



# Un Accélérateur pour le XXI<sup>ème</sup> siècle



Alessandro Variola & Roman Pöschl



0) Introduction

1) Questions fondamentales

2) L'Accélérateur ILC

3) Expérimentation à l'ILC  
les détecteurs

Résonances LAL Novembre 2007

# Introduction

- L'ILC est considéré comme le prochain projet mondial pour la physique des particules
- 2500 physiciens et ingénieurs dans trois continents l'Asie, l'Amérique du Nord et l'Europe travaillent pour sa réalisation
- Nous parlerons d'une machine d'environ 40 km de longueur
- Sa réalisation est indispensable pour répondre aux questions fondamentales que nous nous posons sur la nature

Merci de nous suivre dans cette aventure

# Chapitre 1

## Questions fondamentales

Bibliographie : M Peskin – Dark Matter and Particle Physics XiV0707.1536  
G. Rolandi – Experimental Summary Moriond 2007 – Acte de la conference  
P. Wienemann – Cours donné à l'Ecole d'été ILC Pékin 2005  
D. Wegener - “Moderne Physik”, Skriptum de l' Université de Dortmund

# Unités et échelles

1 eV = Énergie acquise par une particule chargée après le passage d'une différence de tension électrique de un Volt

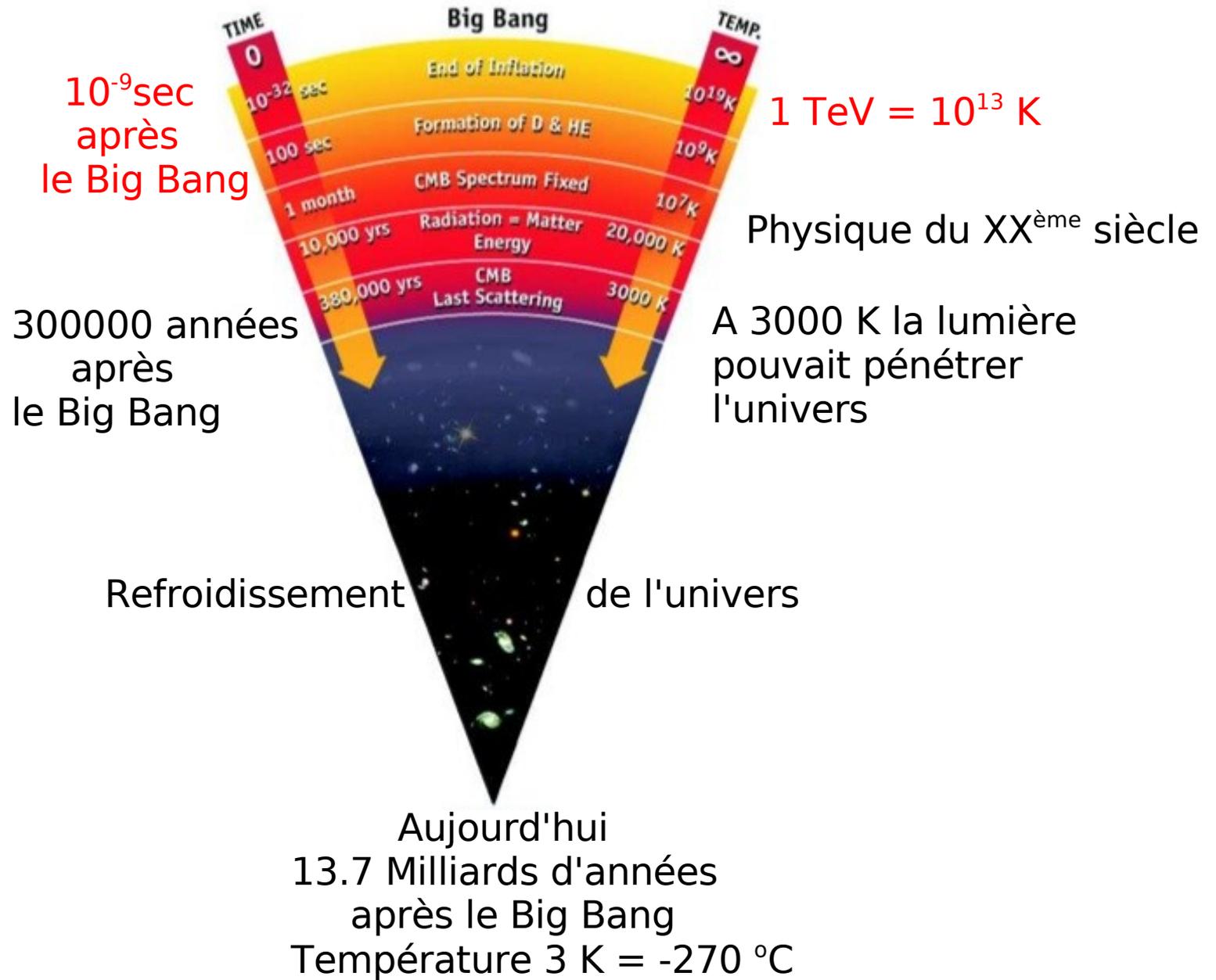
1 eV correspond a une température de  $\sim 10000$  K (= 9727 °C)

