

Mesurer l'infiniment petit, Observer l'infiniment grand

– 2^{ème} partie –

Les détecteurs pour la physique des particules

David Attié

Rencontres de physique de l'infiniment grand à l'infiniment petit

Double-Chooz

ALICE

Fiducielles

TISS

HERN

CMC

Dark Matter

SPH

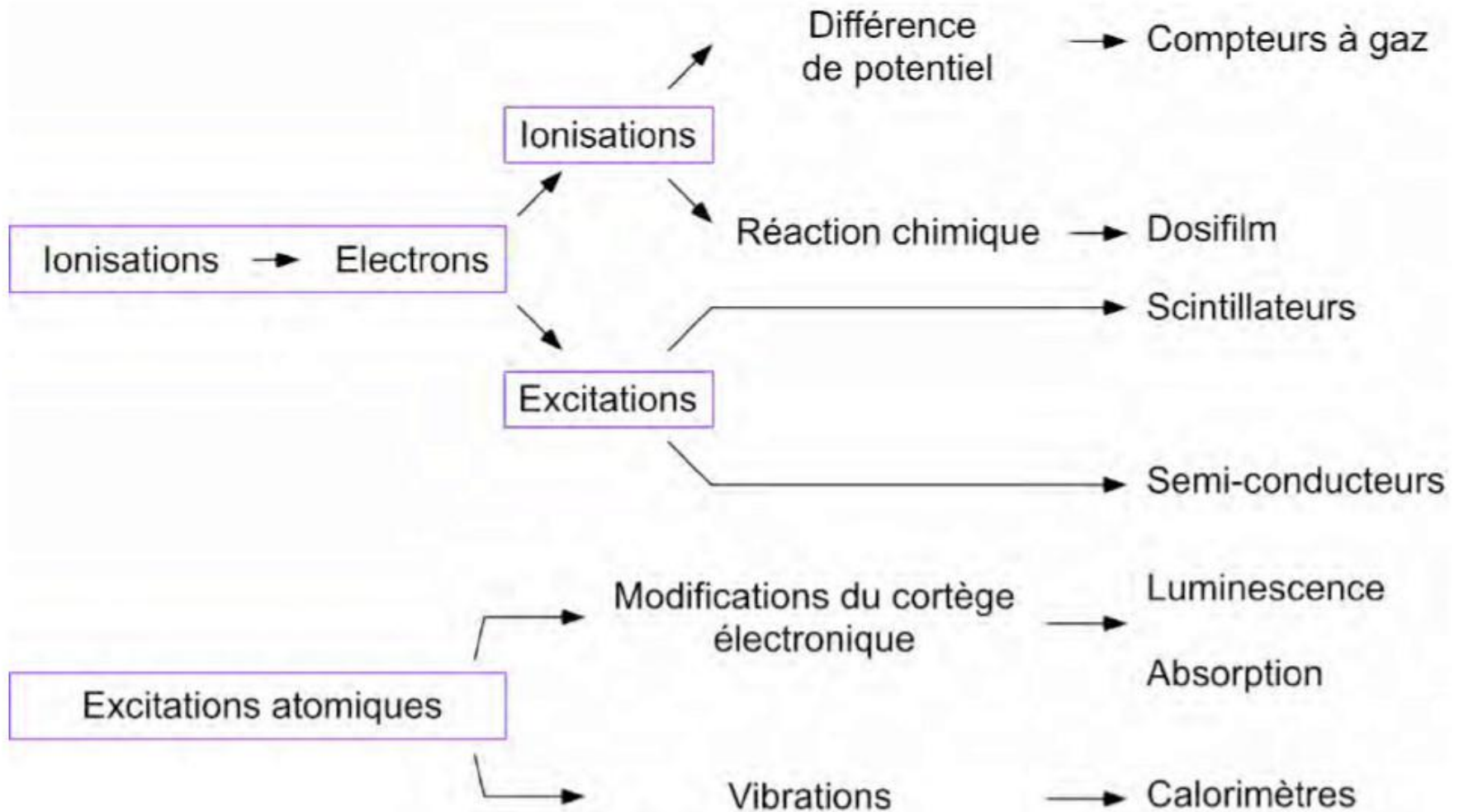
23 juillet 2012

- Introduction
- Famille de détecteurs pour la physique des particules
- Mesure d'énergie selon leur domaine
- Résolutions et temps morts des détecteurs
- Détecteur gazeux
- Détecteurs solides
- Exemple avec les détecteurs au LHC

Détecteur idéal ?

- **Efficacité** : flux détecté/flux incident, >99% selon les sous-détecteurs et les traces recherchée (éviter les faux evts)
- Bonne **résolution** sur : l'énergie E, la position → le moment, ...
- Eviter les zones mortes et les temps morts (électronique et récupération rapide).
Au LHC, : croisement p-p toutes les 25ns soit 40MHz
- **Stabilité** de fonctionnement : fixer les tensions, % de gaz, température, ...
- Une **granularité** adaptée : éviter la superposition des événements/des traces
- Le moins de matière avant les calorimètres ($\leq 0.5X_0$ soit 4 cm d'aluminium) : tenir compte des câbles, de la structure mécanique, du refroidissement, ...
- Pas de biais de détection entre particule/anti-particule sans charge. Important pour étude de symétrie.
- Faible ou **pas de vieillissement** dues aux radiations

Différents types de détecteurs



- Chaîne typique de mesure :

capteur

Amplificateur

Traitement

Affichage

Familles de détecteur de physique des particules

Identification

	Ionisation	Perte radiative	Ionisation
Particules	Détecteurs de traces	Calorimètres	Chambres à muons
Photon	Traverse sans interagir ni produire du signal, en général	Absorbé par les premiers matériau du calorimètre électromagnétique	N'atteint pas
Electron	Traverse en laissant une trace d'ionisation	Absorbé par les premiers matériau du calorimètre électromagnétique	N'atteint pas
Muon	Traverse en laissant une trace d'ionisation	Traverse en laissant une trace d'ionisation (faible dépôt d'énergie comparé aux gerbes)	Traverse en laissant une trace d'ionisation
Tau	Désintègre à proximité du point d'interaction, peuvent être détectés avec un détecteur de vertex de haute précision	N'atteint pas	N'atteint pas
Hadron chargé	Traverse en laissant une trace d'ionisation	Absorbé avec dépôt d'énergie sur toute la profondeur de matière	N'atteint pas

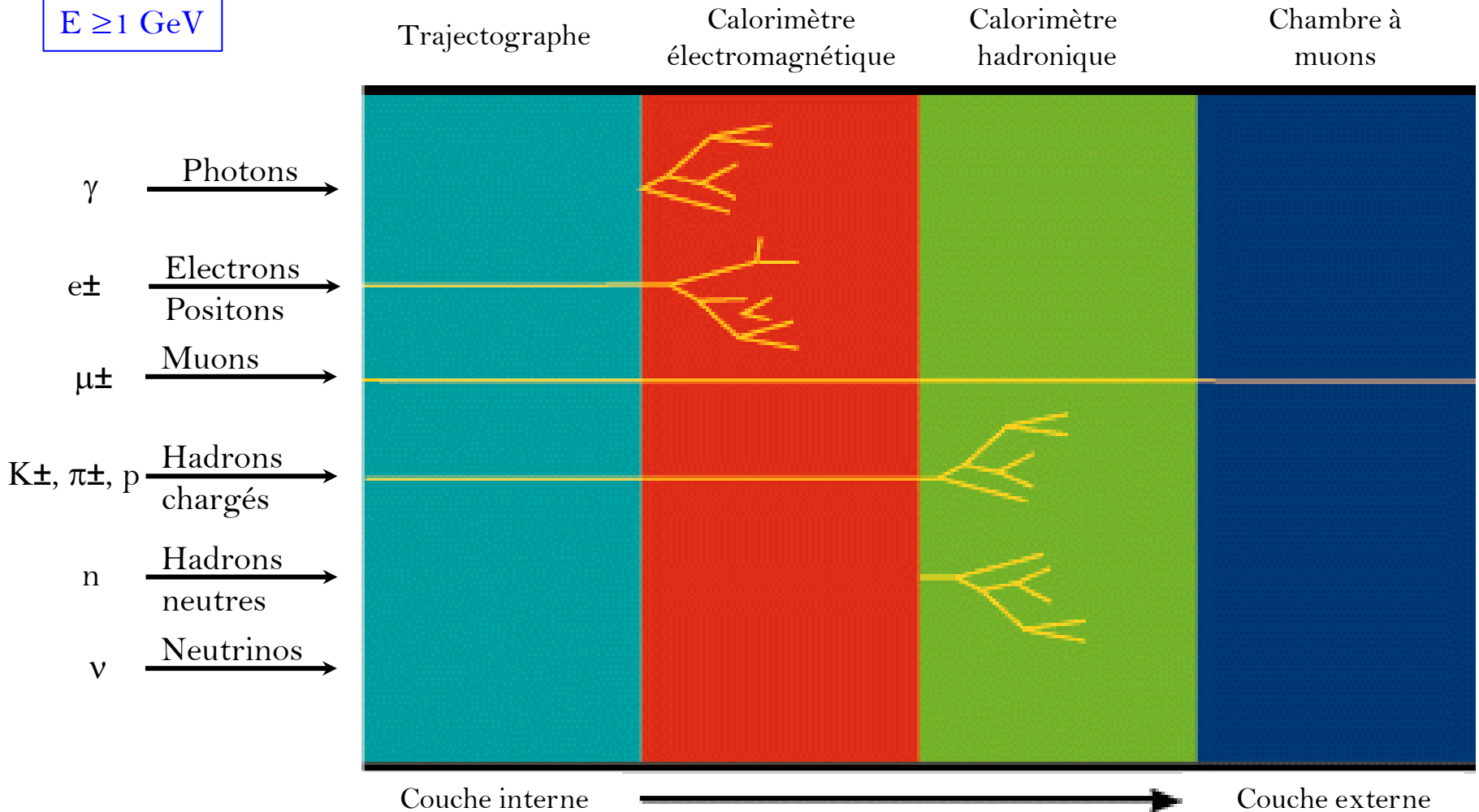
- Position
- Moment (B)
- Energie (dE/dx)

- Position
- Energie (dE/dx)

- Position

Familles de détecteur de physique des particules

$E \geq 1 \text{ GeV}$

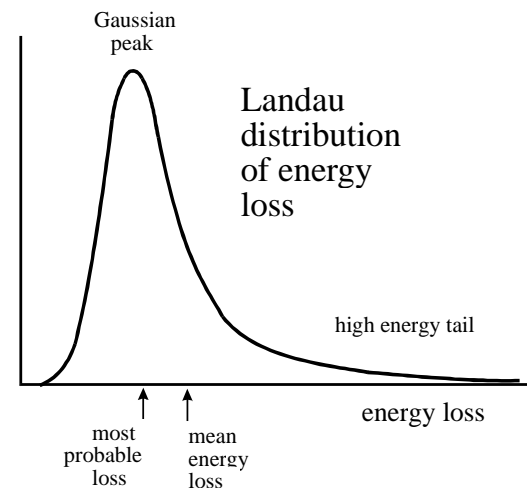


- En plus de détecter ces particules il faut différencier les couples :
 $K/\pi/p$, les π/e , les $e/\gamma+\pi$, les π^0/γ

Mesure de l'énergie selon leur domaine

Energie des particules	Moment (traces de particules chargées)	Calorimétrie
keV – MeV	Longueur de trace trop petite pour mesurer leur courbure	Absorption de l'énergie de la particule initiale
100 ^{aines} de MeV	Bonne mesure de la courbure dans un champ magnétique de ~ 2 à 4T	Erreurs relatives importante à cause des fluctuations de gerbes de particules
100 ^{aines} de GeV	Traces trop droite même avec un champ magnétique $> 4T$ Trajectoires longues	Erreurs relatives faibles

- Loi de Landau : décrit les fluctuations des pertes d'énergie de particules chargées traversant une fine couche de matière
- Faible largeur de la gaussienne \rightarrow meilleure estimation du dE/dx
- Valeur la plus probable est nettement moins élevée que la valeur moyenne
- Queue à haute énergie : si on augmente l'épaisseur du détecteur, la résolution dE/dx ne s'améliore pas beaucoup



Résolutions et temps morts de détecteurs

	Type de détecteurs	Résolution spatiale (μm , rms)	Résolution en temps	Temps mort
Détecteur gazeux	Chambre à étincelles	300	2 μs	100 ms
	Chambre proportionnelle	50-100	2 ns	200 ns
	Chambre à dérivation	50-100	2 ns	100 ns
	MPGD	30-40	< 10 ns	20 ns
	RPC	≤ 10	1-2 ns	-
Détecteurs liquides/solides	Chambre à bulle	10-150	1 ms	50 ms
	Chambre à argon liquide	175-450	~ 200 ns	~ 2 μs
	Emulsion	1	-	-
	Scintillateur	-	100 ps/n	10 ns
	Piste (silicium)	Largeur/(3 à 7)	Limité par la lecture	Limité par la lecture
	Pixel (silicium)	2	Limité par la lecture	Limité par la lecture

