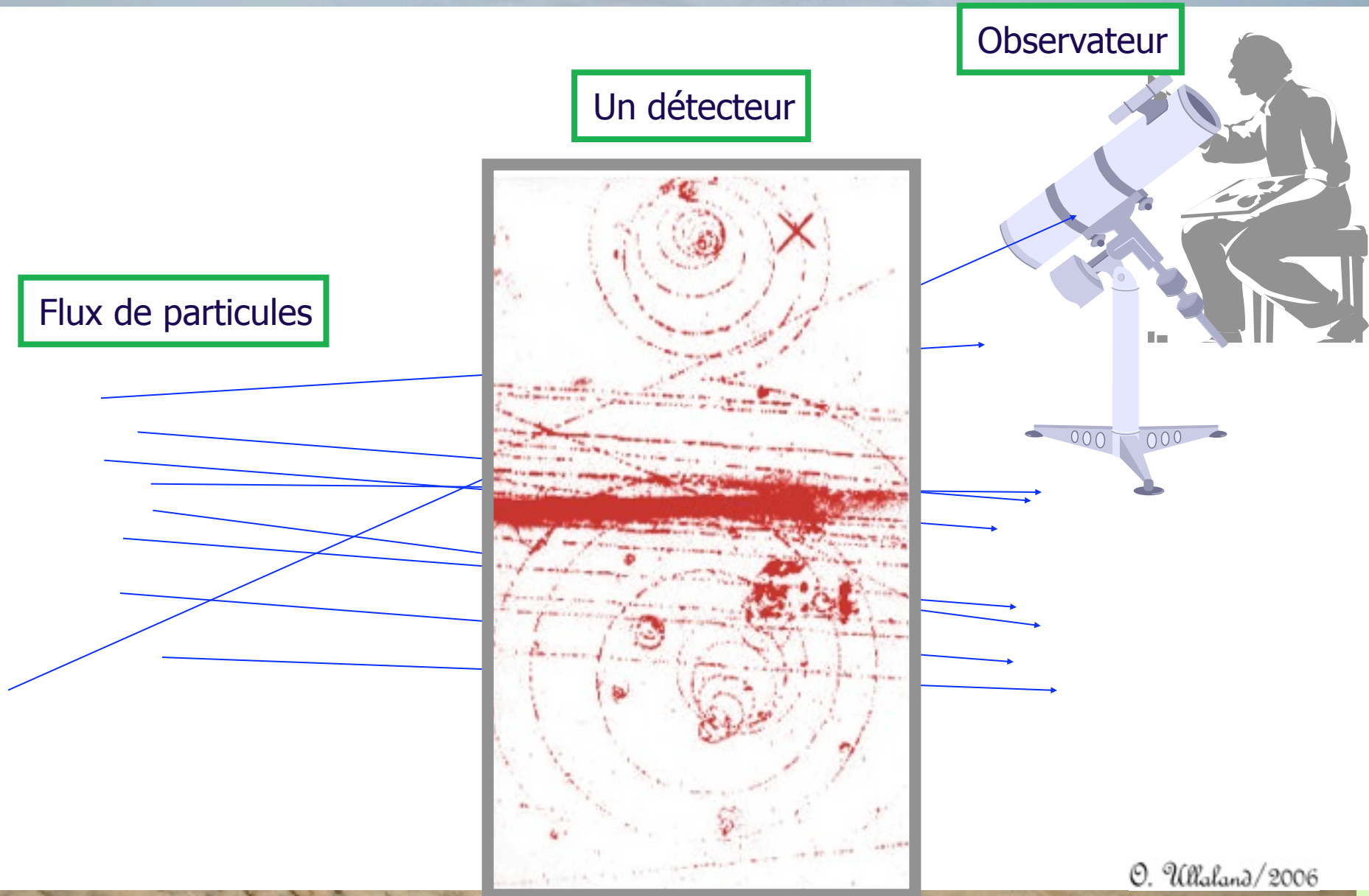


Les détecteurs en physique des particules: principes

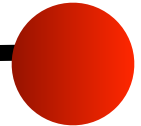
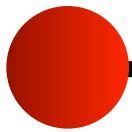
Ecole IN2P3 - Du détecteur à la mesure
Isabelle Wingerter-Seez (LAPP-Annecy)

Comment voir l'invisible ?



Recherche de Phénomènes Nouveaux

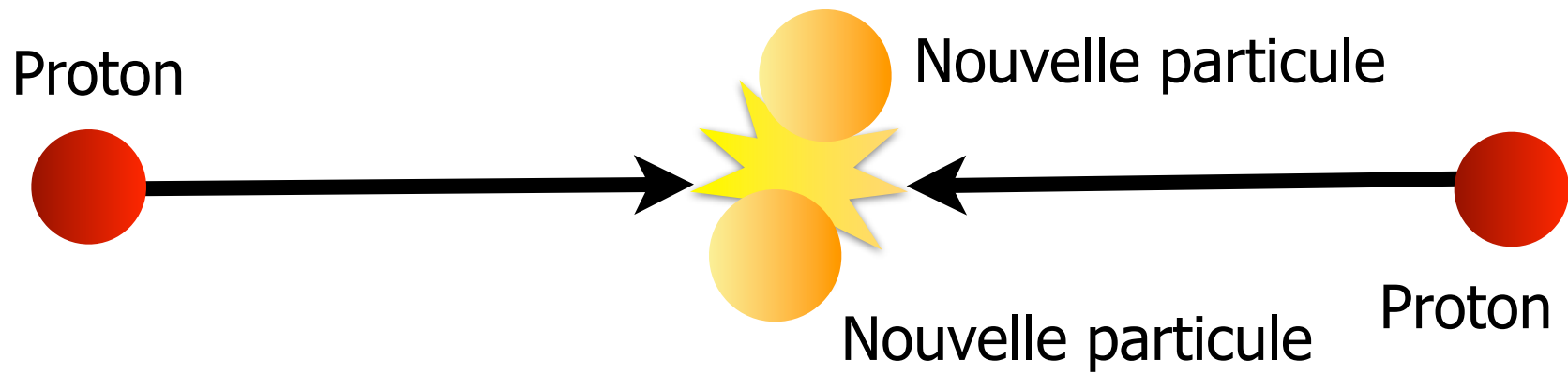
Proton



Proton

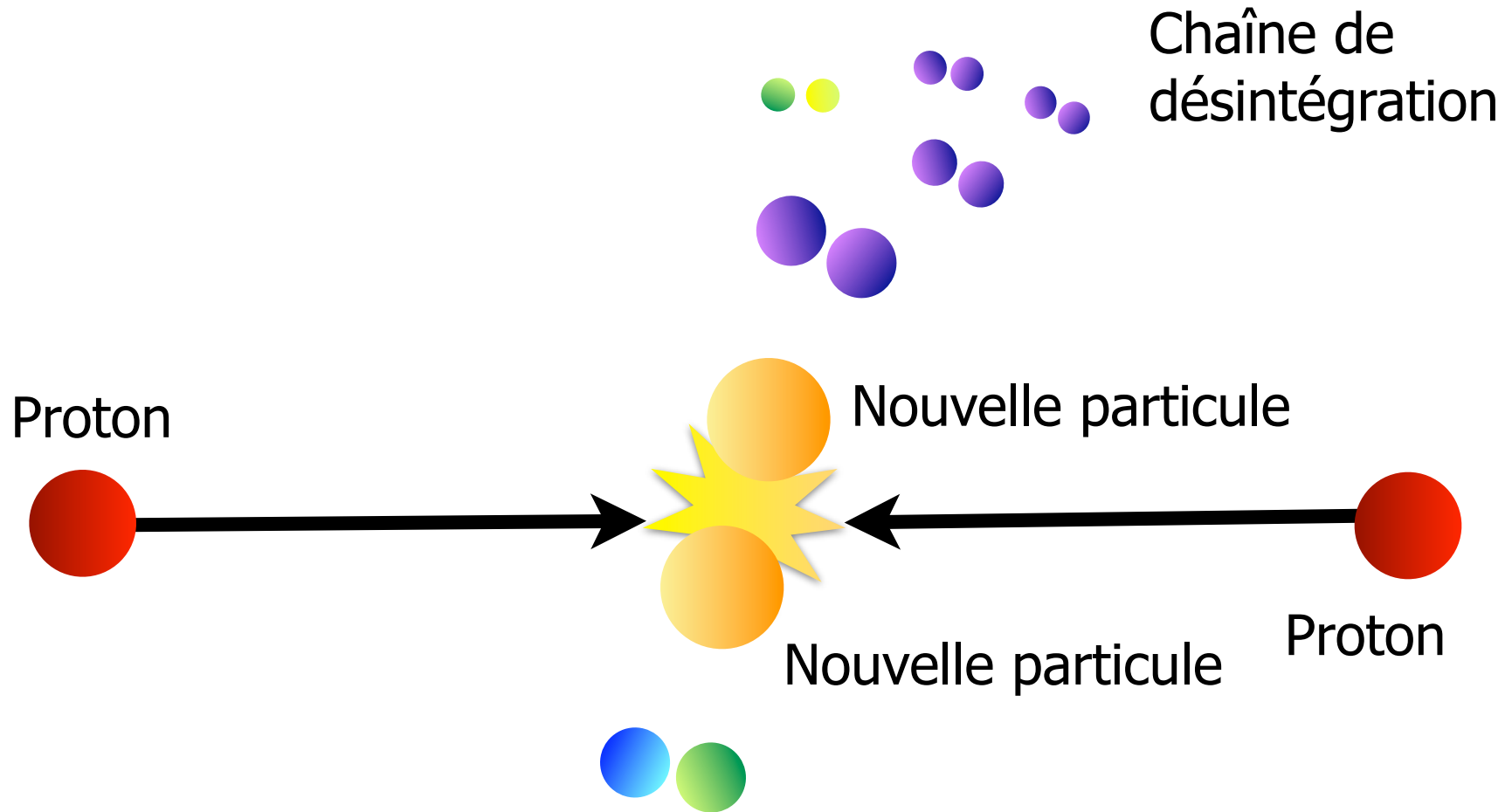
K. Copic

Recherche de Phénomènes Nouveaux



K. Copic

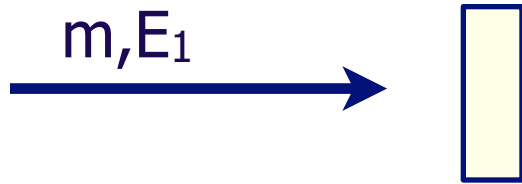
Recherche de Phénomènes Nouveaux



Chaîne de désintégration

K. Copic

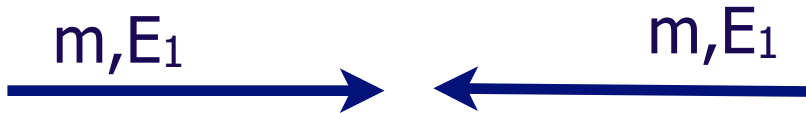
Faisceaux linéaires, circulaires, collisions, cibles fixes



Cible fixe

$$\sqrt{s} = \sqrt{2mc^2(E_1 + mc^2)}$$

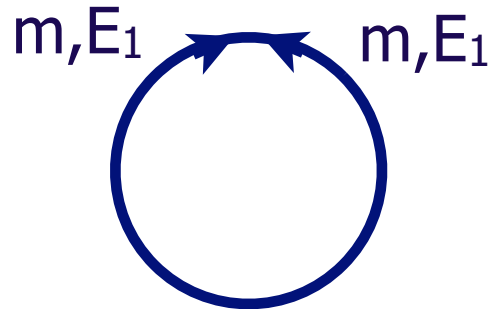
p de 1 TeV $\sqrt{s} = 43.3$ GeV



Collisionneurs linéaires

$$\sqrt{s} = E_1 + E_2 \text{ (p de 1 TeV } \sqrt{s} = 2 \text{ TeV)}$$

Un seul croisement



Collisionneurs circulaires

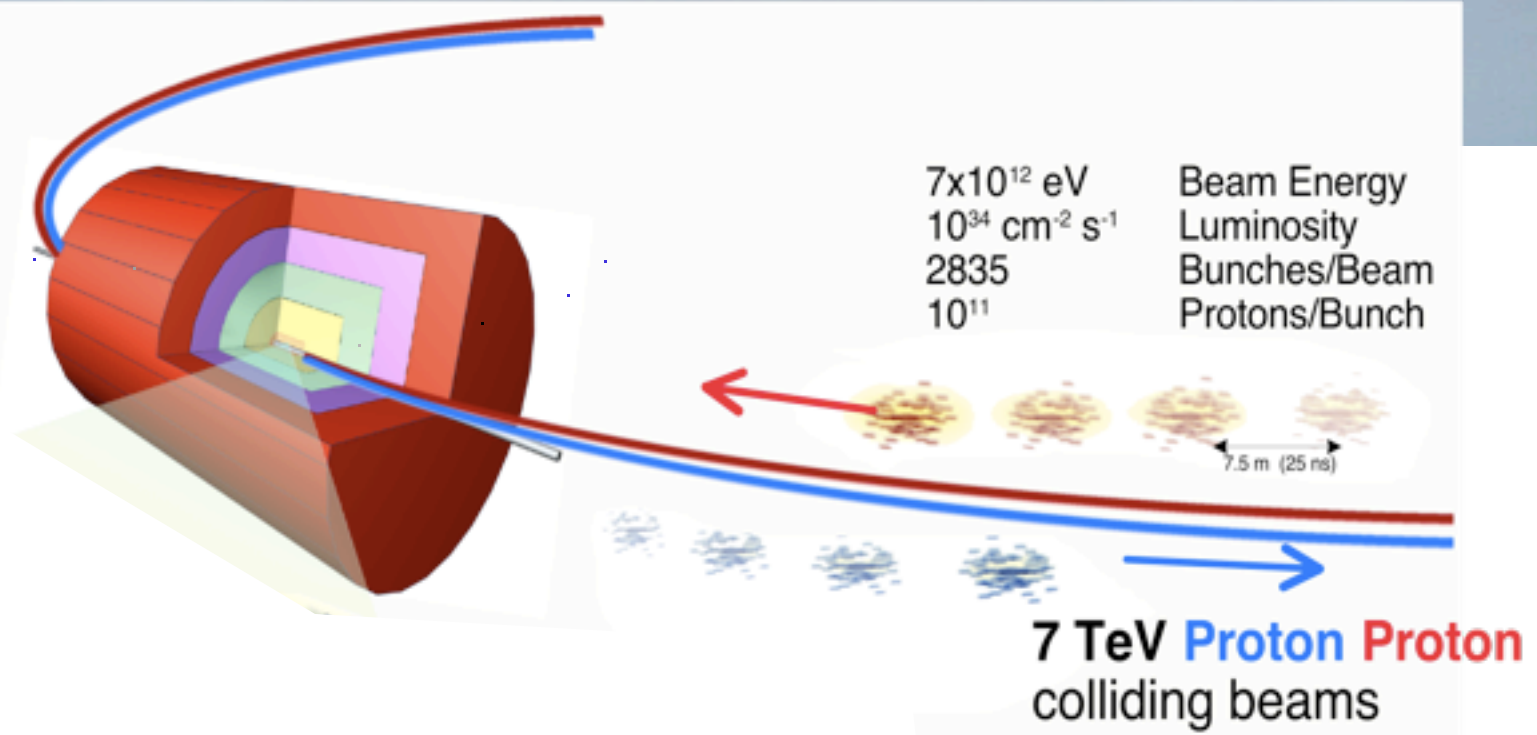
$$\sqrt{s} = E_1 + E_2 \text{ (p de 1 TeV } \sqrt{s} = 2 \text{ TeV)}$$