C'est, environ, la température de la surface du soleil

Aujourd'hui nous parlerons d'une machine qui va créer des particules jusqu'à

$$1\ 000\ 000\ 000\ 000\ \text{eV} = 10^{12}\ \text{eV} = 1\ \text{TeV}$$

# L'histoire de l'univers

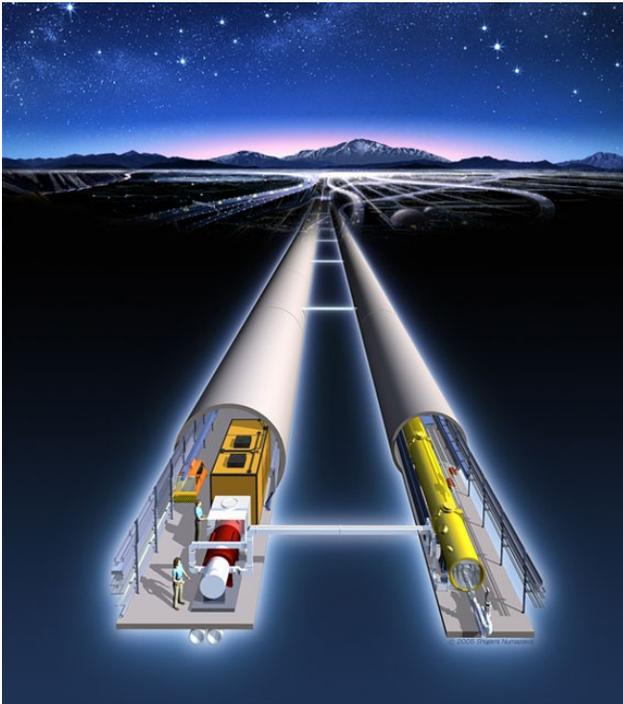


# Accélérateurs de particules - Pourquoi ?



- Télescopes et dispositifs de l'Astrophysique ne font qu' observer

Les résultats peuvent donner une idée et poser des questions

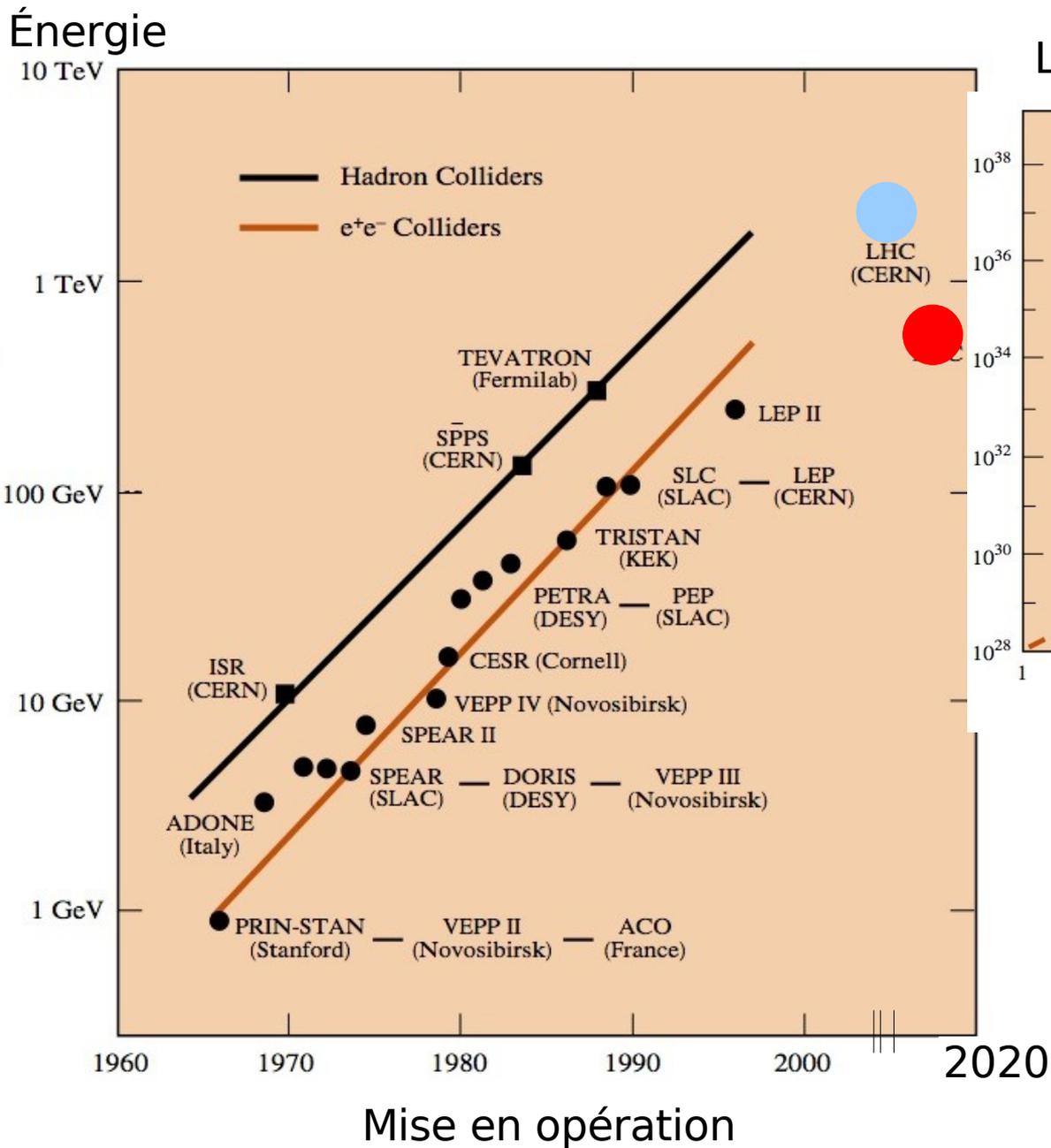


- Les Accélérateurs permettent de faire des observations sous des conditions

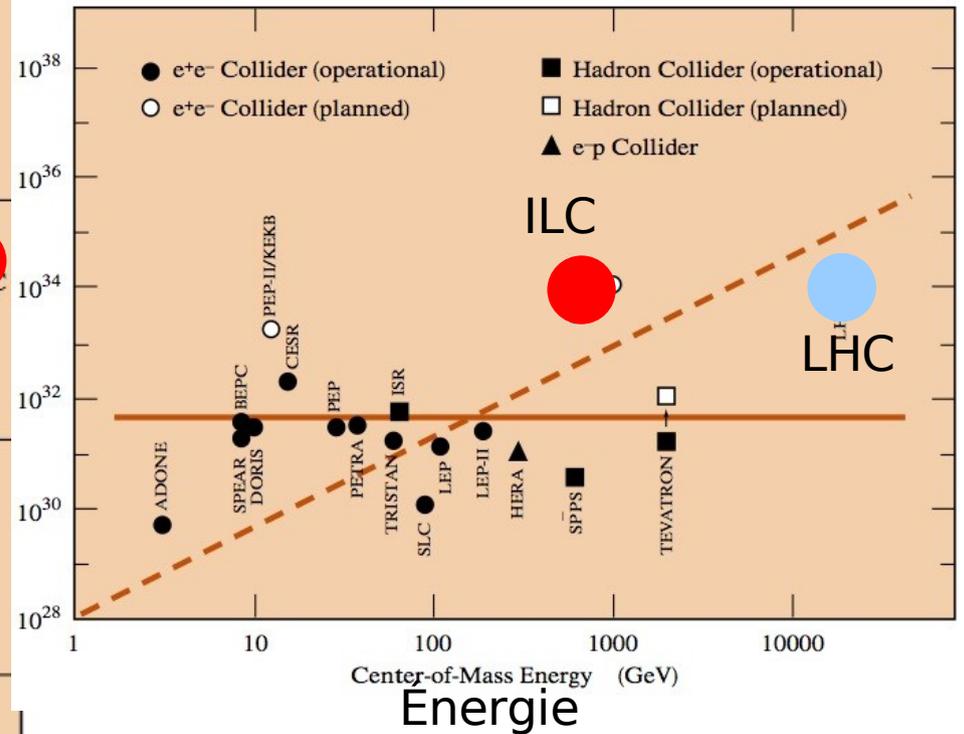
**Bien contrôlées**

Leurs résultats répondent aux questions

# Les Accélérateurs d'hier, d'aujourd'hui et de demain



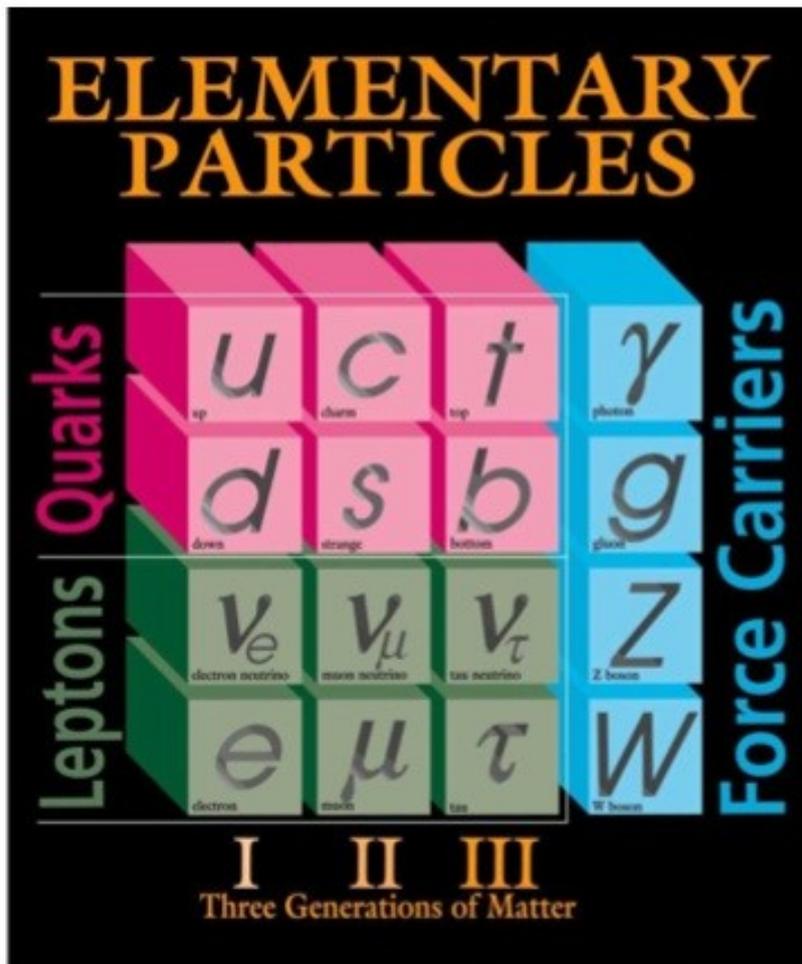
## Luminosité (Puissance)



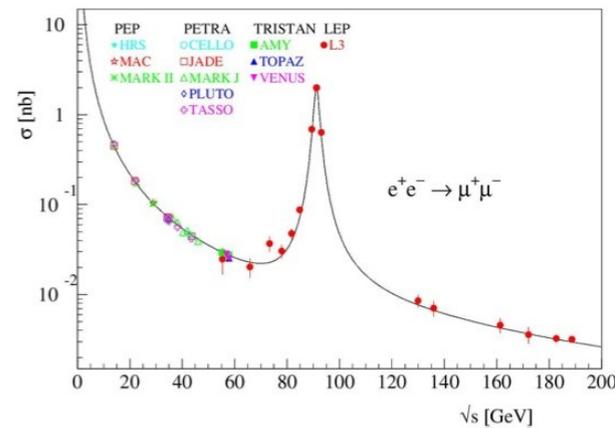
# À quoi nous ont menés les accélérateurs ?

## Standard Model of Particle Physics – Le Modèle Standard de la Physique des Particules

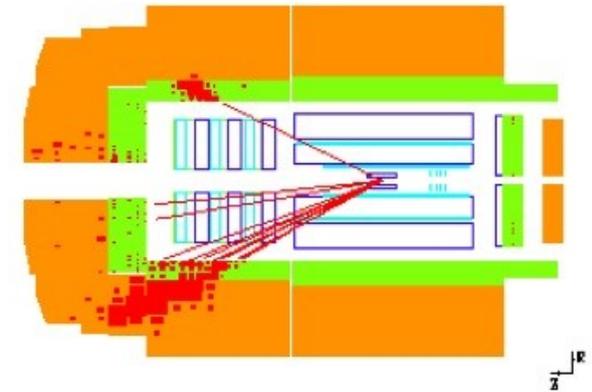
- **Tout** ce qui se passe dans la nature peut être réduit à l'existence de 12 particules '**Lepton and Quarks**' et quatre interactions transportées par des porteurs de force - '**Force Carriers**'



$e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \mu^+\mu^-$  à LEP



Diffusion e quark à HERA



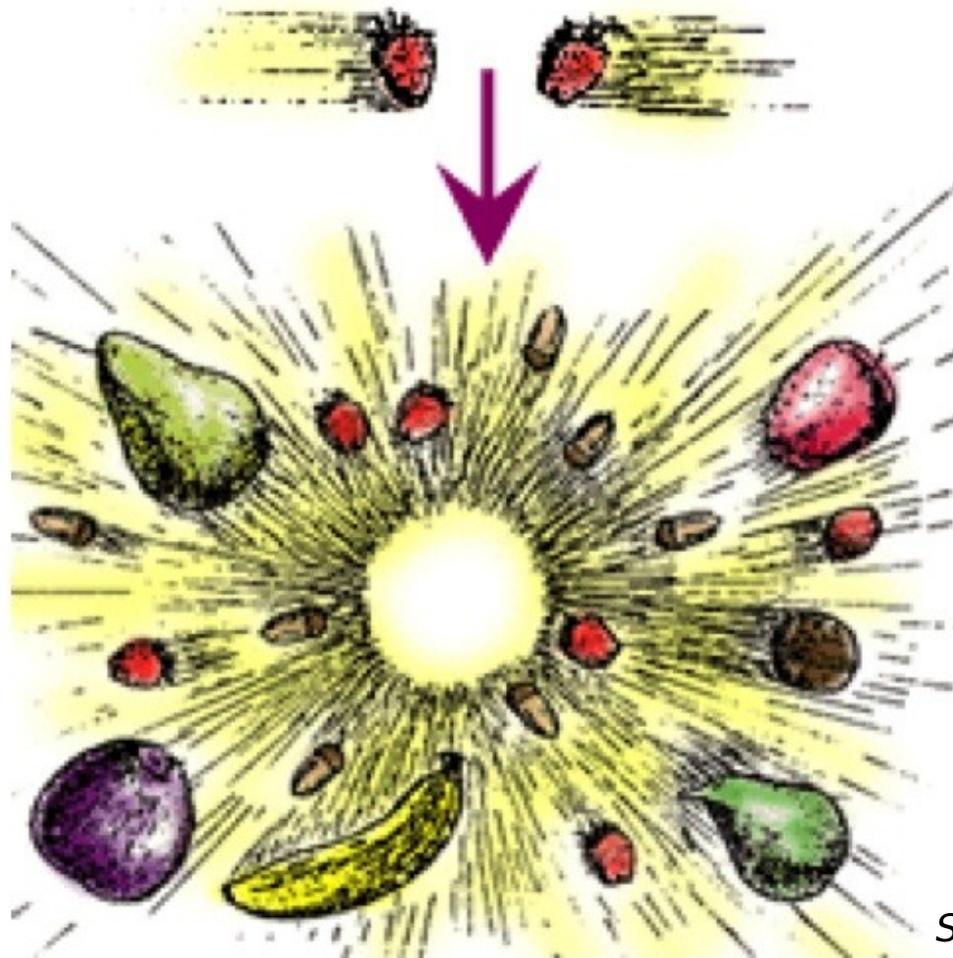
- Nous et tout ce qui nous entoure, est composé par les éléments de la génération I

Les autres générations sont des particules postulées et observées dans les accélérateurs du 20<sup>ème</sup> siècle

# Collisions entre particules

Particules chargées sont accélérées aux hautes énergies (voir chapitre d'Alessandro)

Leur énergie est convertie dans des particules secondaires



*S. McGill*

A l'ILC nous ferons collisionner électrons et leurs anti-particules, les positrons  
L'énergie disponible pour ces collisions sera de 0.2 – 1 TeV

# De l'Énergie à la masse

$$E = mc^2$$

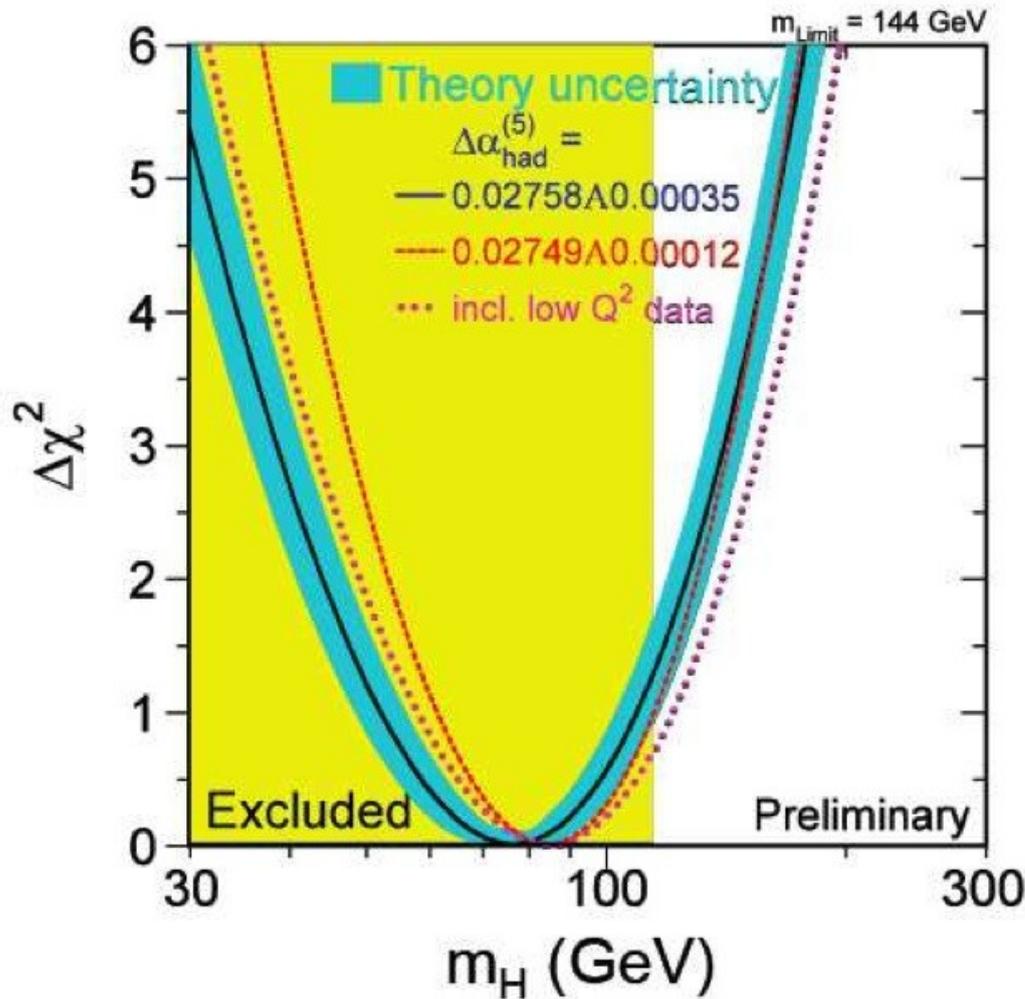
Énergie dans  
les collisions

Disponible pour  
la création des  
particules massive

# Mais ... D'où vient la masse des particules (et la nôtre) ?

Le Modèle Standard postule l'existence d'une autre particule

## Le Boson de Higgs

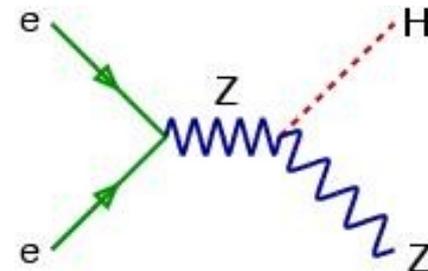


Synthèse des toutes expériences

- Nécessaire afin que les particules obtiennent leurs masse
- Jamais observée dans une expérience