- Le dépôt d'énergie est \sim instantanée : ps dans liquide/solide, ns dans gaz
- Le temps de collection du signal est lié au temps de dérivation des porteurs
- Le choix de l'électronique détermine aussi le temps de collection du signal

Mesure du moment avec un détecteur de traces

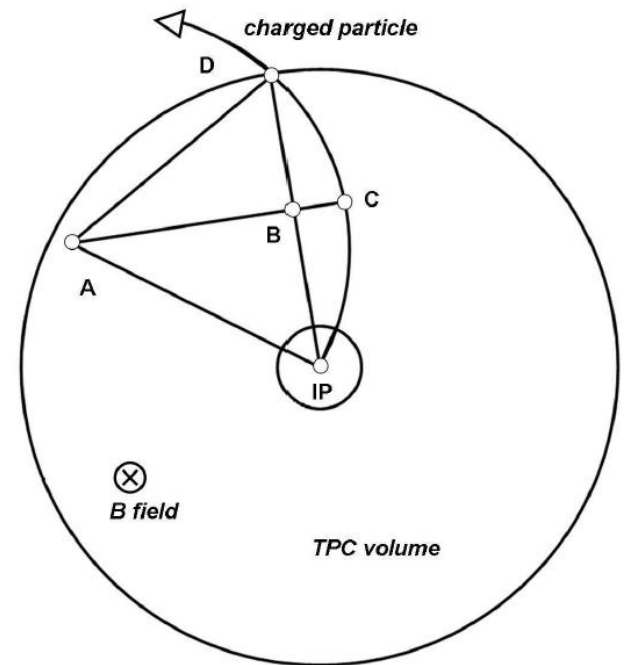
- Une particule de charge e et de moment (p_r, p_ϕ, p_z) traversant un détecteur de trace est courbée par un champ magnétique axial et uniforme $(0, 0, B_z)$ et décrit une trajectoire hélicoïdale. Dans le plan $(r\phi)$ la trajectoire projetée est un arc de cercle de rayon :

$$R = \frac{\sqrt{p_r^2 + p_\phi^2}}{eB} = \frac{p_t}{eB} = \frac{L^2}{8s}$$

Où L est le rayon externe de la chambre (TPC) et $s=BC$ la **sagitta** de la trace projetée

- La valeur du **moment** est donc :

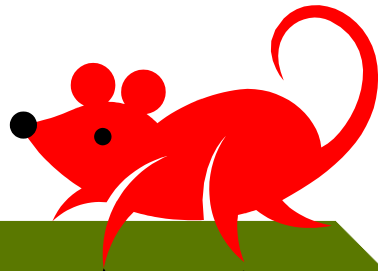
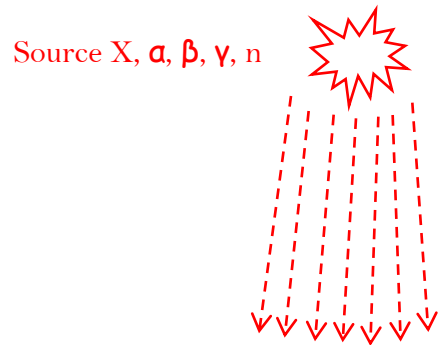
$$p_t = \frac{eBL^2}{8s}$$



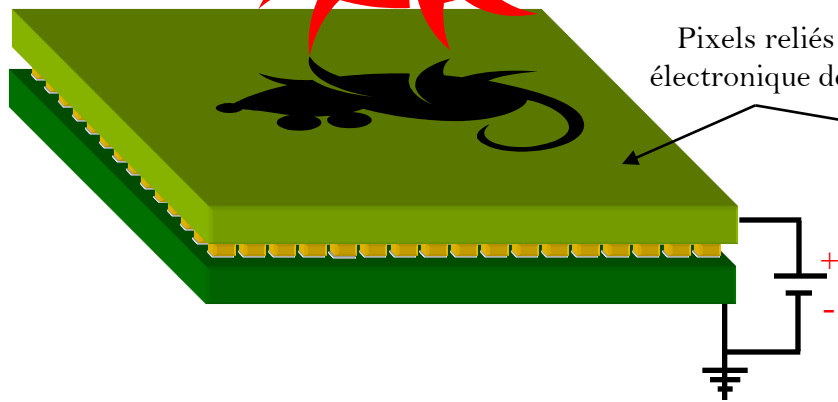
Détecteur solide vs. Détecteur gazeux

Détecteur solide

$x, y, F(x, y)$



Pixels reliés à une électronique de lecture



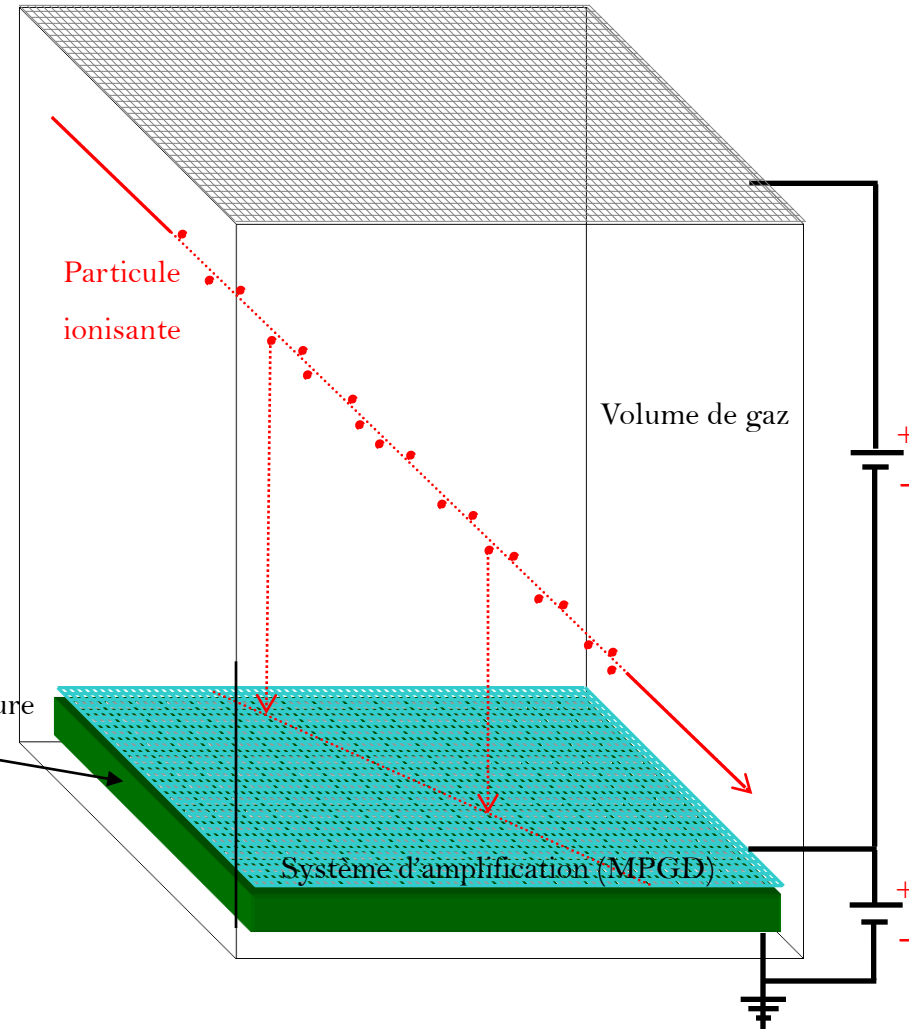
Détecteur gazeux

$x, y, z(t), E(x, y)$

Grille de dérivation

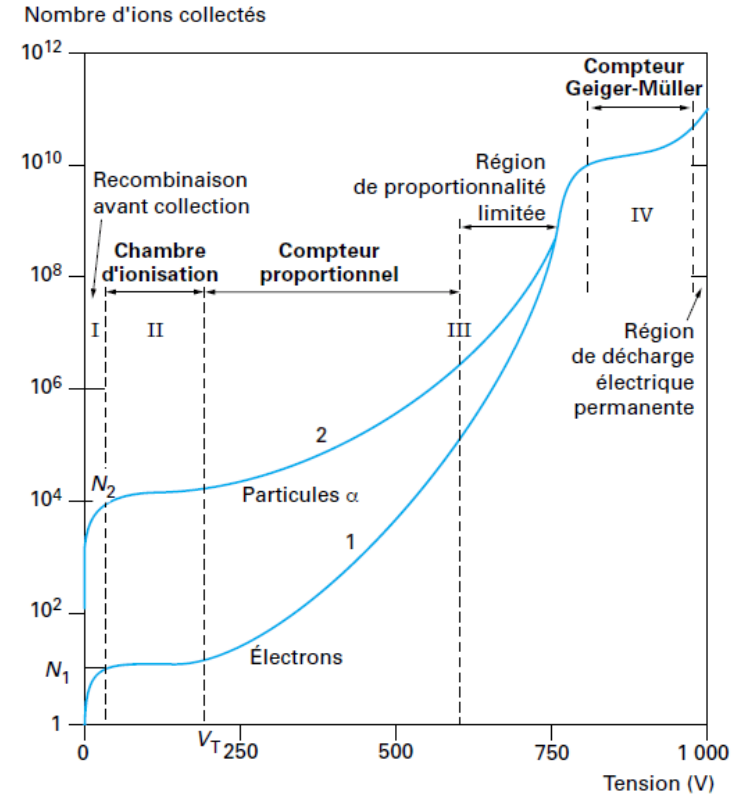
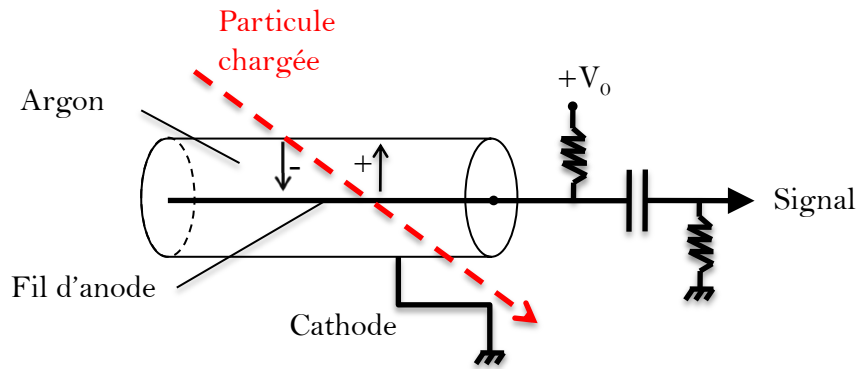
Particule ionisante

Volume de gaz



Détecteurs gazeux

Exemple de détecteur



I. Tension insuffisante \rightarrow recombinaisons des paires

II. Chambre d'ionisation : collection des charges sans amplification

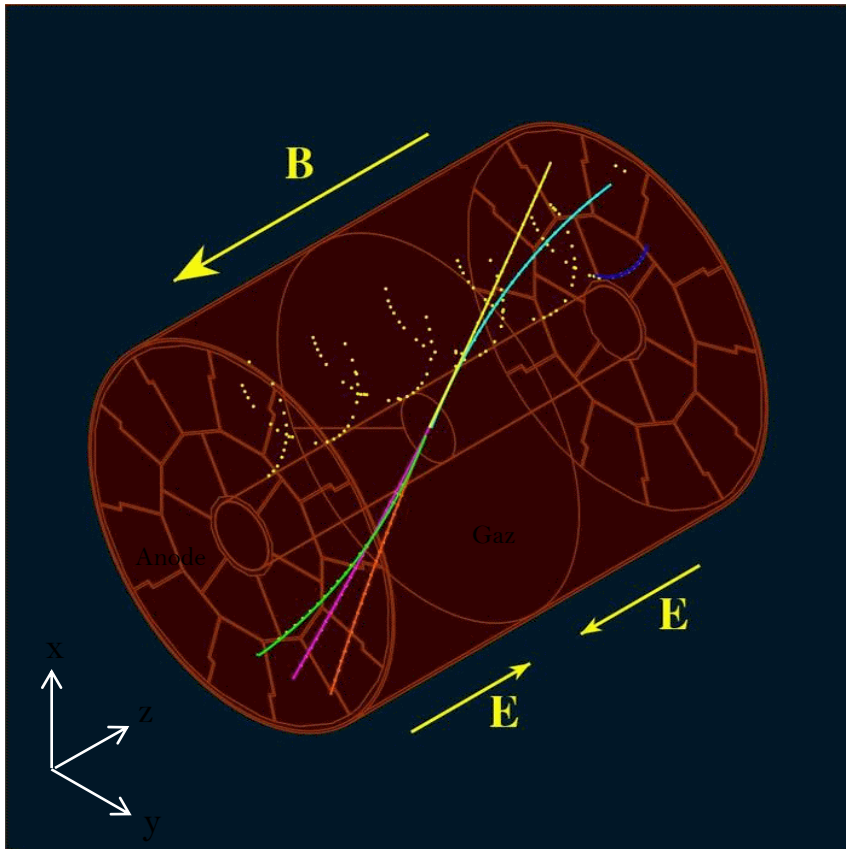
III.a Mode proportionnel : le signal est amplifié par avalanche proportionnelle à l'ionisation