croisements répétitifs

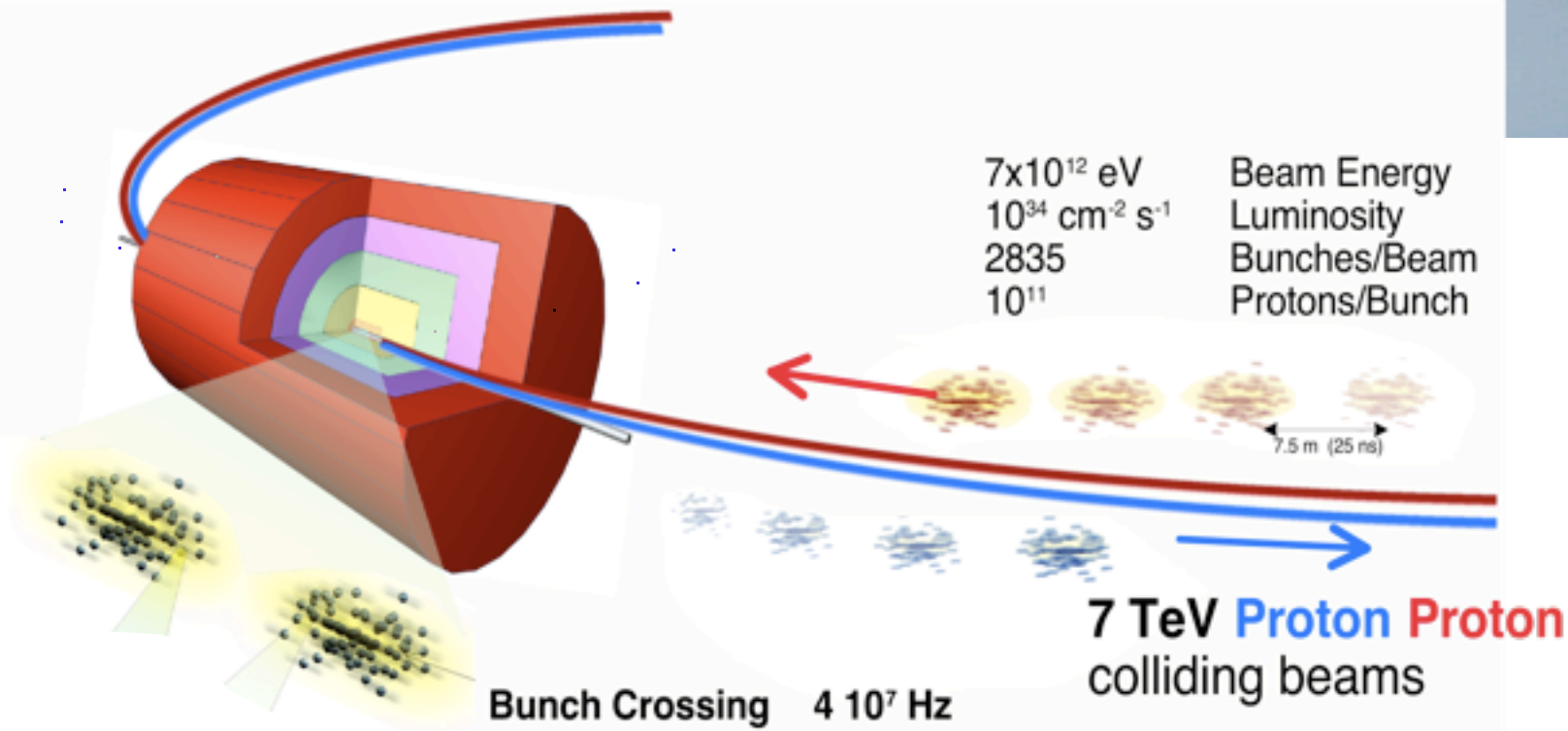
Rayonnement synchrotron

P. PUZO

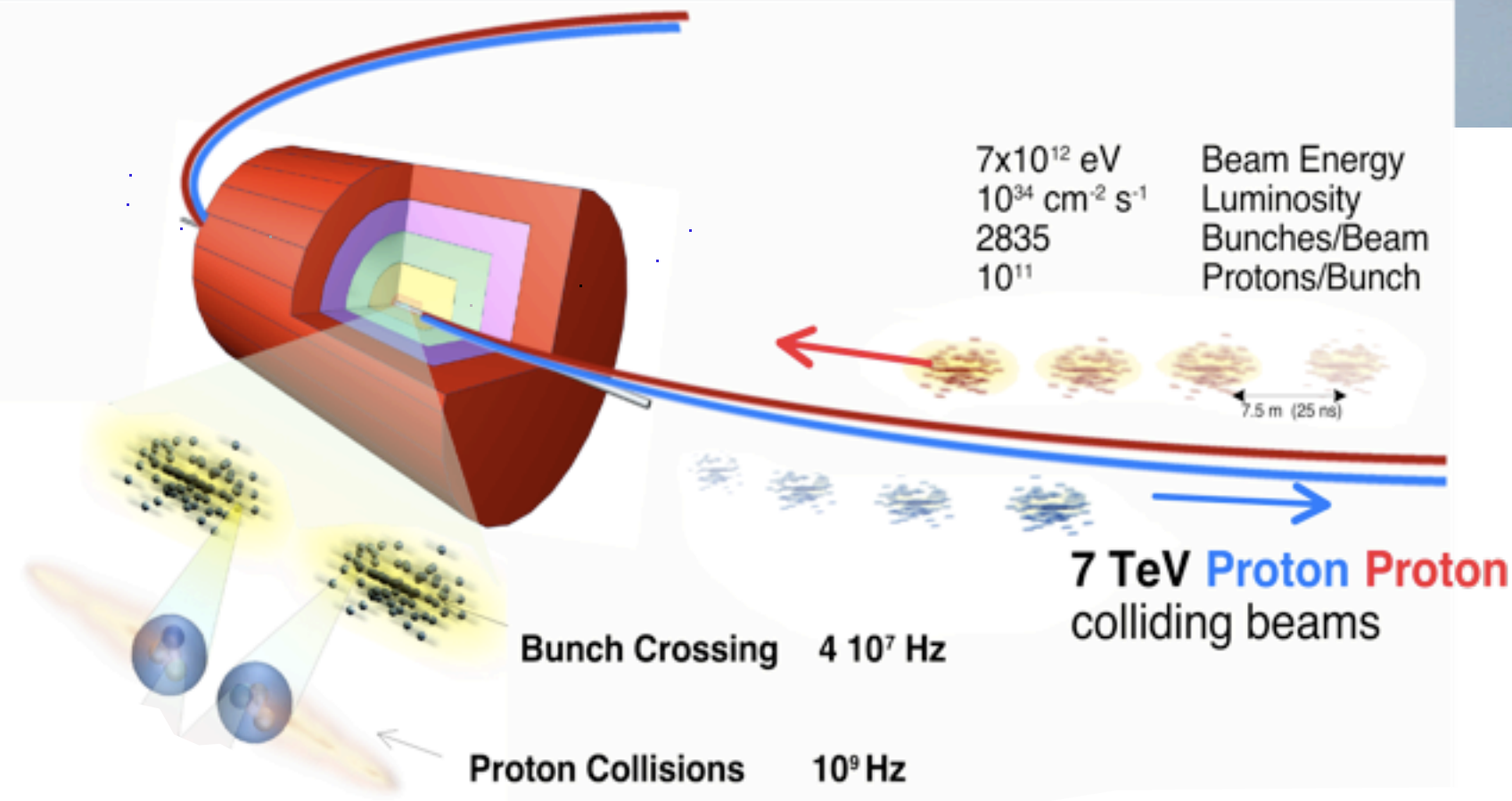
	E (GeV)	P_{RS} (MW)
LEP1	50	1,1
LEP2	108	15,6
LHC	7000	0,0073