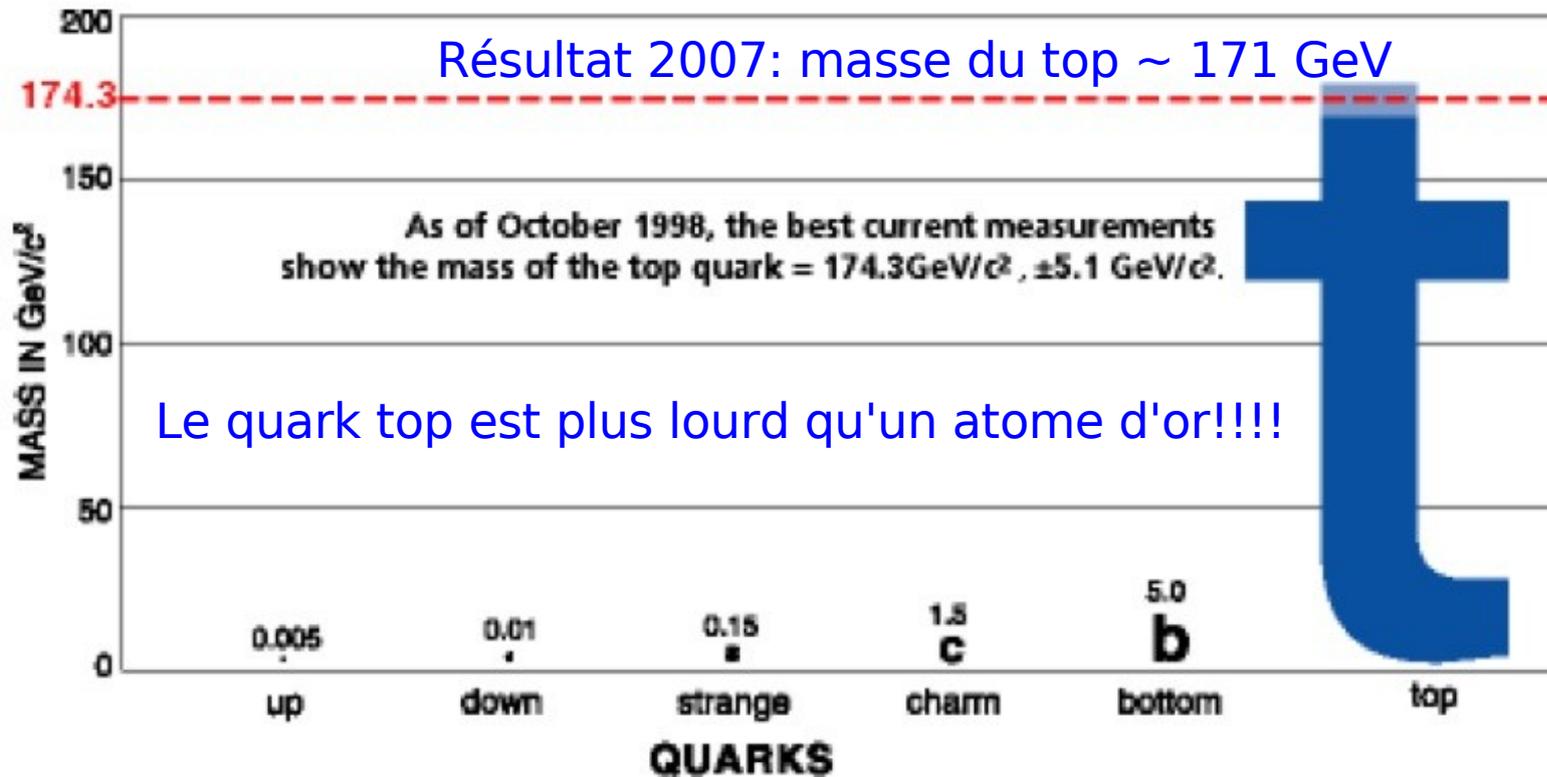
Mais tiens, la particule doit avoir une masse d'environ 100 GeV = 0.1 TeV

Bien accessible à l'ILC



# Un autre mystère – La “hiérarchie” des masses

## Les quarks - les frères inégaux



Il y a des théories avec des dimensions supplémentaires qui peuvent expliquer cette hiérarchie des masses

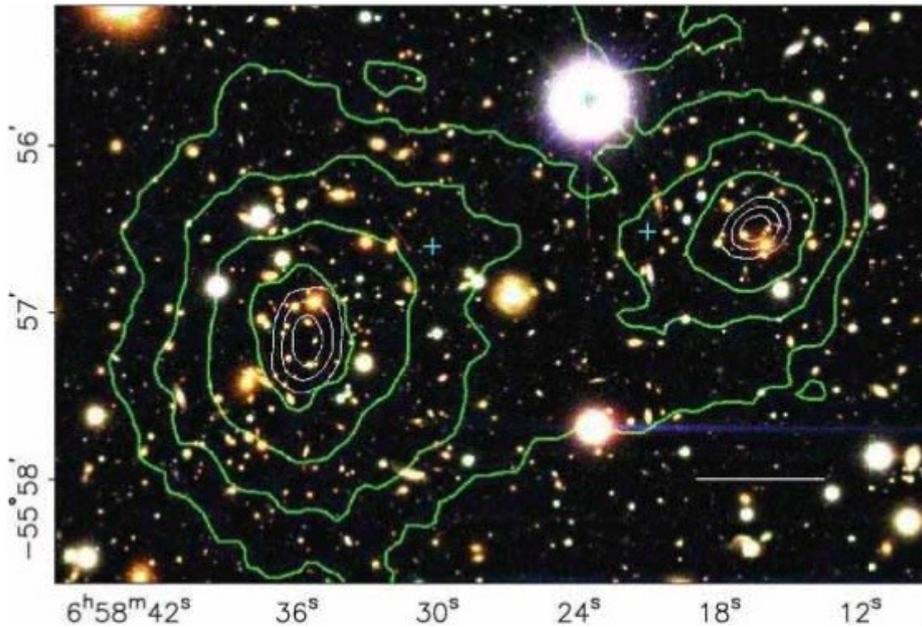
Tiens une autre particule mystérieuse qui sera

**Bien accessible avec l'ILC**

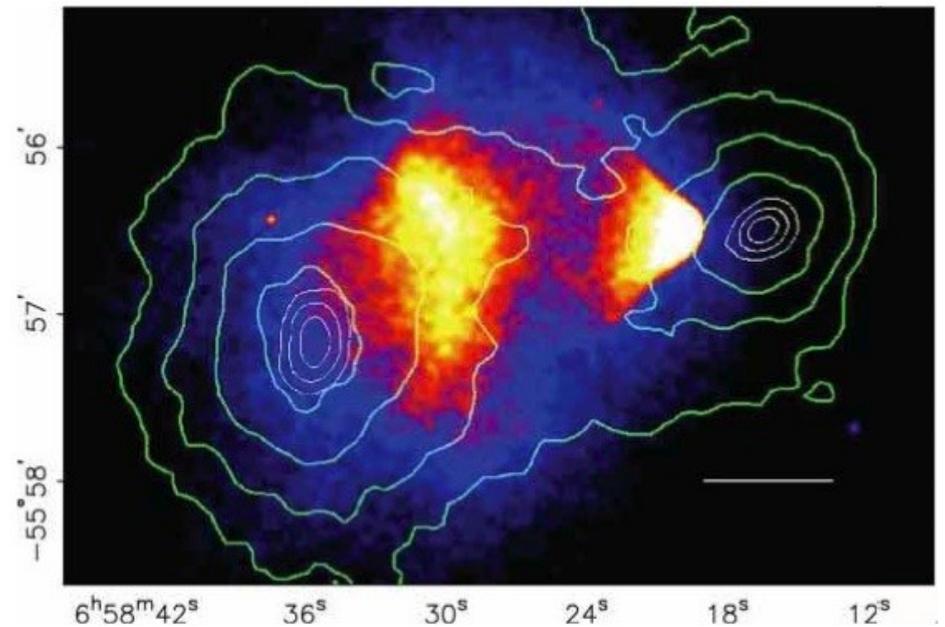
# Du ciel à la terre – Questions cosmologiques

## Amas des galaxies 1E0657 - 558

Vue par Hubble  
Lumière visible



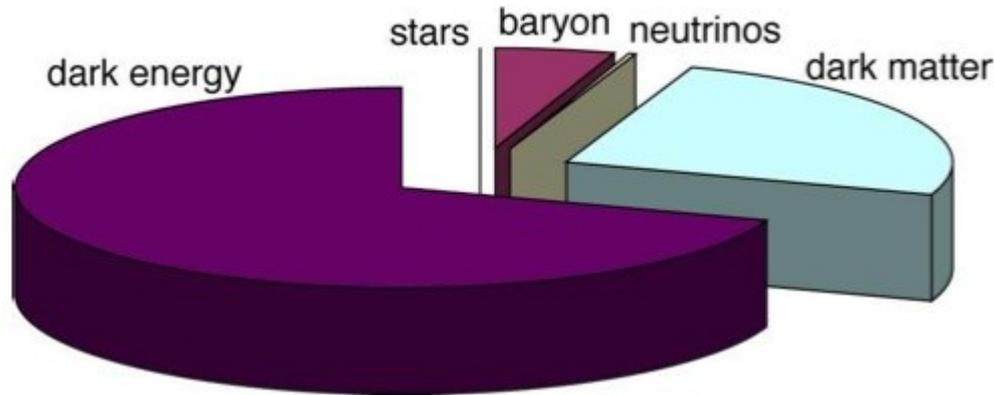
Vue par Chandrasekhar  
Lumière X-Ray



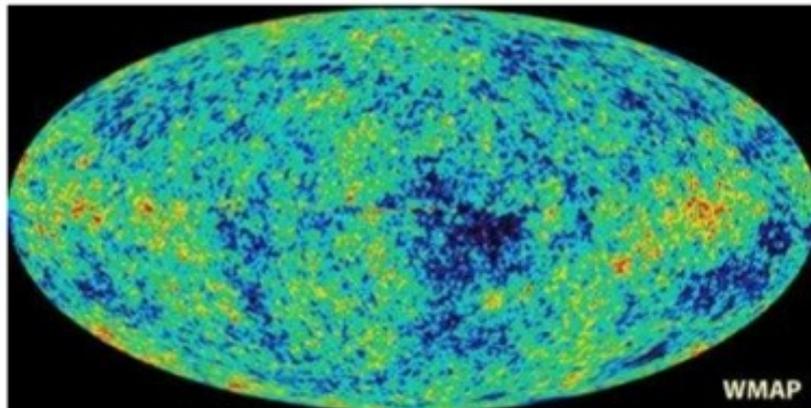
Concentration de masses. Déplacement des concentrations de la matière connue

**Il y a de la Matière Noire dans l'univers!!!!**

# Le gâteau de l'univers – La distribution de l'énergie



- 5% Matière connue en SM
- 25% Matière Noire
- Énergie Noire



WMAP:

Mesures précises des fluctuations dans le "Cosmic Microwave Background"

**Le Modèle Standard ne contient aucune explication pour la Matière Noire**  
(ni pour l'Énergie Noire, mais c'est une autre histoire...)