III.b Mode streamer : avalanche secondaire induite par les photons de la première avalanche \rightarrow nécessité d'un composant pour stabilisé (*quencher*)

IV. Mode Geiger-Müller (ou mode *breakdown*) : Avalanche dans tout le détecteur. Courant en sortie saturé.

Fonctionnement d'une TPC

- **Chambre à projection temporelle** (*Time Projection Chamber*) inventée par D. Nygren (1974)
- Mesure en 3-D d'une trace : (2-D par projection en x-y) \times (1-D en z = $v_{\text{dérive}} \times t_{\text{dérive}}$)
- Identification des particules grâce à l'énergie déposée par unité de longueur dE/dx
- **Trajectographe** à faible occupation (X_0) et grande densité de traces



- **Principe :**

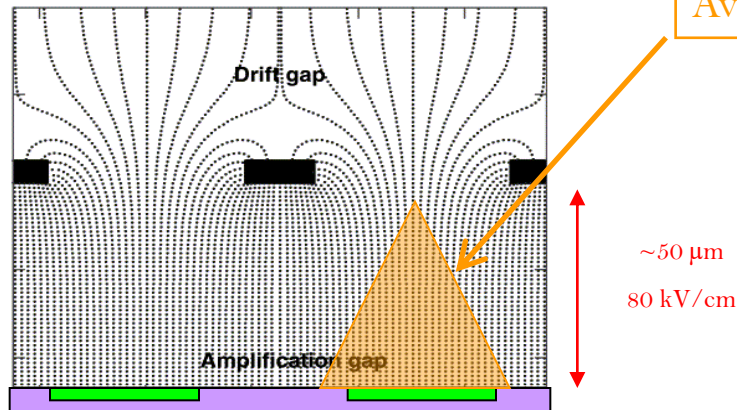
1. Une particule chargée ionise le gaz de la chambre
2. Les e- primaires dérivent le long de \vec{E} vers le fond de la chambre (anode) suivant une longue dérive (x, y et $v_{\text{dérive}} \times t \rightarrow z$)
3. $\vec{B} \parallel \vec{E}$ réduit la diffusion transverse et permet la mesure de la quantité de mouvement \vec{p} de la particule
4. L'ionisation primaire est amplifiée au plan d'anode (ex: Micromegas)
5. Electronique de lecture pour enregistrer le signal

Choix technologique d'amplification pour la TPC : *Micro Pattern Gaseous Detector*

- plus robuste que les fils
- signal rapide et gain élevé
- vieillissement négligeable
- pas d'effet $E \times B$
- faible retour des ions
- facile à fabriquer

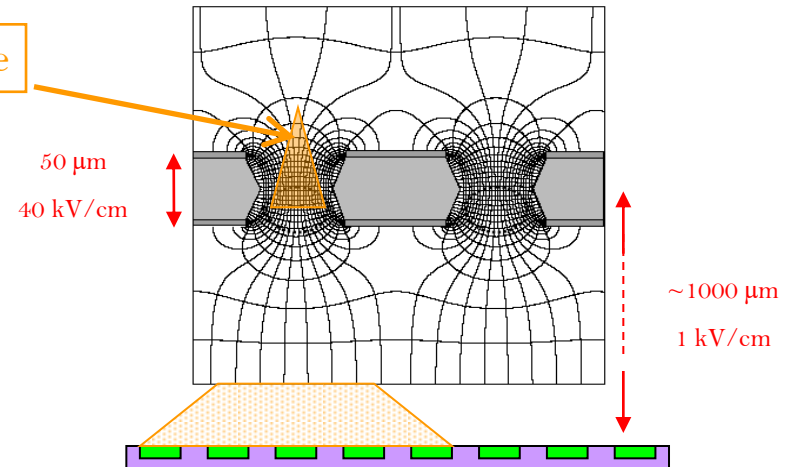
Micromegas

- *MICROMEsh Gaseous Structure* (Y. Giomataris *et al.*, 1996)
- Plans parallèles à deux étages (mesh + anode)
- Mesh en cuivre polarisée à $\sim 50 \mu\text{m}$ au-dessus du plan d'anode

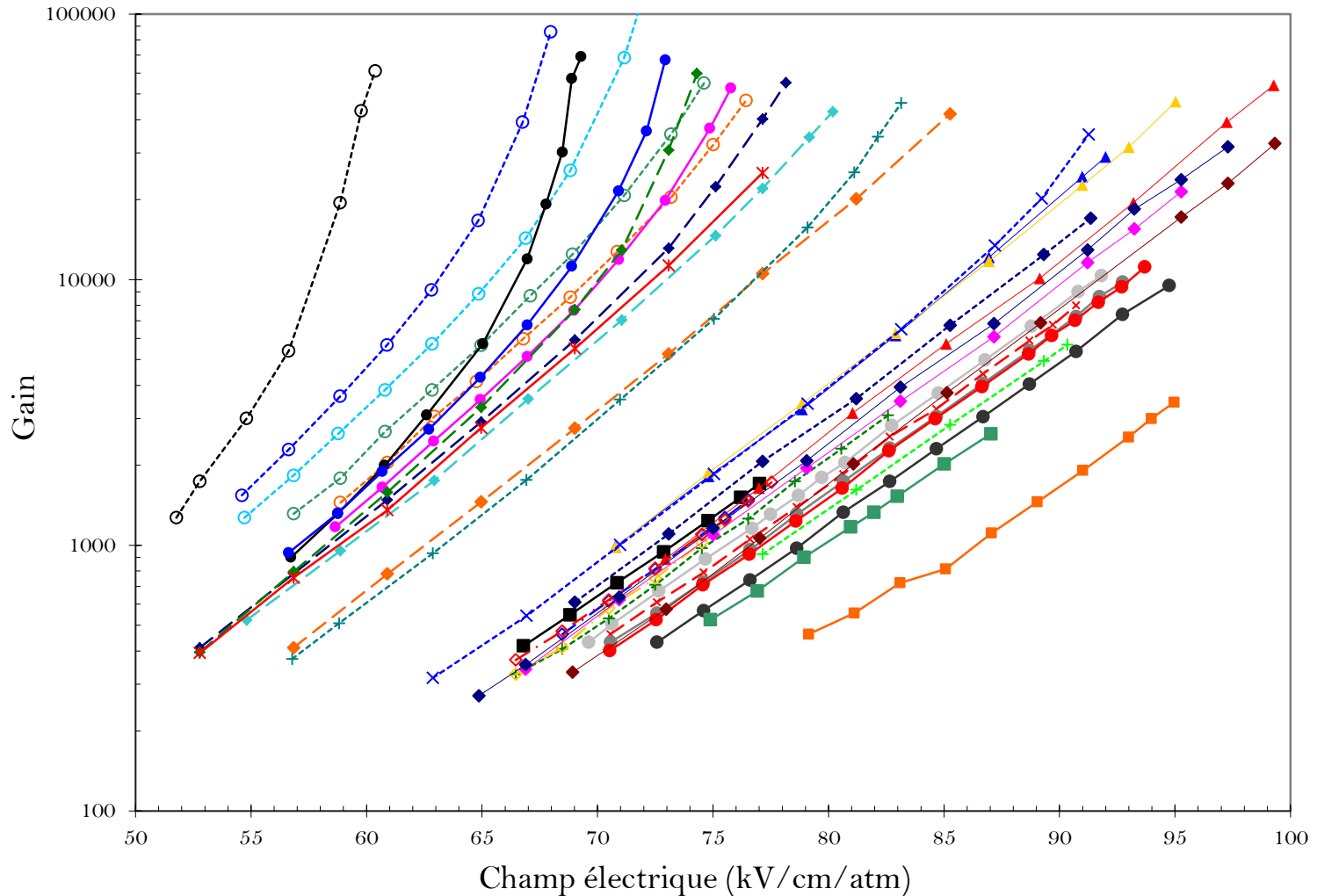
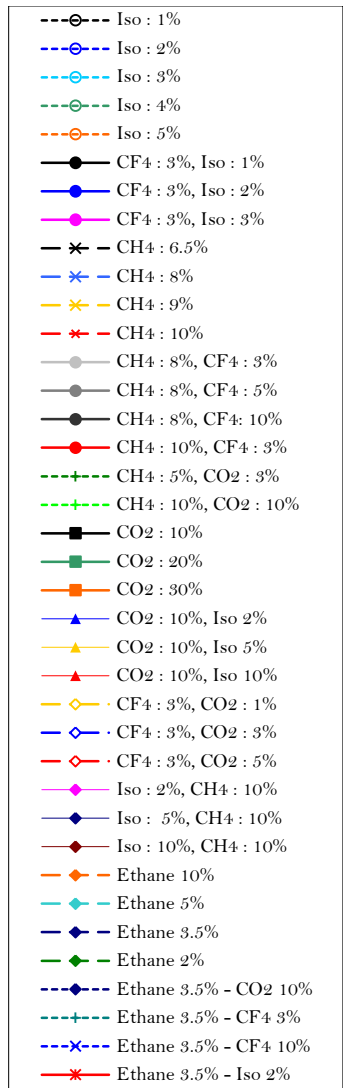


GEM

- *Gas Electron Multiplier* (F. Sauli, 1997)
- Fine couche de polymère séparant deux feuilles de métal (cuivre), perforé de trous gravé chimiquement
- Haute tension entre les deux faces



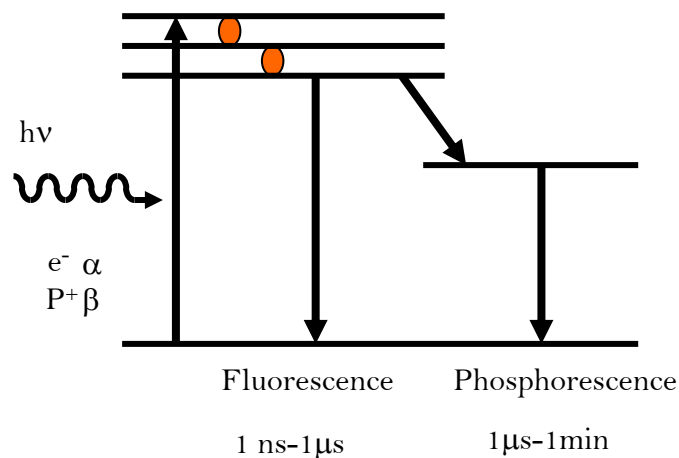
Courbes de gain d'un détecteur Micromegas



Détecteurs solides

Matériau scintillant

- Emet de la lumière après excitation au passage d'une particule chargée ou non
- Doit être transparent à la lumière produite par fluorescence ou phosphorescence
- Il existe deux familles de matériau scintillant :
 - 1) **Organique** (fonctionne avec les niveaux moléculaires)
 - Trois types : cristallin, liquide et plastique
 - Lumière du bleu au vert
 - Faible efficacité des photons gamma, sensible au Compton
 - 2) **Inorganique** (fonctionne avec les niveaux cristallin)
 - Densité plus importante : 4-8 g/cm³. NaI, CsI, ...
 - Bonne efficacité aux photons gamma



