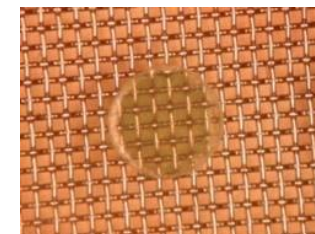
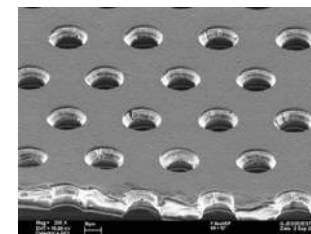
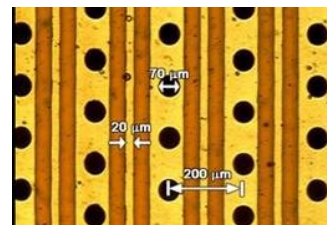
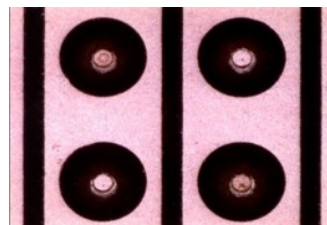
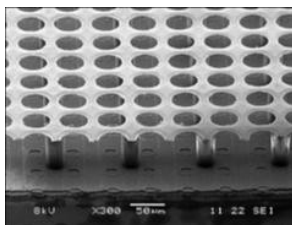


Détecteurs à microstructures pour les collisionneurs à haute luminosité

Maximilien Chefdeville, LAPP, Annecy



Sommaire

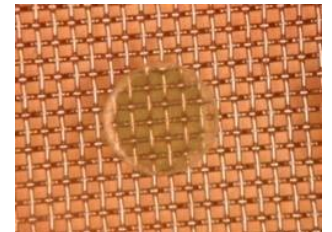
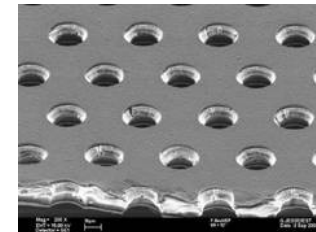
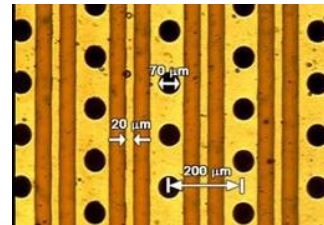
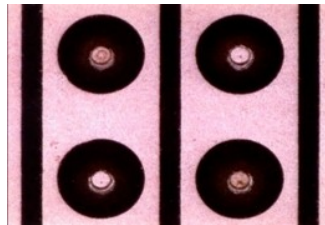
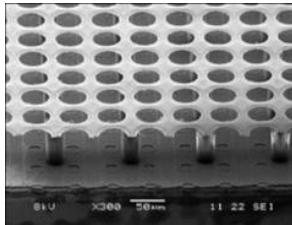
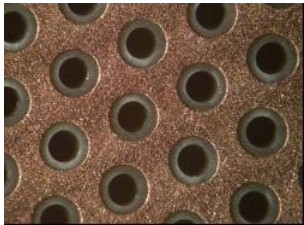
1. Introduction aux détecteurs à microstructures

Invention et performances

2. Applications auprès des collisionneurs à haute luminosité

Le futur linéaire à électrons, calorimétrie et trajectographie

Le LHC haute luminosité, spectrométrie de muons



Fonctionnement des détecteurs gazeux

1. Interaction particule chargée/molécule

$$W(\text{Ar}) = 26 \text{ eV}$$

$$\text{Paquets } N_p = 30 / \text{cm pour des MIP}$$

$$\text{Total } N_t = 90 / \text{cm } (\delta\text{-électrons})$$

2. Dérive des électrons

$$v_d < 15 \text{ cm}/\mu\text{s} \text{ (100 } \mu\text{m en 0.7 ns, 1 m en 7 } \mu\text{s)}$$

$$D_{t,l} = 500 \text{ } \mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}} \text{ (50 } \mu\text{m à 1 cm, 5 mm à 1 m)}$$

$$D_t(B) = D_t(0)/\sqrt{(1+\omega^2\tau^2)}, \omega\tau \sim 20\text{-}30$$

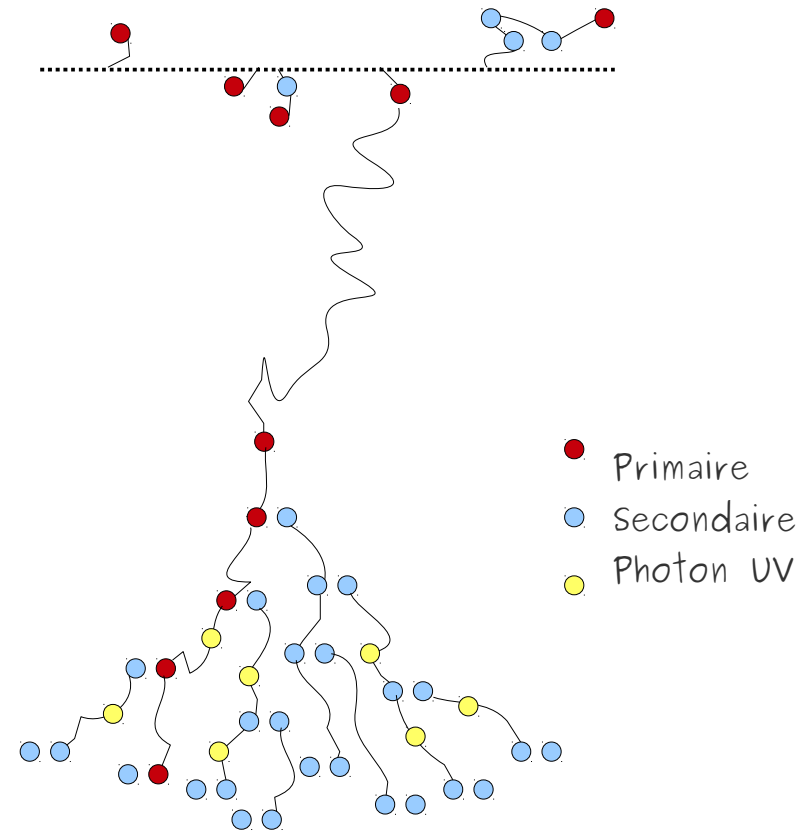
3. Multiplication des électrons

$$\text{Townsend } \alpha > 0 \text{ à } E > qq \text{ kV/cm}$$

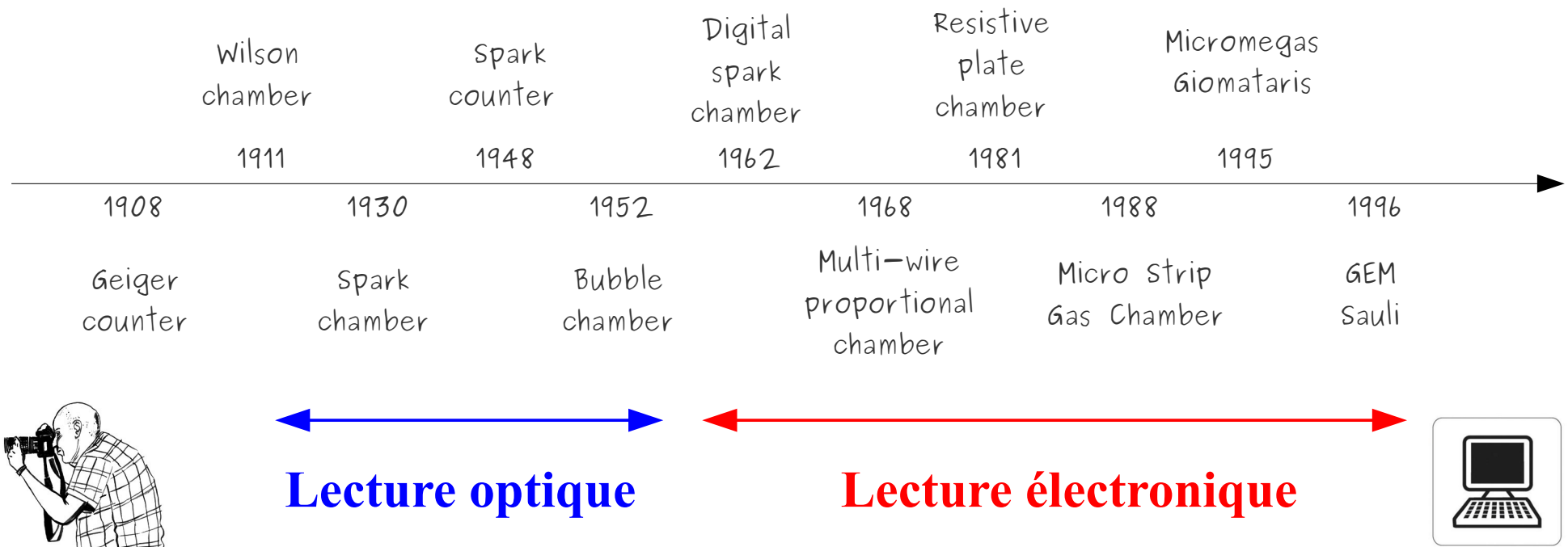
$$\text{Limite de Raether : } (N_t \cdot G)_{\text{max}} = 10^7$$

Remarque : Ces 3 étapes ne sont pas toujours présentes.