## WIMPs – Les Candidats pour la Matière Noire

On cherche une particule qui, à la fois,

Interagit faiblement - “Weakly Interacting”  
et est (très) massive - “Massive Particle”

L'équation qui lie la densité de la Matière Noire et la masse des WIMPs

$$\Omega_{DM} = \frac{s_0}{\rho_{tot}} \left( \frac{\pi}{45g_*} \right)^{1/2} \frac{k_B T_f / mc^2}{m_{Pl} / \hbar^2 \cdot \langle \sigma v \rangle}$$

Il y a une forte évidence pour

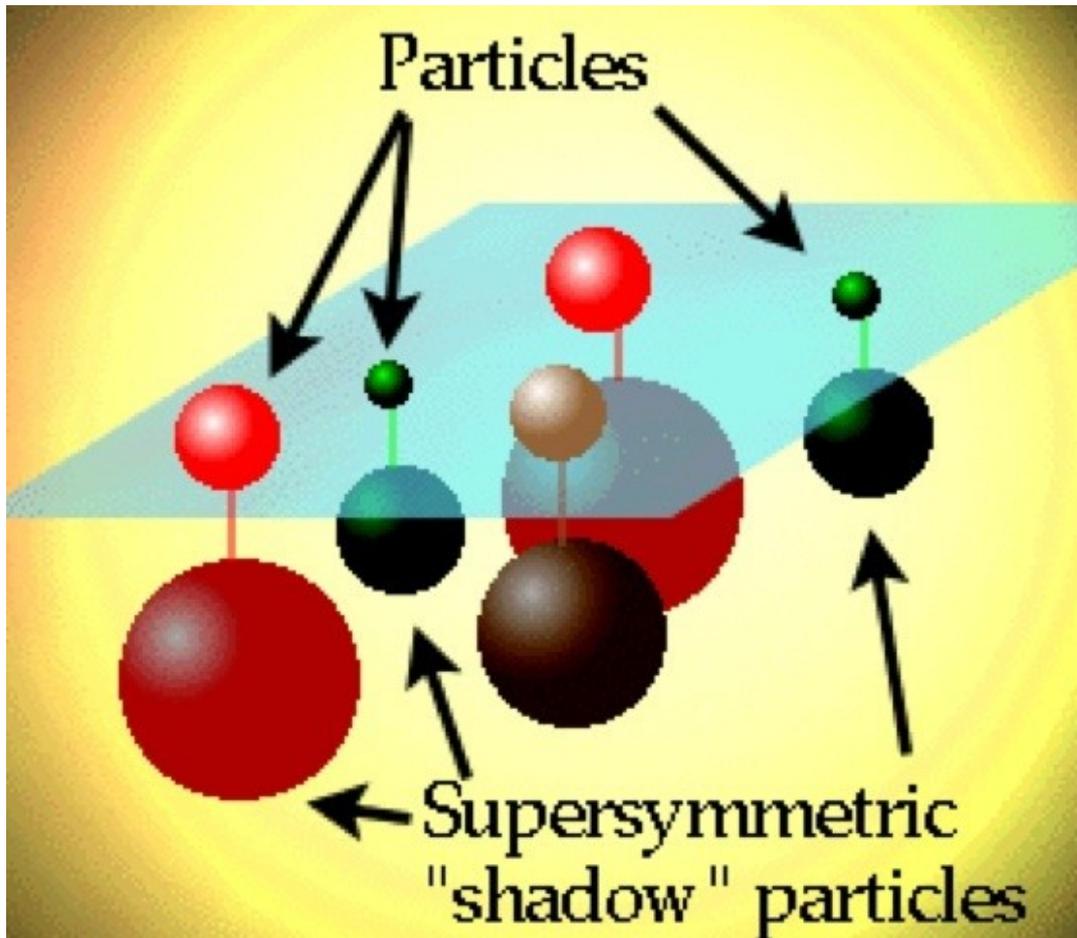
$$m \sim 100 \text{ GeV}$$

C'est une particule qui peut expliquer les observations en astrophysique

**Bien accessible par l'ILC**

# Supersymétrie

Le WIMP est la particule plus légère de tout un spectre de nouvelles particules



Chaque particule du Modèle Standard possède un partenaire supersymétrique

(avec une différence de Spin de  $\frac{1}{2}$ )

Le partenaire du photon est le WIMP

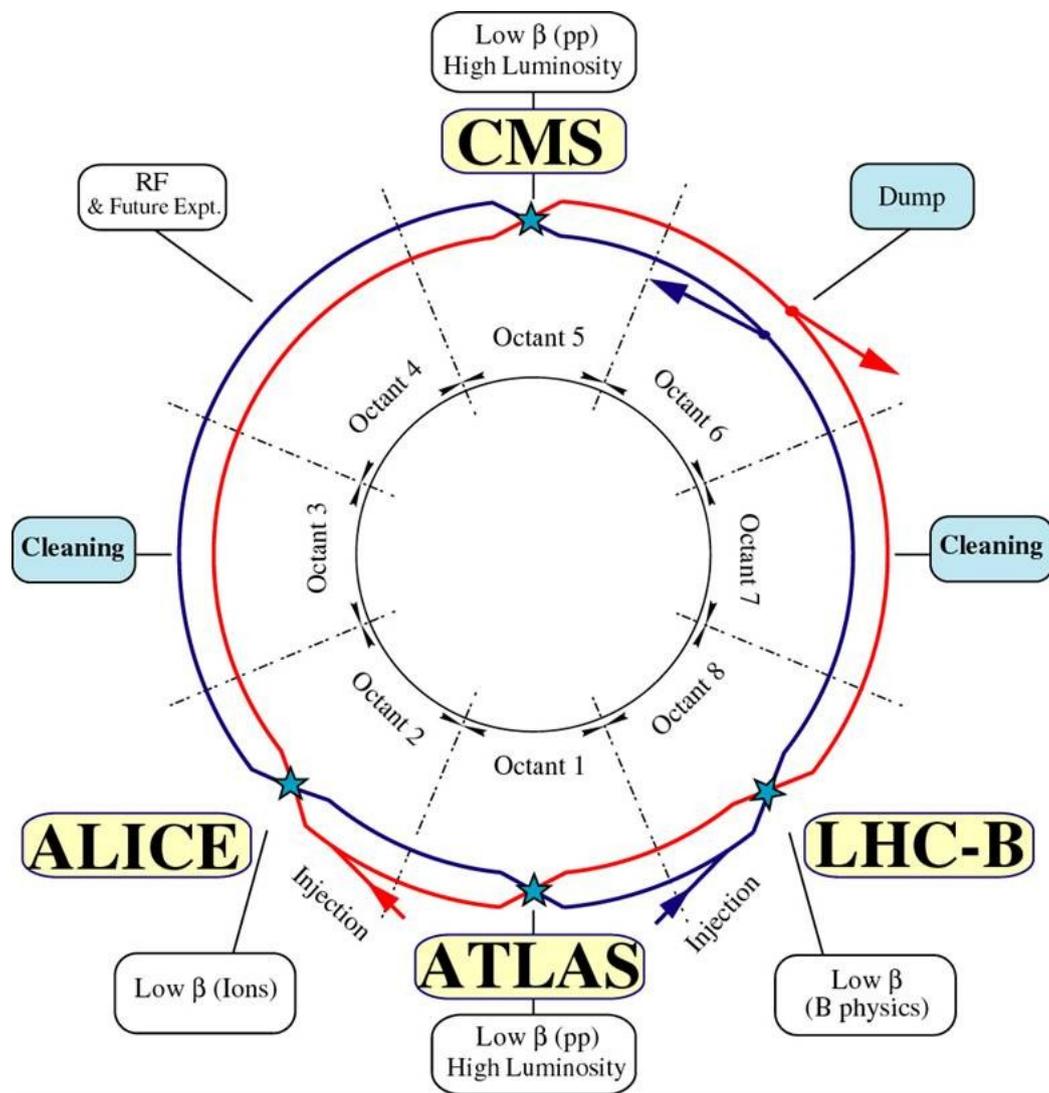
Remarque importante:

La supersymétrie est (peut-être) aussi la clé pour comprendre la gravitation

Si la supersymétrie existe, l'ILC sera capable de la tester avec beaucoup de précisions.

Après sa découverte au LHC (?)

# Un bref coup d'oeil au CERN – Le LHC



Collisions entre proton-protons  
at  $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$

Découvertes (?) du Higgs  
et des WIMPS (Supersymétrie)

Nouvelle physique à l'échelle  
de 1-10 TeV

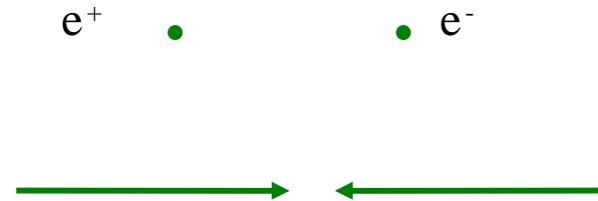
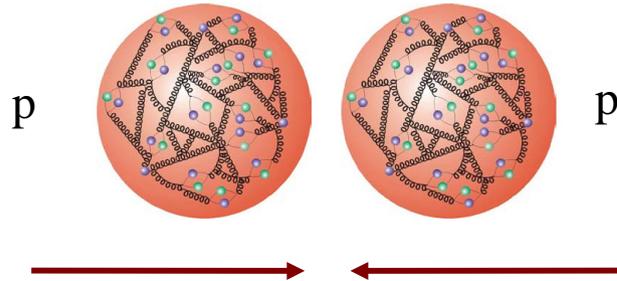
Mise en Opération en 2008

Ouverture de la fenêtre et  
préparation pour des mesures  
plus fines avec l'ILC

# ILC Pourquoi?

**Note:** Il sera mis en route après les premières découvertes importantes du LHC.

Pourquoi l'ILC est quand même indispensable?



## Proton:

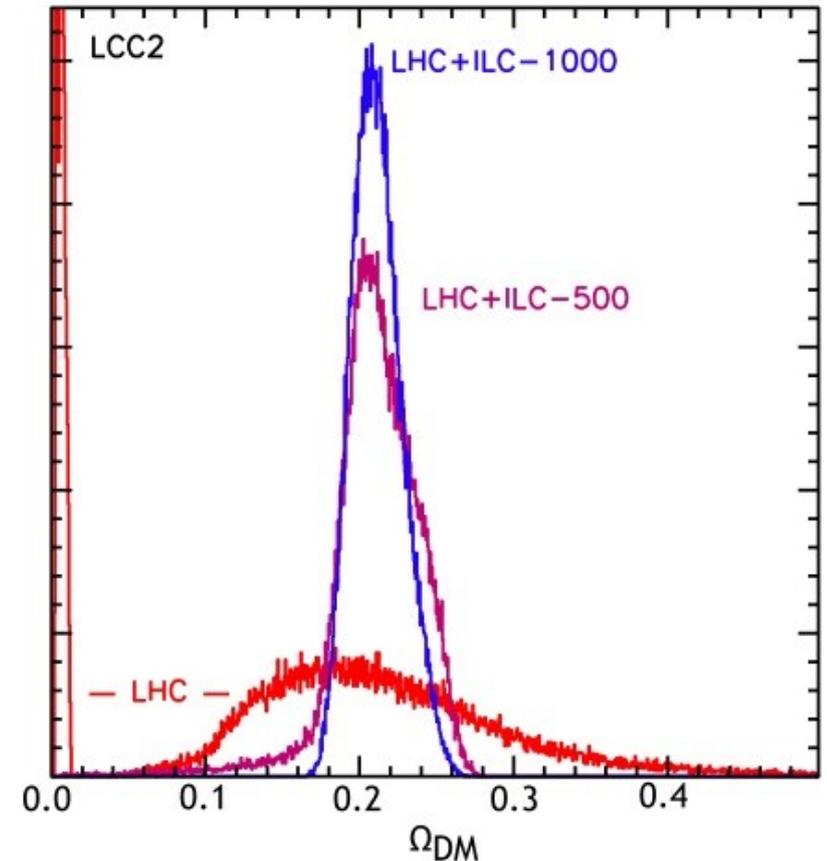
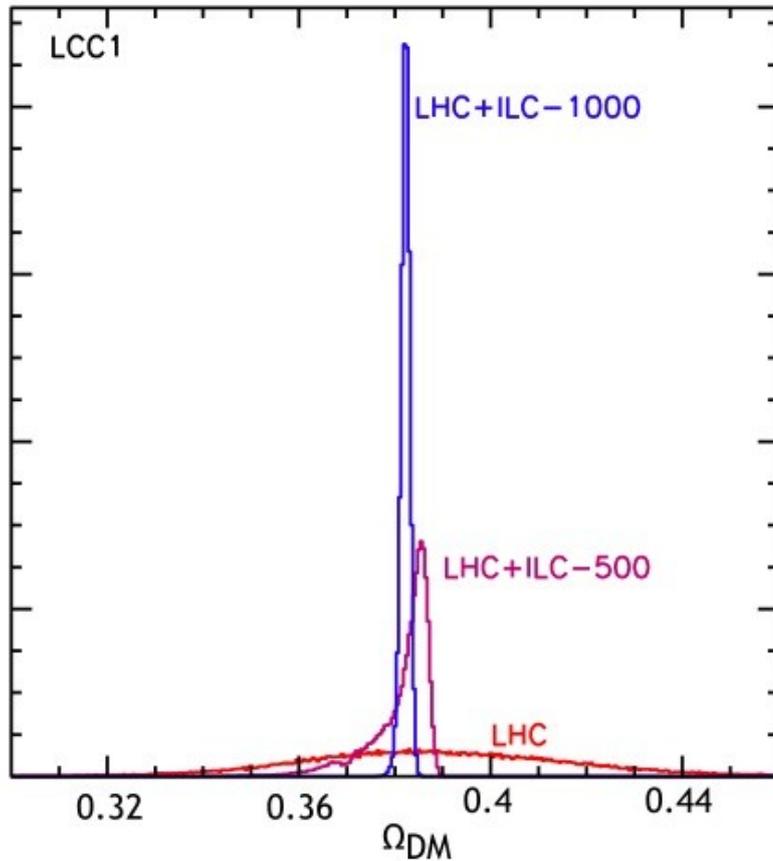
- Particule composée (hadron)
- Énergie des particules initiales inconnue
- Collisions parasites
- Interaction forte
- Bruit de fond importante