Exemple de scintillateurs

Tableau 2 – Propriétés des composants de scintillateurs organiques

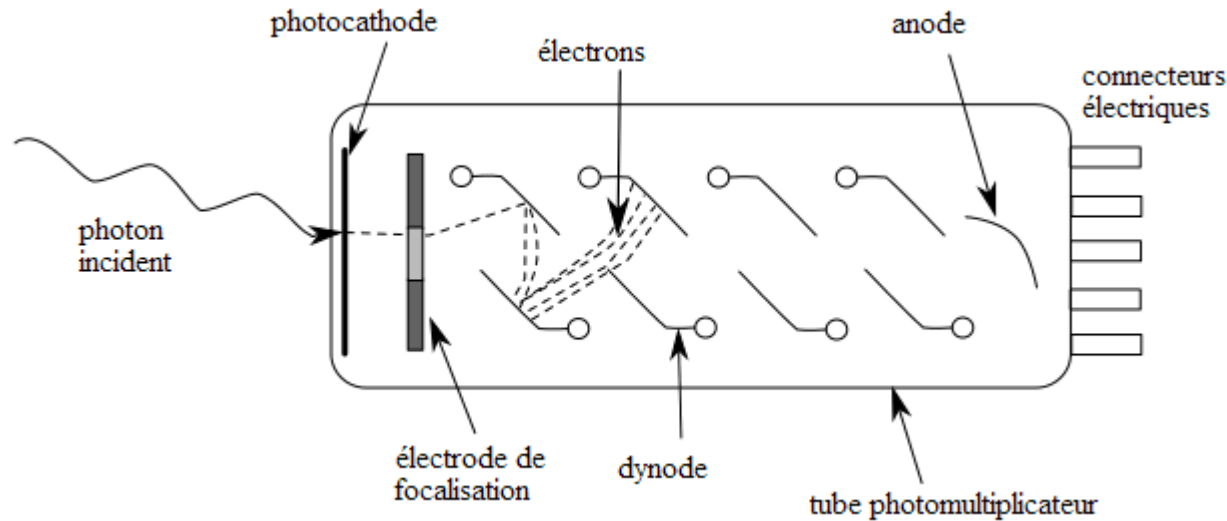
Nom du composé	Intensité relative de lumière émise	λ_{\max} émission (nm)	Temps de décroissance (ns)	Masse volumique ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
Cristaux organiques				
Anthracène	100	448	22	1,25
<i>trans</i> -Stilbène	75	384	4,5	1,16
Naphtalène	32	330 à 348	76 à 96	1,03
<i>p,p'</i> -Quaterphényle	94	437	7,5	1,20
Activateurs primaires				
2,5-Diphényloxazole (PPO)	75	360 à 416	5	
2-Phényl-5-(4-biphénylyl)-1,3,4-oxadiazole (PBD)	96	360	5	
4,4''-Bis (2-butyloctyloxy)- <i>p</i> -quaterphényle (BIBUO)	60	365 à 393	1,30	

Tableau 4 – Propriétés des principaux scintillateurs inorganiques

Propriétés	CeF ₃	PbWO ₄	BaF ₂	BGO	CsF	CsI	CsI(Tl)	NaI(Tl)
Masse volumique(g/cm^3)	6,16	8,28	4,9	7,13	4,64	4,53	4,53	3,67
Longueur d'absorption (cm à 511 keV)	1,9	3,1	2,3	1,1	2,3	1,8	1,8	2,9
Longueur de radiation (cm)	1,68	0,89	2,1	1,1	2,0	1,86	1,86	2,6
Décroissance courte (ns)	≈ 5	5 à 15	0,6		2,8	≈ 10,4		230
Décroissance longue (ns)	30		620	300	4 · 4	> 1 000	> 1 000	150 (ms)
Pic d'émission courte (nm)	310	440 à 500	220		390	300		415
Pic d'émission longue (nm)	340		310	480		> 400	550	
Indice de réfraction (au pic d'émission)	1,68	2,16	1,56	2,15	1,48	1,8	1,8	1,85
Taux de production de lumière (NaI(Tl) = 100)	4 à 5	1	5 à 16	7 à 10	6	3,7	85	100
Hygroscopicité	non	non	faible	non	très	faible	faible	oui

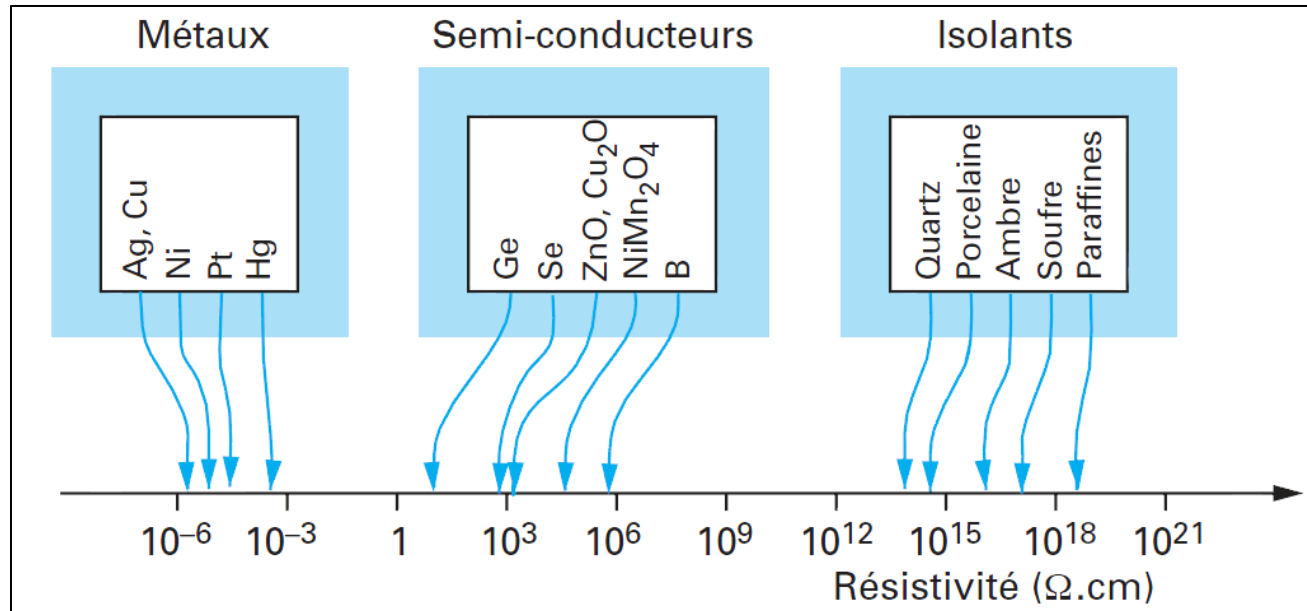
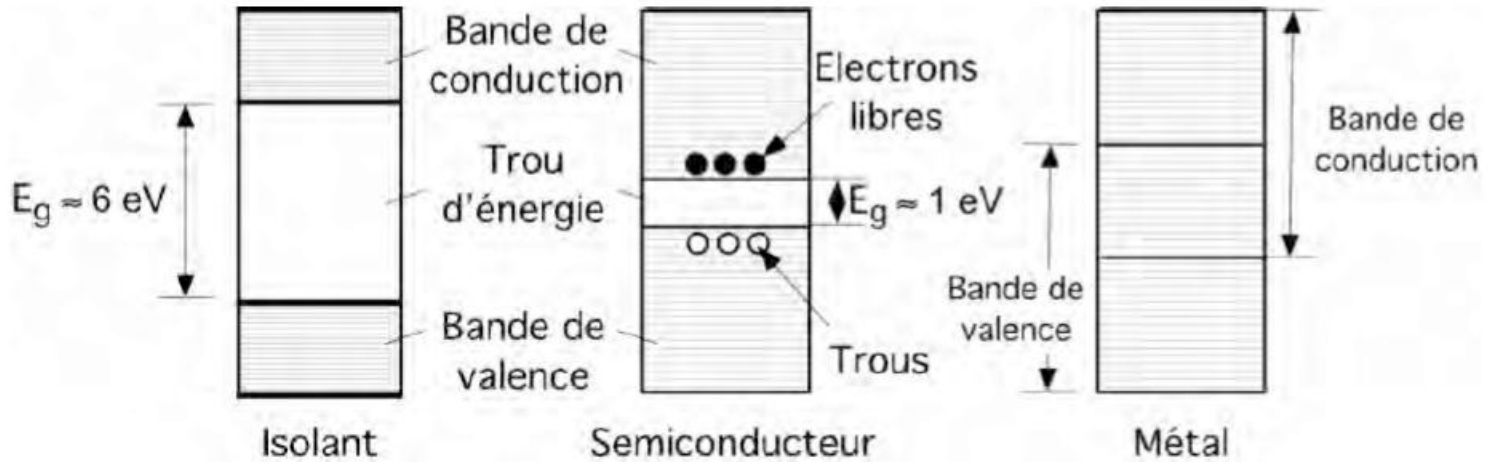
Photomultiplicateur

- L'amplification de la lumière émise par les scintillateur se fait avec un photomultiplicateur :



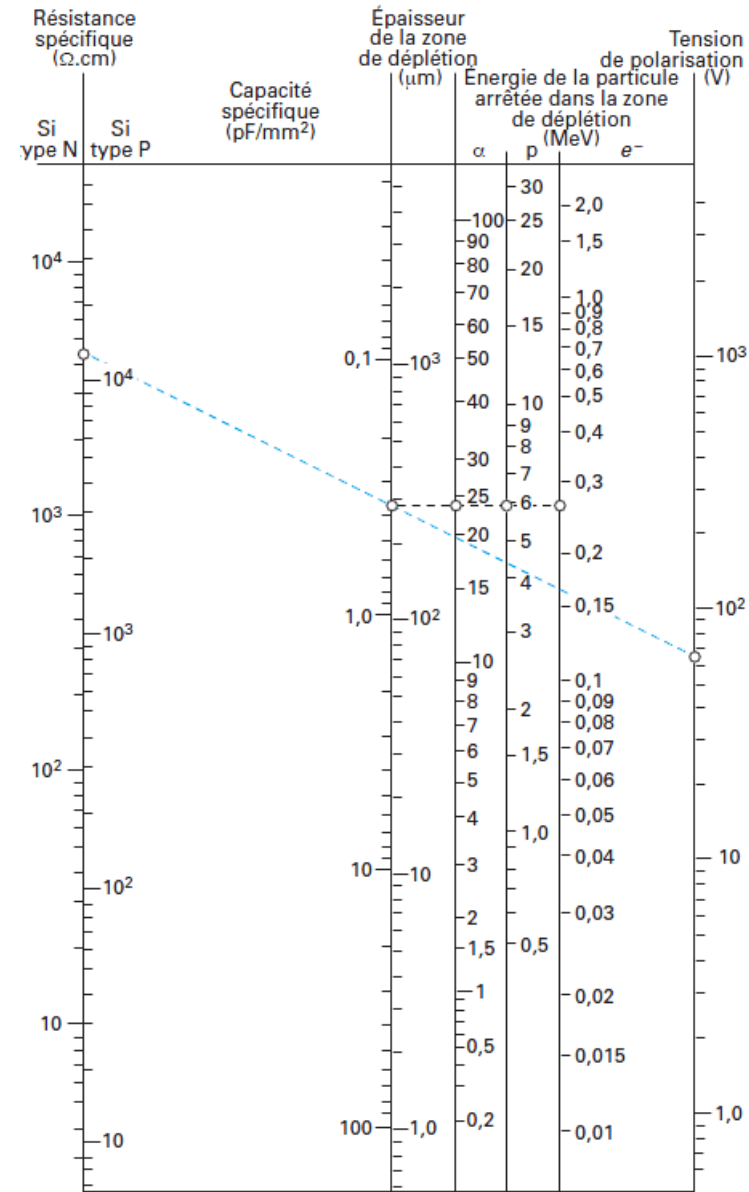
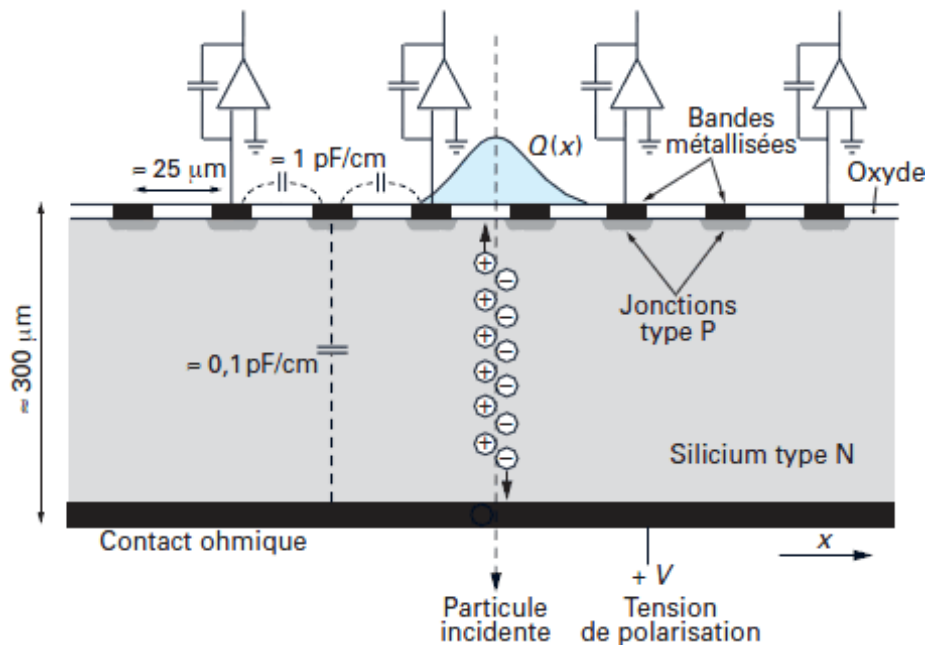
- Le gain est donné par : $G = K(V_{HT})^{N\alpha}$
 - K est une constante
 - V_{HT} est la tension entre les dynodes
 - N le nombre de dynode
 - α , déterminé expérimentalement, est compris entre 0,6 et 0,8.