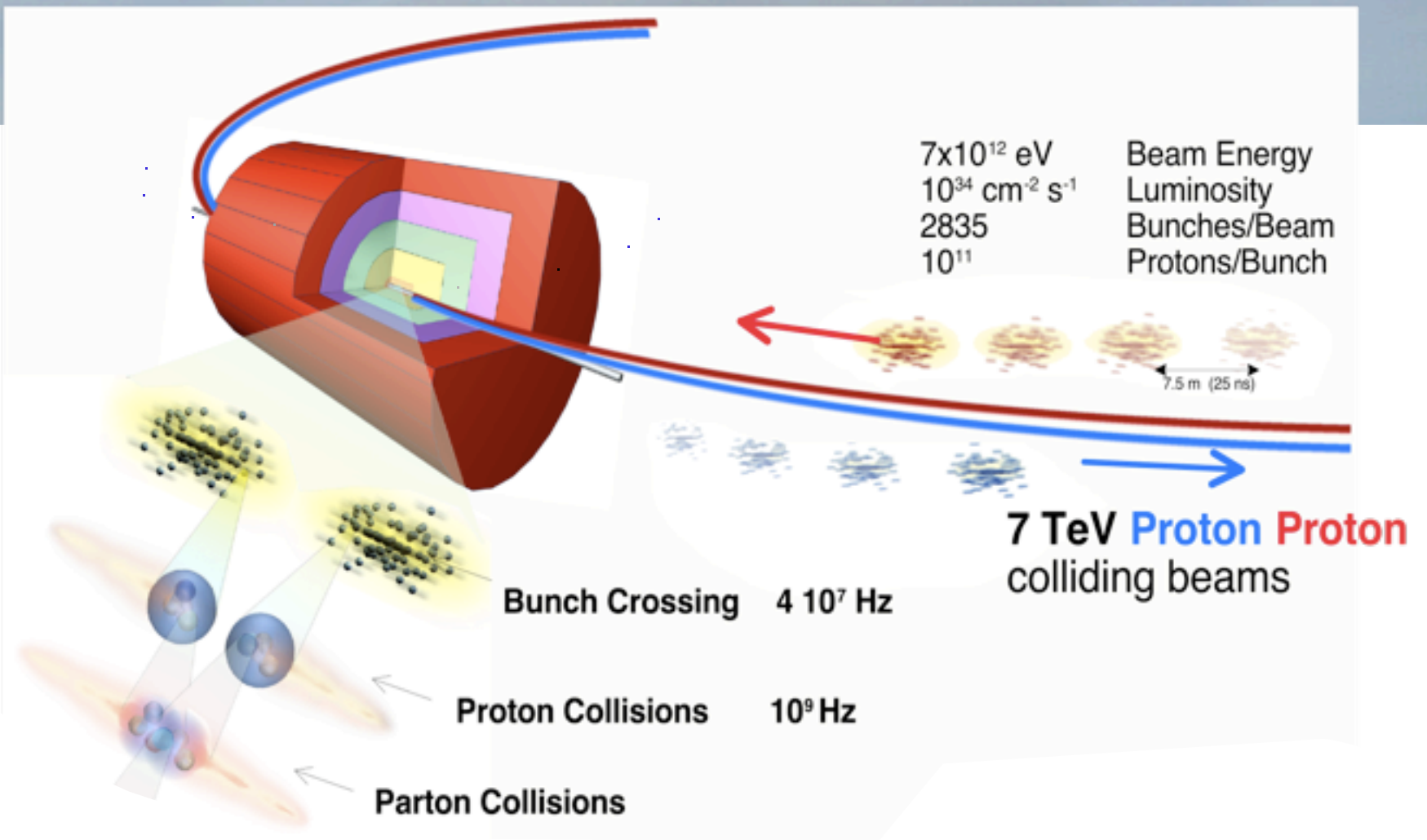


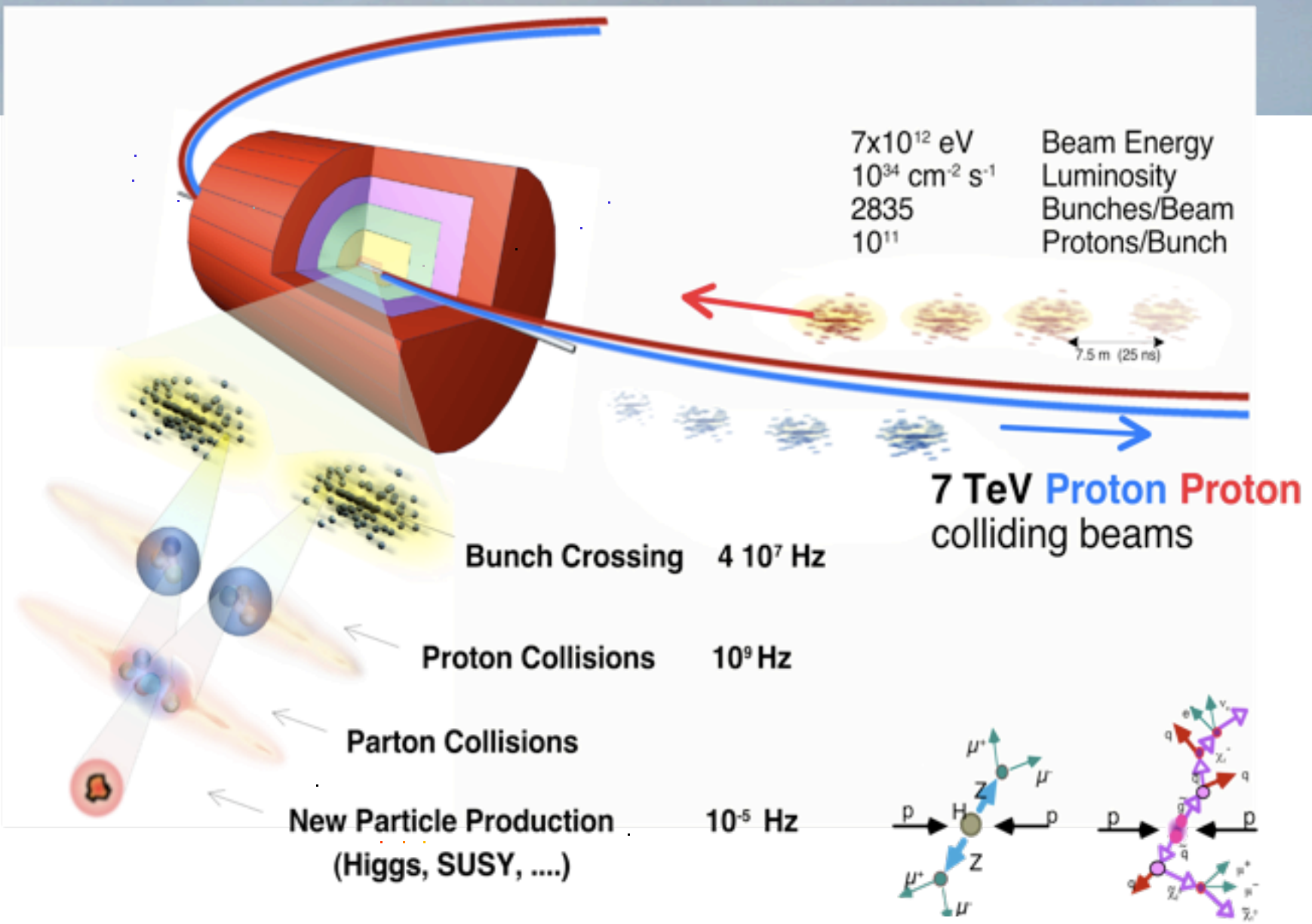
J. Virdee

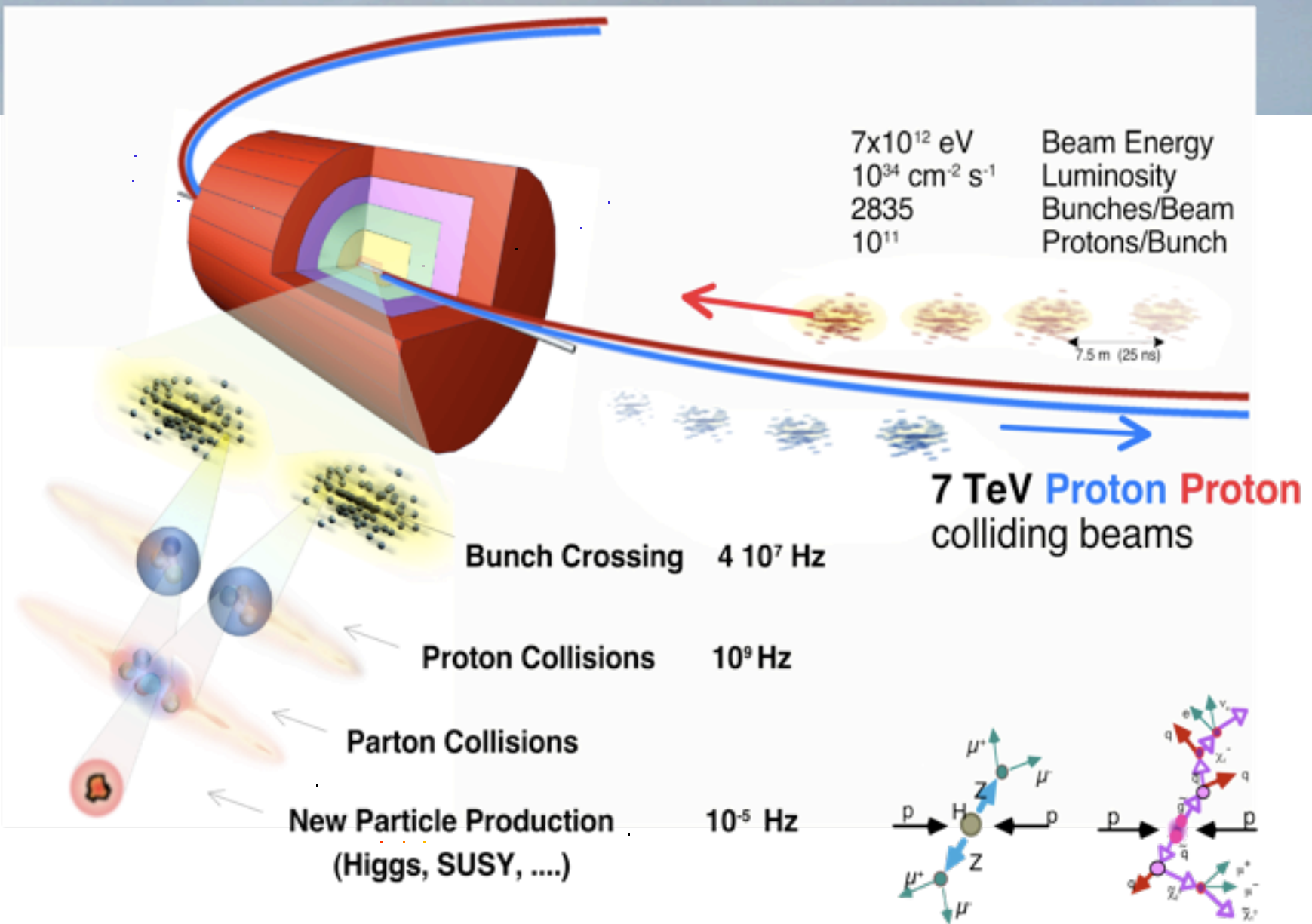


J. Virdee









Selection of 1 event in 10,000,000,000,000

J. Virdee



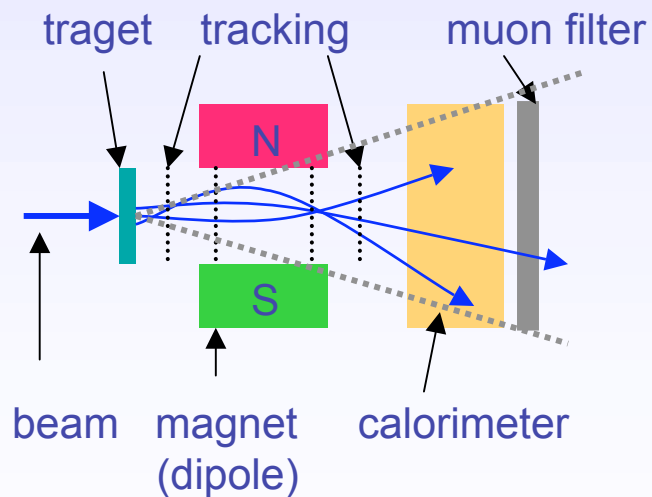
Comment détecter les particules ?

- Hypothèse: toutes les particules produites se désintègrent en particules stables connues et détectables: e^\pm , γ , μ^\pm , p , π^0 , π^\pm
- Seules les particules chargées sont mesurables
- Les principes de détection reposent sur les interactions des particules chargées avec la matière:
 - Ionisation
 - Emission de lumière au voisinage d'un noyau (Bremsstrahlung-Rayonnement de freinage)
 - Conversion du photon en paire d'électrons au voisinage du noyau
 - Dérive des électrons dans un champ électrique
 - Courbure des particules chargées dans un champ magnétique
 - Lumière/rayonnement Čerenkov
 - Scintillation

Cible fixe vs oignon

Fixed target geometry

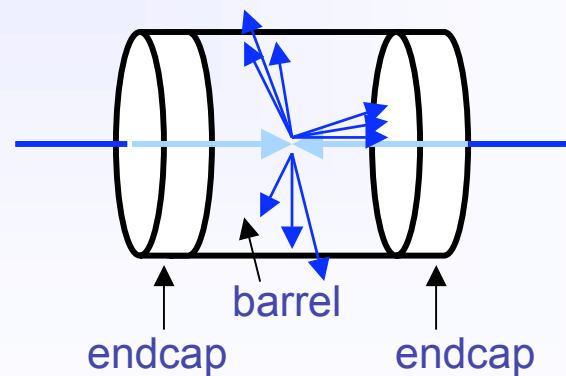
“Magnet spectrometer”



- Limited solid angle $d\Omega$ coverage
- rel. easy access (cables, maintenance)

Collider Geometry

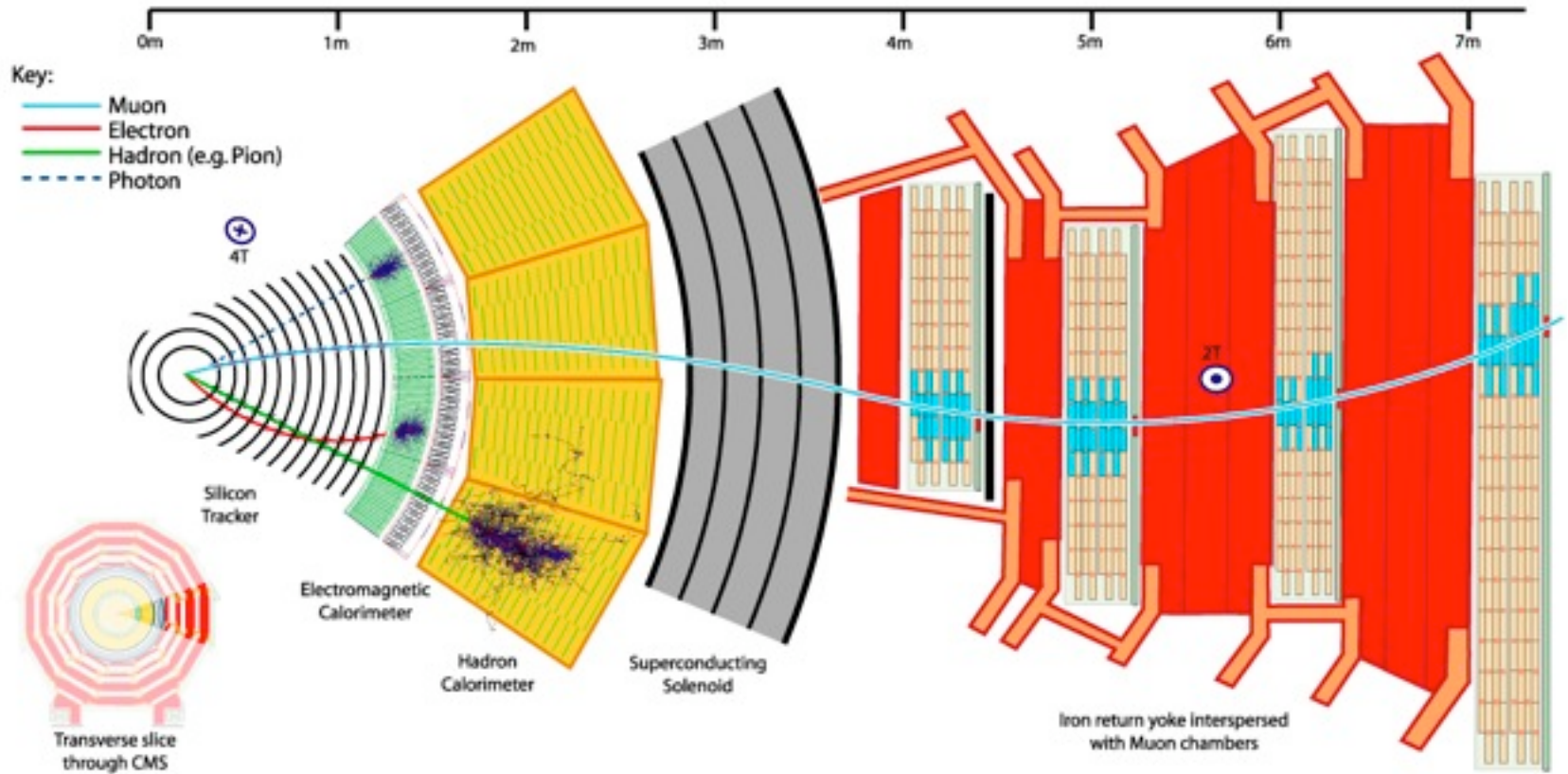
“ 4π multi purpose detector”



- “full” $d\Omega$ coverage
- very restricted access

C. Joram

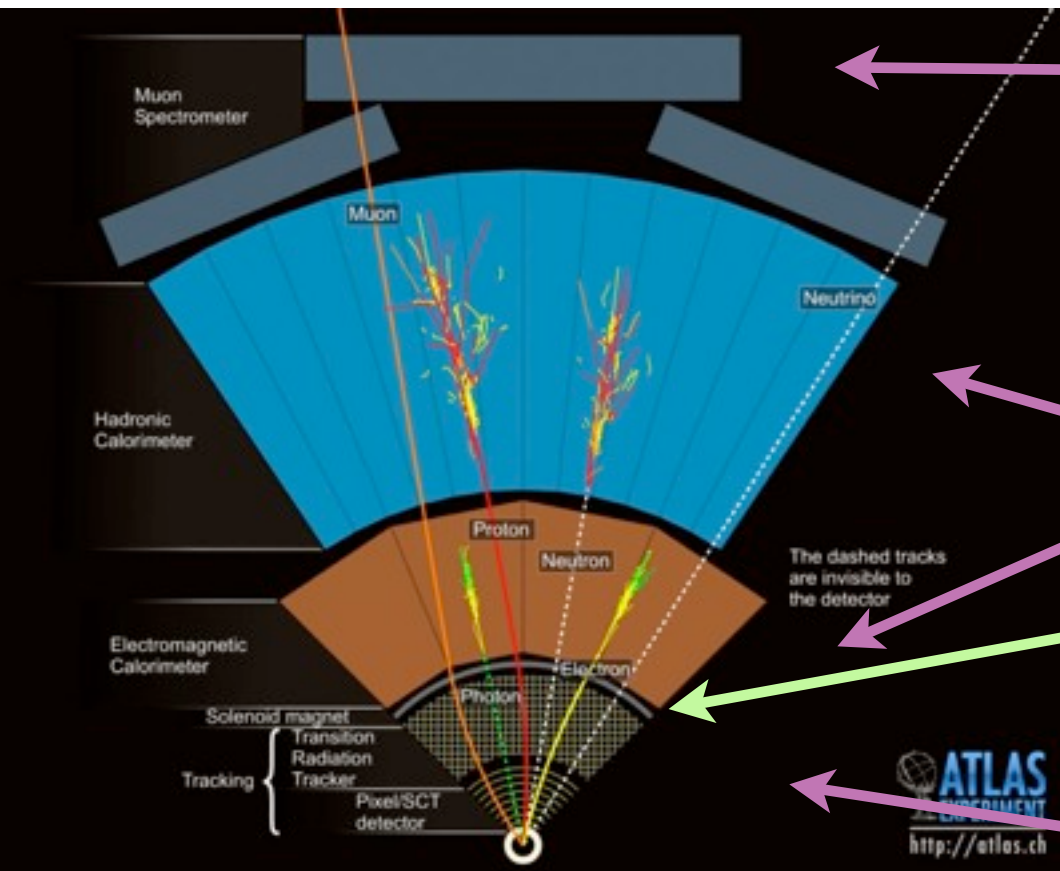
Structure générale d'un détecteur en Physique des Particules



Un détecteur polyvalent

- Shopping list:
 - Reconnaissance des électrons, des photons, des muons, des jets, des hadrons, des vertex déplacés (issus de la désintégration des hadrons beaux, eux-mêmes indicateurs de processus recherchés)
 - Découpage très fin de l'espace pour localiser précisément le passage des particules
 - Mesure précise de l'énergie des particules et de l'impulsion des particules chargées
 - Herméticité pour collecter le maximum des particules produites lors de l'interaction
 - Electronique rapide (40MHz) pour ne pas avoir de temps mort
 - Capacité de déclencher sur des objets rares sans s'aveugler.
 - Résistance aux radiations
 - Prix raisonnable