## Électron:

- Particule non-composée
- Énergie des particules initiales bien connue
- Énergie des particules bien ajustable

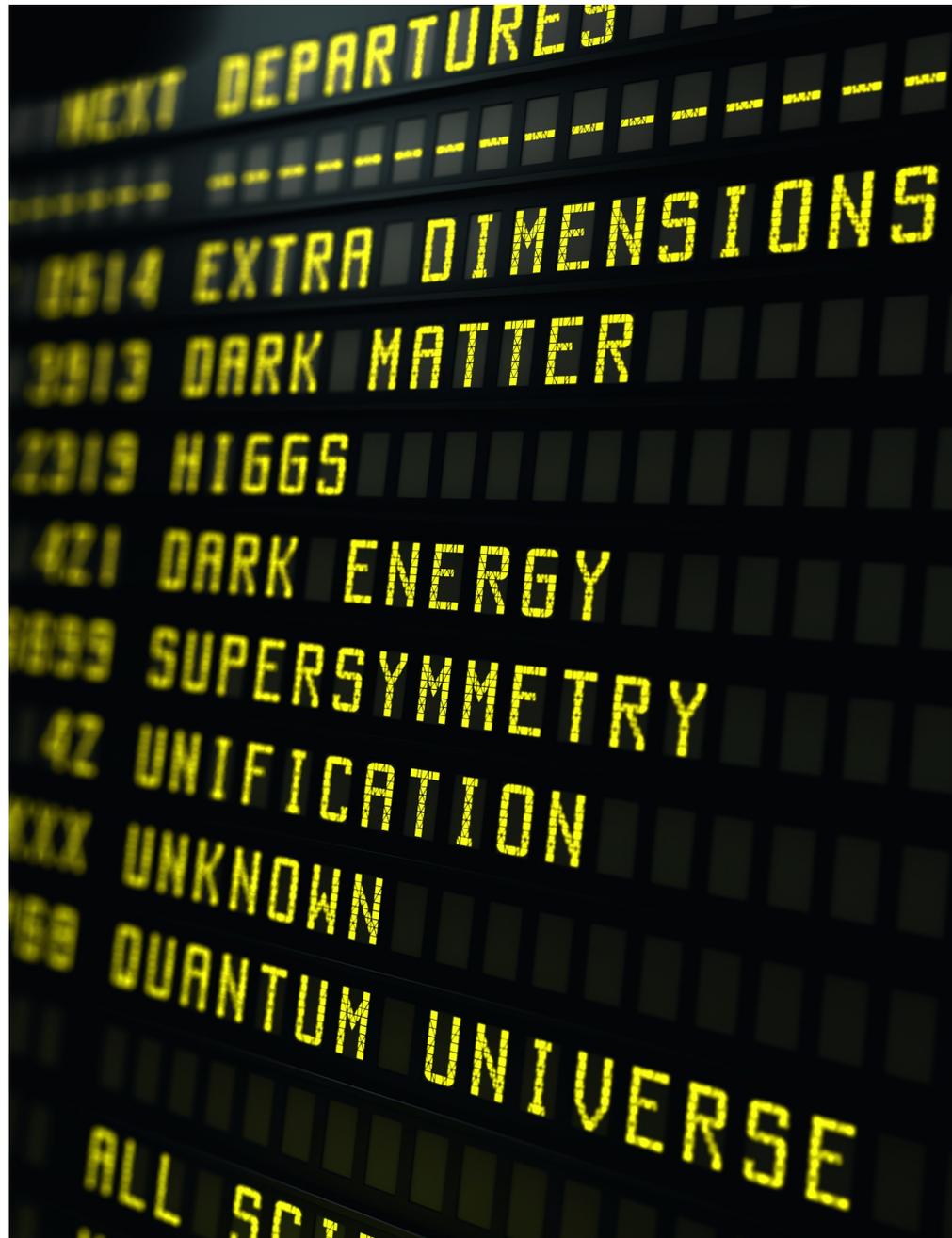
**Mesures de haute précision!!!**

# Bien au-delà du LHC - Précision à obtenir avec l'ILC



Il faut l'ILC pour comprendre la nature de la Matière Noire  
... et il y a une batterie d'exemples supplémentaires

# Alors ... Bienvenue à Bord



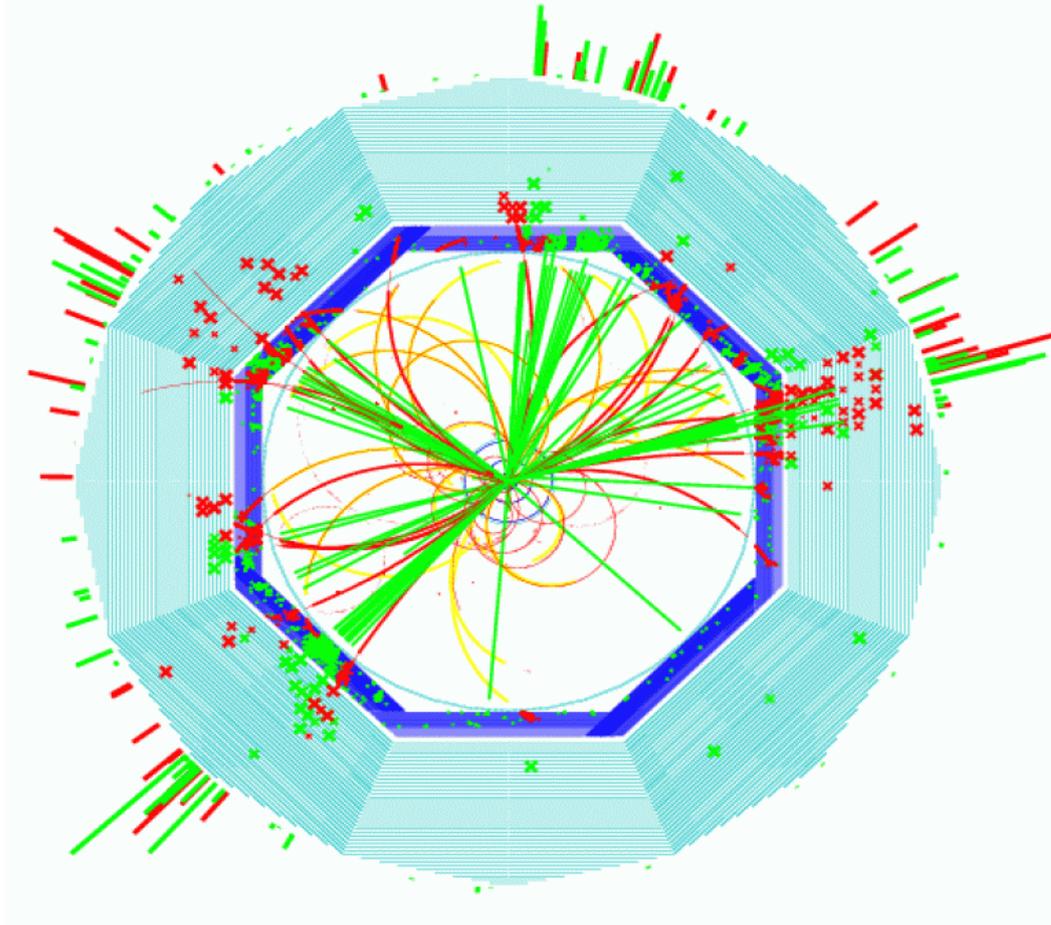
# Chapitre 3

## Expérimentation à l'ILC Les détecteurs

# Étapes principales d'une mesure

Évènement à l'ILC: .....

Structure typique pour un événement  
HEP



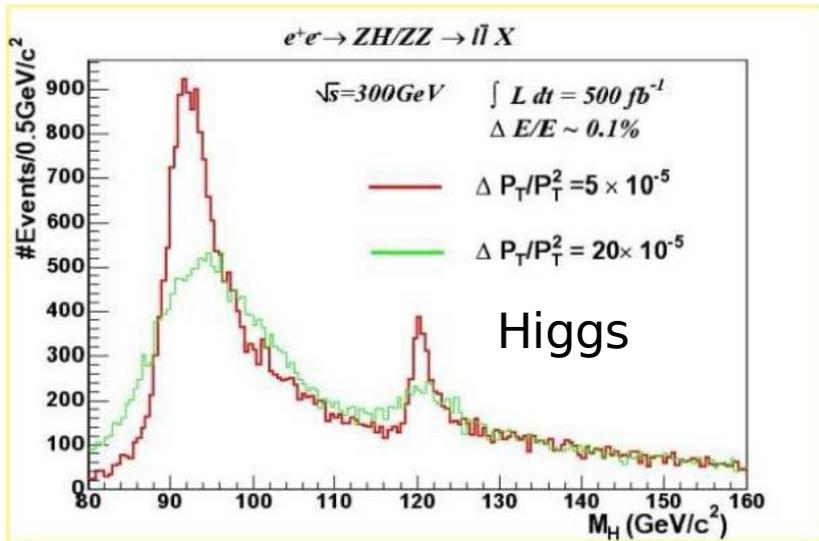
Détecteurs du vertex  
Reconstruction du point  
d'interaction et des points  
de désintégration des particules  
instables

Chambres à traces  
Partie centrale  
Reconstruction des trajectoires  
des particules chargées

Calorimètres  
Partie extérieure  
Mesure de l'énergie

La seule manière de mesurer  
les particules neutres

# Demandes de la Physique



a) **Résolution de la masse deux jets**  
 Séparation du Higgs des autres bosons

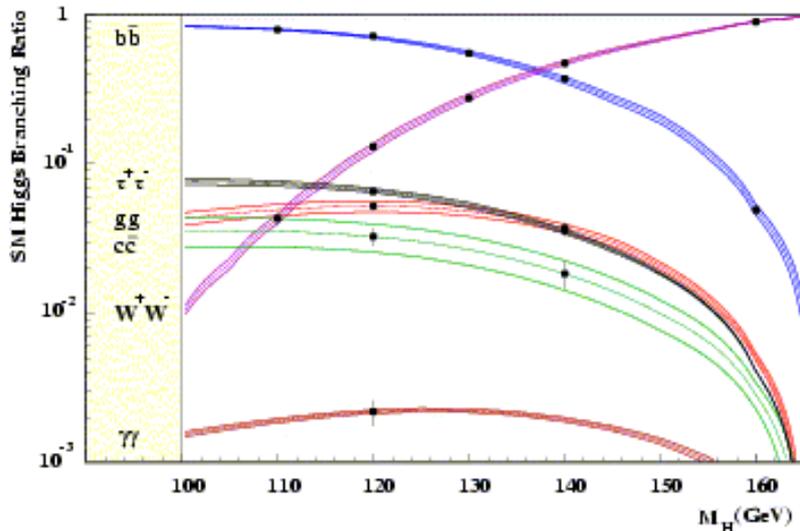
b) **Identification des (quarks) saveur différentes**

Le Higgs interagit préférentiellement avec les quarks lourds

c) **Résolution de l'impulsion**

d) **Herméticité**

Les WIMPs échappent à la détection  
 => Il faut détecter tout pour trouver la trace des WIMPs



# Quelques chiffres importants

**Impulsion:**  $\sigma_{1/p} < 5 \times 10^{-5} / \text{GeV}$  **(1/10 x LEP)**

( e.g. Mesure de la masse du Boson Z avec leptons chargés)

**Résolution du Vertex:**  $\sigma_{d0} < 5\mu\text{m} \otimes 5\mu\text{m}/p(\text{GeV})$  **(1/3 x SLD)**

(Identification des quarks c/b/t)

**Énergie des Jets :**  $dE/E = 0.3 / (E(\text{GeV}))^{1/2}$  **(1/2 x LEP)**

(Mesure des masses des W/Z avec jets)

**Herméticité :**  $\theta_{\text{min}} = 5 \text{ mrad}$

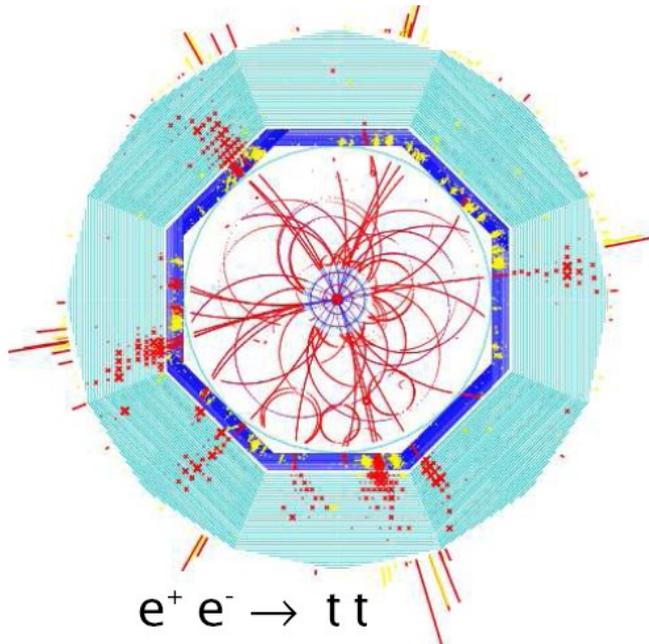
(pour des événements avec de l'énergie manquante e.g. SUSY)

On attend des événements avec un grand nombre des traces chargées et un grand nombre des jets (**6+**).

