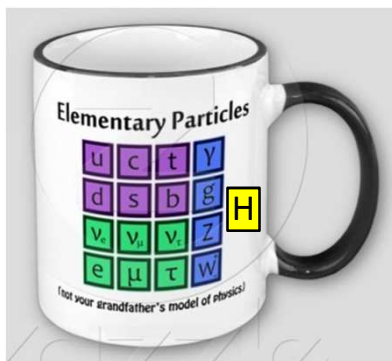


Epilogue ou début d'une nouvelle aventure ?



L'état de l'art (1)

Le Modèle Standard est complet !



Activité	Musique	Physique des Particules
Eléments	Notes* (12)	Particules de matière (12)
Type	b/#	Quark/Lepton
Caractéristiques	Fréquence Durée Intensité Timbre	Masse Durée de vie Taille Charge
Dynamique	Instruments (4)	Forces (4)
Types de dynamique	Vents (Souffler) Cordes (pincer) Percussions (taper) Chanter	Faible ElectroMagnétique Forte Gravitation
Constantes	La=440 Hz	$h = 4.1 \cdot 10^{-24} \text{ GeV.s}$ $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

* Echelle Chromatique (Gamme tempérée): $2^a \sim 3^b$, $a=19$, $b=12$ (7 octaves, 12 quintes, 12 demi-ton= $12\sqrt[12]{2}$ par octave)

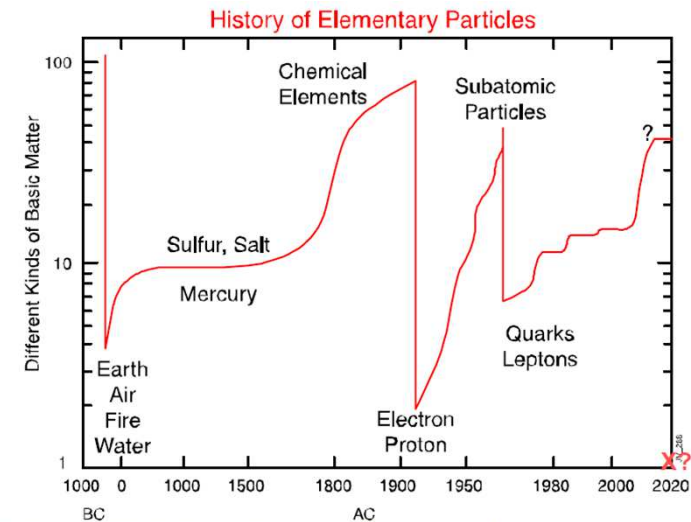
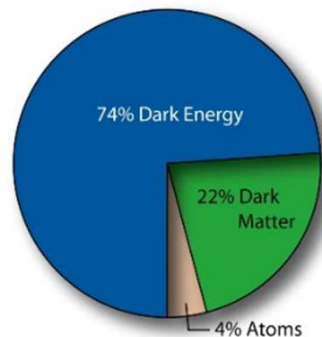
L'état de l'art (2)

Atouts du Modèle

- Très bonne description de toutes les données expérimentales jusqu'à 10^{-18} m

Beaucoup de questions en suspens

- Pourquoi 3 forces d'intensité différentes ?
- Pourquoi 12 particules de matière avec des masses si différentes ?
- Comment expliquer la matière noire ?
- Comment expliquer l'énergie noire ?
- Comment inclure la gravitation ?



Il doit y avoir une nouvelle physique (donc encore du boulot !)