La structure en oignon



Détecteur de muons

Calorimètres
Arrête tout sauf μ et ν

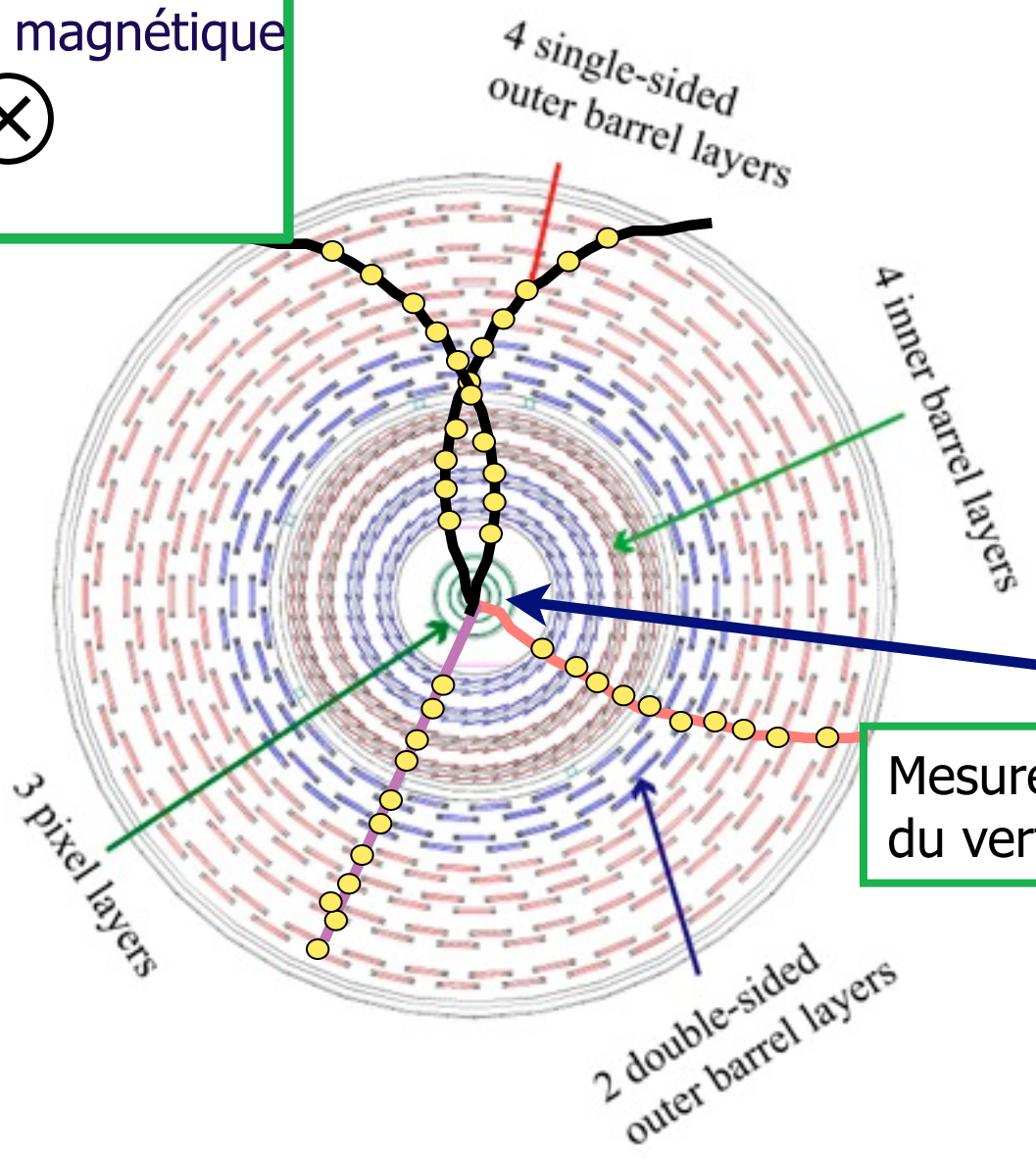
Aimant solénoïdal

Identification des particules

Détecteur de traces chargées
Peu de matière

Mesure de l'impulsion

Champ magnétique
 $\vec{B} \otimes$



Mesure de l'impulsion
 $P = 0.3 \cdot B \cdot \rho$

Mesure de la position
du vertex: d_0

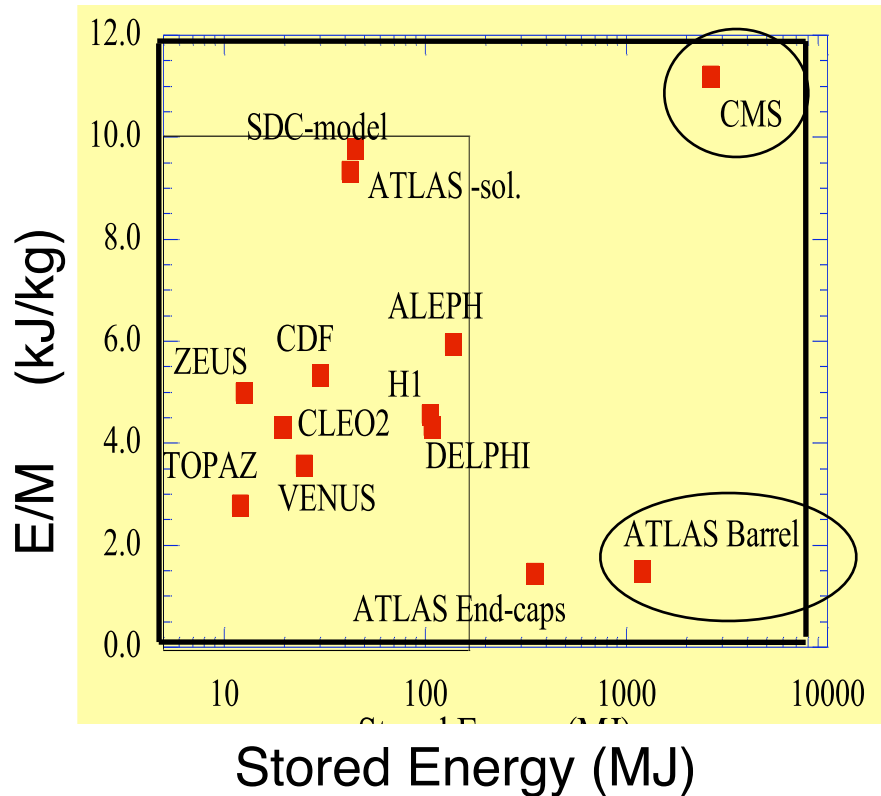
Aimants - Champ Magnétique

$p \nearrow \Rightarrow B$ doit augmenter

$B \nearrow \Rightarrow$ La puissance stockée

dans l'aimant augmente

Depuis LEP, aimants supraconducteurs



J. Virdee

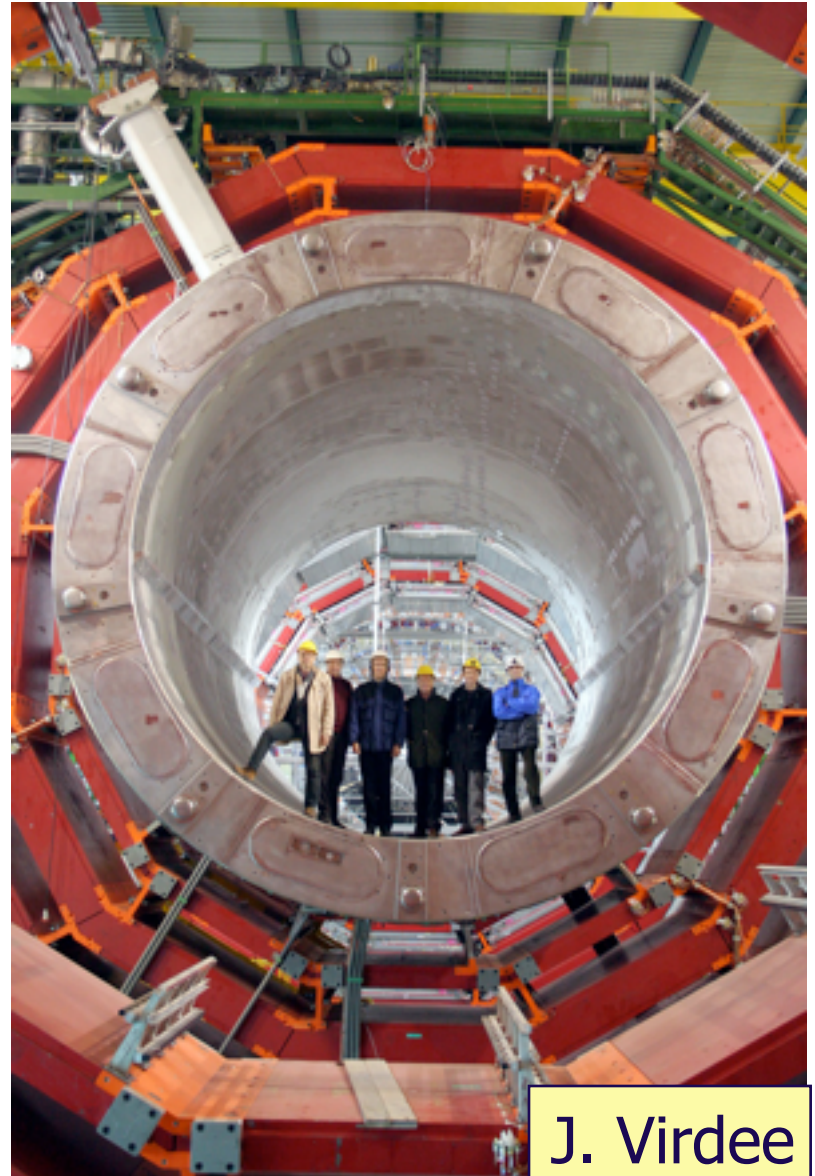
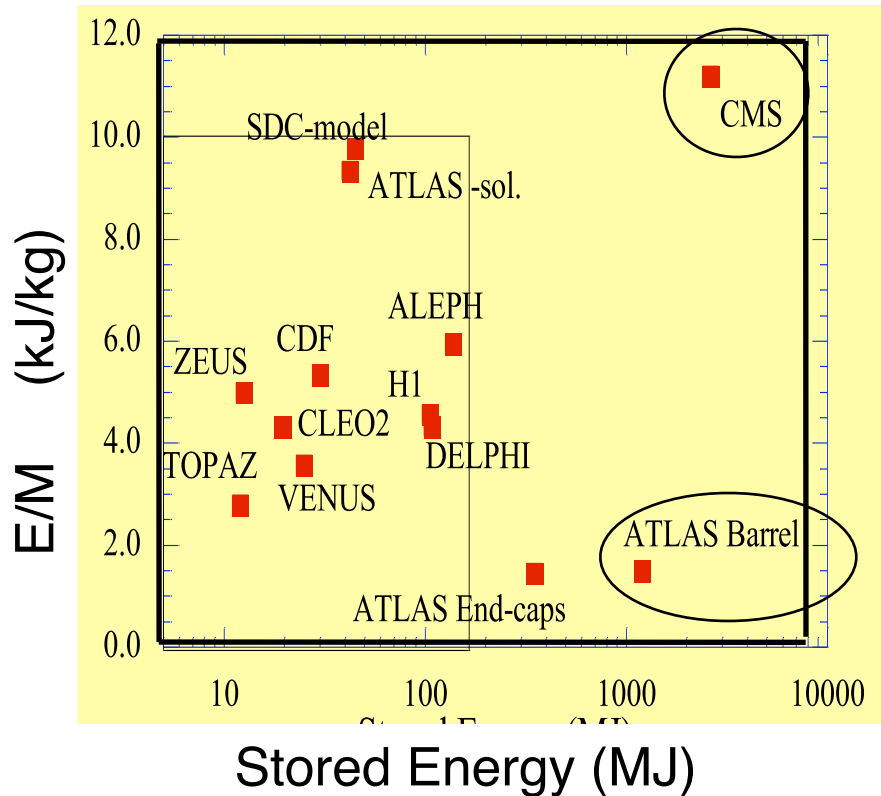
Aimants - Champ Magnétique

$p \nearrow \Rightarrow B$ doit augmenter

$B \nearrow \Rightarrow$ La puissance stockée

dans l'aimant augmente

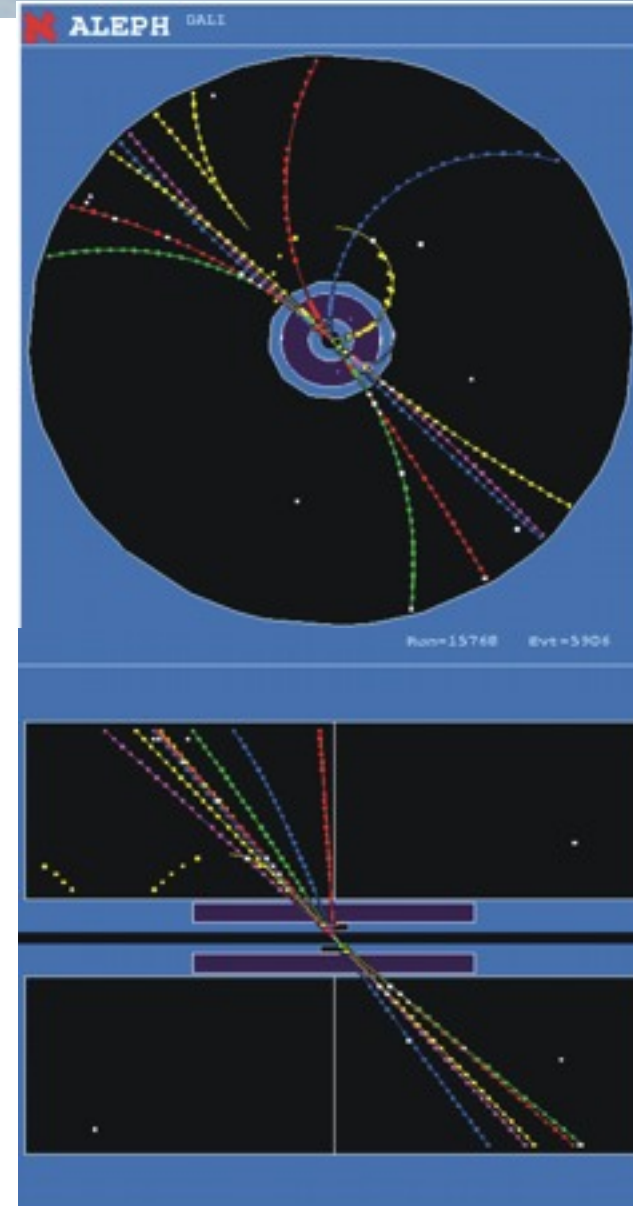
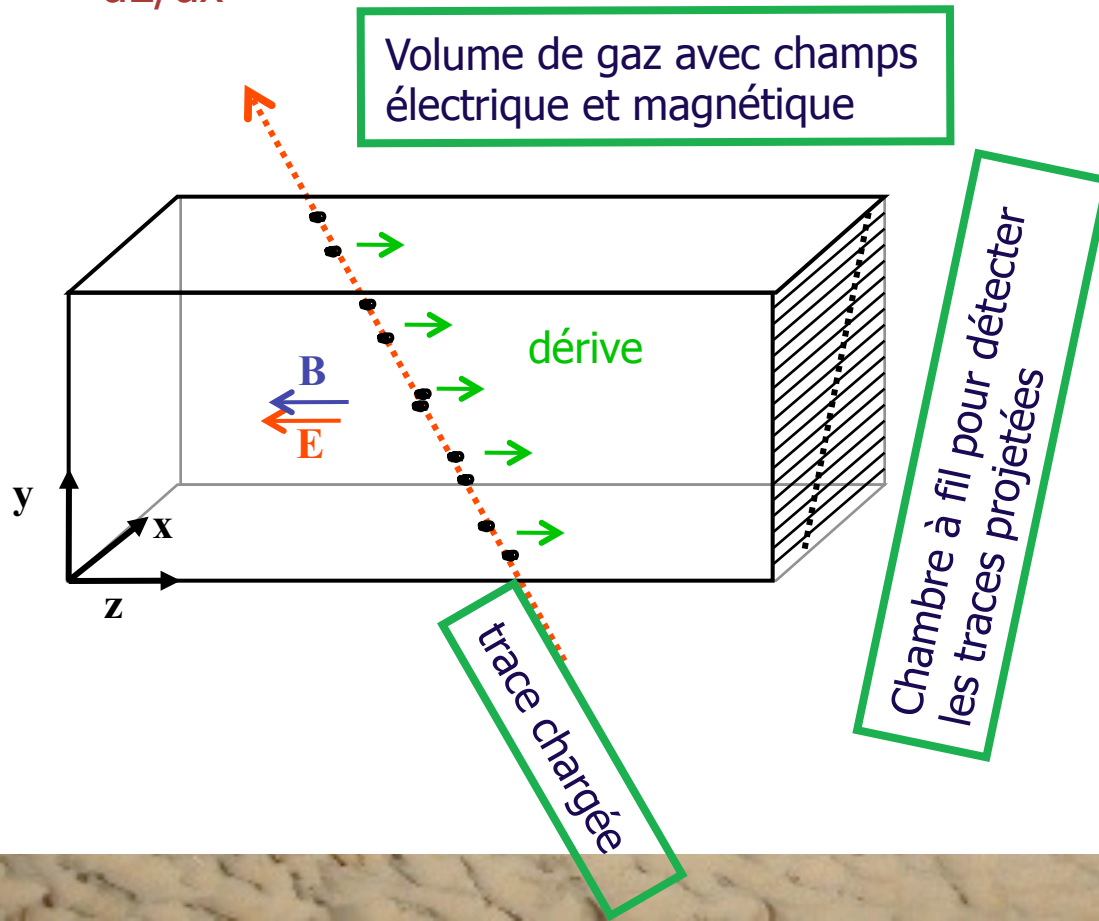
Depuis LEP, aimants supraconducteurs