- Haute Granularité
- mesure excellente des traces
- séparation excellente des traces

⇒ 3 approches différentes

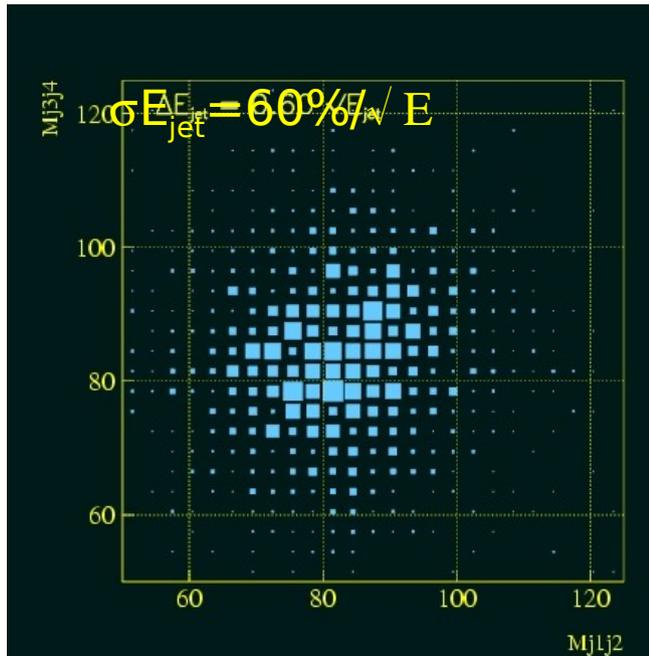
Les concepts détecteur SiD, **Large** and **Huge**



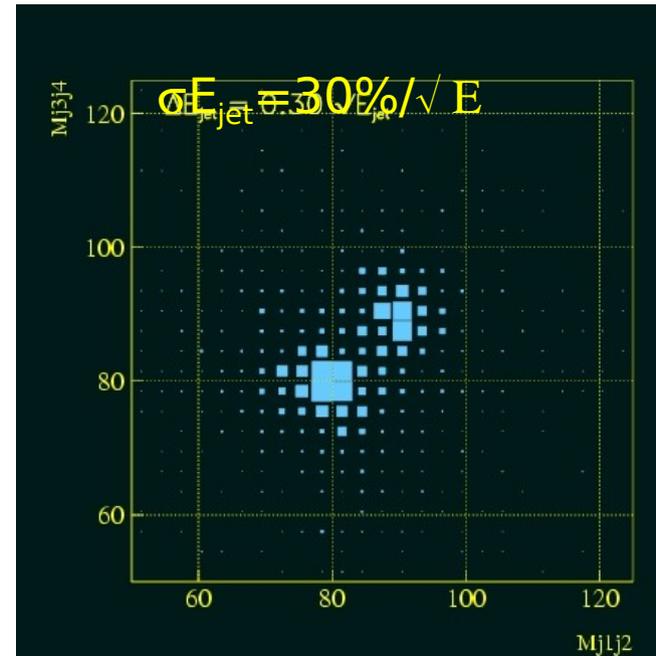
# Mettons des lunettes ....

Reconstruction des jets en  $e^+e^- \rightarrow WW_{\nu\nu}, ZZ_{\nu\nu}$

Séparation des WW et ZZ: 4 Jets + énergie manquante



Détecteur à LEP



Détecteur à l'ILC

30%/√E Jet de résolution de l'énergie nécessaire @ ILC

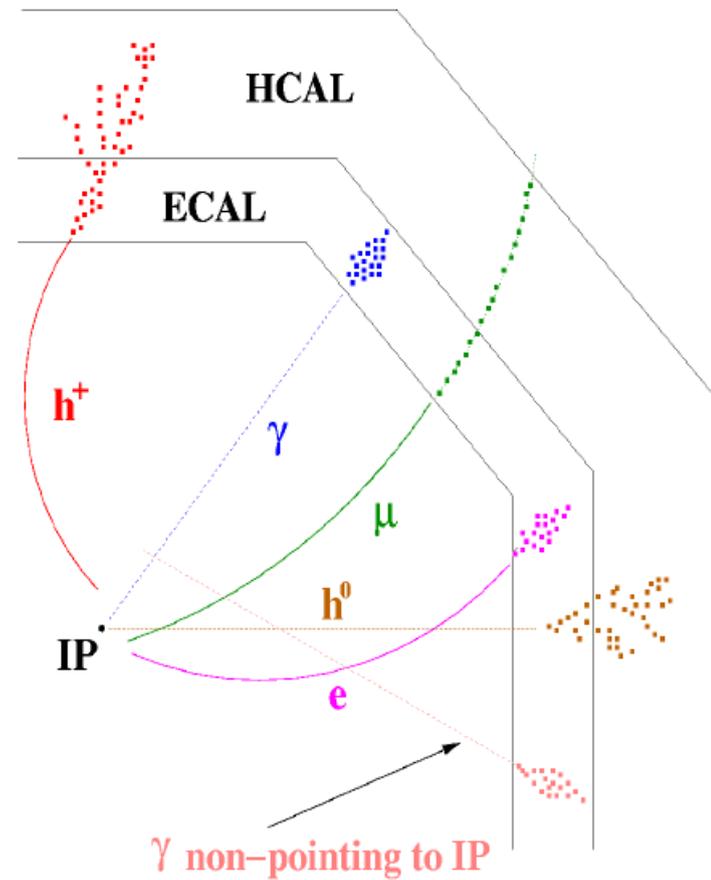
# Conception du Détecteur et 'Particle Flow'

Résolution optimale d'énergie:  
Détection de chaque particule  
dans un événement → "Particle Flow"

- Particule chargée avec chambre à traces et leurs signaux associés dans le calorimètre (Shower Track Matching)

Remplacement de l'énergie calorimétrique par l'énergie des traces

- Photons en ECAL
- Hadrons neutres en HCAL

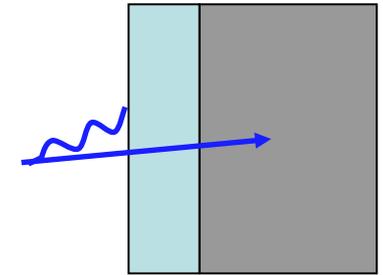


# Le calorimètre électromagnétique

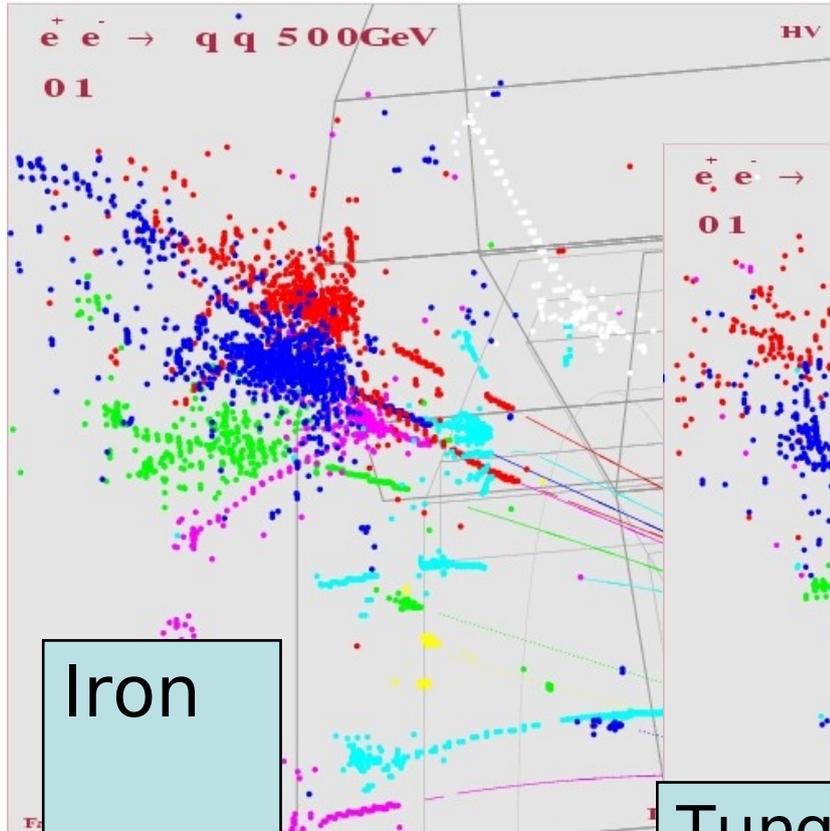
Projet principal en France

Detéction des photons et séparation photon/hadron

## Choix du matériel

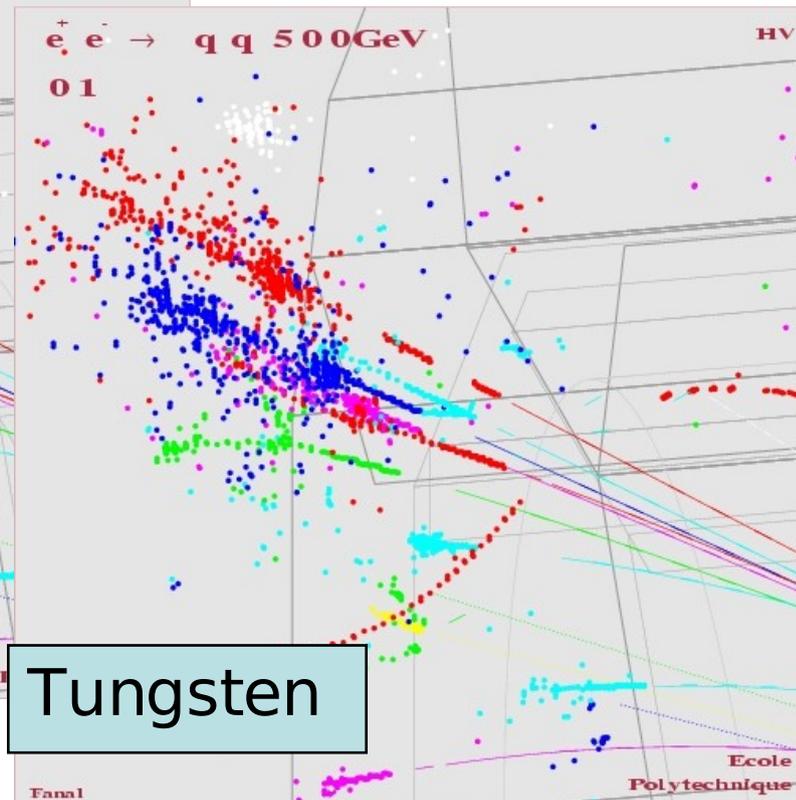


$X_0 = 1.8\text{cm}$ ,  $\lambda_I = 17\text{cm}$



(images courtesy H.Videau)