Perspectives de Nouvelle Physique



Dimensions Supplémentaires/Nouvelle Interaction

- Sous-structure et/ou une dimensions supplémentaires a une grande échelle
 - Masse du Higgs stabilisée
- ➔ Nouvelles particules autour du TeV

Supersymétrie (SUSY)

- Nouvelle symétrie entre bosons et fermions qui suit la généralisation des symétries d'espace-temps
- Si $M(\text{SUSY}) \sim 0.1-1 \text{ TeV}$, Masse du Higgs stabilisée
 - ➔ Nouvelles particules autour du TeV
- + Force unifiée a $2 \cdot 10^{16} \text{ GeV}$, candidat Matière Noire, gravitation

Méthodes pour la Recherche de Nouvelle Physique

❑ Ingrédients

- Un accélérateur très performant ($\sqrt{s}=7$ TeV, $L_{\text{int}}=5000$ pb $^{-1}$)
- Un détecteur très performant
- Un modèle théorique incomplet

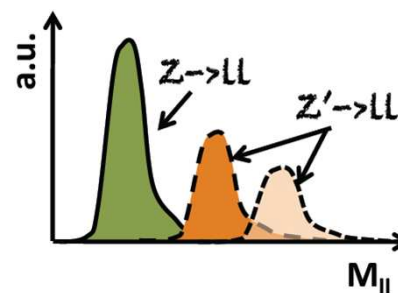
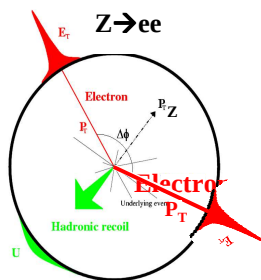


"This could be the discovery of the century.
Depending, of course, on how far down it goes"

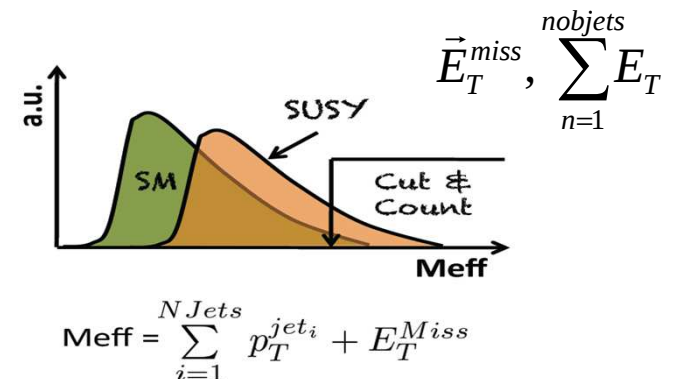
❑ Méthodologie pour une recherche directe (version simplifiée !)

- La masse invariante de 2 particules: résonance

$$M_Z = \sqrt{2(E_e E_{e^-} - \vec{p}_{e_1} \cdot \vec{p}_{e_2})}$$



- Excès dans une distribution

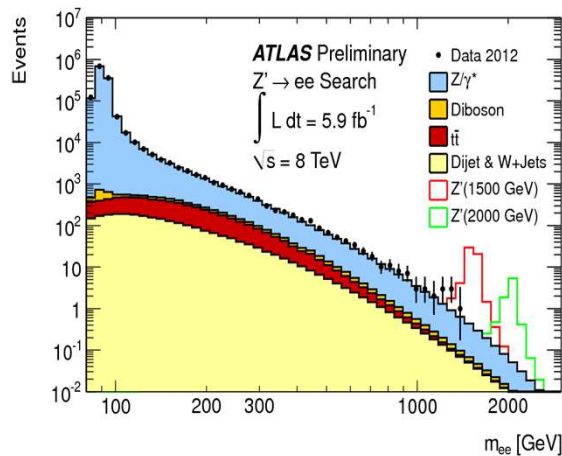


→ Compréhension du détecteur + bruit de fond du Modèle Standard !