J. Virdee

Chambre à Projection Temporelle (TPC)

- Grand volume actif avec reconstruction 3D
 - x-y avec les chambres à fils + cathodes des MWPC
 - z avec le temps de dérive
 - dE/dx



Performance typique détecteur de traces

- Résolution en impulsion (μ, π)

$$\frac{\sigma(p_T)}{p_T} \approx 3.6 \times 10^{-4} \cdot p_T (\text{GeV}) \oplus \frac{1.3 \times 10^{-2}}{\sqrt{\sin \theta}}$$

- Détermination du point d'impact

$$\sigma(d_0) \approx 11 \oplus \frac{73}{p_T \sqrt{\sin \theta}} (\mu\text{m})$$

p_T	50 GeV/c	100 GeV/c	1 TeV/c
$\sigma(p_T)/p_T$	2.2%	4%	36%
p_T	0.5 GeV/c	5 GeV/c	100 GeV/c
$\sigma(d_0)$	150 μm	23 μm	11 μm

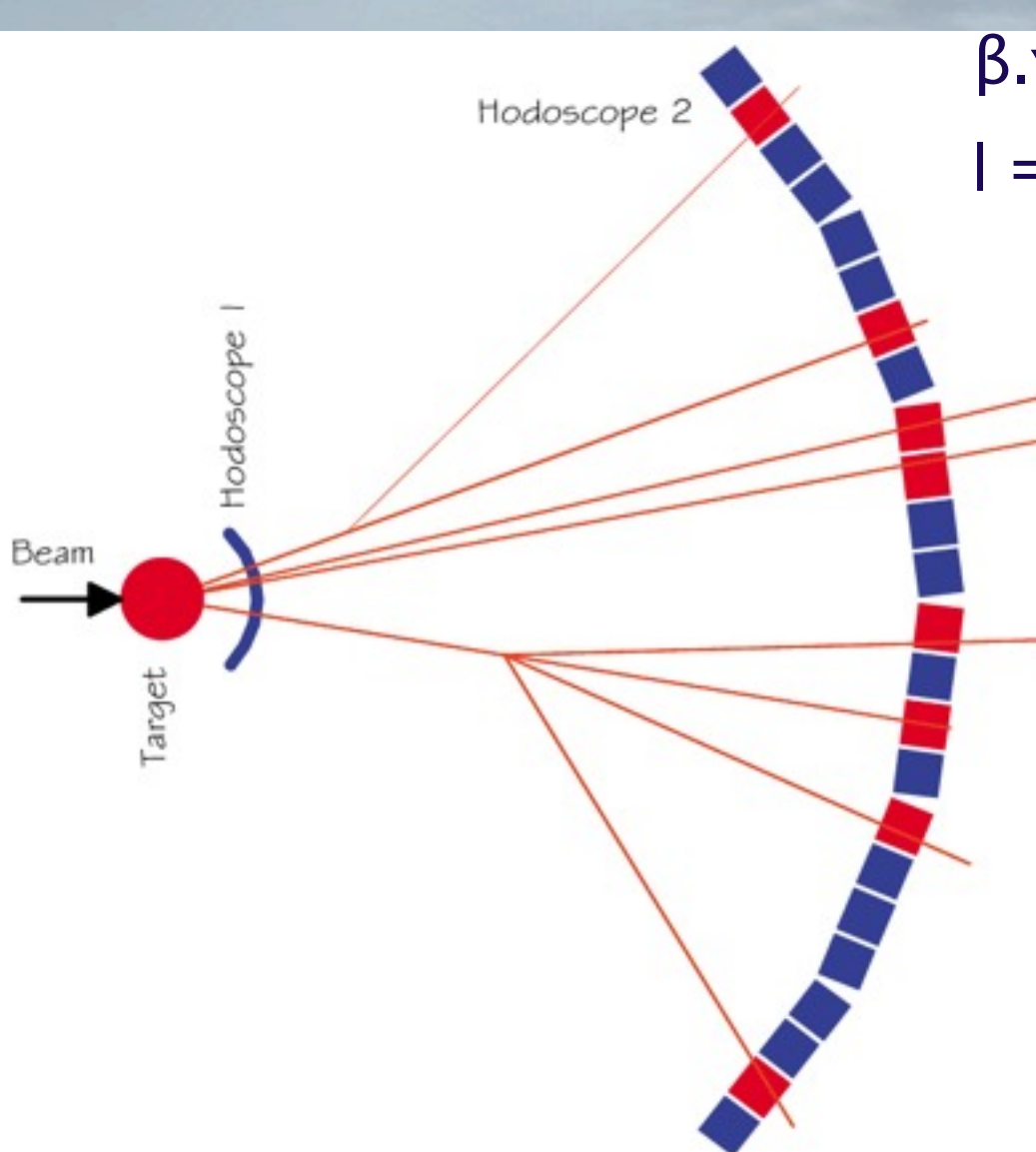
- Détermination de la charge

- misidentification <2% (5%) pour des μ (électrons) à $p_T=1\text{TeV}$

Identification des particules

- La nature des particules produites est un indice très important pour comprendre l'interaction qui s'est produite:
 - masse
 - charge électrique
- On exploite les différentes propriétés de chaque particules pour les identifier:
 - e/μ : tous deux des leptons (interaction faible & em) mais $m_\mu \approx 200 \times m_e$
 - e/π : tous deux chargés, mais interactions différentes: em vs had, $m_\pi \approx 200 \times m_e$
 - π/K : masse différentes
- Méthodes
 - Temps de vol (masse)
 - dE/dx (masse)
 - Čerenkov
 - Forme des impacts (type d'interaction).....

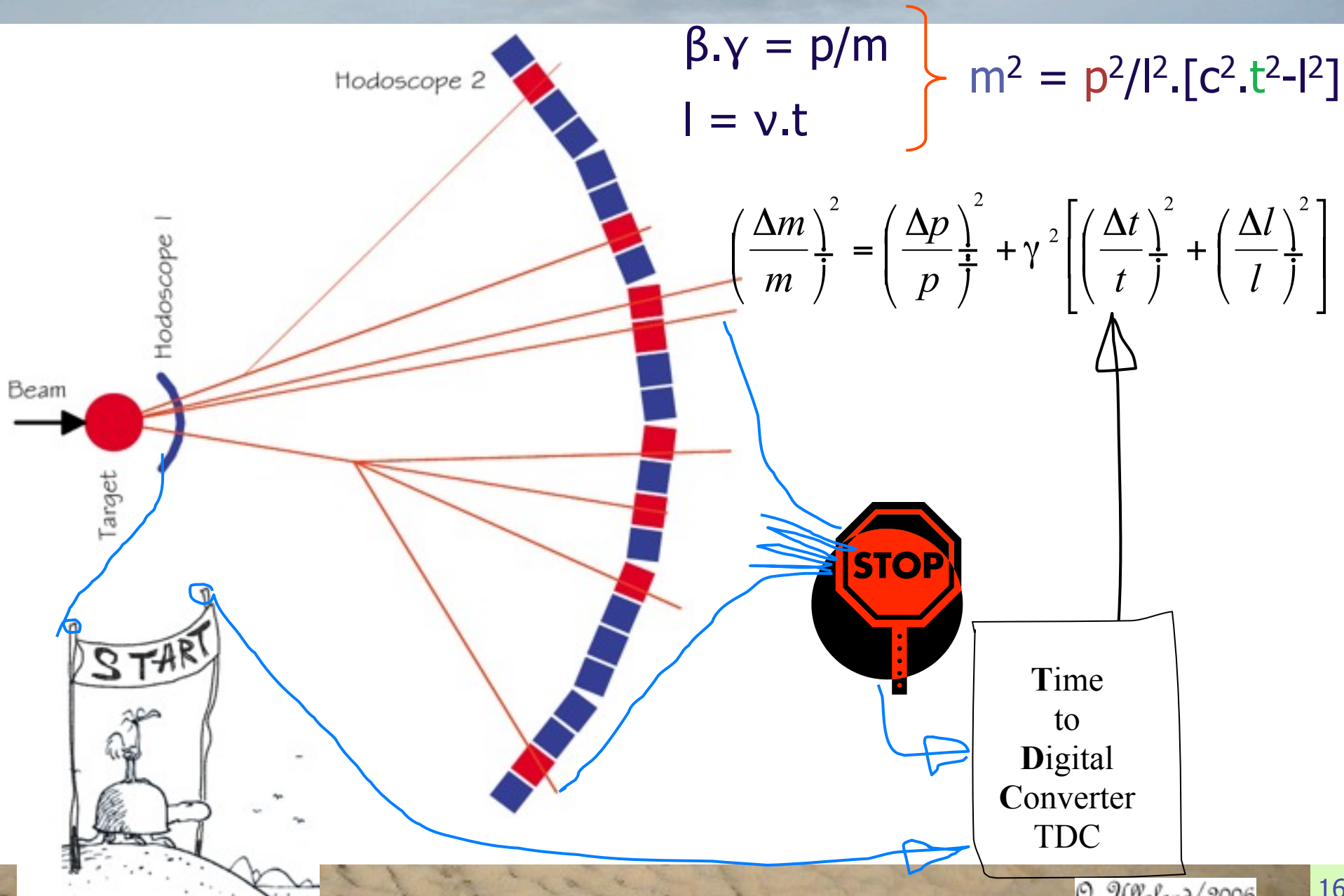
Mesure du temps de vol



$$\left. \begin{aligned} \beta \cdot \gamma &= p/m \\ l &= v \cdot t \end{aligned} \right\} m^2 = p^2/l^2 \cdot [c^2 \cdot t^2 - l^2]$$

$$\left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2 = \left(\frac{\Delta p}{p} \right)^2 + \gamma^2 \left[\left(\frac{\Delta t}{t} \right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 \right]$$