$X_0 = 0.35\text{cm}$ ,  $\lambda_I = 9.6\text{cm}$



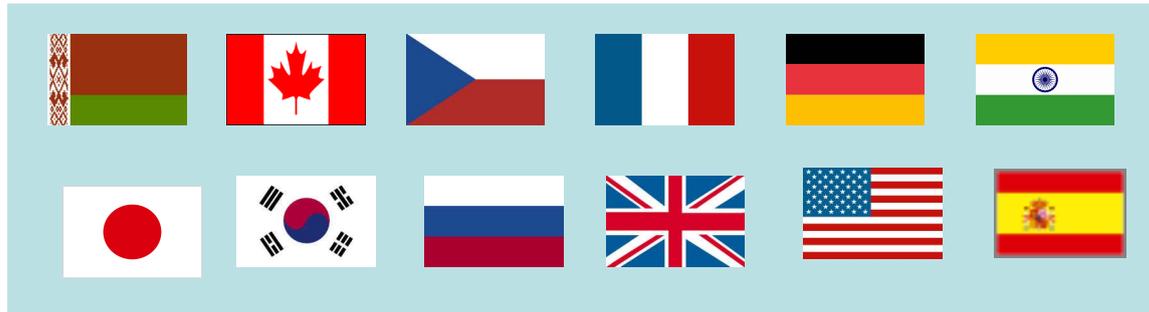
Meilleure séparation des particules en utilisant le Tungstène W

Résonances LAL Nov. 2007

La Collaboration



## R&D calorimètre pour l'ILC

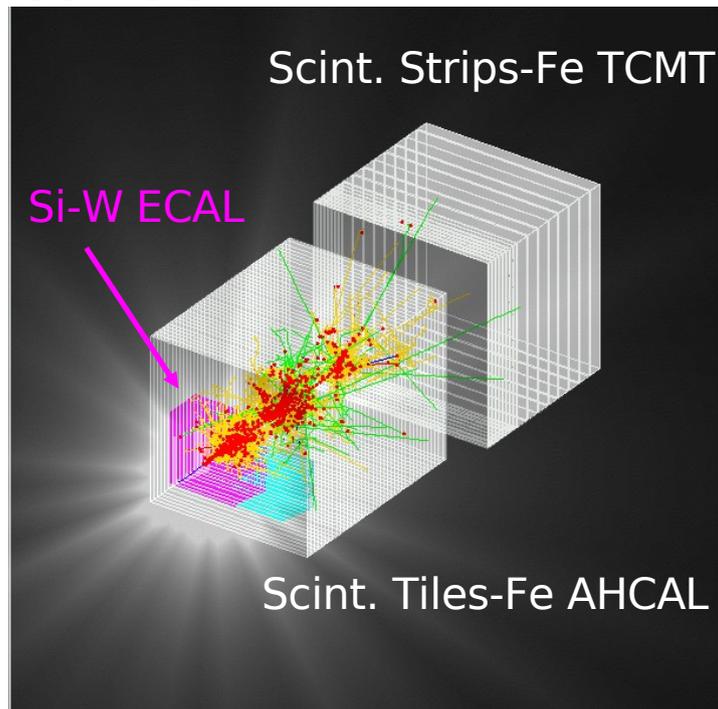


- ~230 physiciens/ingénieurs de 12 pays, 3 continents
- Effort R&D intégré
- Développement du détecteur bénéficie d'une approche commune

# La Mission de Calice

## But final:

Calorimètre de haute granularité optimisé pour le **Particle Flow**  
Mesure des états finaux multi-jets à l'International Linear Collider



## Sujet actuel:

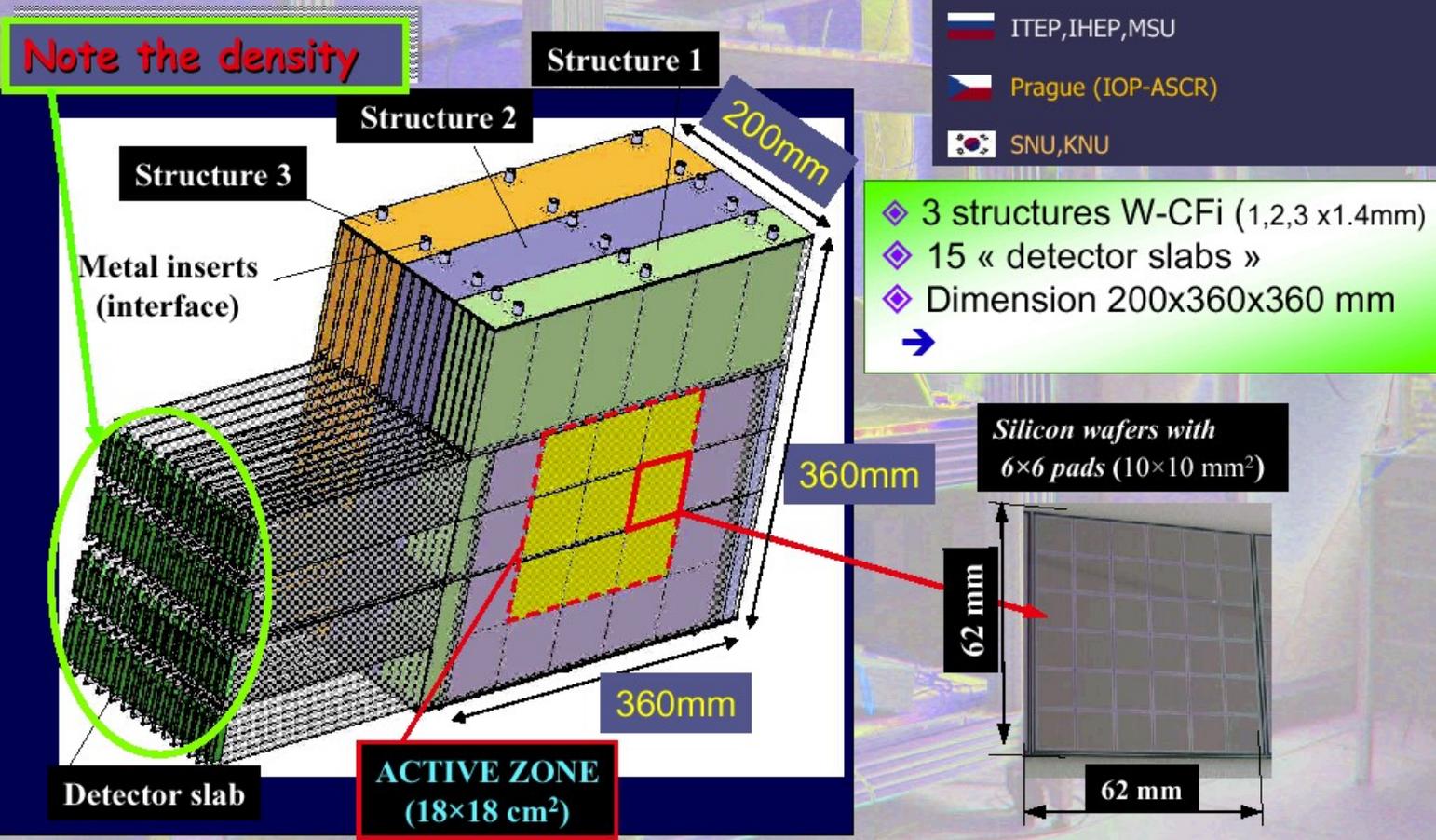
Construction des prototypes de calorimètres pour

- La mise au point de la technologie
- Faire des tests en faisceau
  - optimisation des algorithmes de la reconstruction des événements

29

# Prototype Ecal- CALICE Collaboration

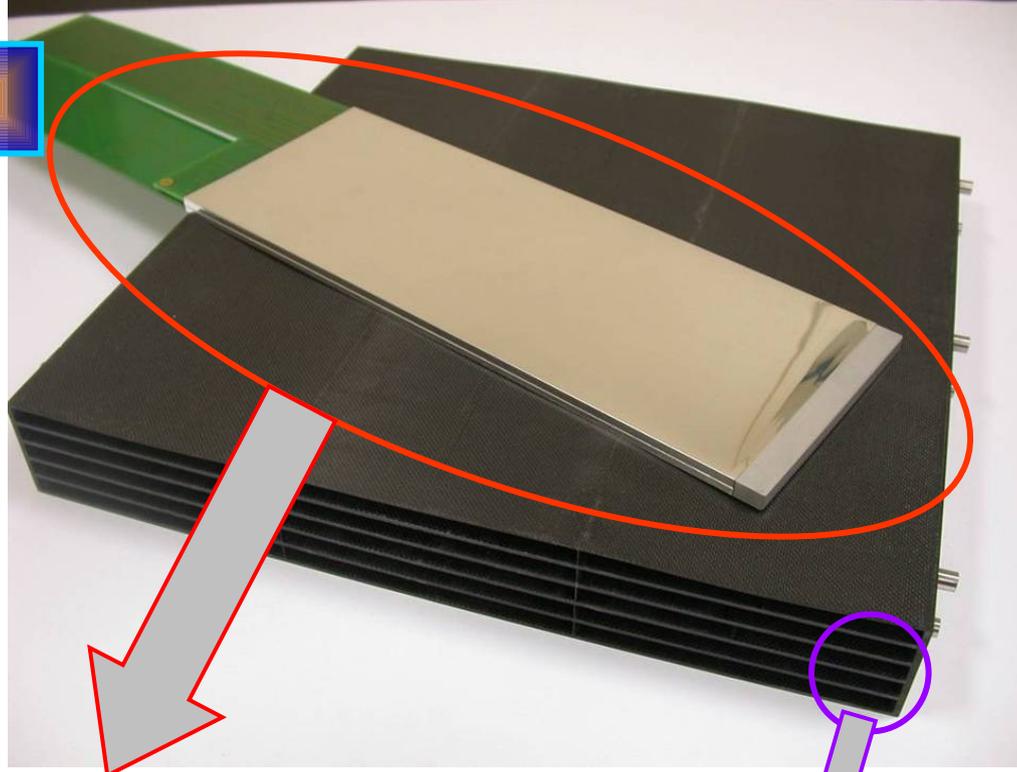
## The ECAL prototype



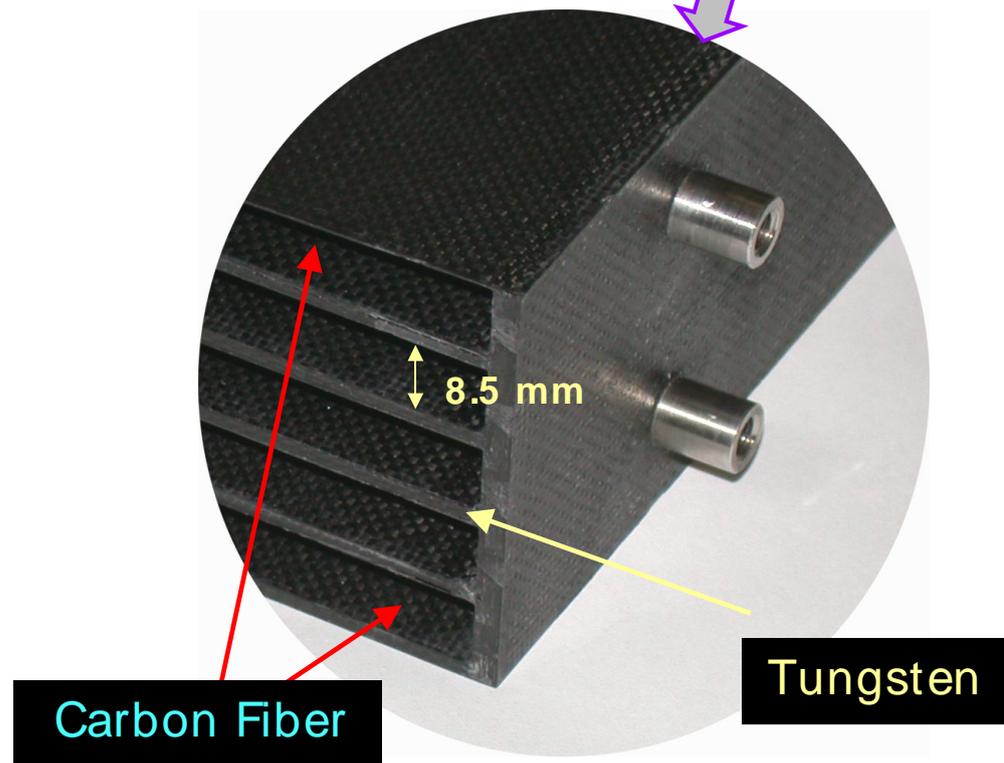
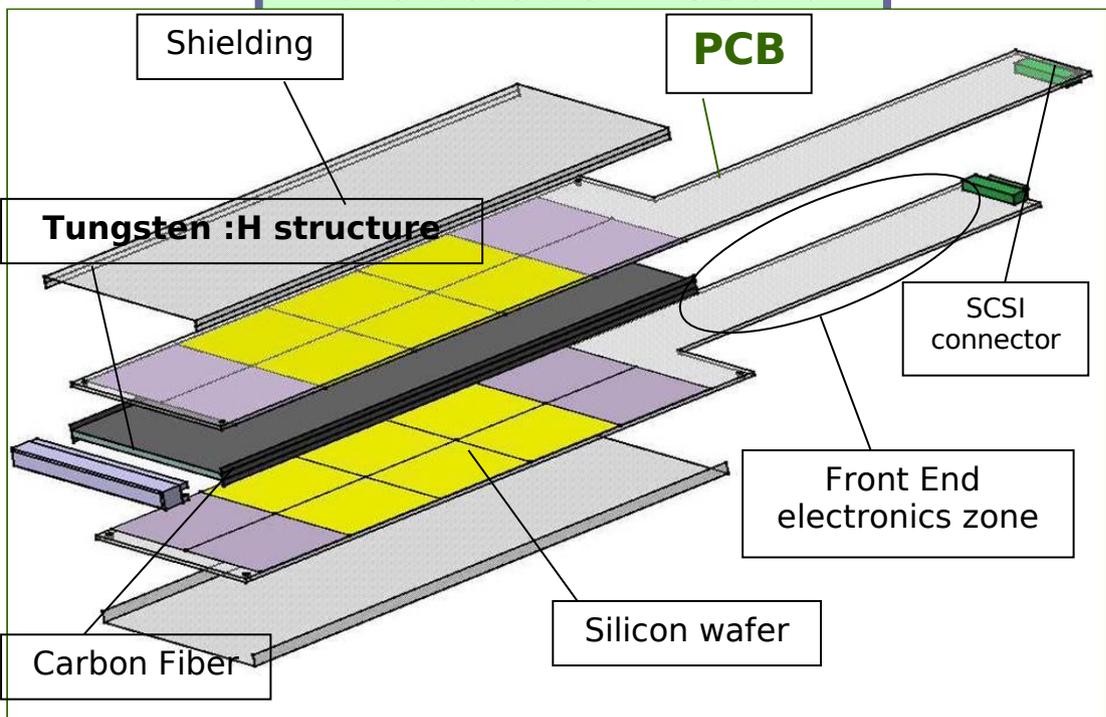
- W comme matériel d'absorption
- Extraction en "Silicon Wafers"
- Très haute granularité cellules 1x1 cm<sup>2</sup>
- Détecteur est optimisé pour la séparation des particules
- 10000 canaux  
~ nombre des canaux dans LHC-b