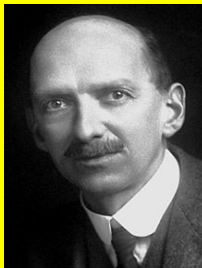
Les chambres à brouillard et bulles (1), à étincelles et RPC (1,3), à dérivate et projection temporelle (1,2,3)



Une chronologie des détecteurs gazeux



H. Geiger



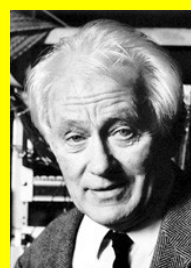
CTR. Wilson



F. Kreinen



DA. Glaser



G. Charpak



A. Oed



F. Sauli



I. Giomataris

Les détecteurs électroniques: fils et faces parallèles

The use of multiwire proportional counter to select and localize charged particles
G. Charpak, et al., NIMA 62 (1968) 262

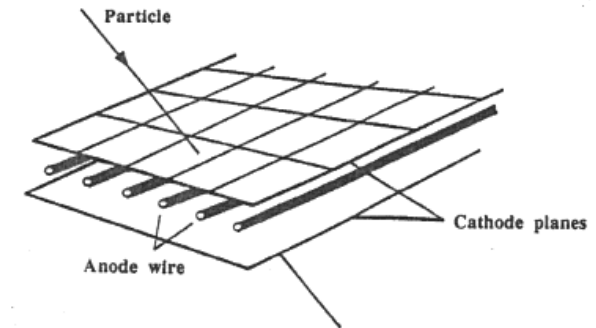
Pad response function étalée :

mesure de position le long du fil très précise

Champ électrique radial + distance fil/cathode \sim cm

Le temps de collection des ions est long (\sim ms)

Baisse de gain à haut flux



Parallel plate chambers: a fast detector for ionizing particles
A. Arefieu, et al., NIMA 348 (1994) 318

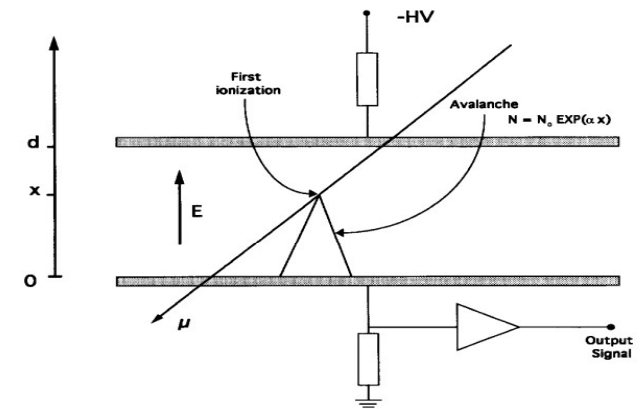
Champ élevé (50 kV/cm) et uniforme

Multiplication instantanée donc potentiellement très rapide

Gain est une fonction exponentielle de la distance entre les plaques

Uniformité de la distance critique pour la stabilité

Difficile à garantir sur de grandes surfaces



Le compteur gazeux à micropistes

Limitation en flux des fils → Rapprochement des fils → électrodes sur 1 substrat

Premier détecteur à microstructures (Micro Pattern Gas Detector)

Position-sensitive detector with microstrip anode for electron multiplication in gases

A. Oed, NIMA 263 (1988) 351

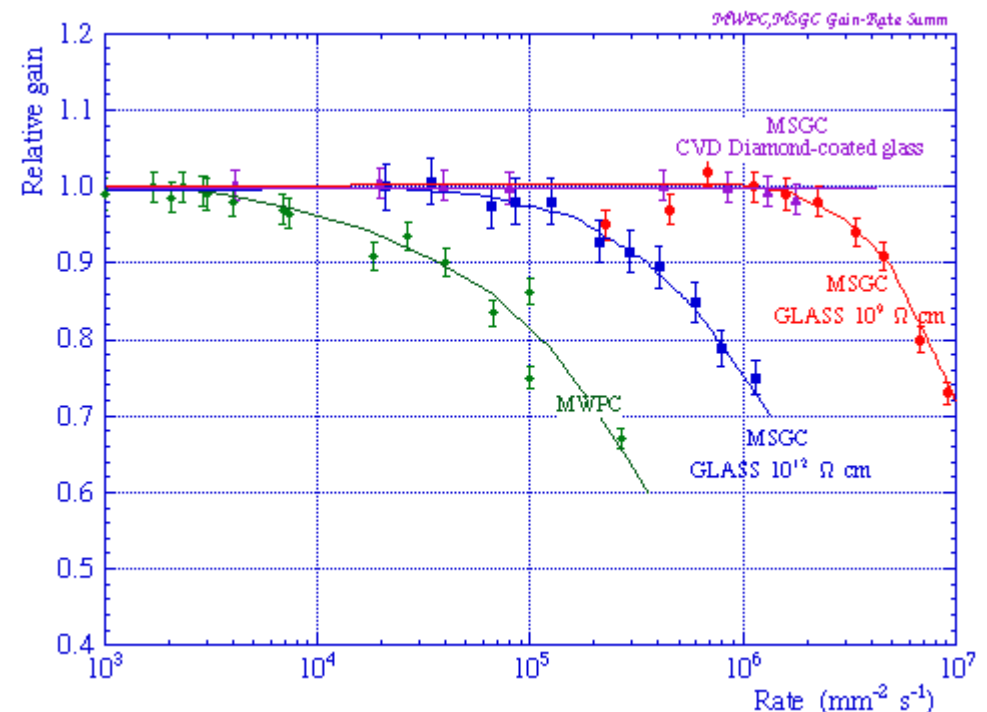
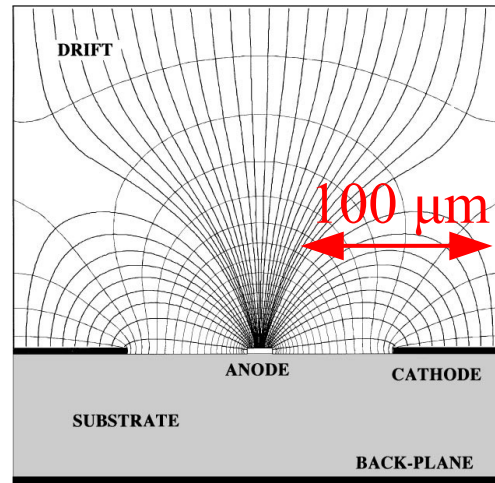
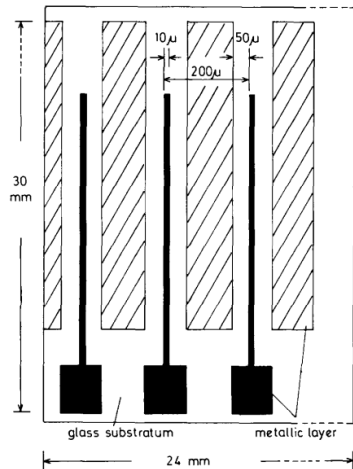
Excellente résolution spatiale $> 50 \mu\text{m}$

Fonctionne à haut flux $< 1 \text{ MHz/mm}^2$

Charge accumulée $> 10 \text{ mC/cm}$

Gain modeste $< 10^4$

Peu résistant aux étincelles



Microstructures à faces parallèles

Uniformité du gain \rightarrow “Gap” constant \rightarrow micro-grilles/feuilles

MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments

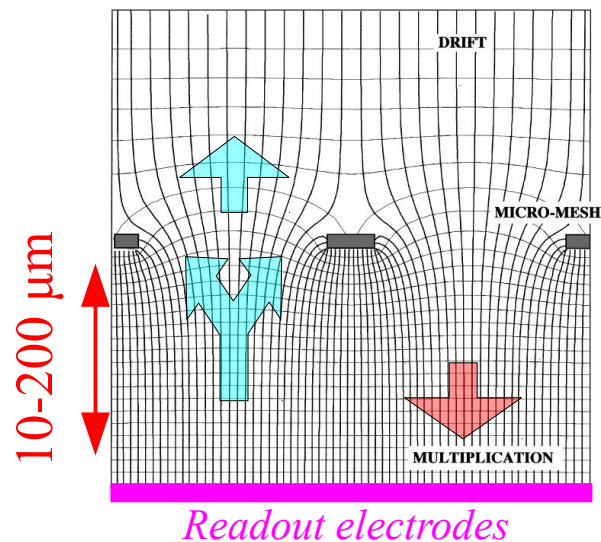
Y. Giomataris, et al., NIMA 376 (1996) 29

Collection des ions par la grille

Gains élevés sur 1 étage (10^6)

Avalanche localisée

Support: piliers isolants



GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors

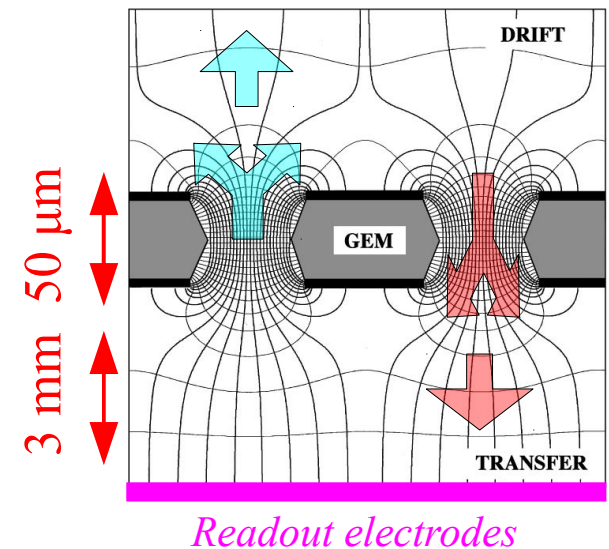
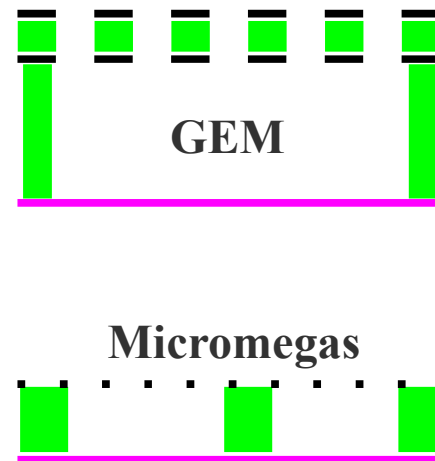
F. Sauli, NIMA 386 (1997) 531

Multiplication sur plusieurs étages (1-4)