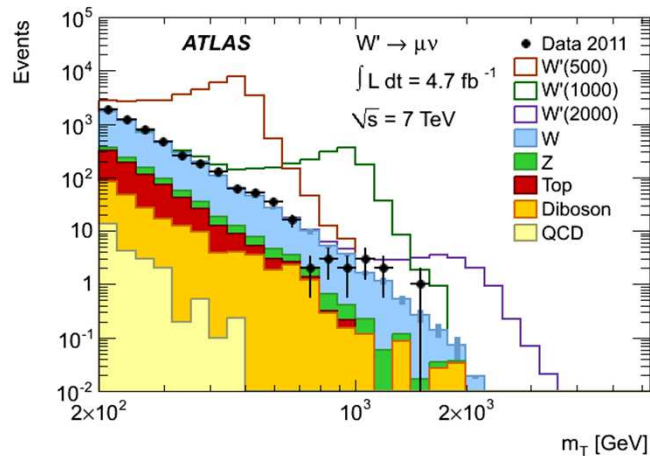
Quelques Résultats

❑ Recherche d'une nouvelle interaction (W' , Z'), ...

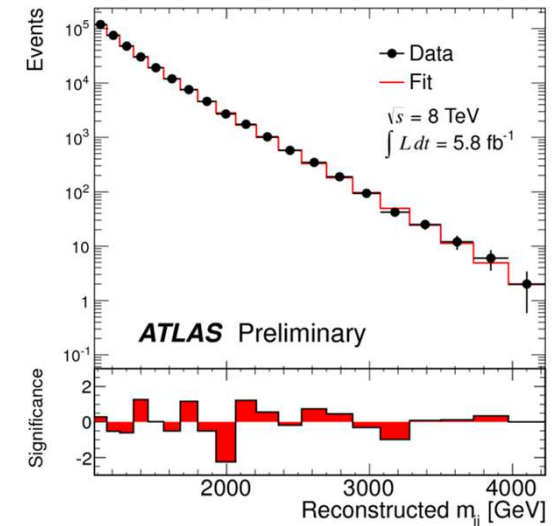
- Doit se manifester par la présence d'une particule massive (boson de jauge)
- Contraintes théoriques: aucune
- Contraintes expérimentales avant LHC (Tevatron): $M > 1$ TeV