Mesure du temps de vol



$$\beta \cdot \gamma = p/m$$

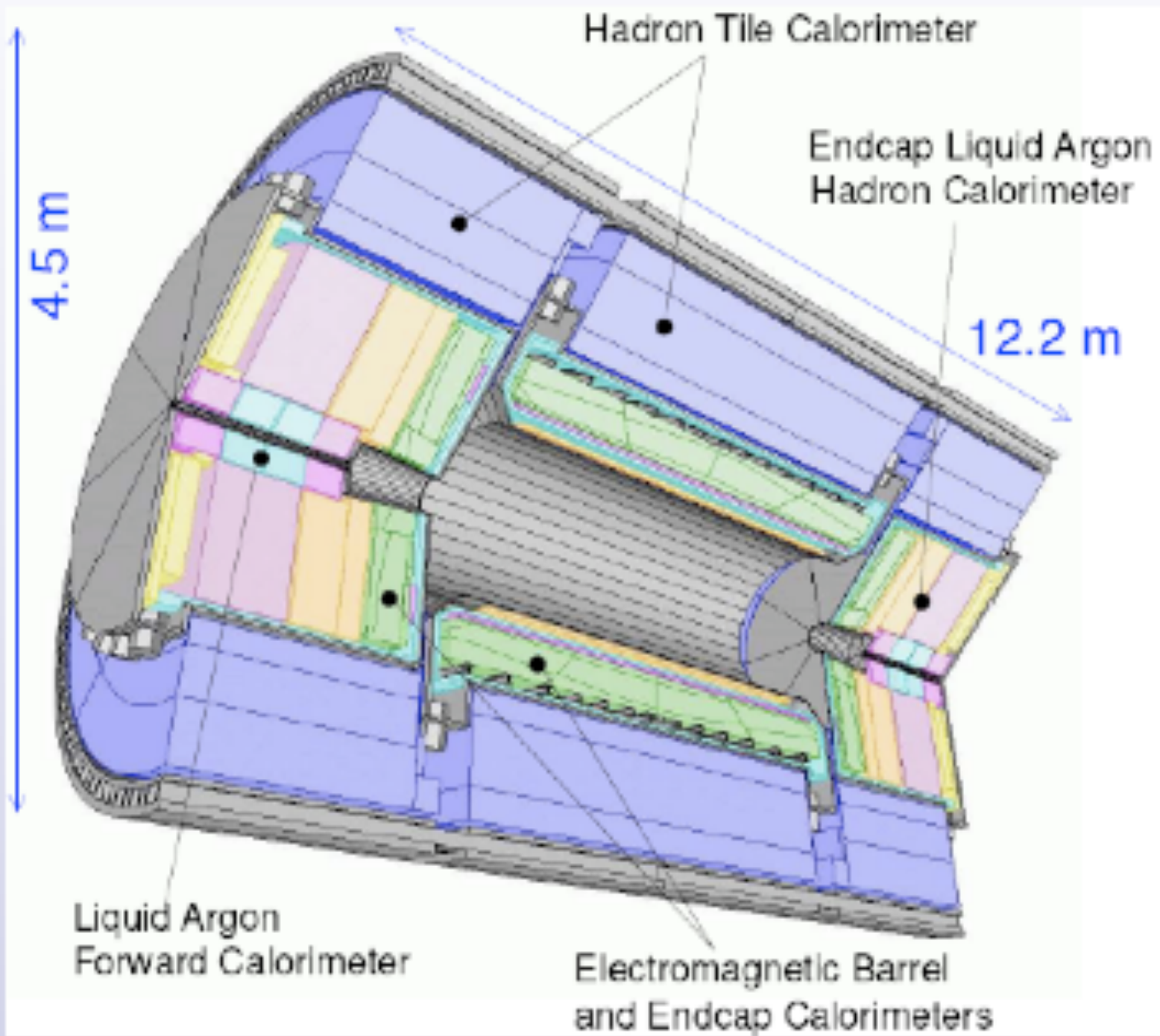
$$l = v \cdot t$$

$$m^2 = p^2/l^2 \cdot [c^2 \cdot t^2 - l^2]$$

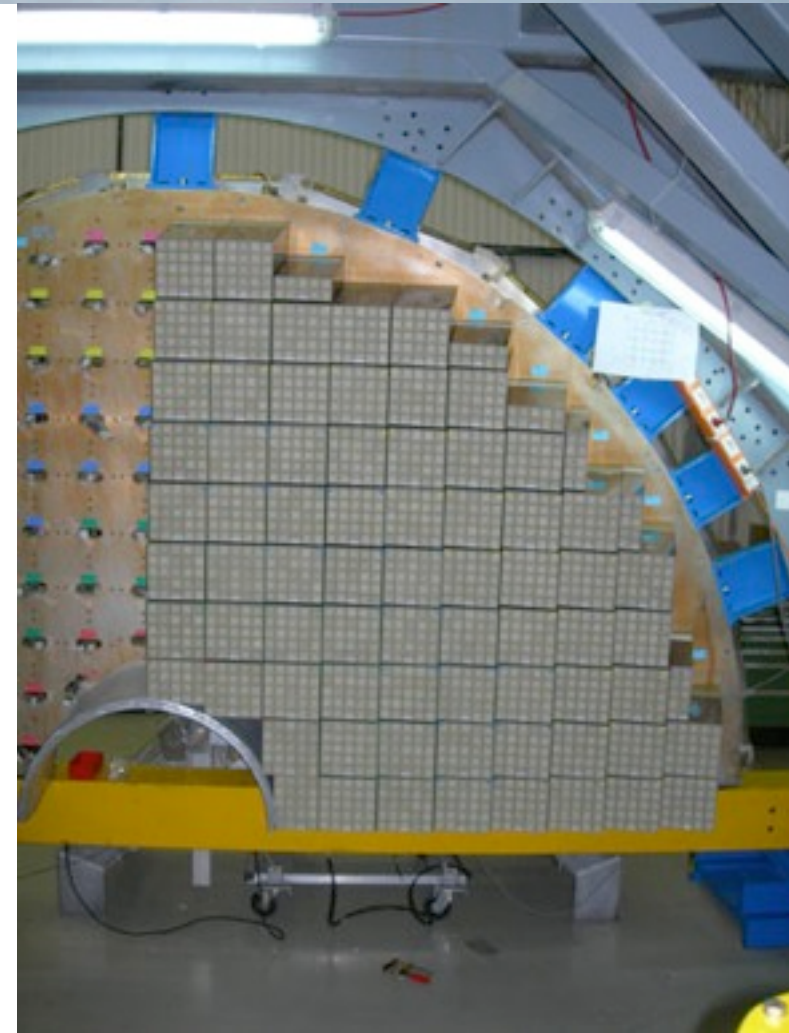
$$\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 = \left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2 + \gamma^2 \left[\left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 \right]$$

Calorimètres

- Les calorimètres mesurent l'énergie déposée par la particule incidente alors qu'elle interagit dans la matière
- Les calorimètres arrêtent les particules sauf celles qui interagissent très peu: muons & neutrinos
- Ils ont été conçus pour mesurer les neutres: γ , π^0
- Ils doivent suffisamment profonds pour contenir tous les produits de l'interaction
 - ⇒ ils sont placés après le trajectographe
- Deux rôles:
 - Faire interagir les particules
 - Collecter l'énergie déposée
- Deux types d'interactions:
 - électromagnétique
 - hadronique



Calorimètres

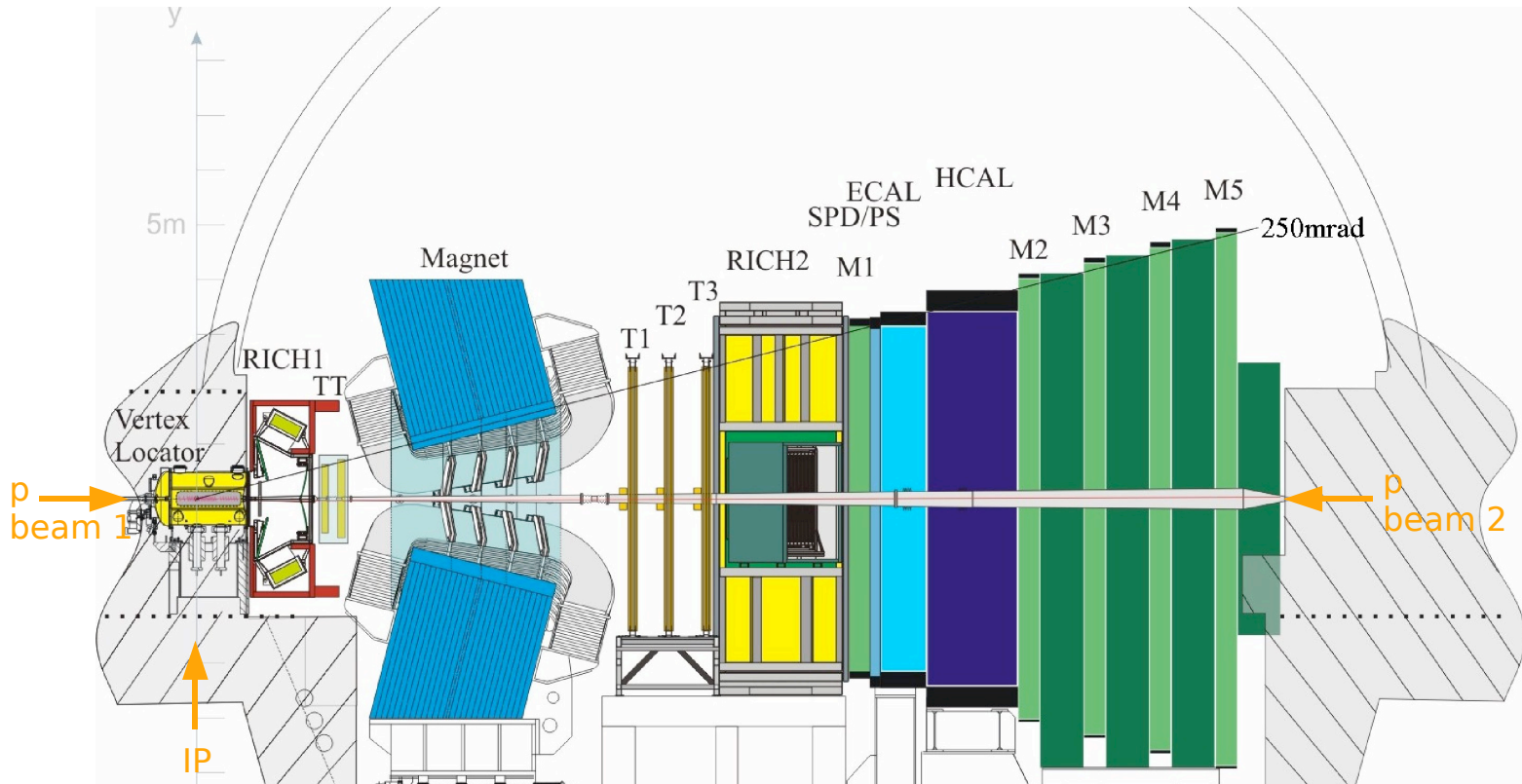


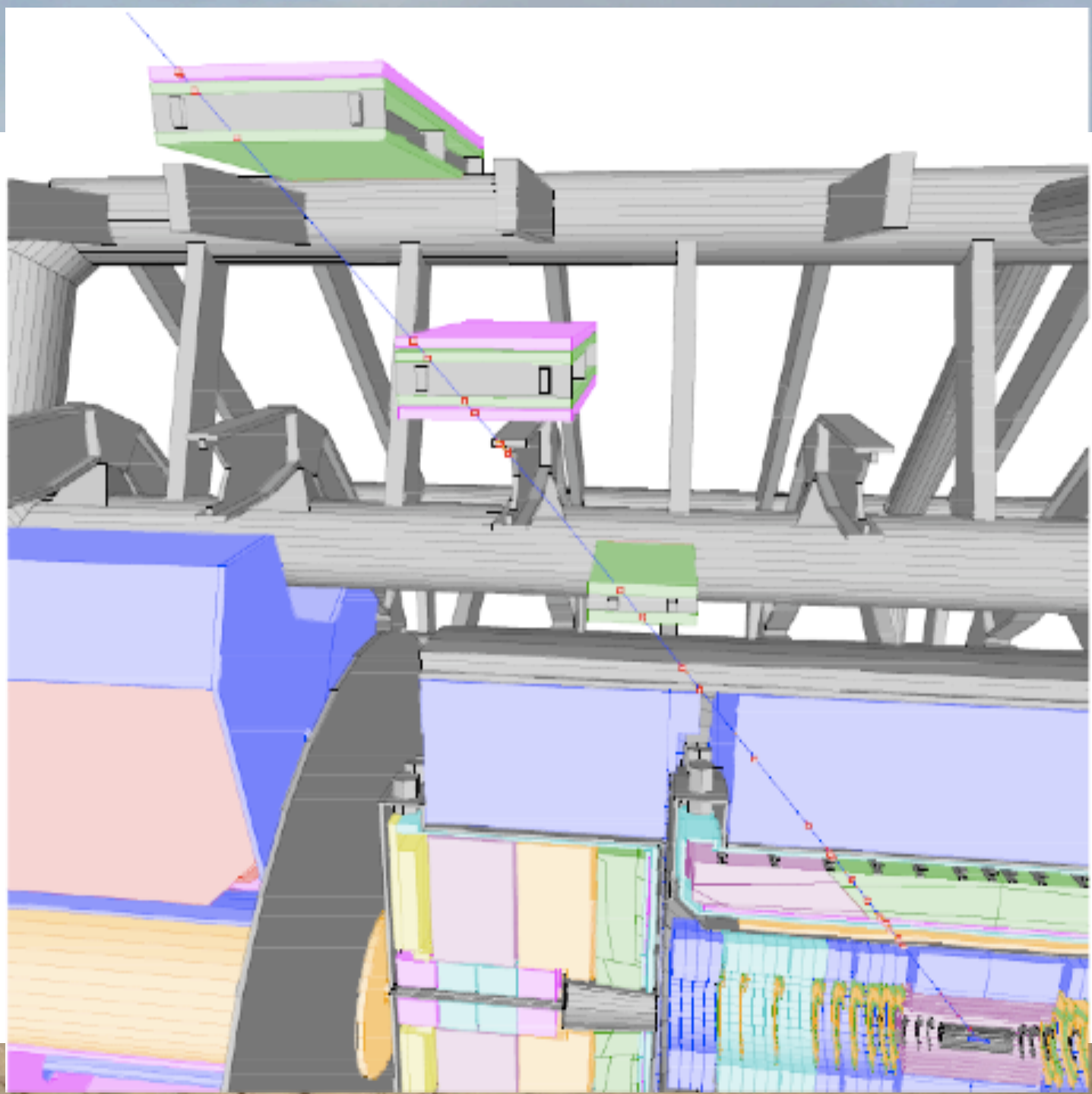
Performances typiques des calorimètres

- Résolution en énergie: $\Delta E/E \sim a/\sqrt{E} \oplus c \oplus b/E$
 - e^\pm, γ : $\sim\%$ à 100 GeV
 - jets: $\sim 10\%$ à 100 GeV
- Linéarité: $\sim \text{‰} - \%$
- Identification des particules: Séparation électromagnétique/hadronique
- Résolution en temps: 100ps-1ns

Détecteurs de muons

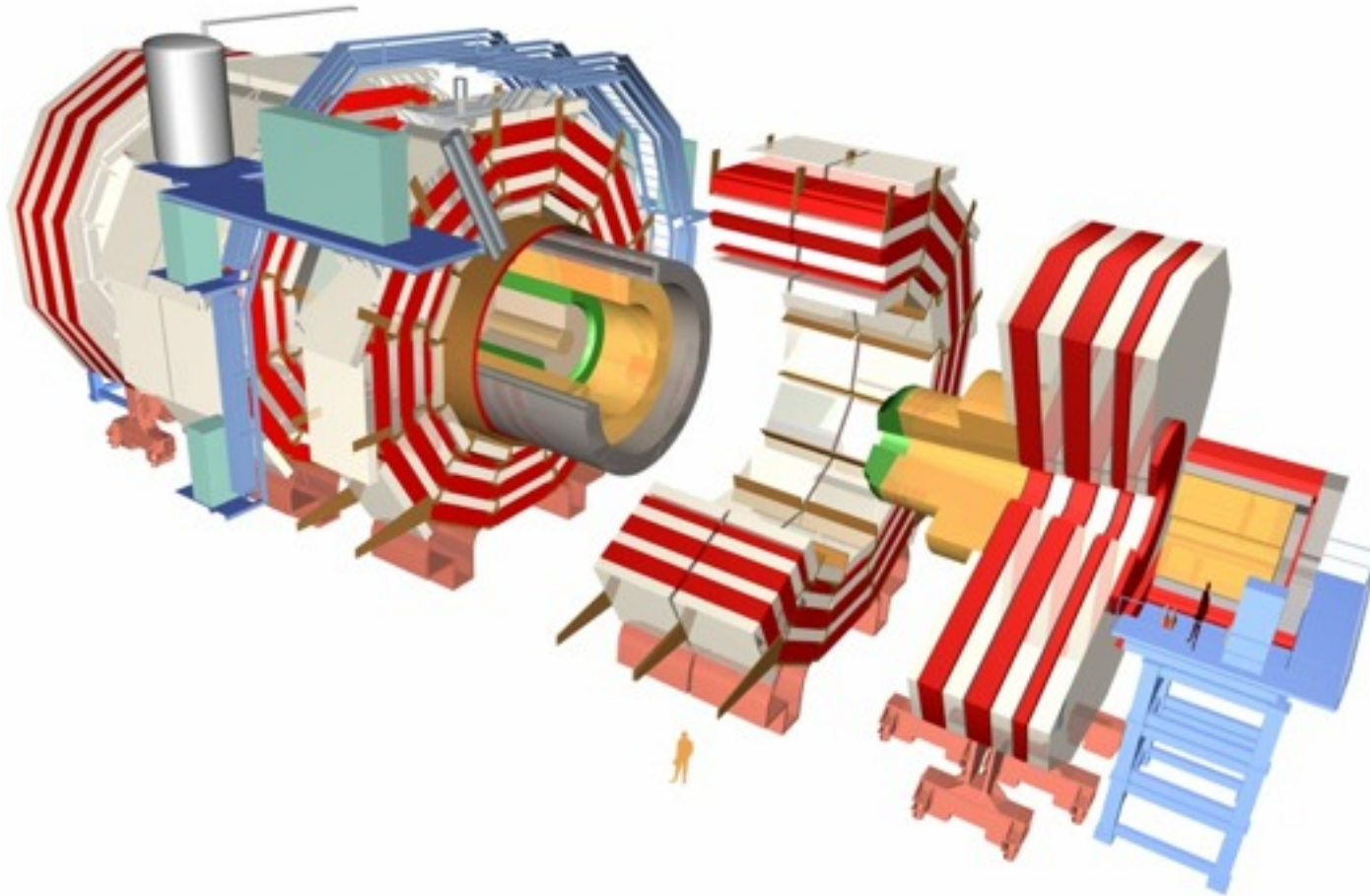
- Seuls les muons et les neutrinos ont échappé aux calorimètres
- Les muons sont chargés et peuvent donc être détectés en sortie du calorimètre