Étalement des électrons sur l'anode

Chargement des isolants + perte d' e^- sous les feuilles

Support: cadre isolant



Trajectographie à haut flux

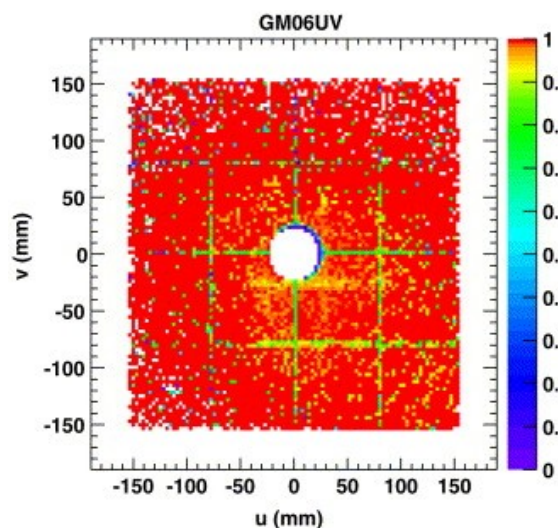
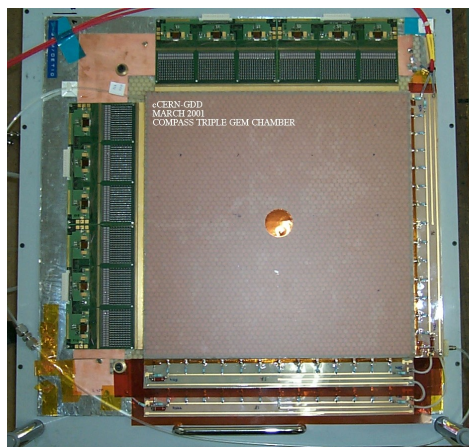
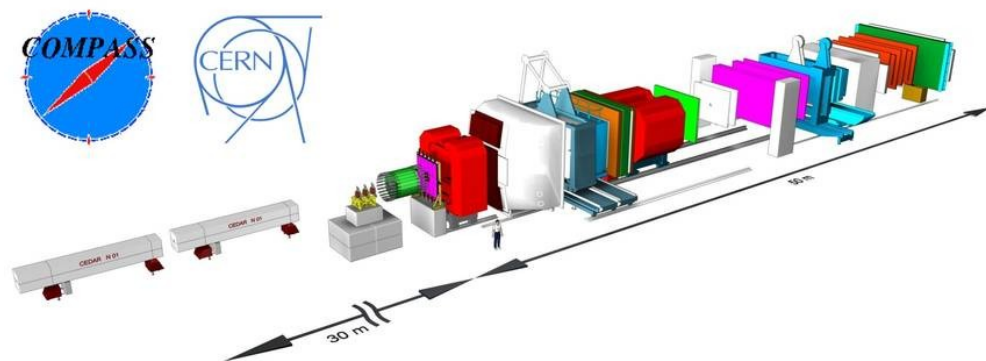
Expérience COMPASS au CERN

Faisceau délivrant : 10^8 muons / spill de 5s

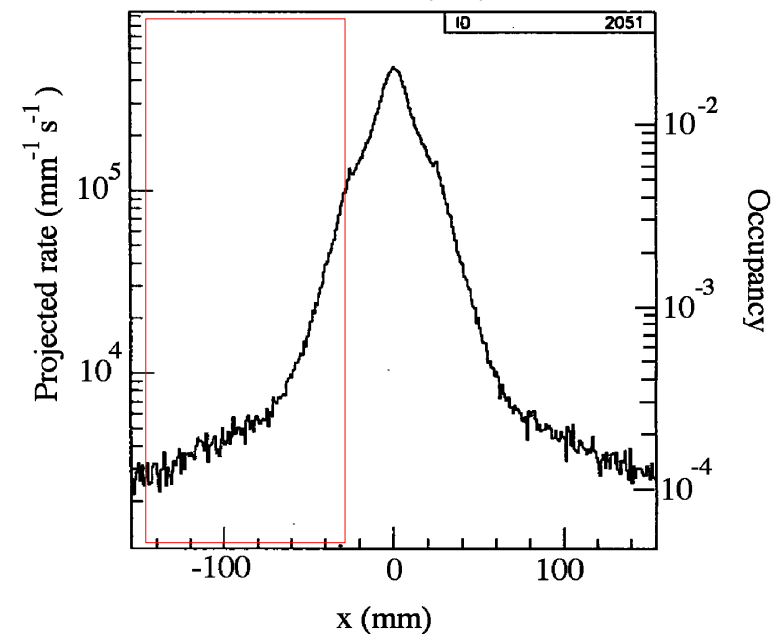
En aval de la cible proche du faisceau : plusieurs dizaine de kHz/mm²

Micromegas: 3 stations de 4 chambres avec pistes XYUV

Triple-GEM: 10 stations de 2 chambres, XY ou UV



C. Altunbas et al., NIMA 490 (2002) 177



Gas rapides et segmentation fine

	ε (%)	σ_{xy} (μm)	σ_t (ns)
μmegas 150 kHz/ch.	97.0	90	9
t-GEM 60 kHz/ch.	95.6	70	12

En ce qui concerne la trajectographie à haut flux, GEM et Micromegas montrent des performances similaires

Résolution en énergie (rayons X)

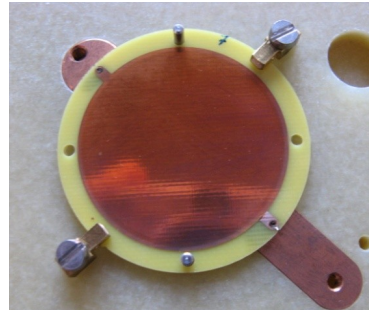
Expérience CAST au CERN

Détection de rayons X (conversions d'axions)

Rejection du bruit de fond : trace et énergie

Segmentation fine (pistes XY pas de 350 μm)

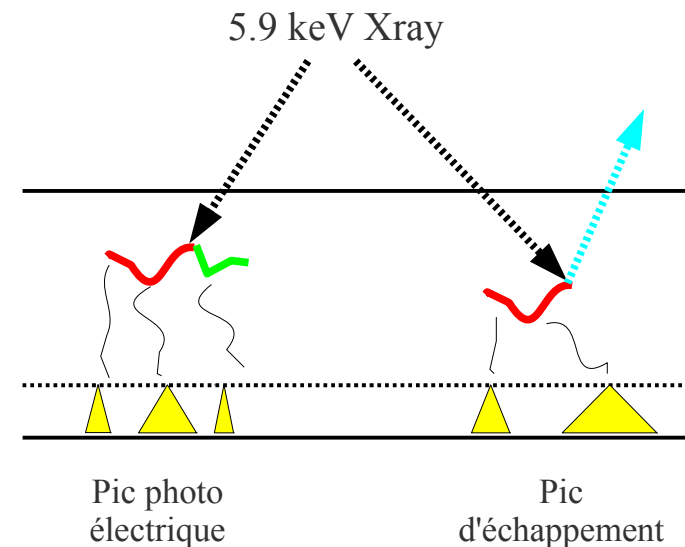
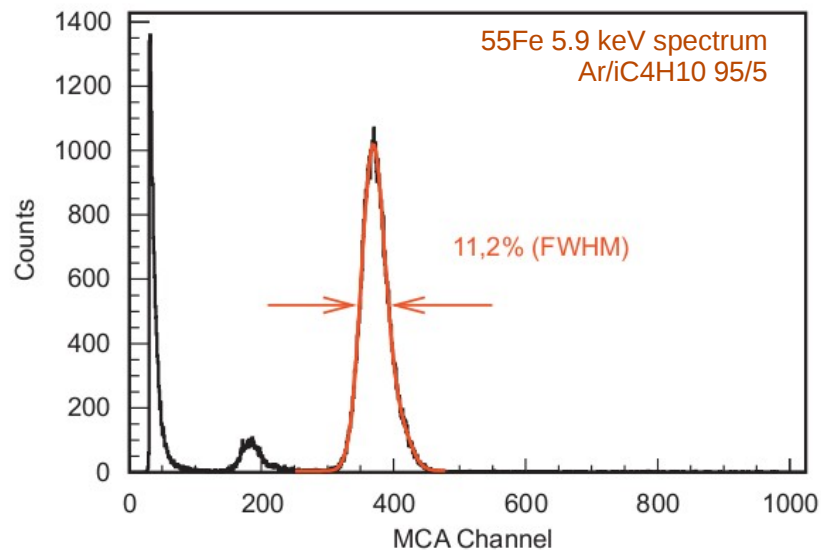
Peu de fluctuations de gain : microBulk



Micromegas microBulk

Photolithographie d'une feuille de kapton \rightarrow contrôle précis de la distance anode/grille

T. Dafni et al., NIMA 608 (2009) 259–266



Résolution en énergie (rayons X)

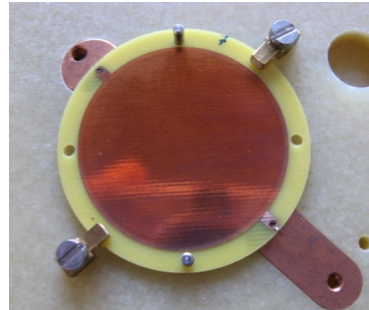
Expérience CAST au CERN

Détection de rayons X (conversion d'axions)

Rejection du bruit de fond : trace et énergie

Segmentation fine (pistes XY pas de $350\ \mu\text{m}$)

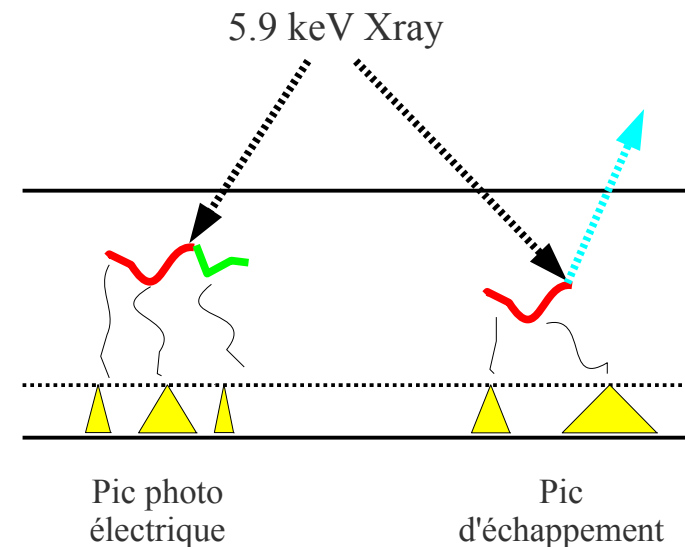
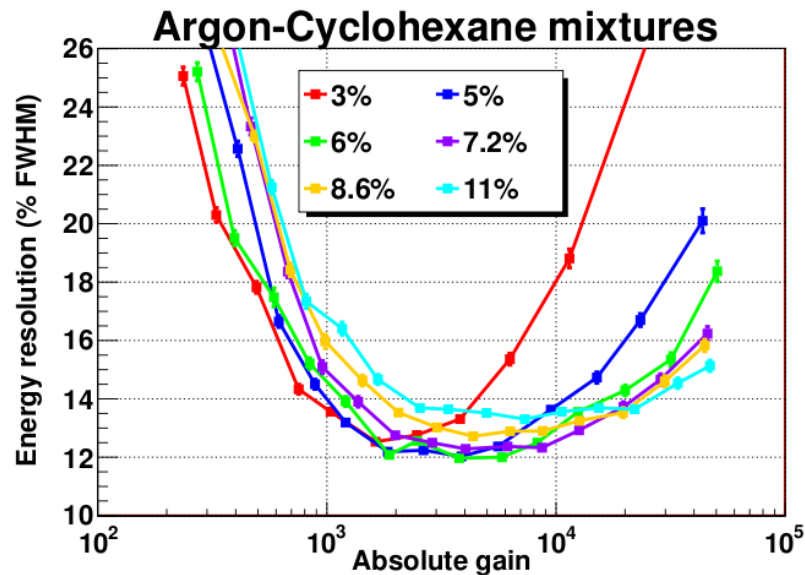
Peu de fluctuations de gain : microBulk