$M(Z' \rightarrow ee, \mu\mu) > 2.5 \text{ TeV}$



$M(W' \rightarrow e\nu, \mu\nu) > 2.5 \text{ TeV}$

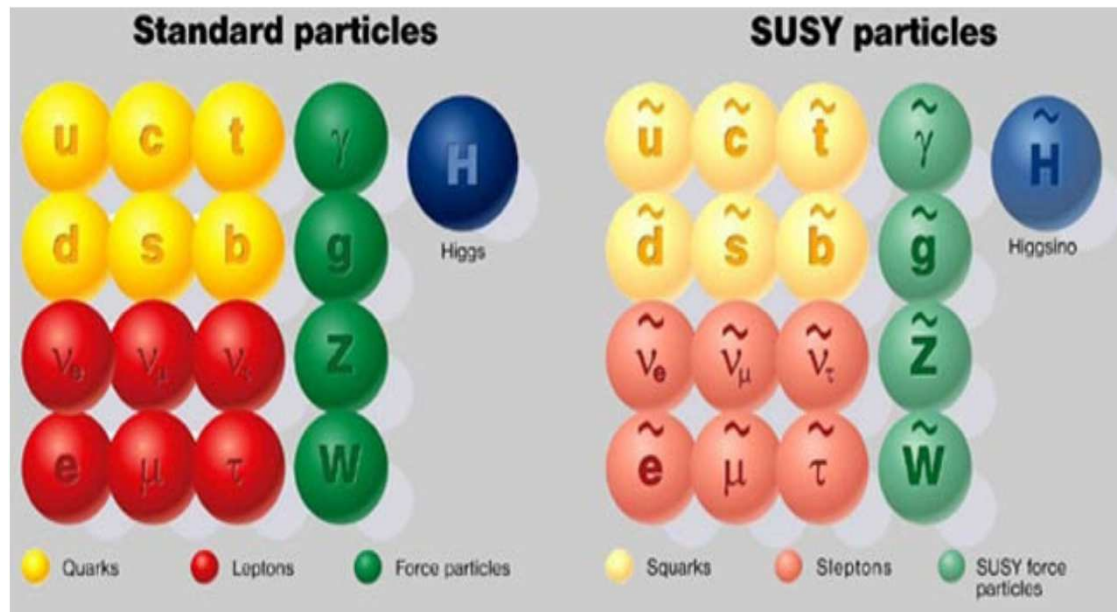


$M(X \rightarrow jj) > 3.7 \text{ TeV}$

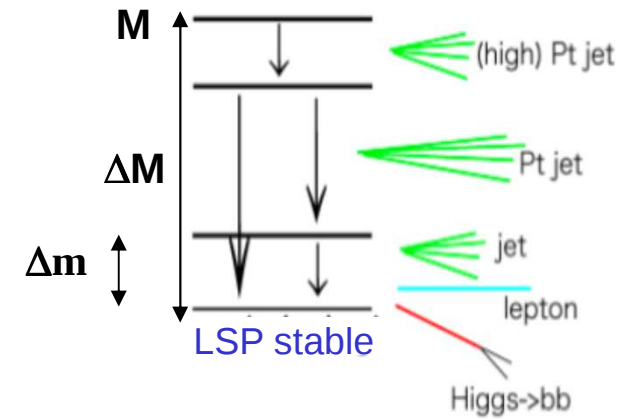
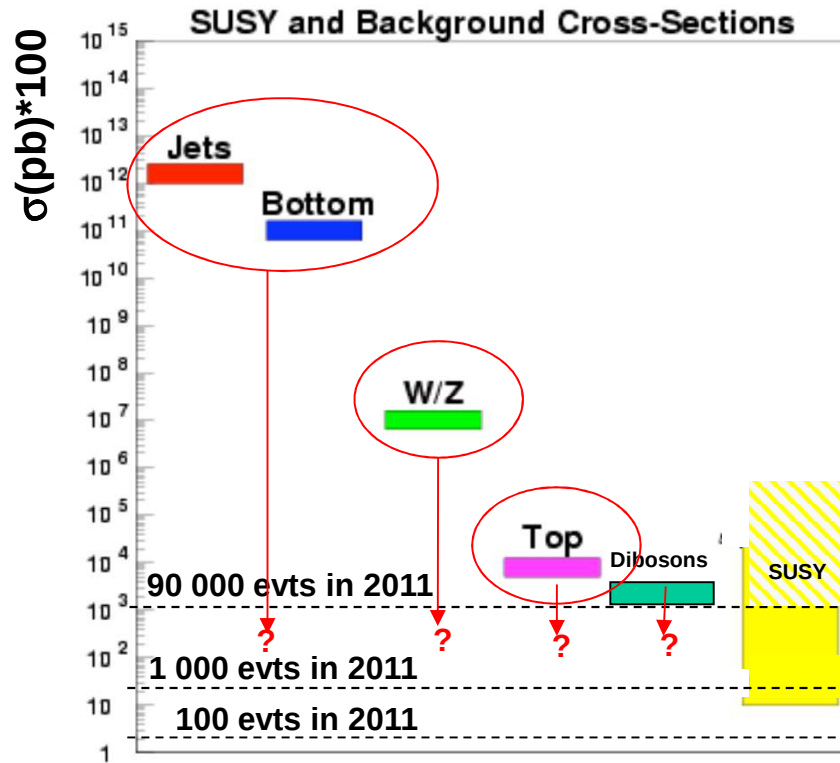
La supersymétrie SUSY (1)

□ Supersymétrie: réponses aux principaux problèmes du Modèle Standard

- Extension naturelle du Modèle Standard (Bosons $\leftrightarrow$ Fermions)
 - ✓ Chaque particule du Modèle Standard a un double
- Unification des trois forces à la masse de Planck ($\sim 10^{16}$ GeV)
- Une particule pour expliquer la matière noire (LSP stable)
- Inclusion de la gravité !
- Contraintes théoriques, expérimentales: faibles