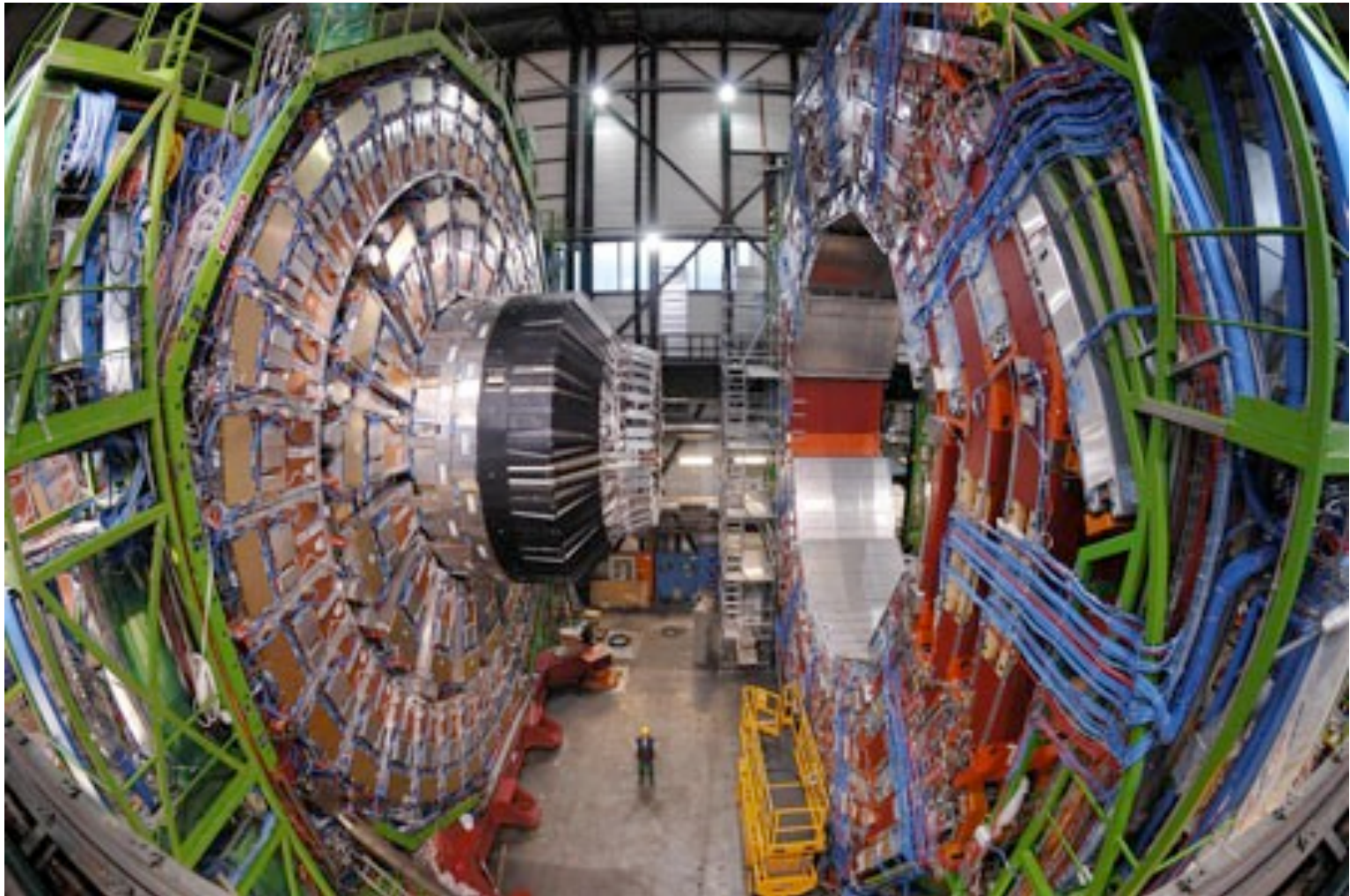
Détecteur à muons

- Avec un champs magnétique, on peut aussi mesurer l'impulsion des muons



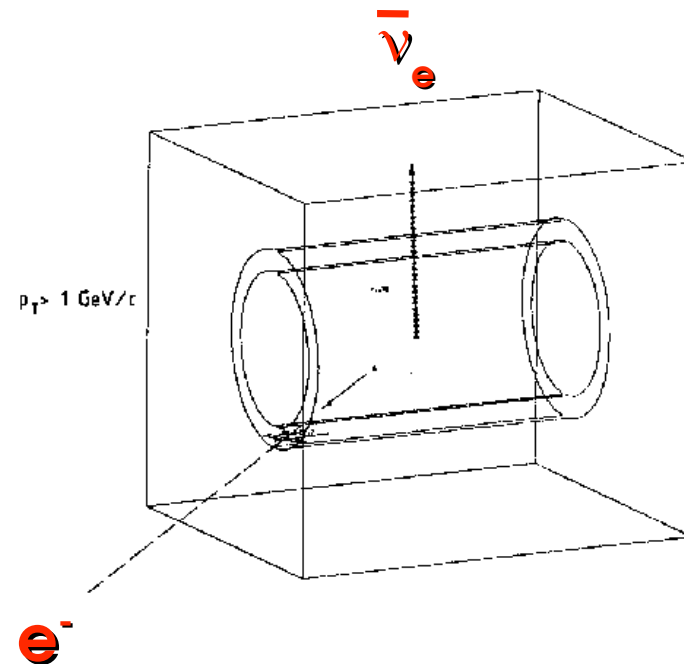
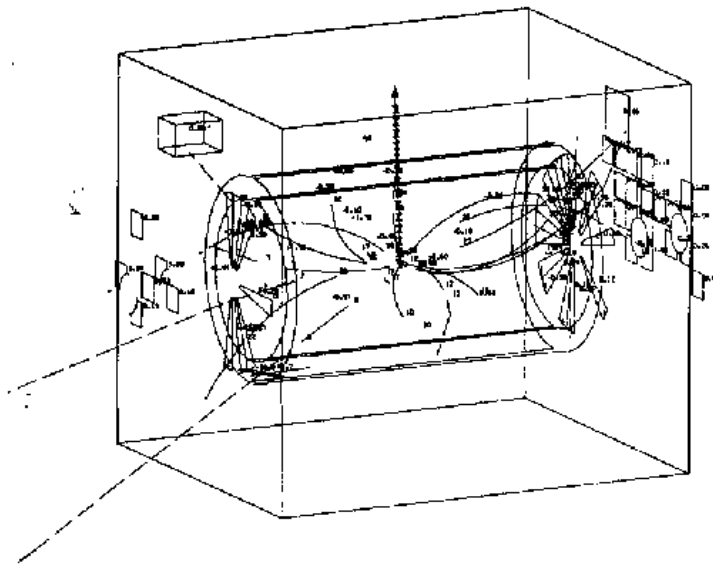
Détecteur à muons

- Avec un champs magnétique, on peut aussi mesurer l'impulsion des muons



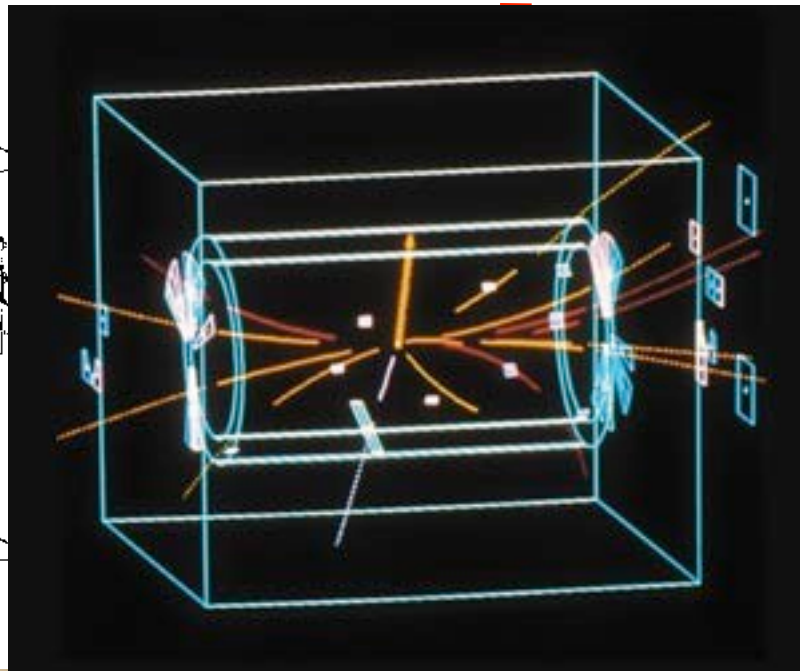
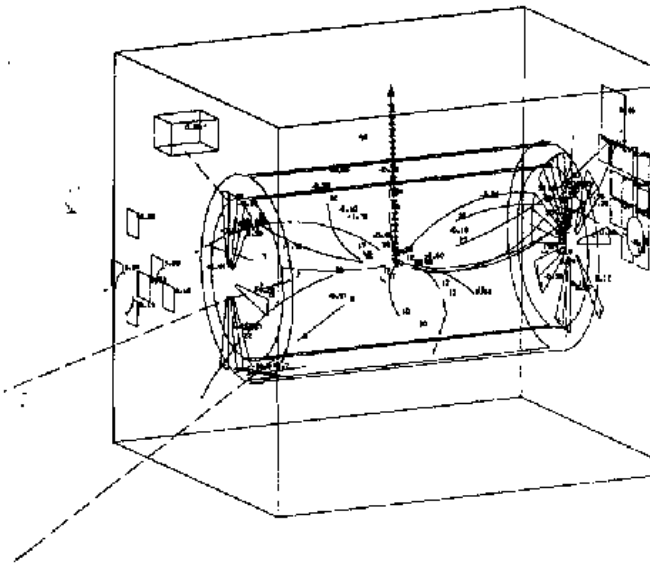
Herméticité

- Seuls les neutrinos ont échappé à tous ces détecteurs.
- Avec un détecteur étanche on pourrait mesurer l'énergie emportée par les neutrinos ou autre nouvelle particule.
- On peut mesurer l'énergie perdue dans la direction transverse aux faisceaux (E_T^{miss})
- Exemple: la découverte du boson W en 1983: un électron + de l'énergie transverse manquante



Herméticité

- Seuls les neutrinos ont échappé à tous ces détecteurs.
- Avec un détecteur étanche on pourrait mesurer l'énergie emportée par les neutrinos ou autre nouvelle particule.
- On peut mesurer l'énergie perdue dans la direction transverse aux faisceaux (E_T^{miss})
- Exemple: la découverte du boson W en 1983: un électron + de l'énergie transverse manquante



Points clés de l'herméticité

- Cables
- Angles d'incidence



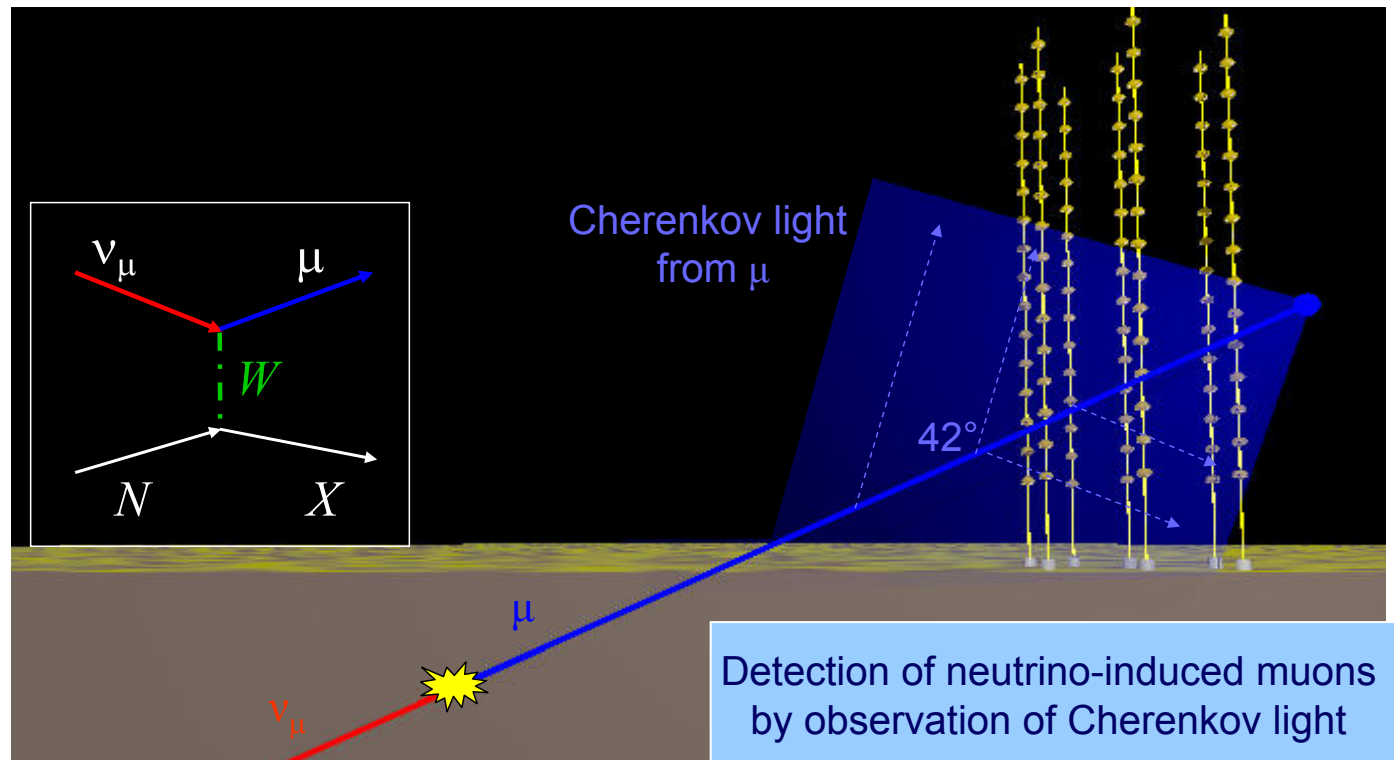
Hors accélérateur

- Depuis la terre, depuis l'espace, sous la mer, sous la glace, en ballon, dans l'hémisphère Nord, dans l'hémisphère Sud pour détecter:
 - Rayons cosmiques (AUGER,...)
 - Neutrino solaires, atmosphériques (ANTARES)
 - Rayonnement (HESS, CTA)
 - La matière noire (AMS,.....)
 - L'anti-matière (AMS)
- Ces détecteurs utilisent des techniques semblables à celles utilisées auprès des accélérateurs et récoltent l'ionisation ou l'énergie d'excitation de la matière