Matériaux semi-conducteur



Détecteur à jonction Si (P+N)

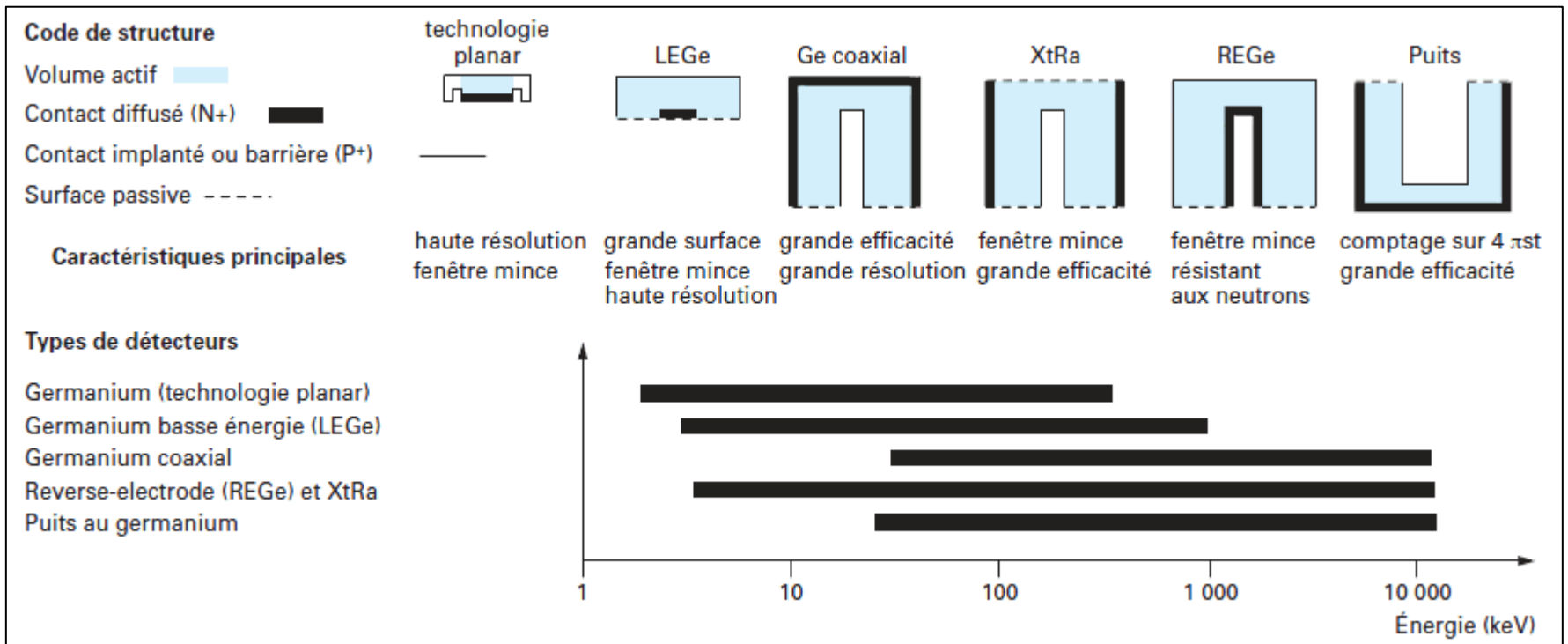
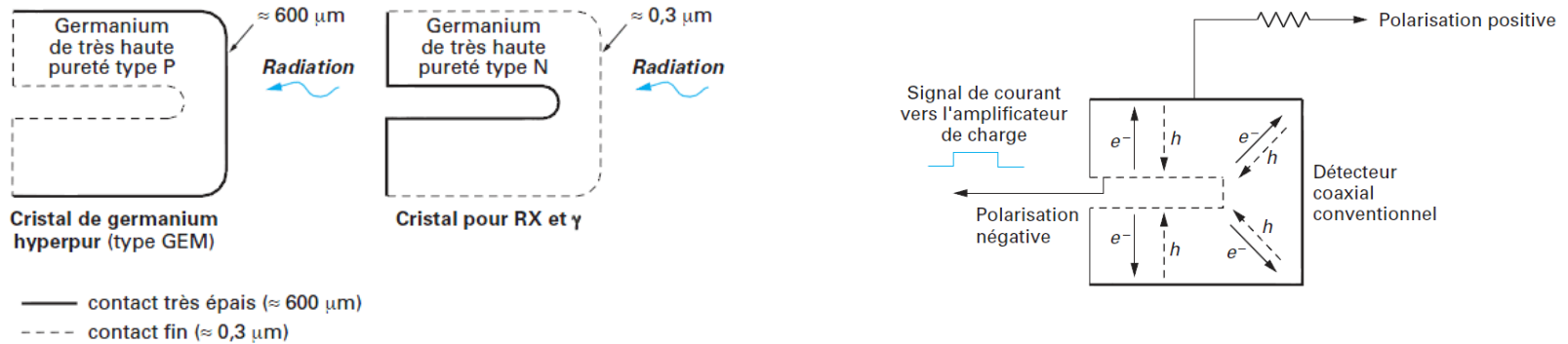
- Le détecteur est constitué d'une zone utile, la zone de déplétion, où règne un champ électrique important, et de zones mortes dues aux contacts ohmiques, aux zones non déplétées et aux effets de bords
- La jonction PN peut être assimilée à une chambre d'ionisation solide. On peut pousser l'analogie avec les chambres gazeuses à fils lorsque l'on segmente une jonction PN en plusieurs éléments contigus, on réalisera alors un détecteur à micropistes



1 μm de Si = 0,2325 mg / cm²
 1 mg / cm² de Si = 4,3 μm

Détecteur au Germanium

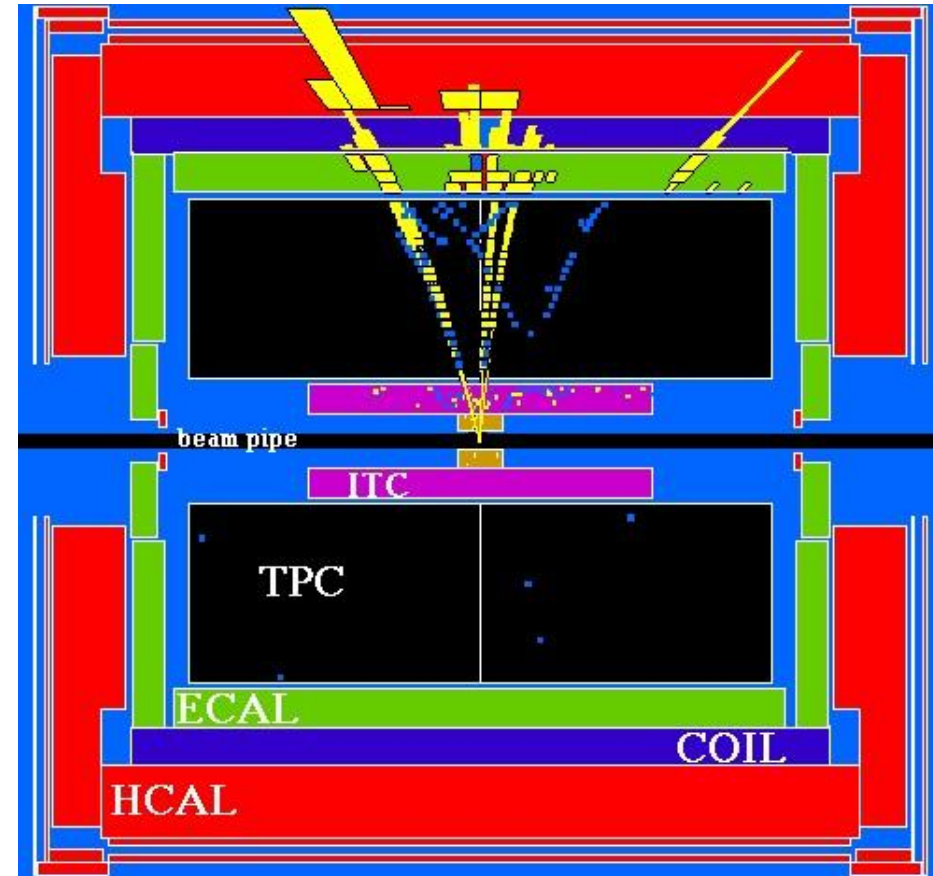
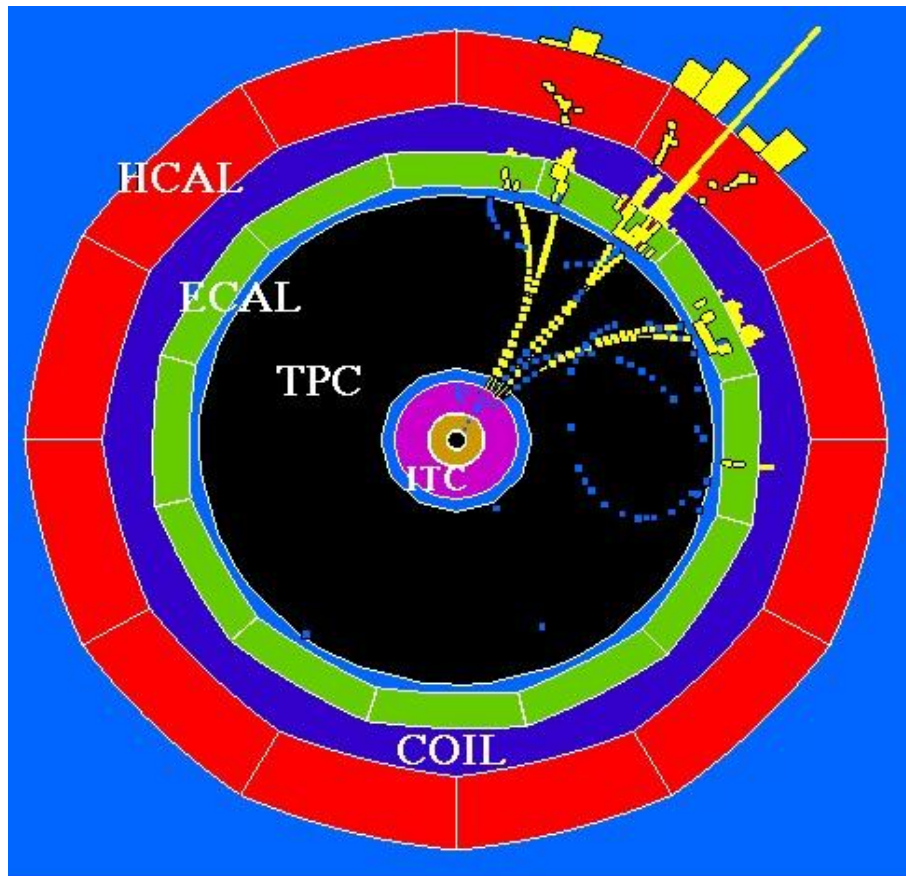
- De par son numéro atomique élevé ($Z = 32$) comparé à celui du silicium, le germanium est bien adapté à la détection X et γ . Néanmoins, il doit être refroidi à 77 K.