La supersymétrie SUSY (2)



Excluded by LHC 2010

$m(g,q) \sim 500 \text{ GeV}$, $m(t_1) \sim 200 \text{ GeV}$, $m(\chi_{1,2}) \sim 60 \text{ GeV}$

Discoverable

$m(g,q) \sim 850 \text{ GeV}$, $m(t_1) \sim 400 \text{ GeV}$, $m(\chi_{1,2}) \sim 200 \text{ GeV}$

Hard

$m(g,q) \sim 1300 \text{ GeV}$, $m(t_1) \sim 600 \text{ GeV}$, $m(\chi_{1,2}) \sim 350 \text{ GeV}$

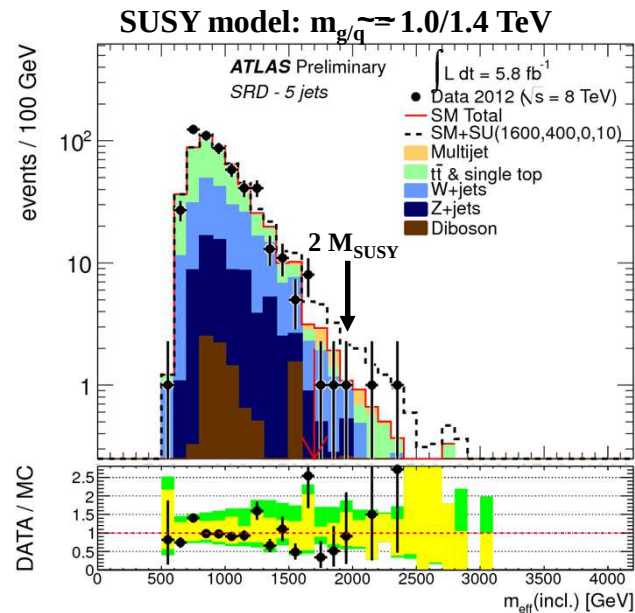
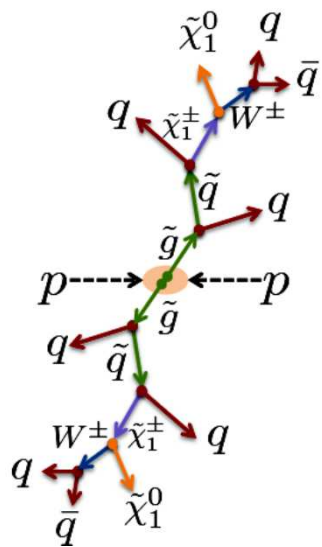
Too Hard

Quelques Résultats (1)

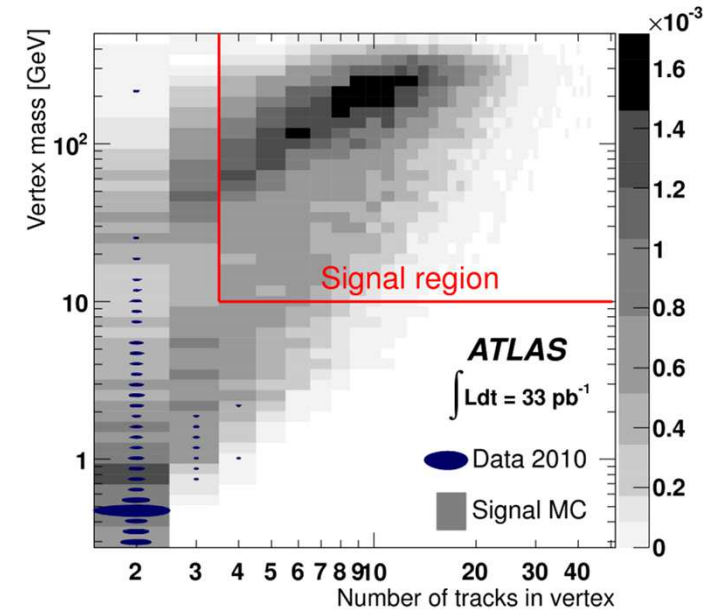
Recherche de la supersymétrie

- Spécificités très fortes pour les différents canaux: topologie, bruit de fond, ...