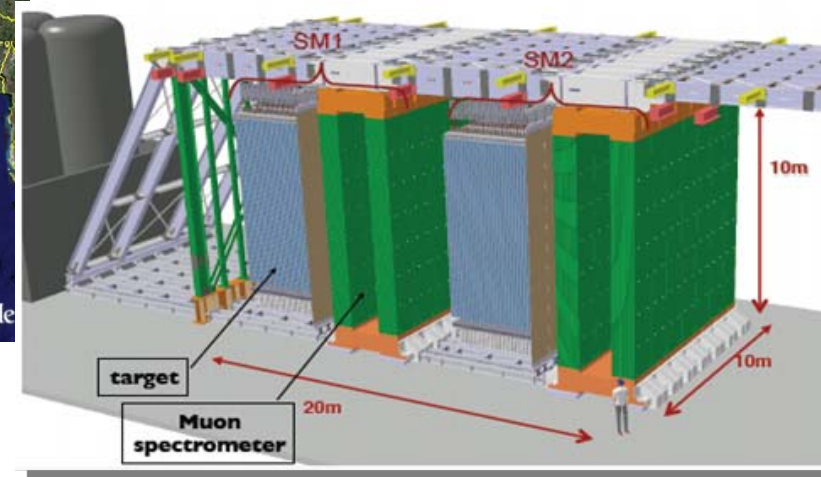
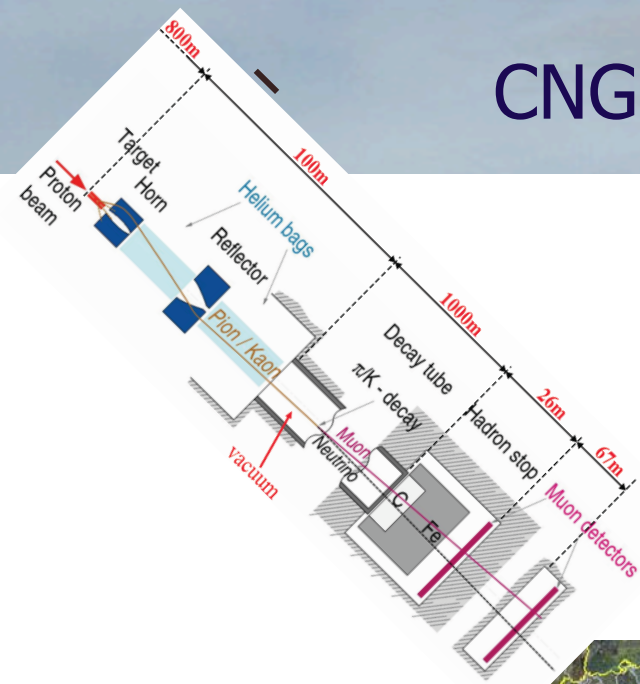
Expériences neutrino

- Les neutrinos interagissent peu mais ils sont traqués depuis des décennies
 - auprès des centrales nucléaires
 - en provenance de l'espace
 - en provenance du soleil

Detection principe



CNGS+Gran Sasso + OPERA



La mécanique

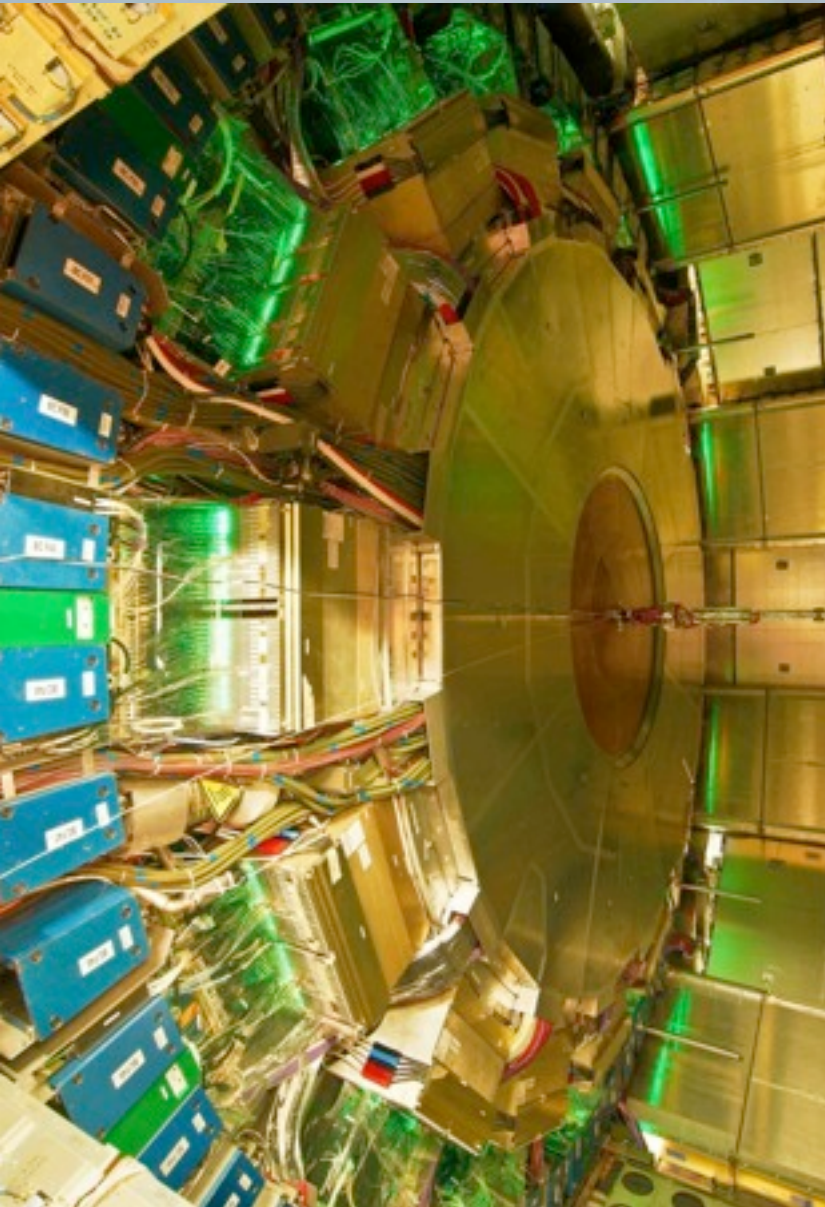
- **Spécifications**

- robuste & transparente
- Aligner les composants à qqes μm
- 7000 tonnes positionnées à $100\mu\text{m}$
- coordination entre les différents éléments
- tenue aux radiations
- installation dans les zones expérimentales

Cours de Michel Raymond



L'électronique

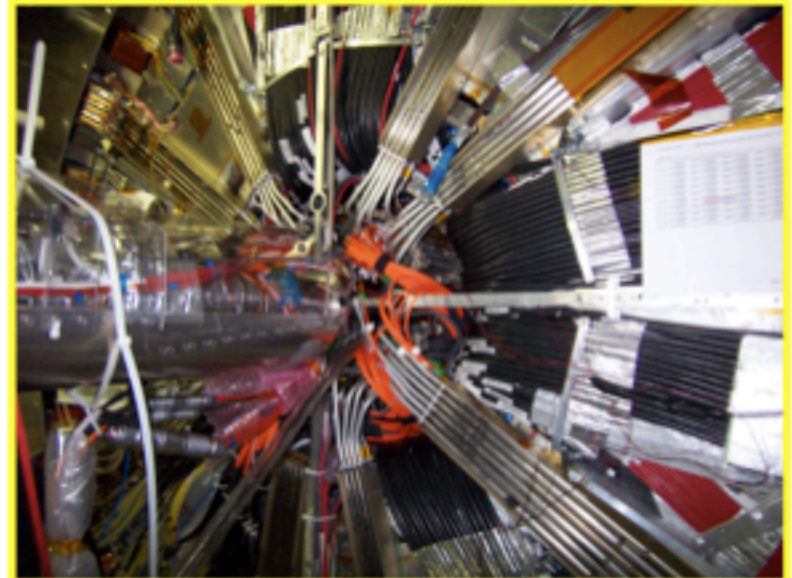
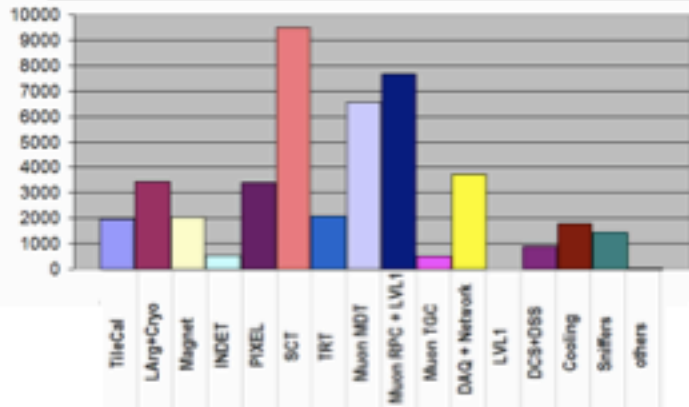


- Lecture des signaux induits dans les détecteurs
 - Analogique - Numérique
 - Embarquée (espace, sous-marine, dans les cavernes LHC)
 - Frontend - Backend
- Dans presque tous les cas:
 - Bas bruit
 - Rapide
 - Basse consommation
- Conditions extrêmes
 - Radiations
 - Températures
 - Longue durée de vie
- Toujours le coût

Cours de Christophe de la Taille

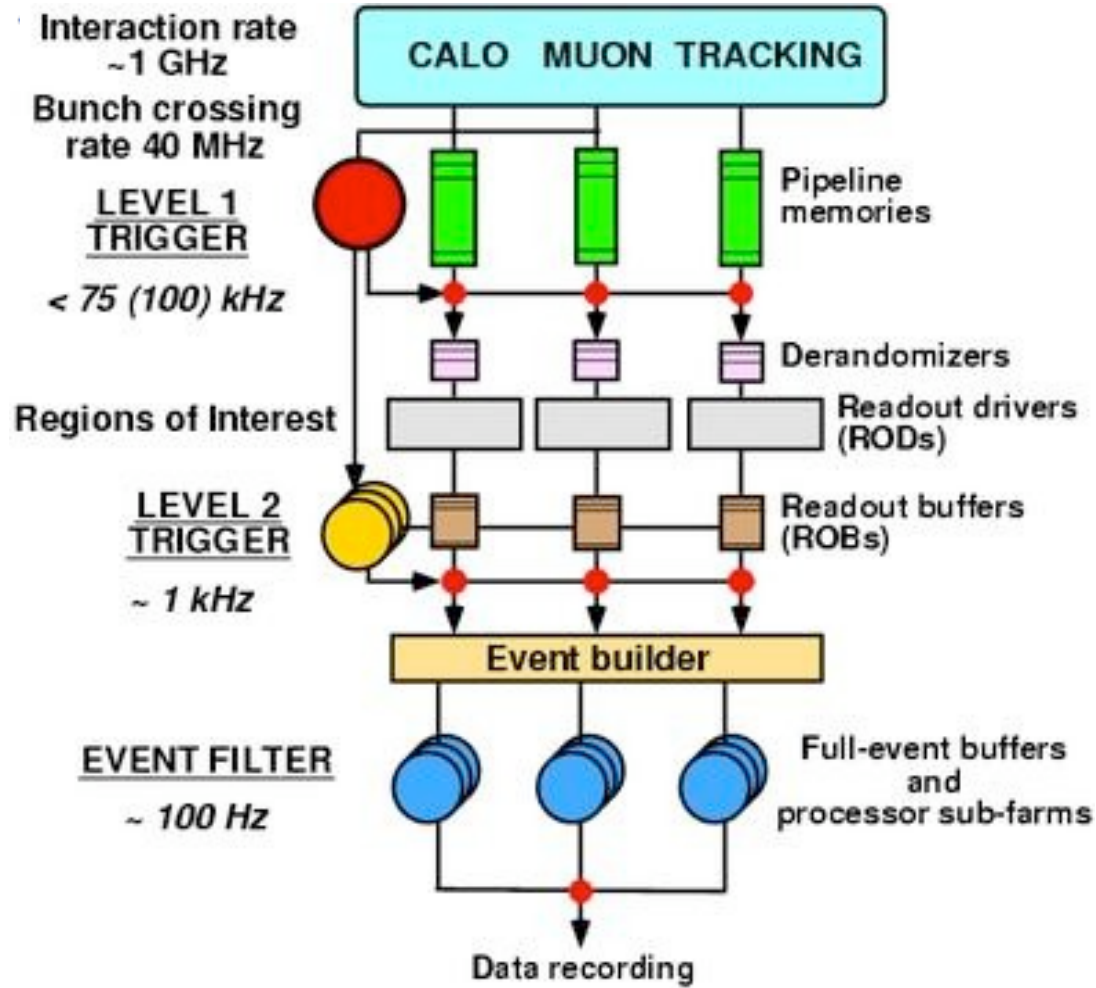
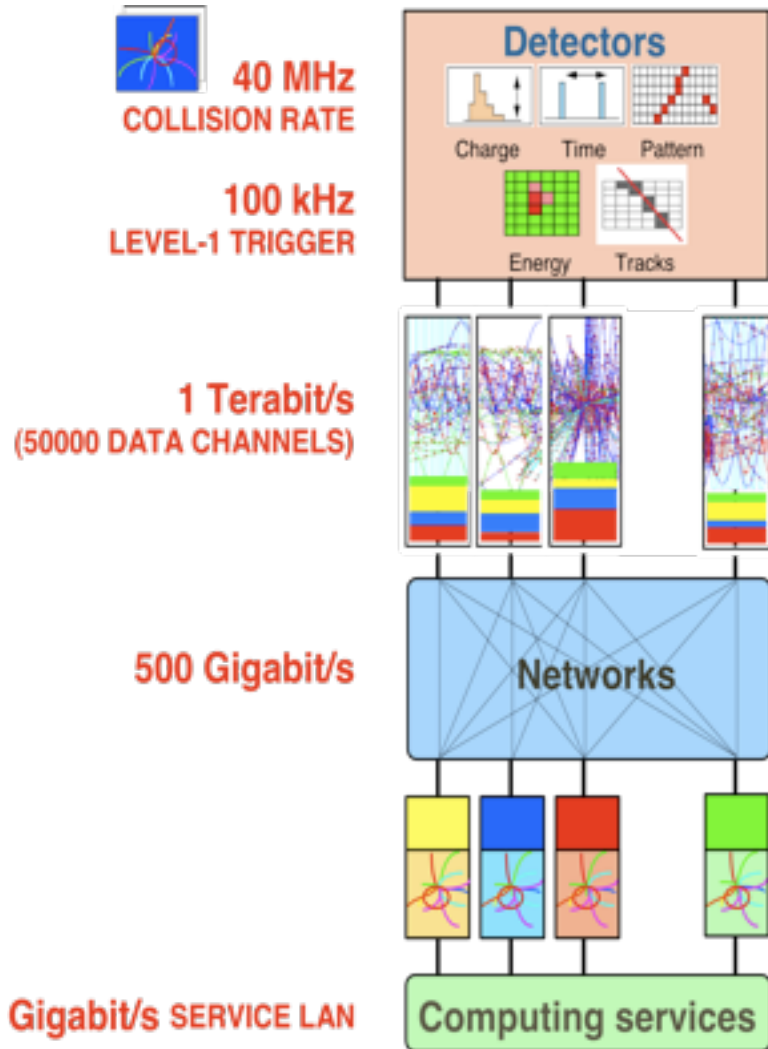
Installer et cabler

> 50000 cables and pipes installed



T. Virdee, I

Le déclenchement



De la conception à l'exploitation