Fluctuations d'avalanche

Bas gain: bruit électronique, transparence électronique

Haut gain: avalanche secondaires déclenchées par les photons UV



Résolution en énergie (rayons X)

Limite intrinsèque au gaz

Fluctuation du nombre d'électrons primaires

$$N = E / W \quad \sigma_N = (F \cdot N)^{1/2} \quad R = 2.35 (FW/E)^{1/2}$$

Transfert d'énergie des états excités aux molécules: $X^* + Y \rightarrow X + Y^+ + e^-$

Cas limite: toute l'énergie est investie dans l'ionisation

Mélanges à fort effet Penning

$$W \rightarrow I$$

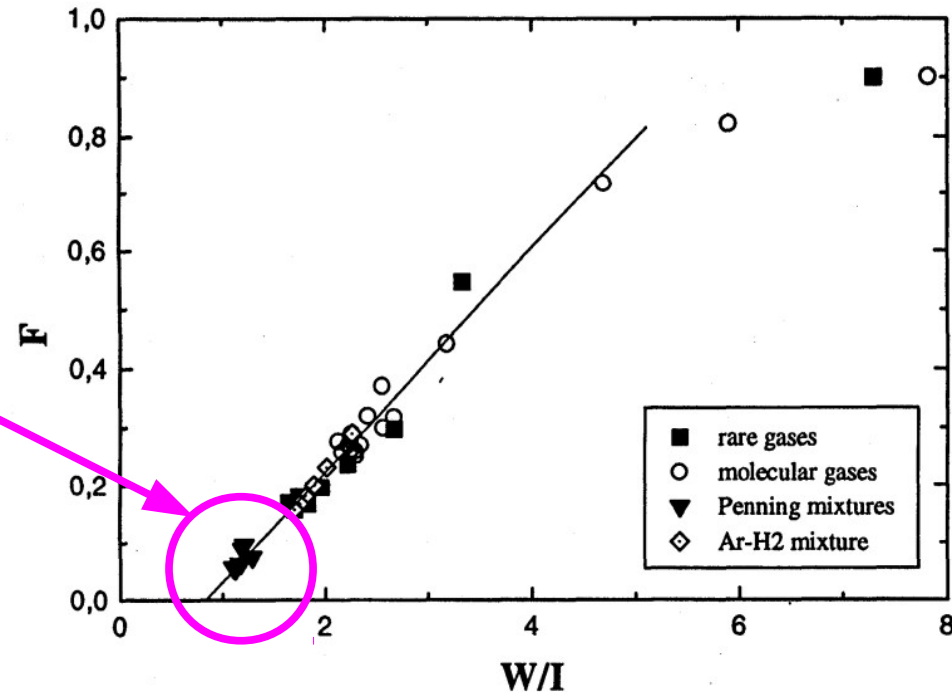
$$F \rightarrow 0$$

$$\text{Résolution} \rightarrow 0$$

$R \sim 16\% \text{ FWHM} / \sqrt{E(\text{keV})}$ Argon

$R \sim 8\% \text{ FWHM} / \sqrt{E(\text{keV})}$ Penning mix.

I K Bronic 1992 J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 25 L215



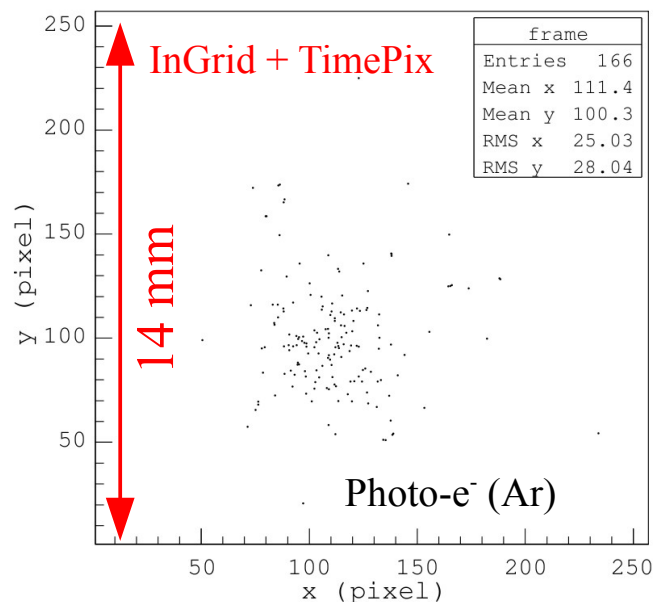
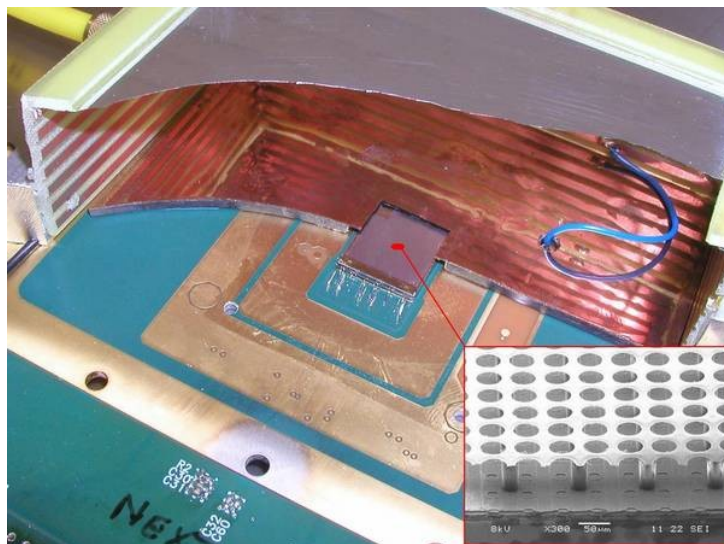
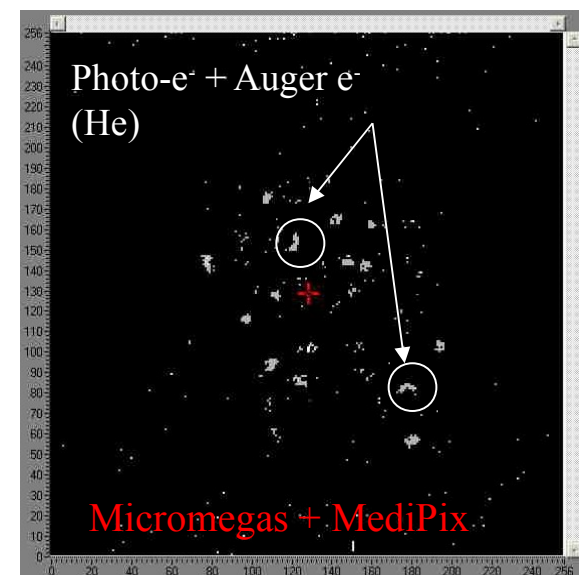
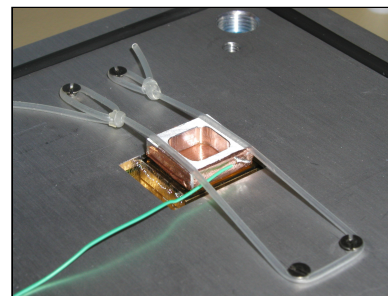
Suppression des fluctuations de gain

Comptage des électrons primaires *Lecture à pixels*

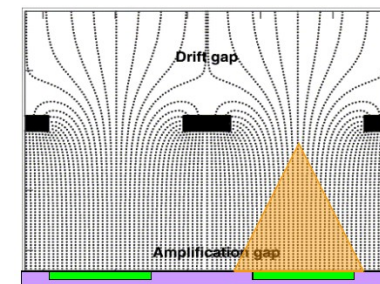
Pixels de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$, surface totale $15 \times 15 \text{ mm}^2$

Trajectographie : Micromegas + TimePix
NIKHEF/Saclay/Twente, van der Graaf

Polarimétrie rayons X
GEM + PIXI, INFN, Bellazzini



Avec plus de diffusion:
 $1 e^- = 1 \text{ pixel}$



Suppression des fluctuations de gain

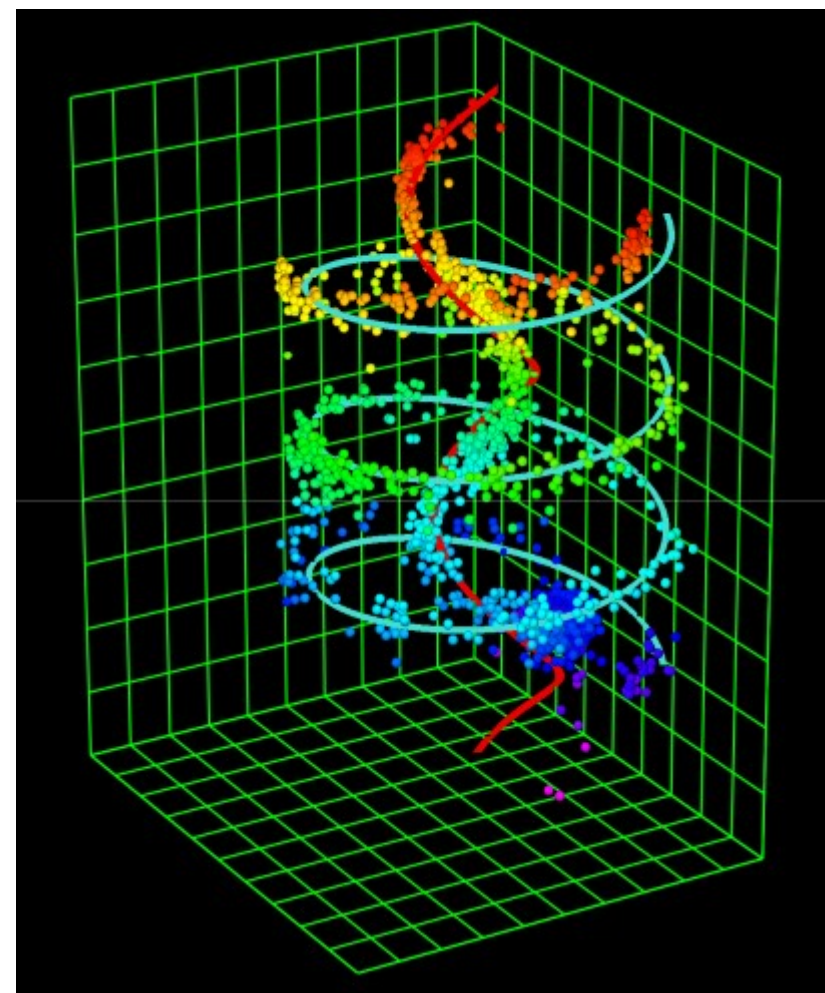
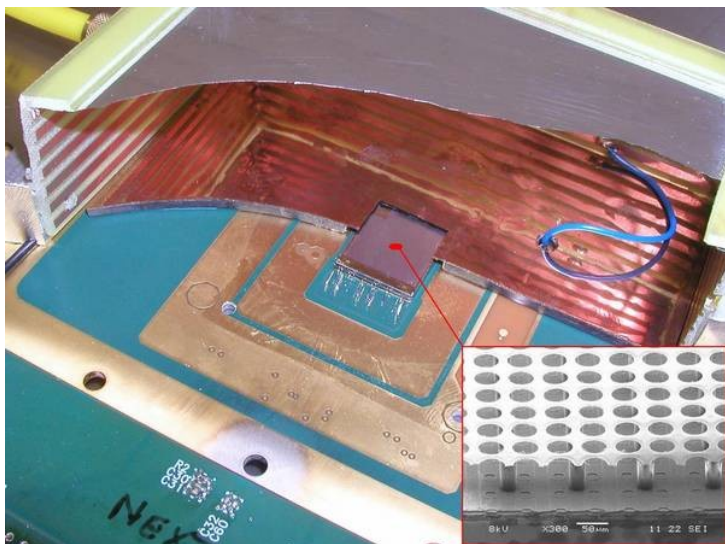
Comptage des électrons primaires