$M \sim 1 \text{ TeV}$, $\Delta M \sim 800 \text{ GeV}$



Faible Δm ou pas de LSP stable

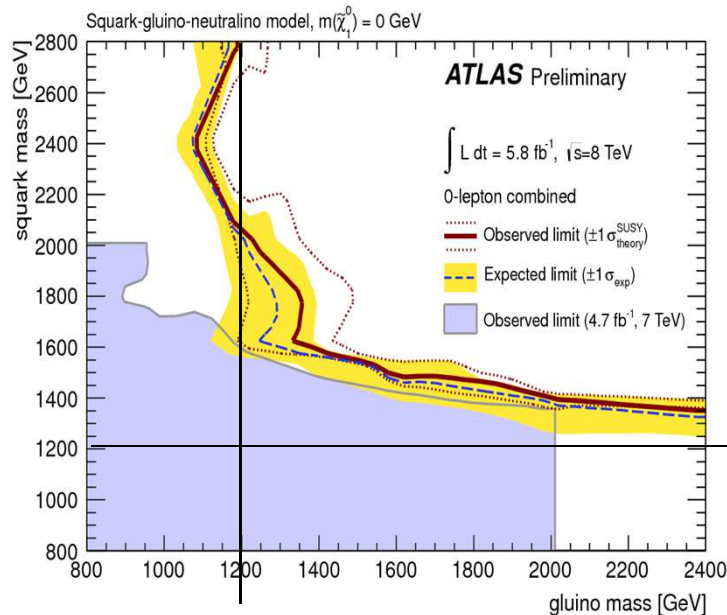


Quelques Résultats (2)

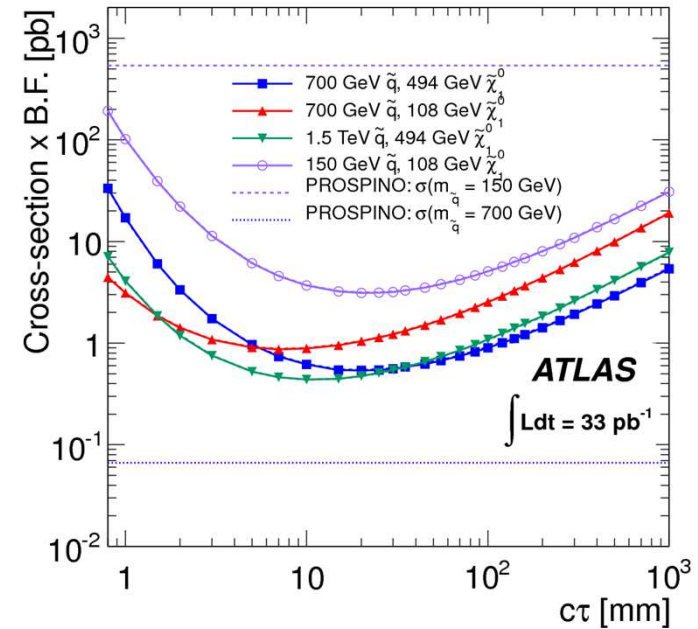
Recherche de la supersymétrie

- Spécificités très fortes pour les différents canaux: topologie, bruit de fond, ...