Exemples

ALEPH au LEP

- ALEPH (Apparatus for LEP PHysics at CERN) était un des quatre détecteurs montés sur le collisionneur Large Electron Positron (LEP) au CERN

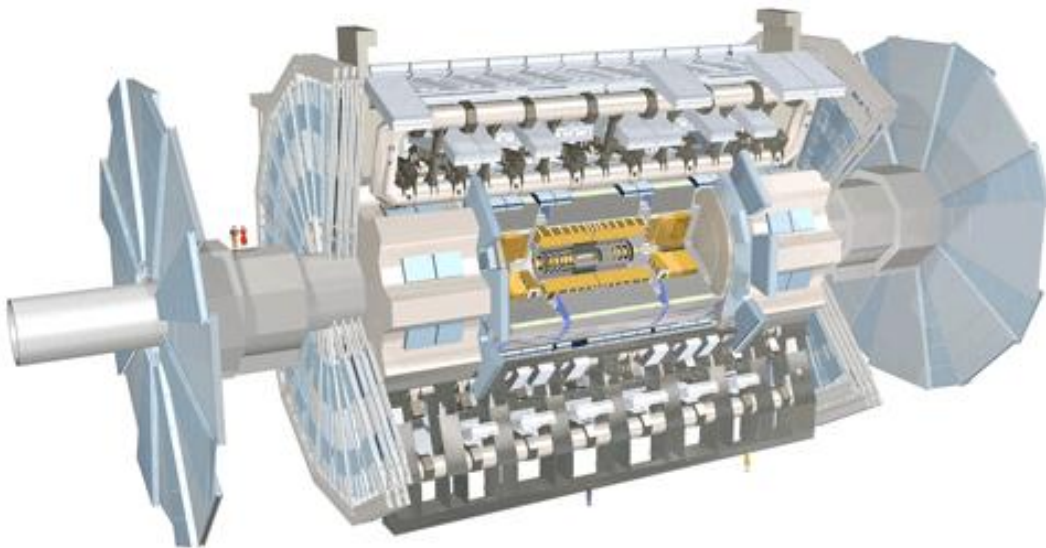


Principaux détecteurs au Large Hadron Collider (LHC)

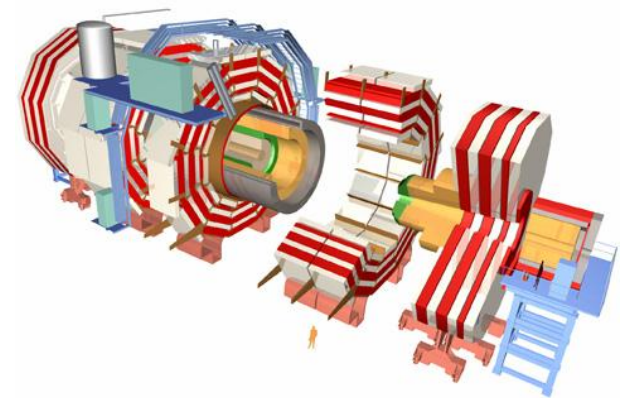
- Deux principaux détecteurs concurrents et complémentaires : ATLAS & CMS

Détecteur	Dimensions (m ³)	Poids (tonnes)	Compétence principale
ATLAS	46 × 25 × 25	7 000	Calorimètre
CMS	21 × 16 × 16	12 500	Spectromètre
ALICE	21 × 15 × 15	10 000	Ions lourds
LHCb	21 × 15 × 15	5 600	Symétrie matière/antimatière

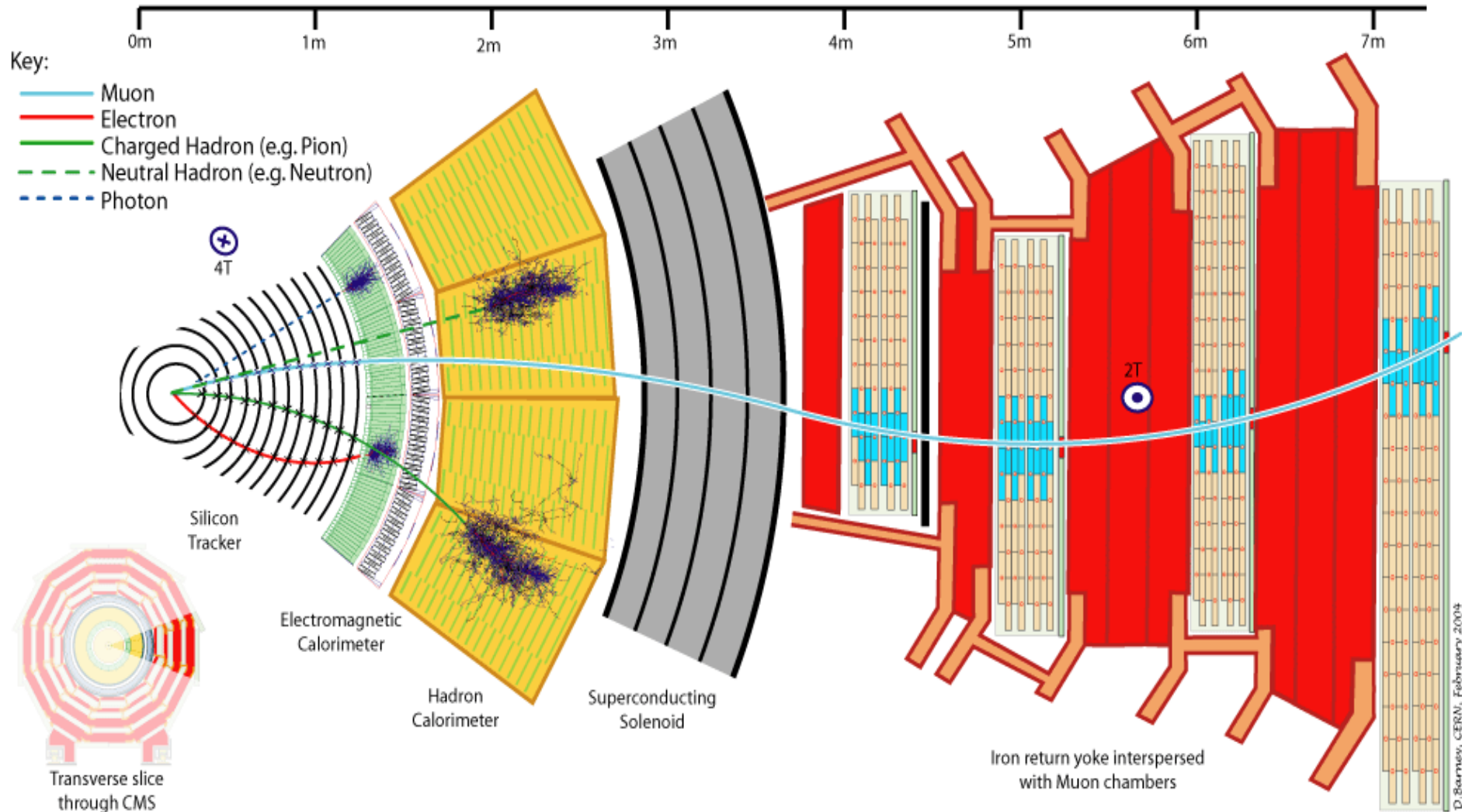
ATLAS



CMS

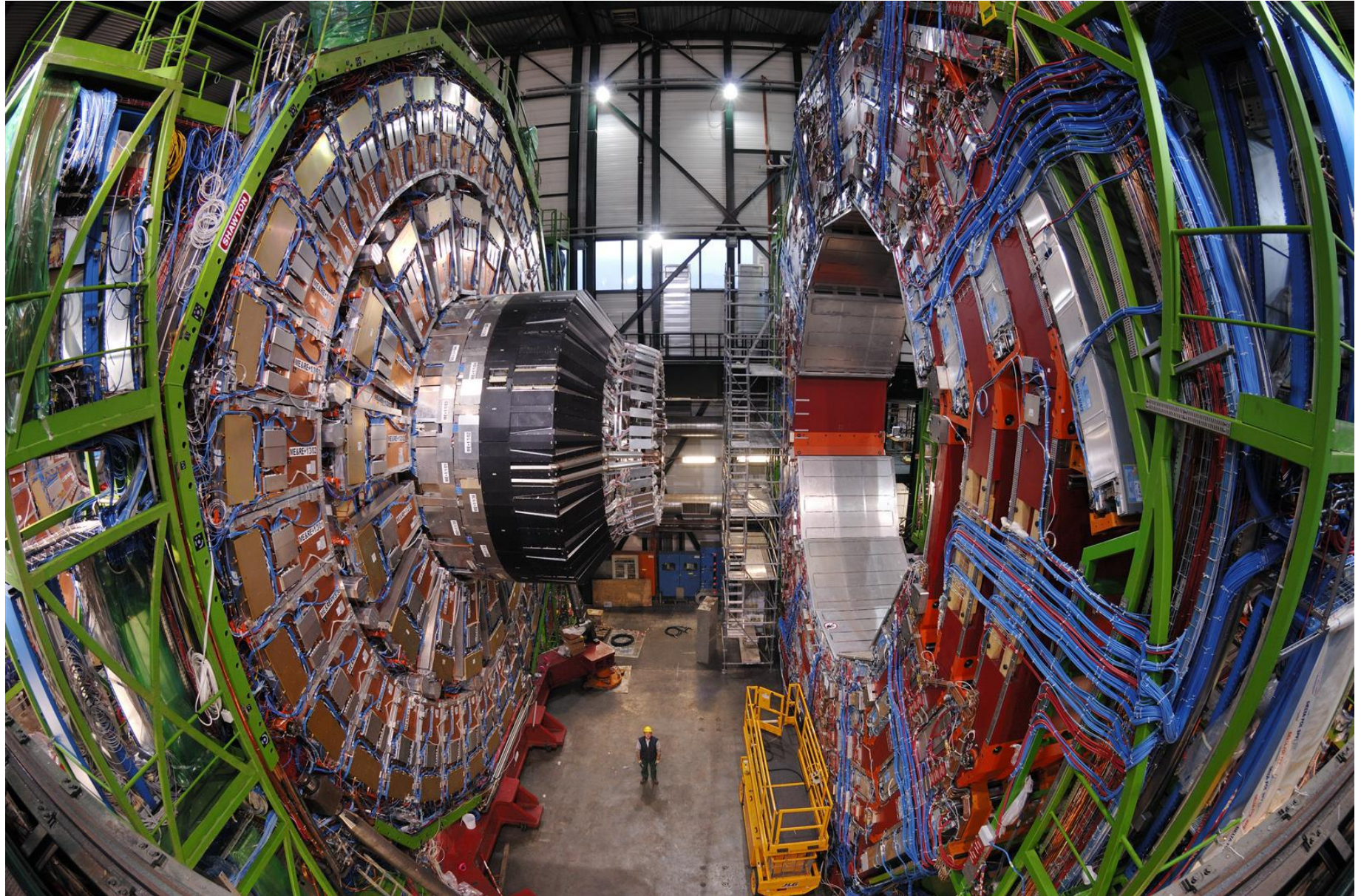


CMS (Compact Muon Solenoid)

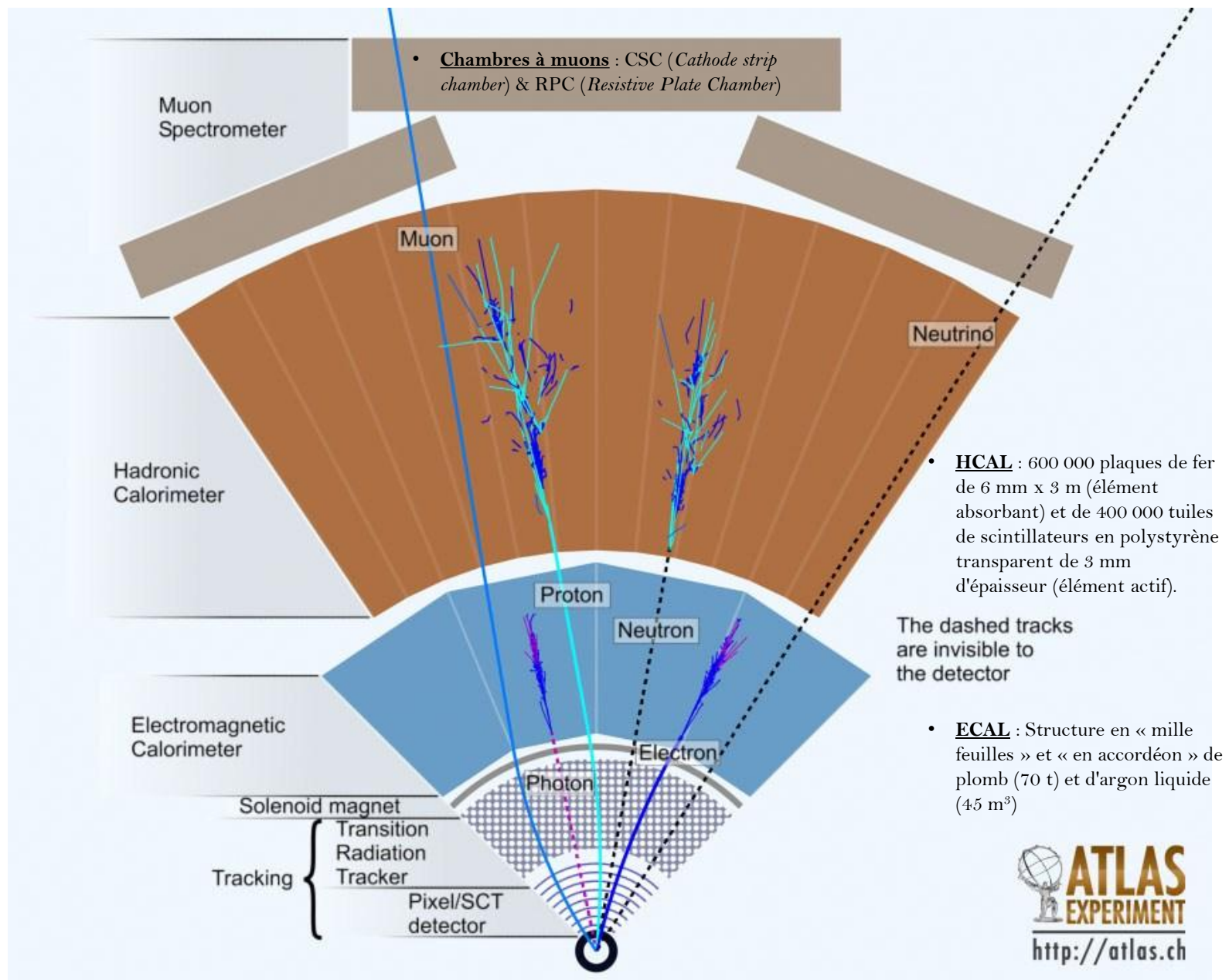


- **ECAL** : 80 000 cristaux ; scintillants de tungstate de plomb (PbWO_4)
- **HCAL** : couches intercalées de matériau (laiton) et de scintillateurs plastique ou de fibres de quartz
- **Chambres à muons** : CSC (*Cathode strip chamber*) & RPC (*Resistive Plate Chamber*)