Lecture à pixels

Pixels de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$, surface totale $15 \times 15 \text{ mm}^2$

Trajectographie : Micromegas + TimePix
NIKHEF/Saclay/Twente, van der Graaf

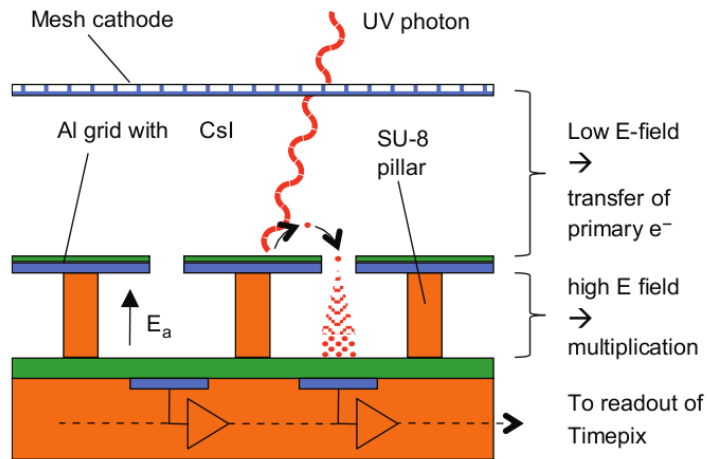
Polarimétrie rayons X
GEM + PIXI, INFN, Bellazzini



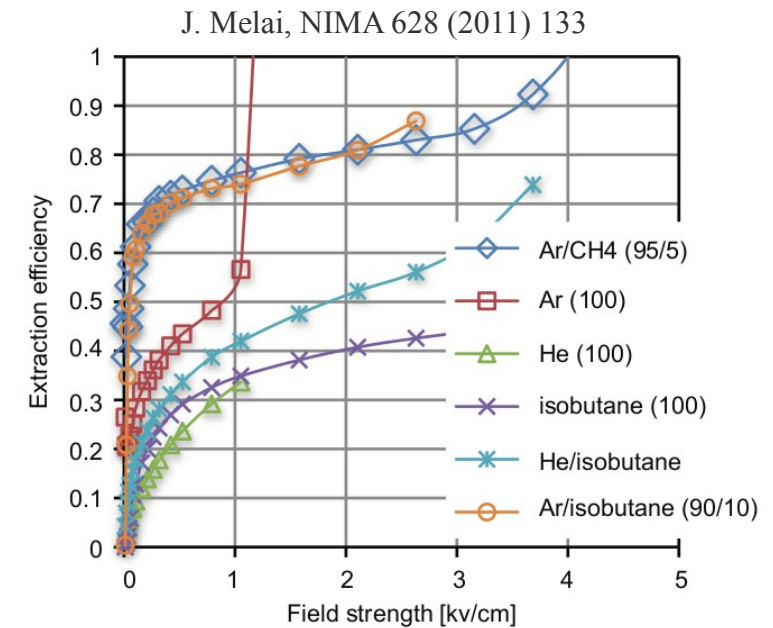
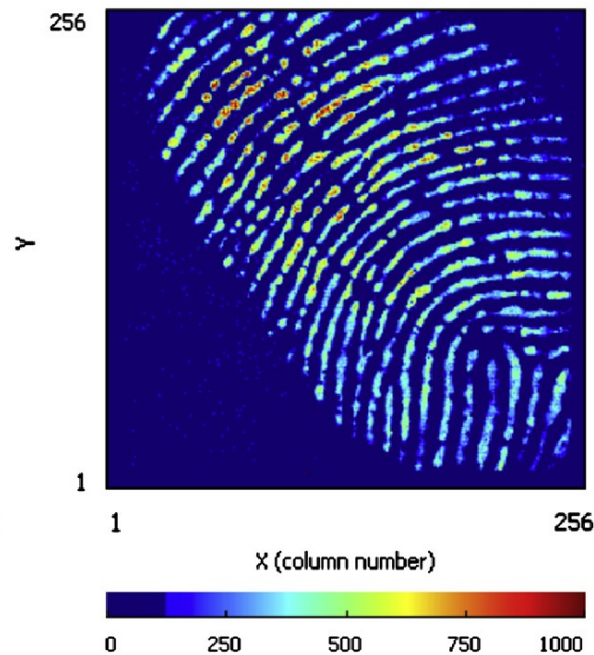
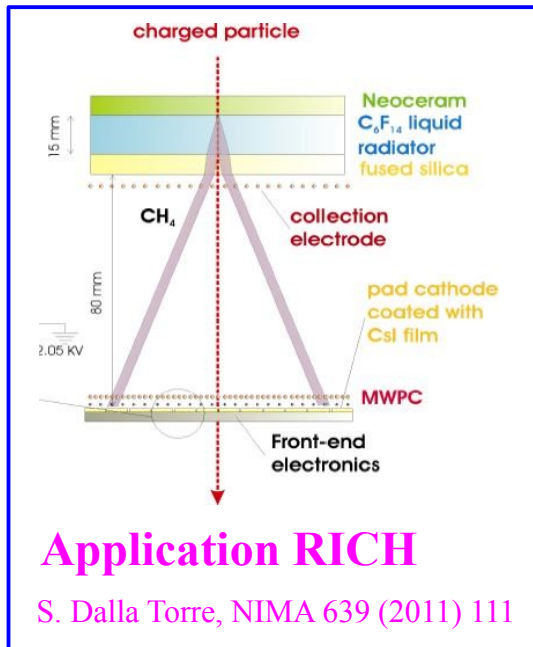
Efficacité de détection aux e- uniques $> 95 \%$

Image de 2 traces d'électrons (^{90}Sr)
dans un champ vertical de 0.2 T

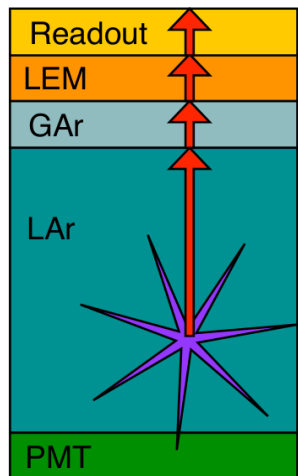
Détection de lumière UV



Dépôt d'un film photosensible sur les électrodes
Emission d'un photoélectron
Extraction
Multiplication



Application dans les TPC double phase

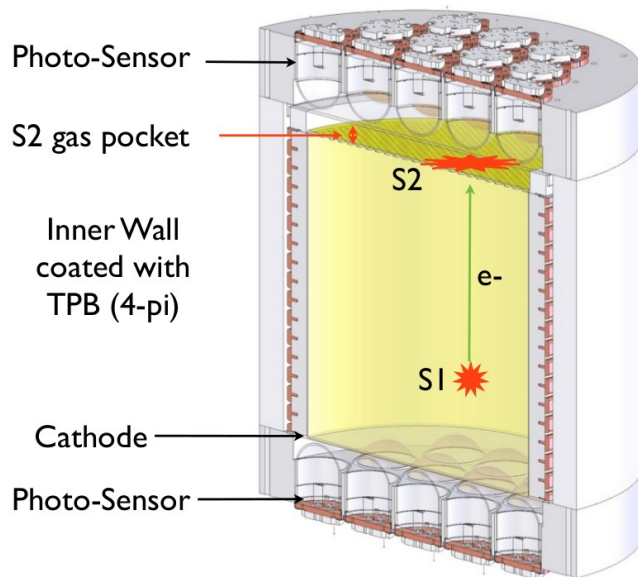
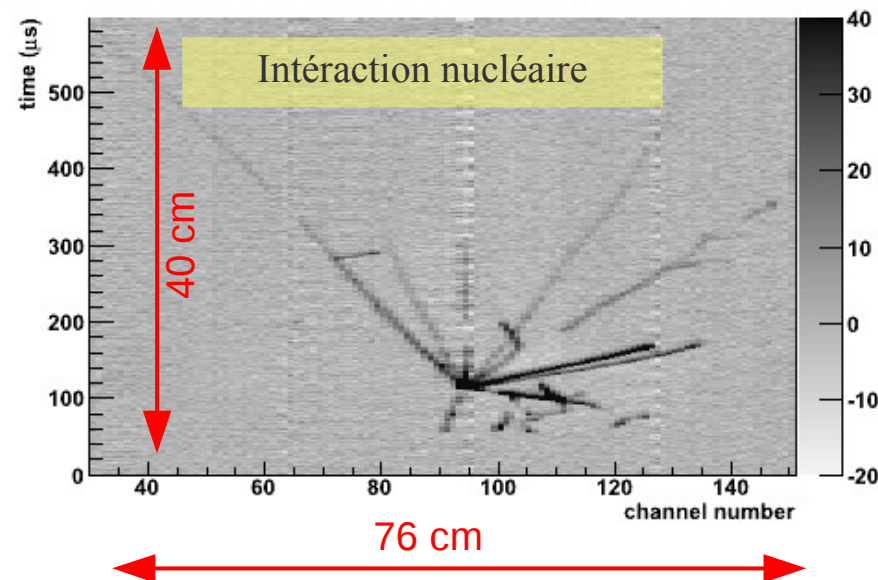