$M > \sim 1200$ GeV, $\Delta M < \sim 900$ GeV



Faible Δm ou pas de LSP stable



→ $M > 1 \text{ TeV}$ a grand ΔM

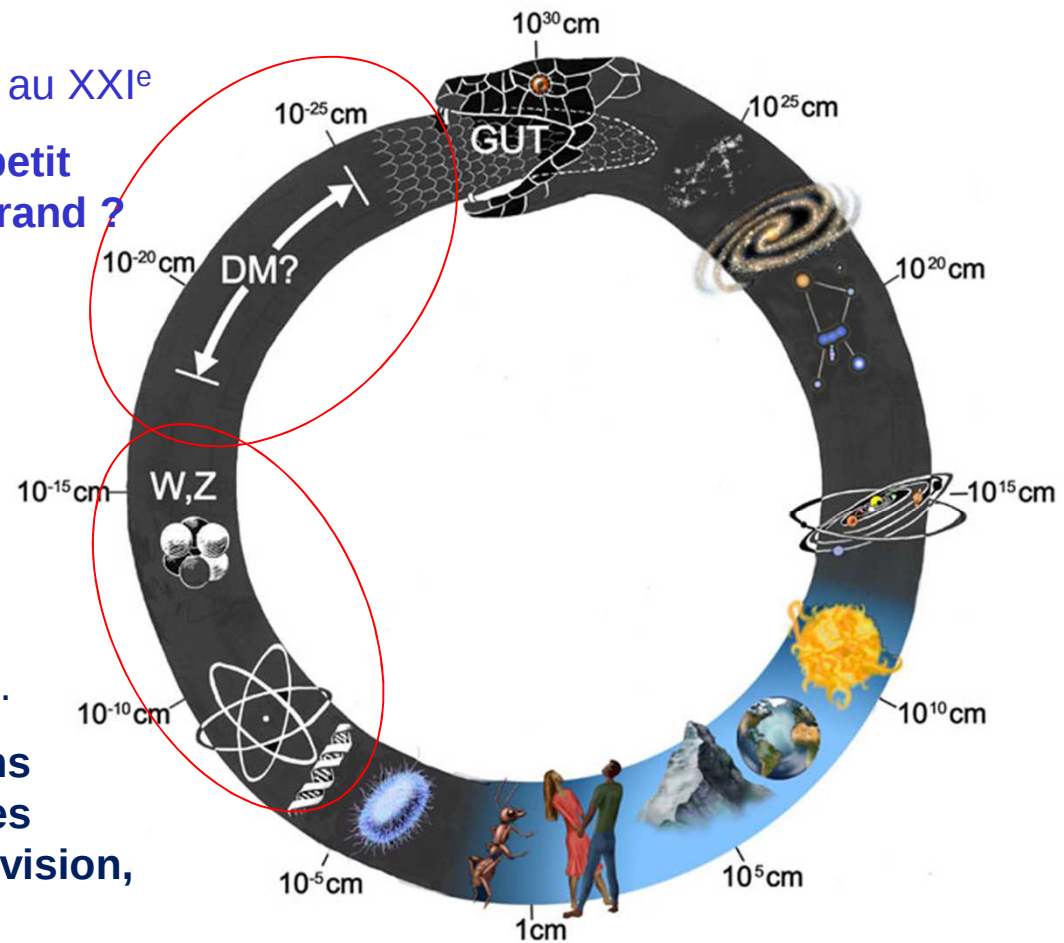
Epilogue

La recherche de nouvelle physique au XXI^e

Et si chercher dans l'infiniment petit
c'était comprendre l'infiniment grand ?

La nouvelle physique du XX^e siècle.

Et aujourd'hui plein d'applications
pratiques (Transistors, téléphones
mobiles, ordinateurs, lasers, télévision,
GPS, ...)



The Cosmic Uroboros

© 2006 Abrams and Primack, Inc.

Bibliographie

❑ **Bibliographie:** <http://cern.ch/pralavop/phd.html>

❑ **Lecture:**

- JP Luminet, «*Le destin de l'univers : Trous noirs et énergie sombre*»
- T. Xuan Thuan «*Le chaos et l'harmonie* »
- M. Kumar «*Le grand roman de la Physique quantique* »
- S Hawking «*Les 3 premières minutes de l'Univers* »
- H. Reeves «*Petite Histoire de l'Univers et de la matière* »