CMS (Compact Muon Solenoid)



ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)

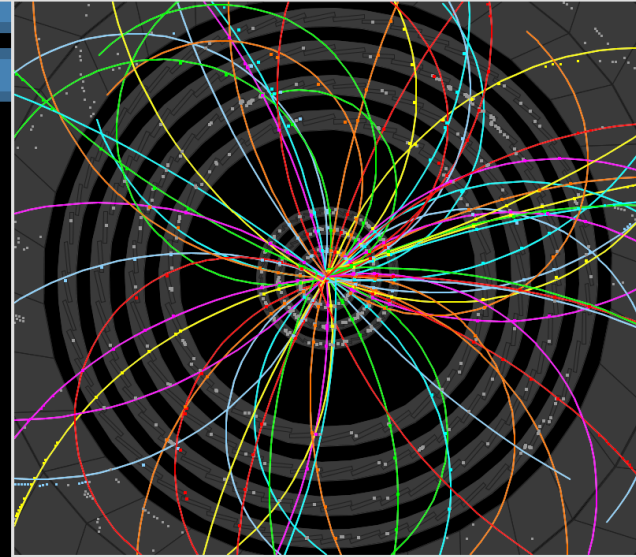
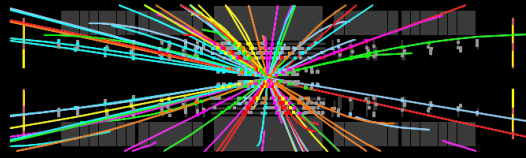


ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)



Premières collisions p-p à 7 TeV

<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/public/EVTDISPLAY/events.html>

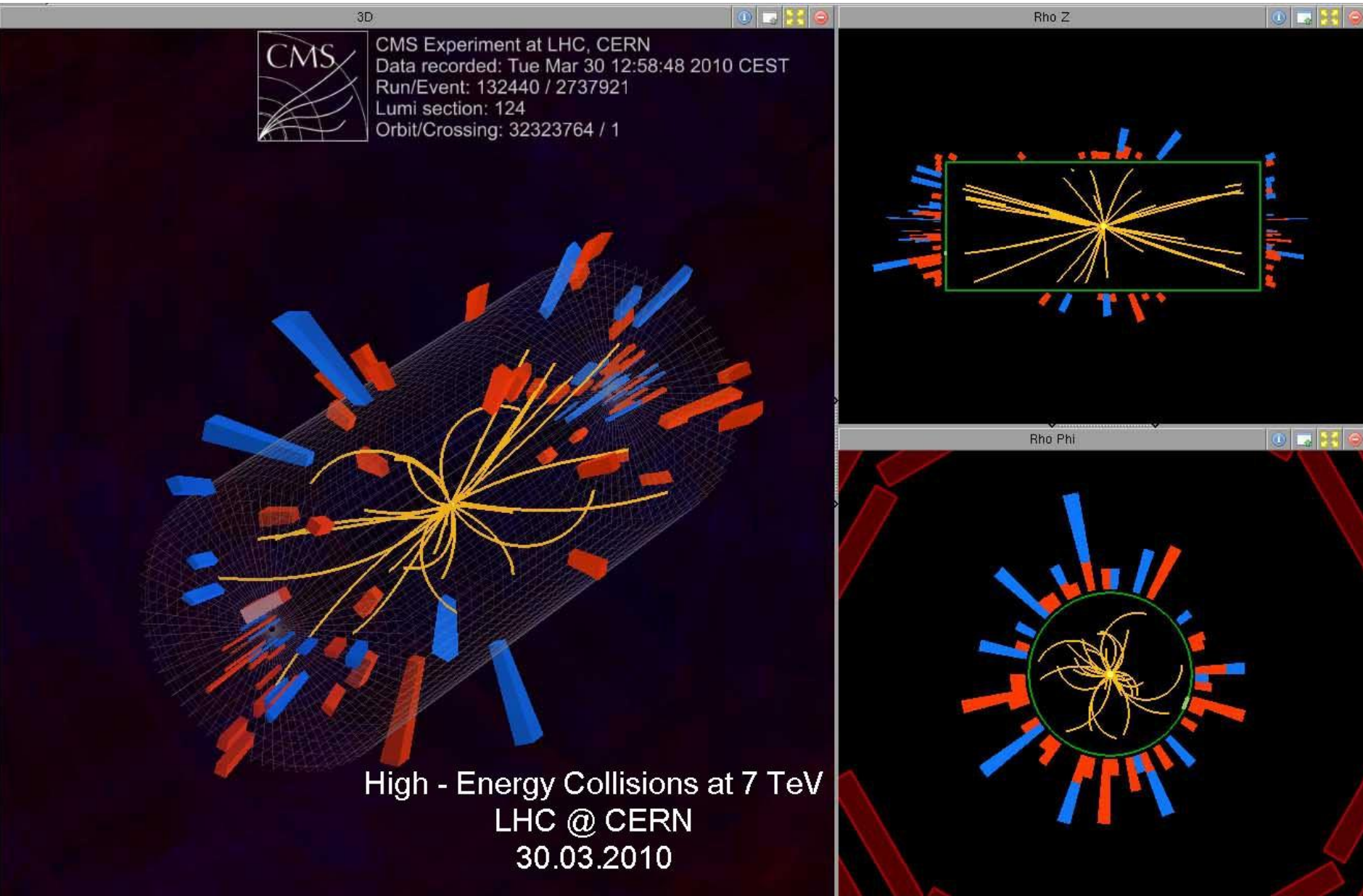


ATLAS EXPERIMENT

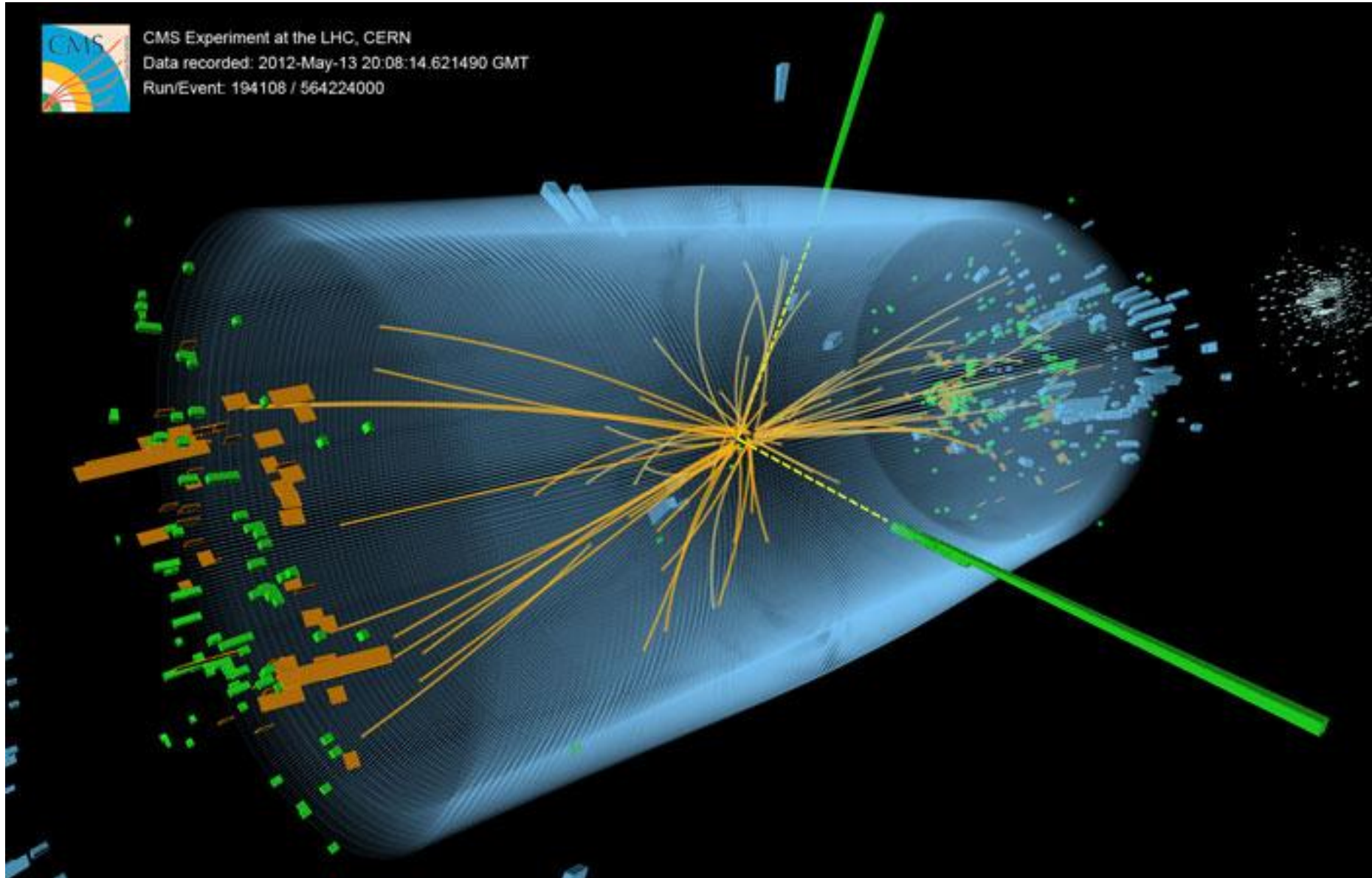
Run Number: 152166, Event Number: 451982