Trajectographe 3D
+ calorimètre homogène

Large Electron Multiplier

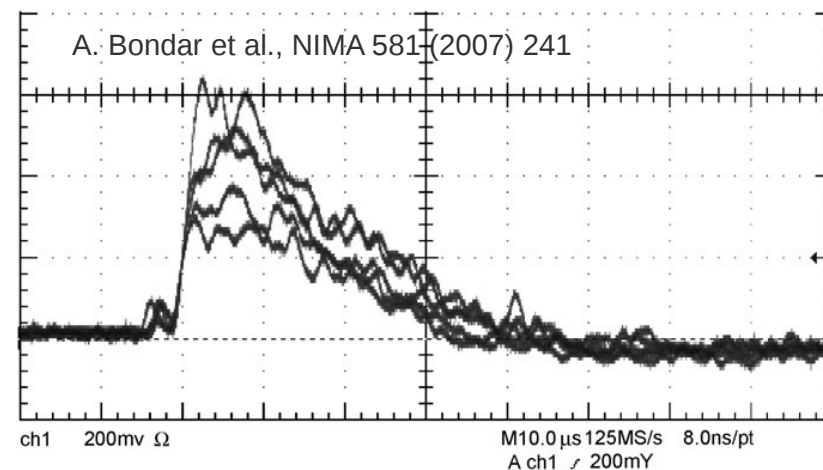
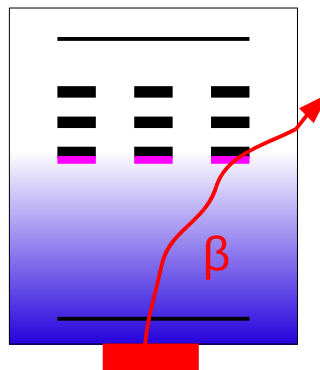
Epaisseur 1 mm, $5 \cdot 10^5$ trous
diamètre/pas trous : 500/800 μm
Pas des pistes XY 3 mm

A. Badertscher et al., NIMA 641 (2011) 48



PMT → MPGD

Démonstration dans l'Ar: prototype (10 cm³) avec 3 GEM, Gain > 5000 à 85 K

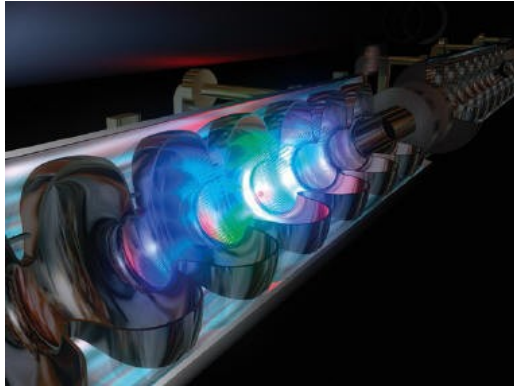


Les collisionneurs haute luminosité

- Le futur linéaire à électrons
 - Le calorimètre hadronique
→ les détecteurs de grandes tailles
 - La chambre à projection temporelle
→ la résolution spatiale
- Le LHC haute luminosité
 - Le spectromètre à muons
→ les stratégies contre les étincelles

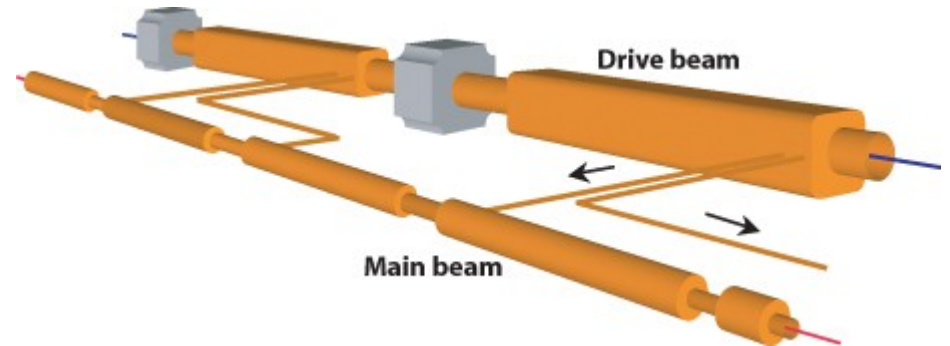
Le futur collisionneur linéaire

International Linear Collider



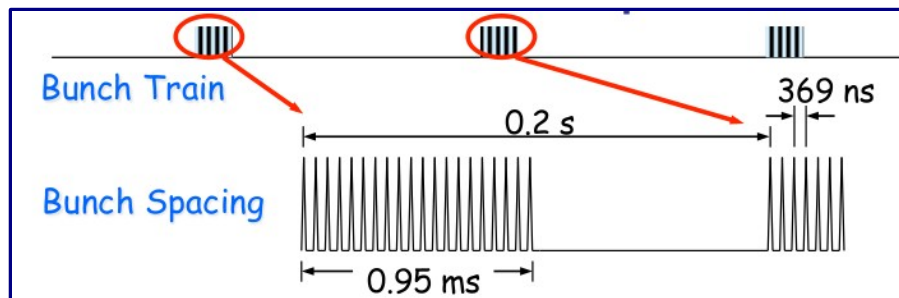
Cavités RF supraconducteurs
Gradient 35 MV/m
Energie c.m. 500 GeV (1 TeV)
Période BX 369 ns
Taille paquets x/y 600/6 nm
Beam-strahlung 0.2 paire/BX

Compact Linear Collider



Accélération à 2 faisceaux
Gradient 100 MV/m
Energie c.m. 3 TeV
Période BX 0.5 ns
Taille paquets x/y 40/1 nm
Beam-strahlung 3 paires/BX

“Detailed Baseline Design” pour la fin 2012



“Conceptual design report” récemment publié
<http://lcd.web.cern.ch/LCD/CDR/CDR.html>

Objectif ILC : 500 fb^{-1} en 4 ans
→ luminosité de $2 \cdot 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{s}$

Objectifs physiques ILC

Brisure de symétrie électrofaible

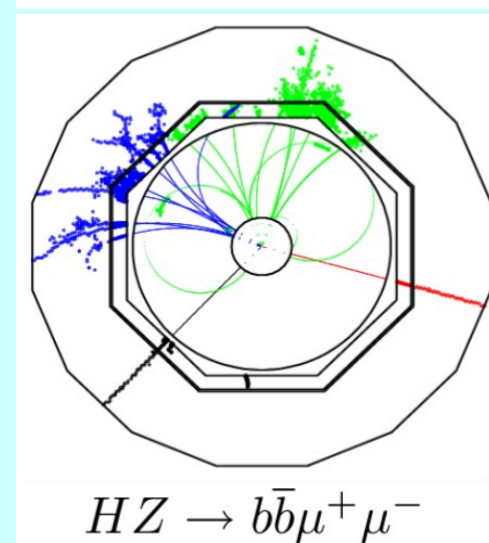
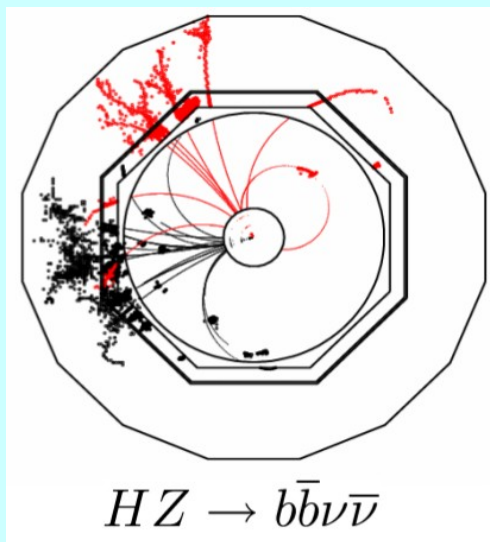
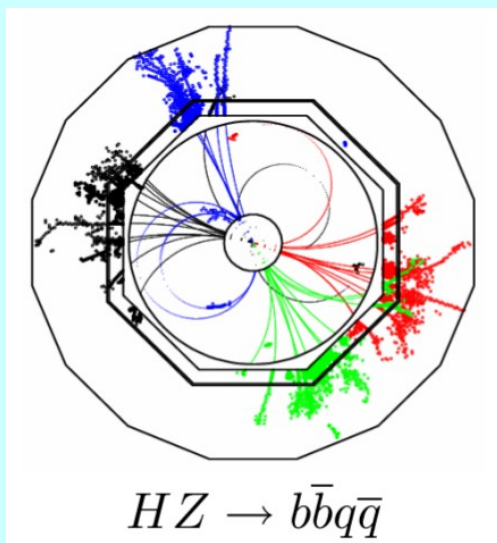
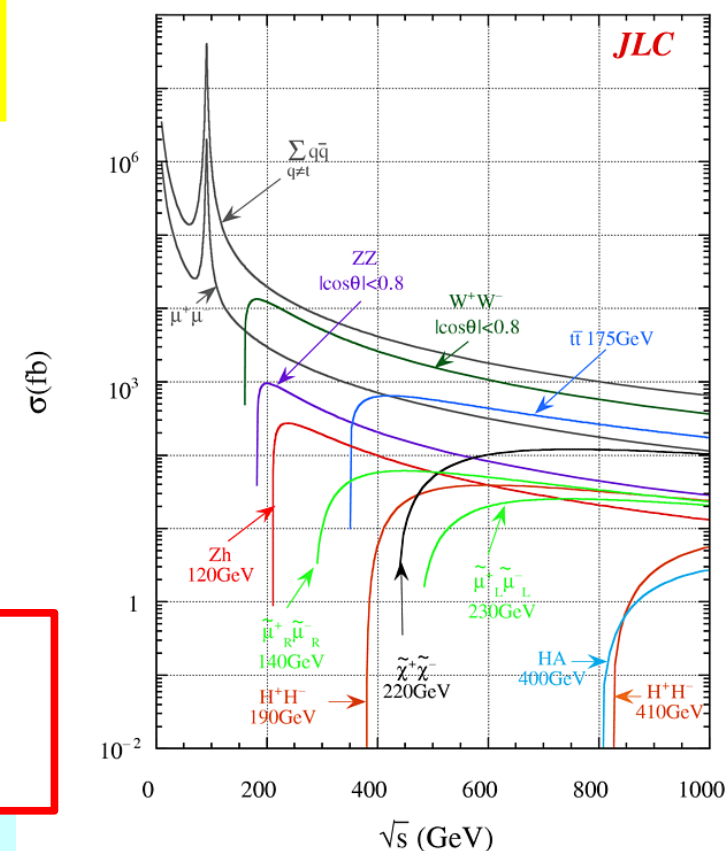
Spectre des particules supersymétriques