# Alveolar structure & Slab

- Design and fabrication of **alveolar structures** with associated moulds
  - Alveolar structures : 3 / 3
- Design and fabrication of **30 type H structures** with associated moulds
  - H with W = 1.4 mm : 10 / 10
  - H with W = 2.8 mm : 10 / 10
  - H with W = 4.2 mm : 10 / 10



## Detector slab



Courtesy of J.C. Vanel LLR

# Front-end PCB

## 6 wafers actives

Composés de 36 PIN diodes  
silicon

216 canaux par board

Chaque diode carrée de  
1cm<sup>2</sup>

## 2 chips de calibration

6 canaux de calibration par  
chip

18 diodes par canal de  
calibration

## 12 FLC\_PHY3 front-end chip

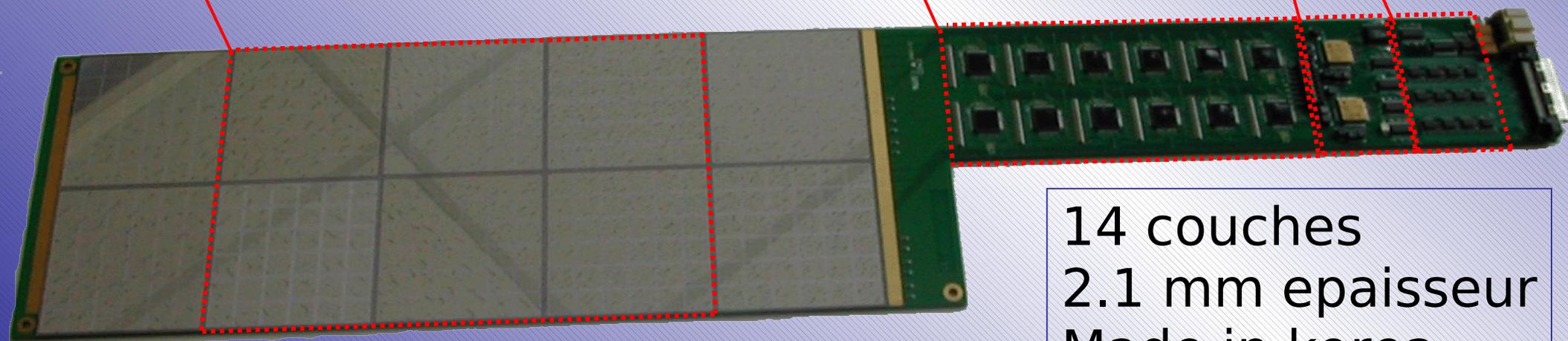
18 canaux par chip

Gamme dynamique de 13 bit

## Line buffers

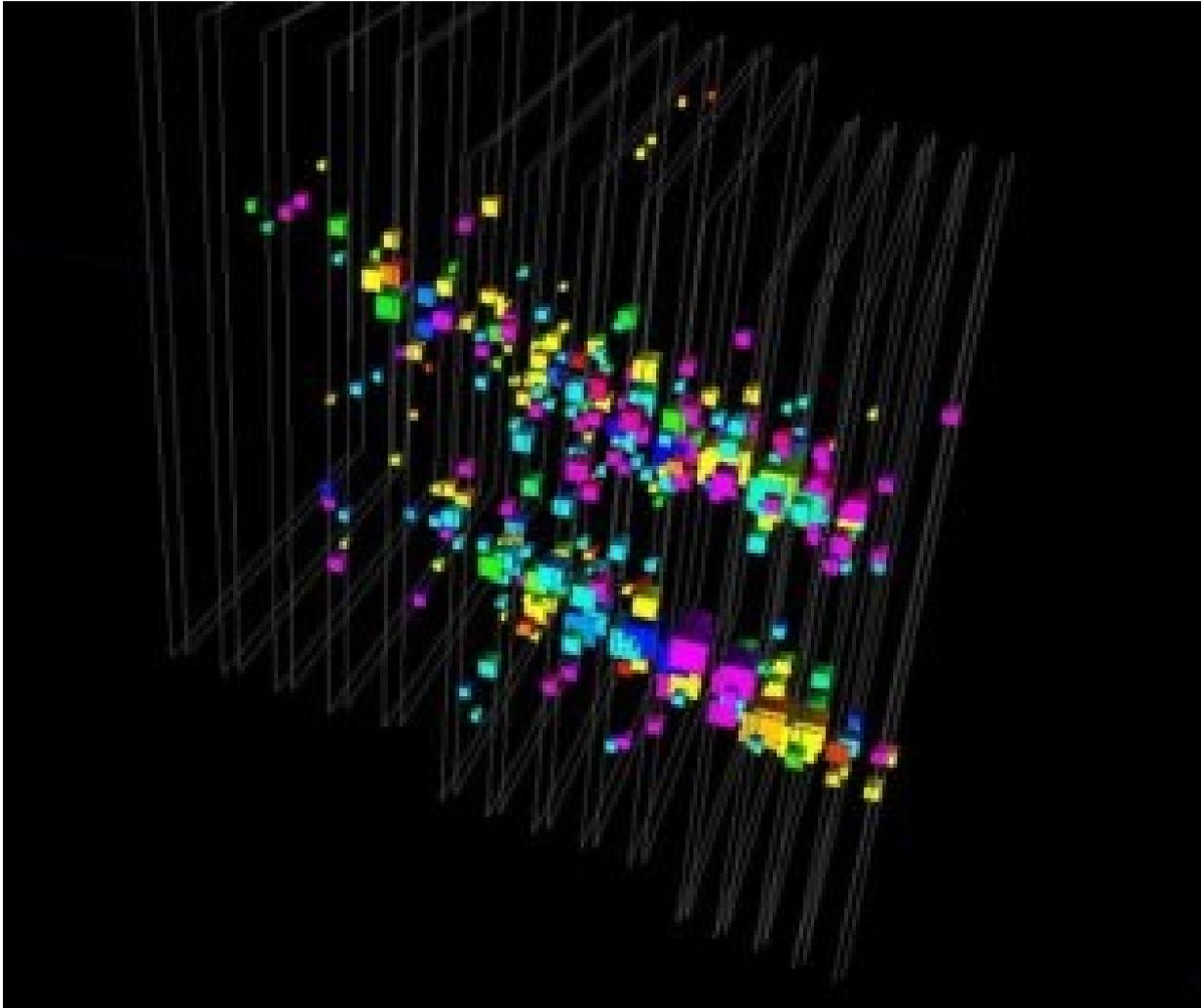
À DAQ

Differentiel



14 couches  
2.1 mm epaisseur  
Made in korea

# Ecal en test en faisceau @ CERN

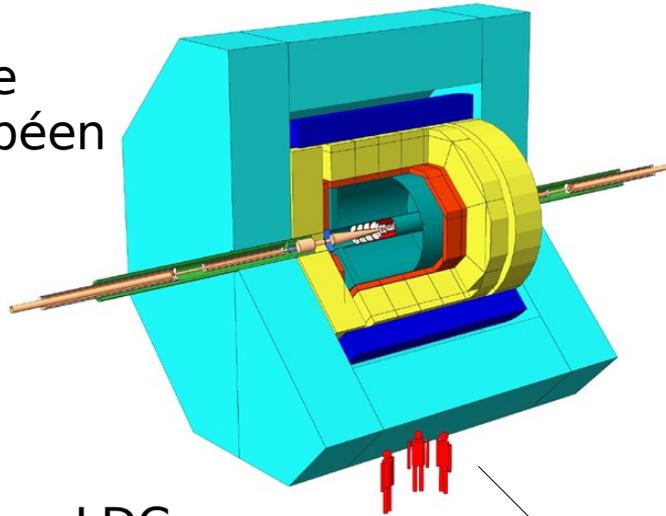


... et voilà une bonne séparation des particules !!!  
Distance entre particule  $\sim 5\text{cm}$  – Pas de confusion !!!!

## Nouvelles fraîches

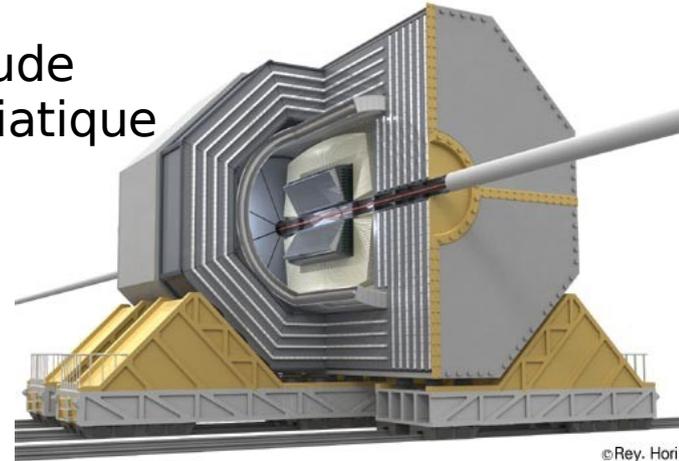
Accélération du développement – Octobre 2007 L'appel pour des 'LOI'

Étude  
Européen



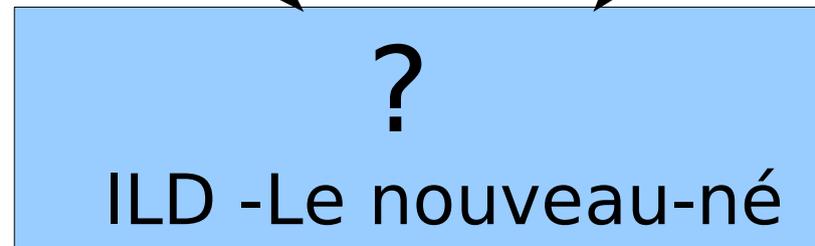
LDC

Étude  
Asiatique



© Rey. Hori

GLD



'Letter of Intent ' jusqu'en Octobre 2008 – Étape importante vers le vrai projet

# Résumé

- En tandem avec le LHC, l'ILC déterminera la recherche et la philosophie du 21<sup>ème</sup> siècle et bien au-delà
- C'est une aventure intellectuelle et technologique
- vous qui êtes là, personnel du LAL, aidez à sa réalisation

**Merci pour votre soutien et votre attention**