Date: 2010-03-30 13:28:15 CEST

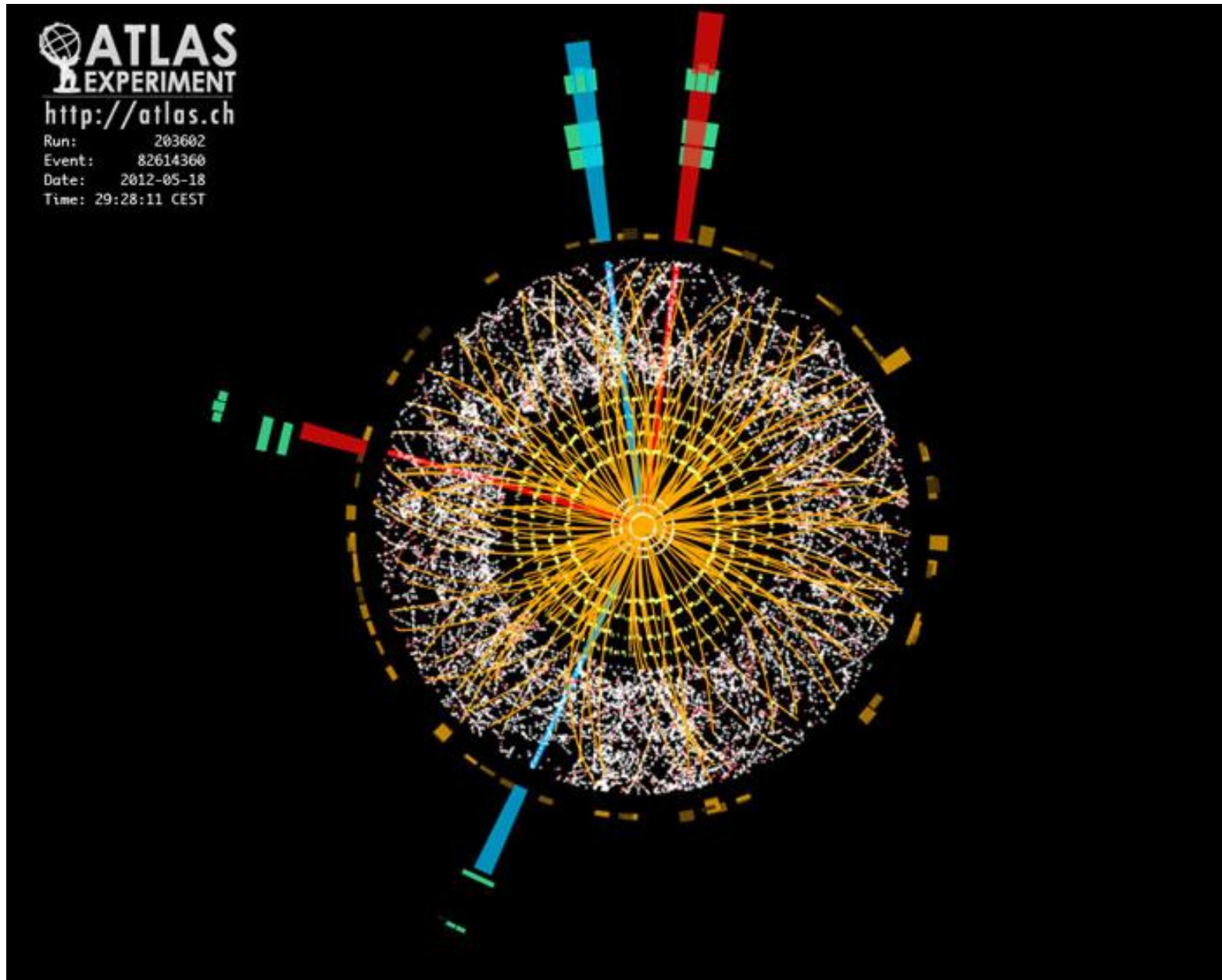
Premières collisions p-p à 7 TeV



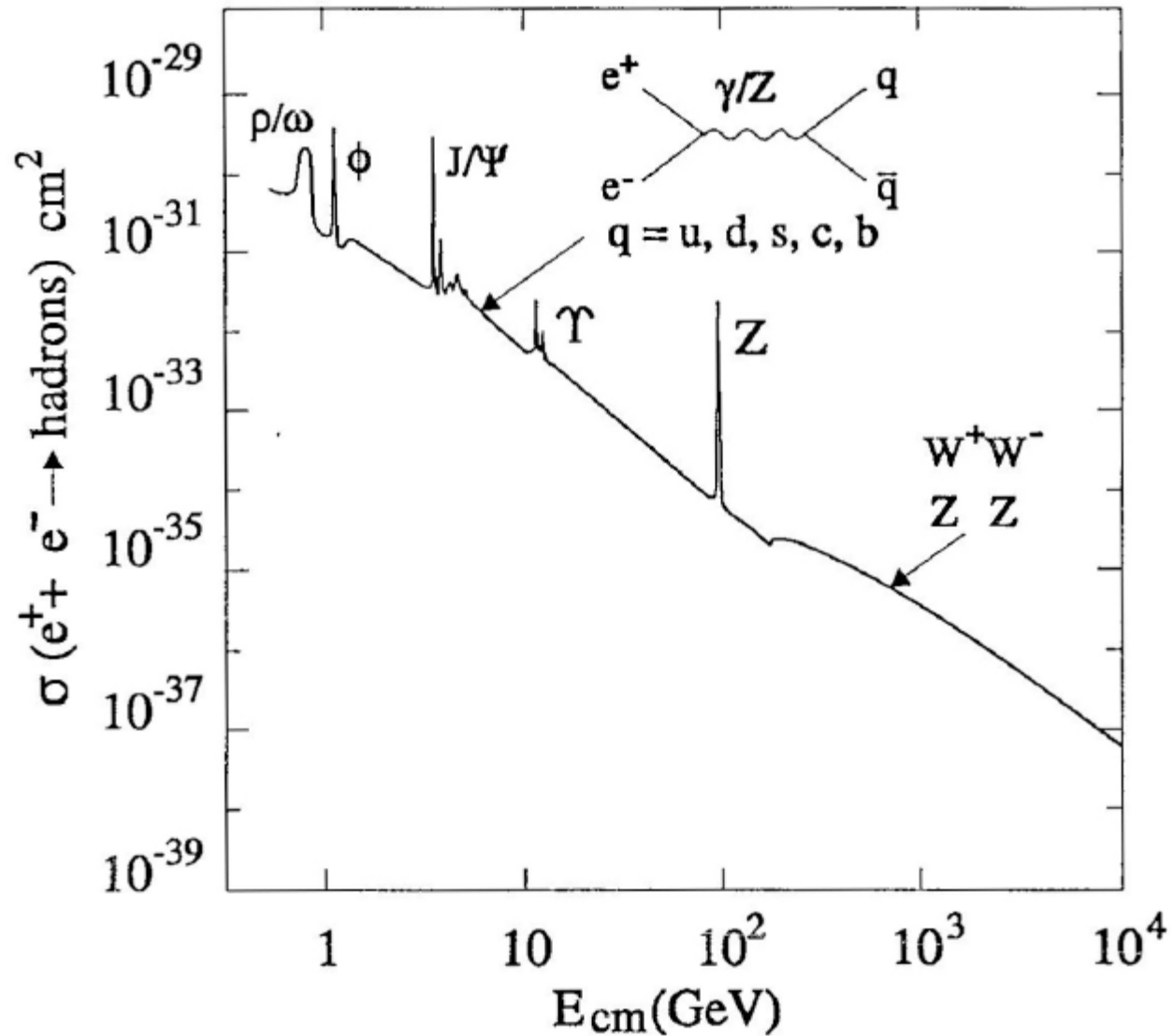
Candidat Higgs dans CMS



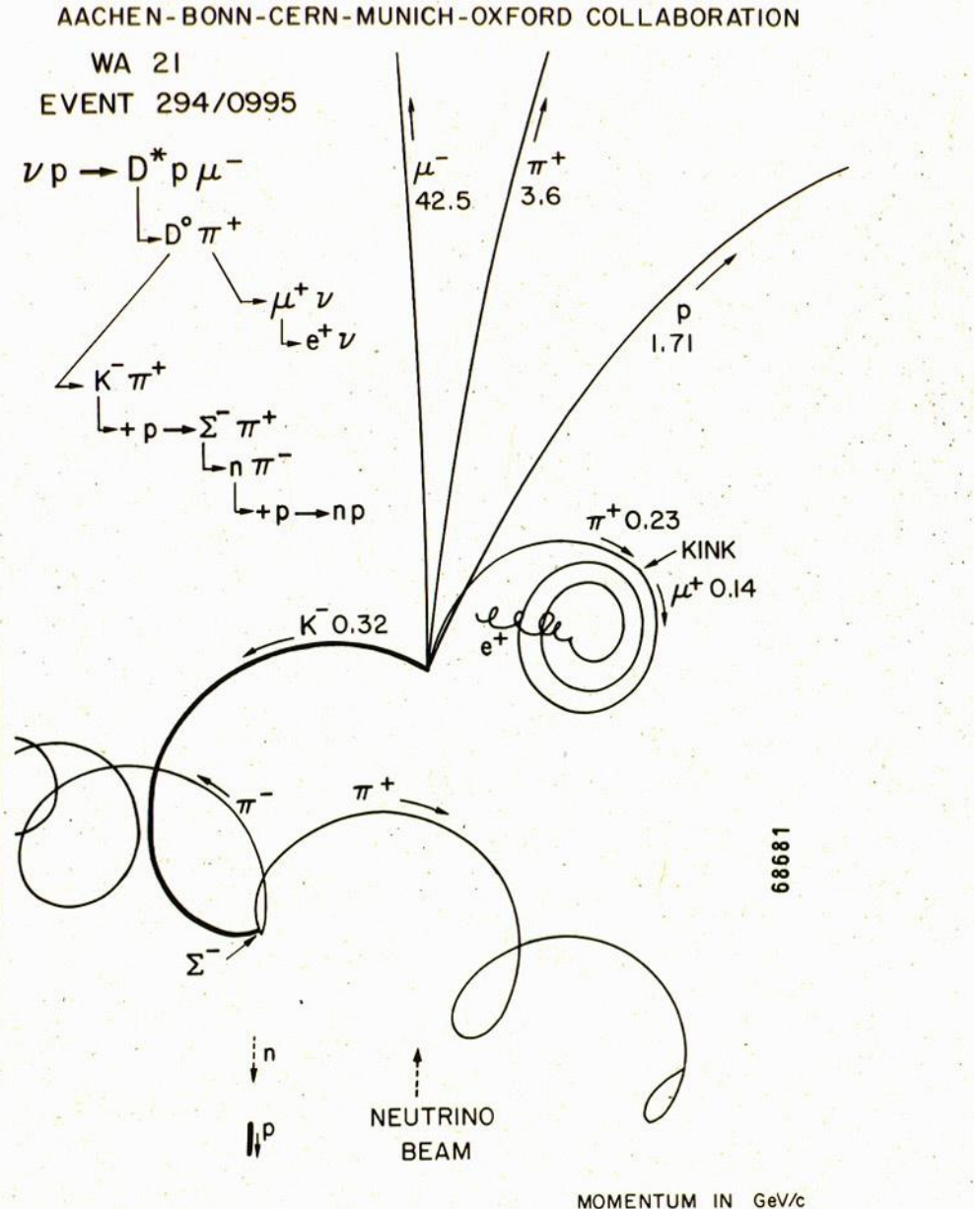
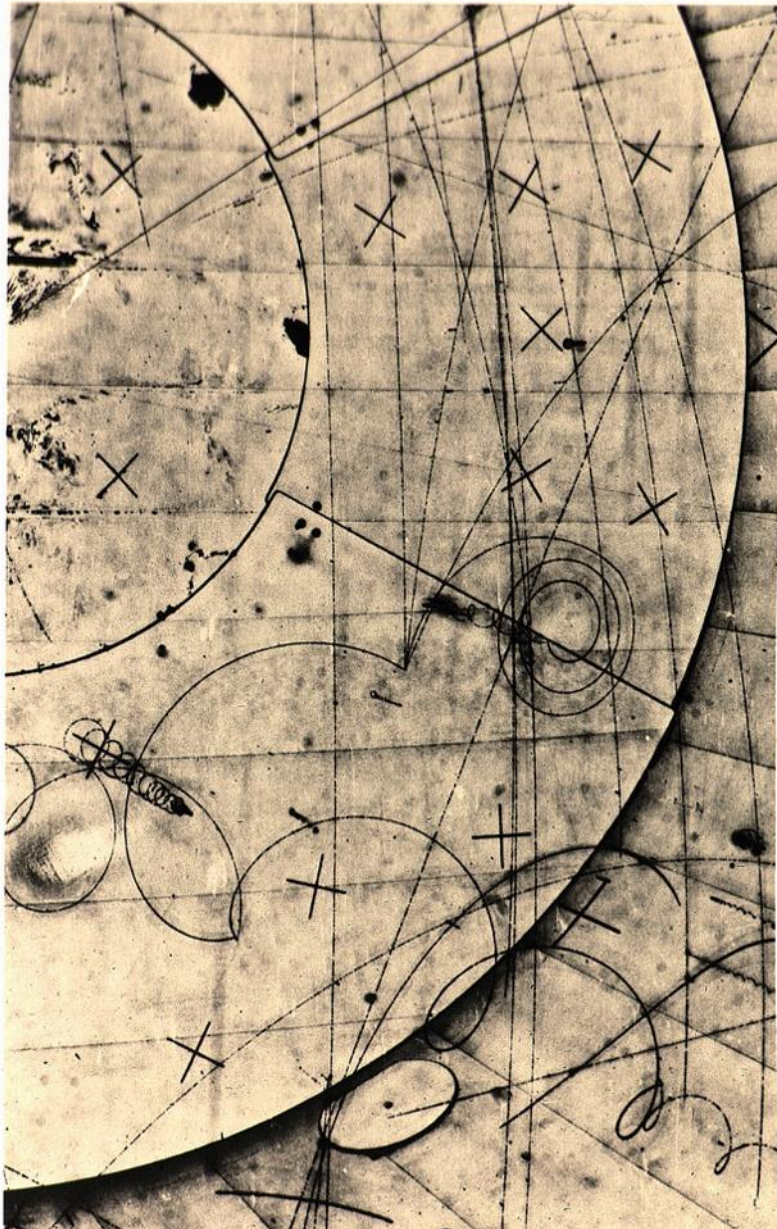
Candidat Higgs dans ATLAS



Taux de production des interactions $e^+e^- \rightarrow X$



Détection de neutrino





Fin !

Questions ?