Propriétés des particules lourdes du SM (W, top)

Au-delà du SM (dimensions supplémentaires)

Mesure des propriétés du boson de Higgs

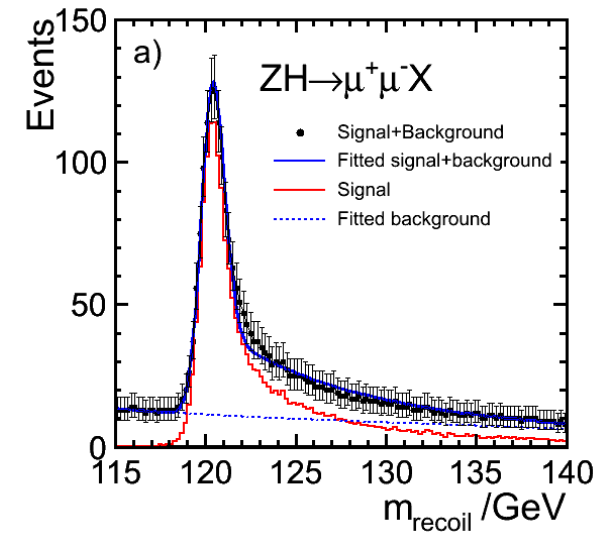
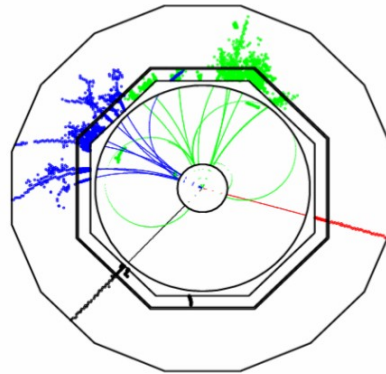
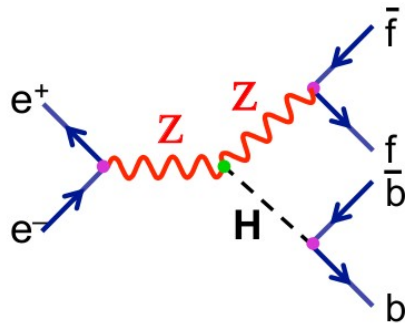
- Masse, rapports de branchement, largeur, spin
- Couplages aux bosons de gauge, fermions (Yukawa), tri-linéaire



Objectifs physiques à l'ILC

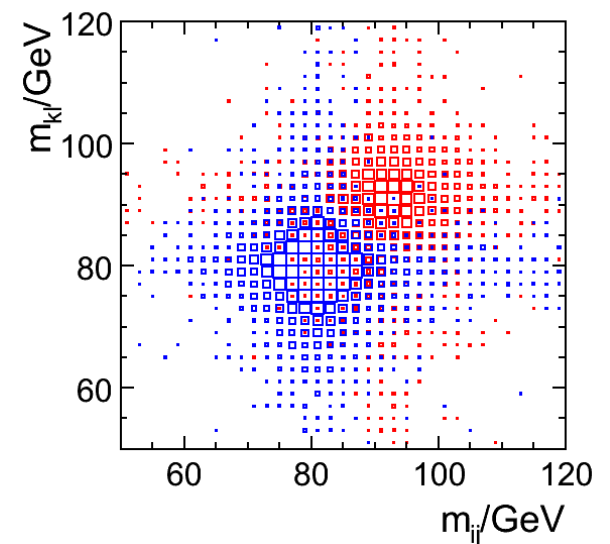
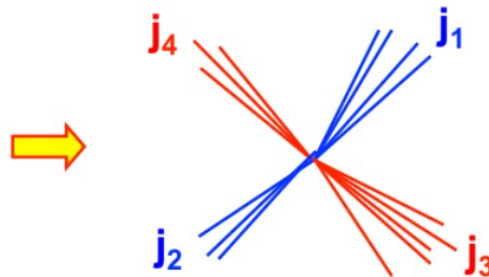
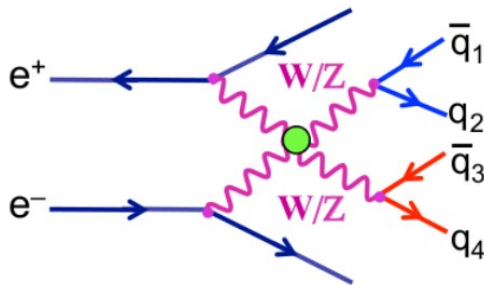
Mesure de la masse du boson de Higgs (indepdt. hyp. désintégration)

Recul par rapport au Z se désintégrant en 2 muons



Diffusion de bosons de gauge

Identification états finaux à 2 bosons W ou 2 Z



Contraintes sur les détecteurs

Impulsion

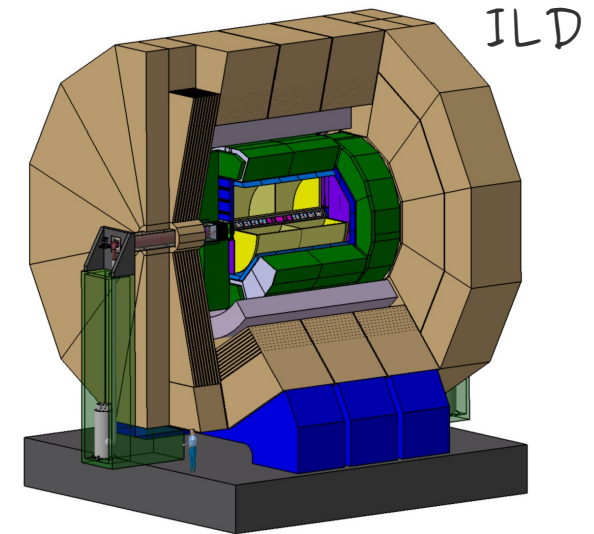
$$\sigma_{1/p} < 5 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-1}$$

Energie (jets)

$$\frac{\sigma_E}{E} \approx 3 - 4 \%$$

Vertex

$$\sigma_{r\phi} = 5 \oplus 10 / (p \sin^{\frac{3}{2}} \theta) \mu\text{m}$$



ILD

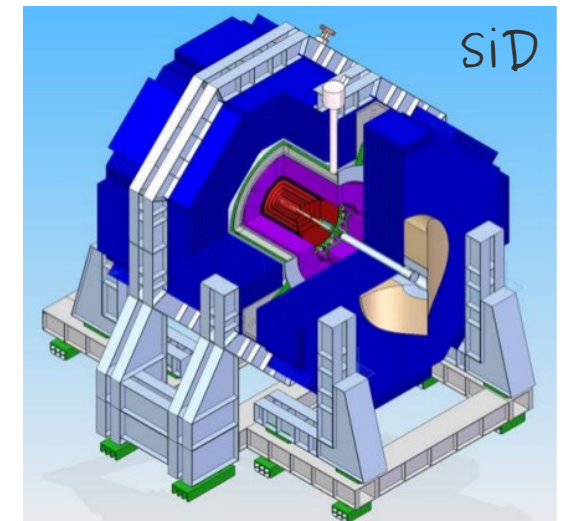
TPC de grand diamètre (3.6 m)

Champ magnétique de 3.5 T

SiD

Trajectographe silicium compact (2.4 m)

Champ magnétique de 5 T



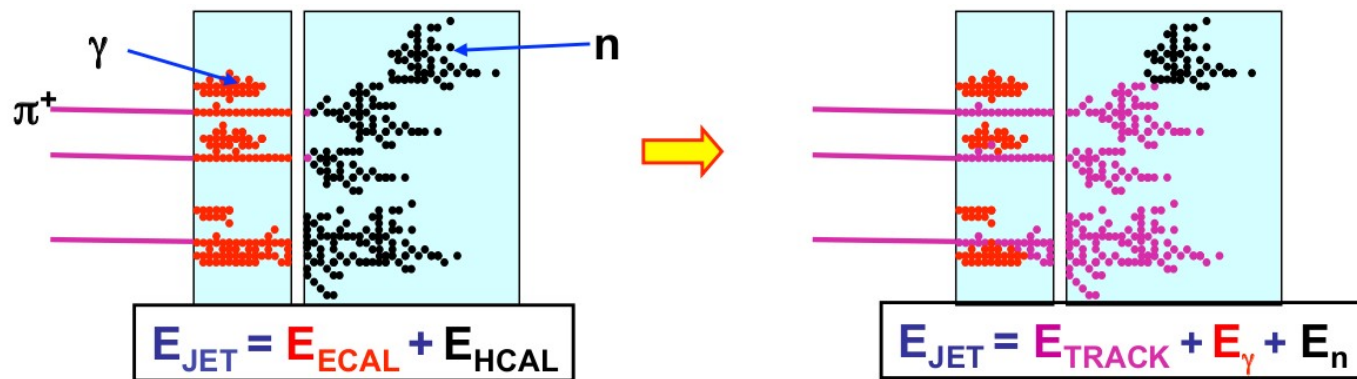
Mesure de l'énergie des jets

Résolution des calorimètres hadroniques à échantillonnage intrinsèquement médiocre

- Réactions nucléaires dans les absorbeurs → énergie non mesurée
- Fluctuations de l'énergie EM et H d'une gerbe à l'autre, e/h fonction de l'énergie

Mesurer l'énergie des particules chargées avec le trajectographe

Concept du « *Particle Flow* »



Composition jets

60 % h. chargés
30 % photons
10 % h. neutres

→ Séparations des différents dépôts dans les calorimètres

Autre approche basée sur la compensation

Mesure de l'énergie EM et H pour chaque gerbe

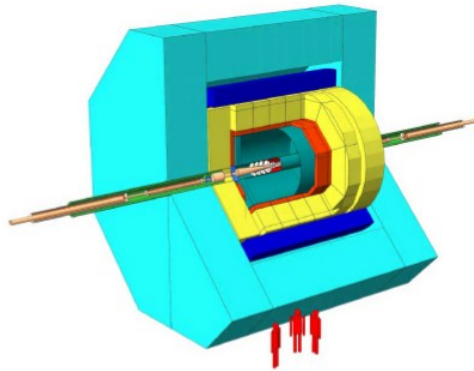
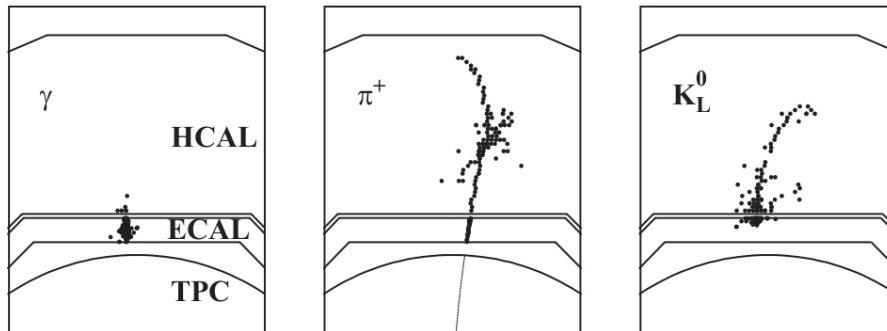
The DREAM project—Towards the ultimate in calorimetry, NIMA 617 (2010) 129

Les performances du « *Particle Flow* »

Les performances du Particle Flow dépendent de

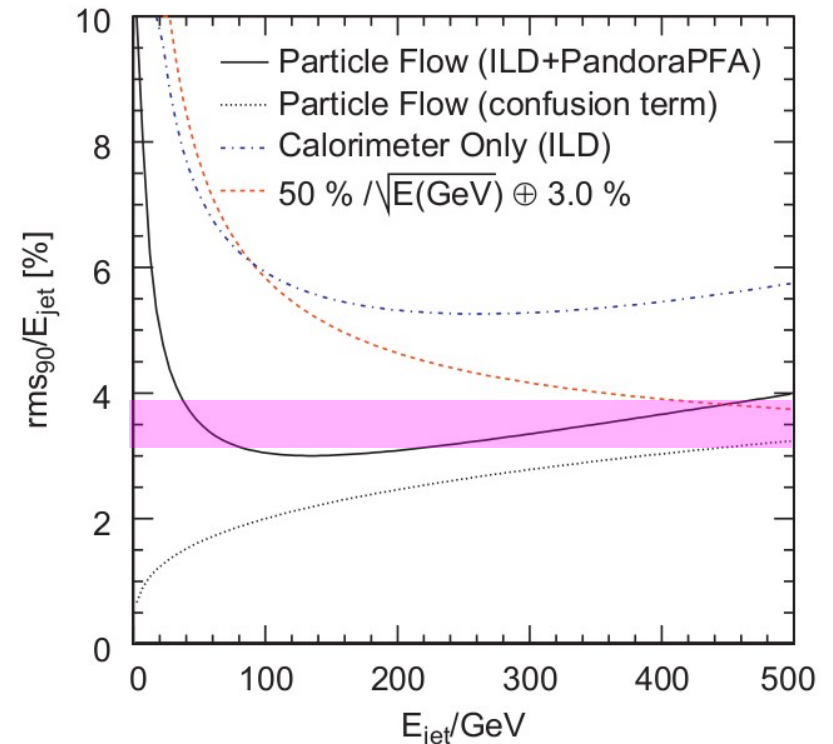
- la segmentation des calorimètres
- l'efficacité du programme de reconstruction

Particle flow calorimetry and the PandoraPFA algorithm, M.A. Thomson, NIMA 611 (2009) 25



E_{JET}	$\sigma_E/E = \alpha/\sqrt{E_{jj}}$ $ \cos\theta < 0.7$
45 GeV	23 %
100 GeV	29 %
180 GeV	39 %
250 GeV	47 %

Simulation très encourageante !



Les calorimètres pour le « *Particle Flow* »

Granularité

10-50 mm² (ECAL) et 1-10 cm² (HCAL)
→ Electronique frontale sur les détecteur,
power-pulsée et auto-déclenchée

Herméticité

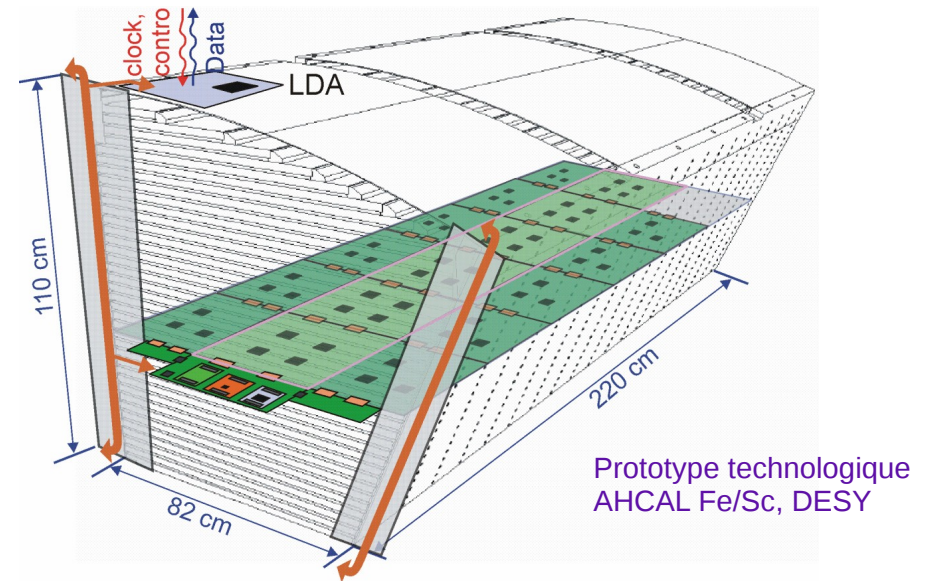
> 5 mrad, zone mortes et fuites minimales
→ Détecteurs fins, de grande taille
et vers l'avant, tolérants aux radiations

Résolution

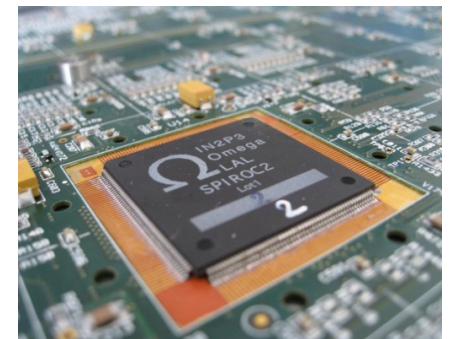
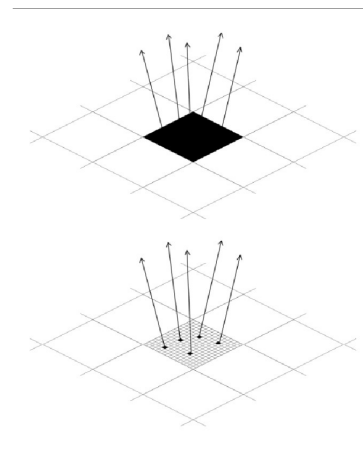
Mesure des neutres (photons et hadrons)
→ Somme de l'énergie (10-12 bits)
ou comptage (1-2 bits)

Stabilité

Dissipation de chaleur, variables environnementales
→ Systèmes de contrôle et de calibration,
techniques de correction des signaux



Analogue VS digital



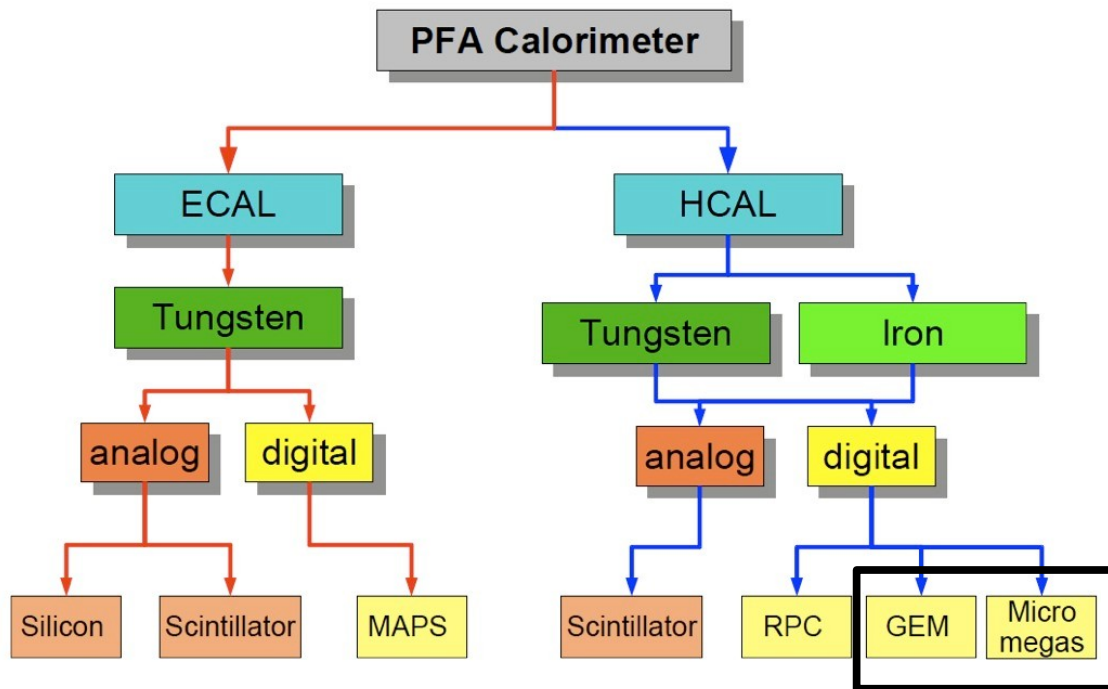
ASIC développés au LAL (Omega):
HARDROC, SPIROC, SKIROC...

Les collaborations

CALICE, Calorimeter for LInear Collider Experiment

Calorimètres optimisés pour le « Particle Flow »

<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CALICE/CaliceCollaboration>



Etude de différentes technologies
Construction de prototypes « ILC »
Validation sur faisceaux (Geant4)
Développement ASIC et DAQ commune
Outils de reconstruction et d'analyse

Au CNRS : IPNL, LAL, LAPP, LLR, LPC, LPSC

MPGD à l'étude pour un
HCAL à lecture à seuil

FCAL, Forward Calorimeters

Calorimètres optimisés pour les régions vers l'avant

Capteurs tolérants aux radiations et ASIC/ADC rapides

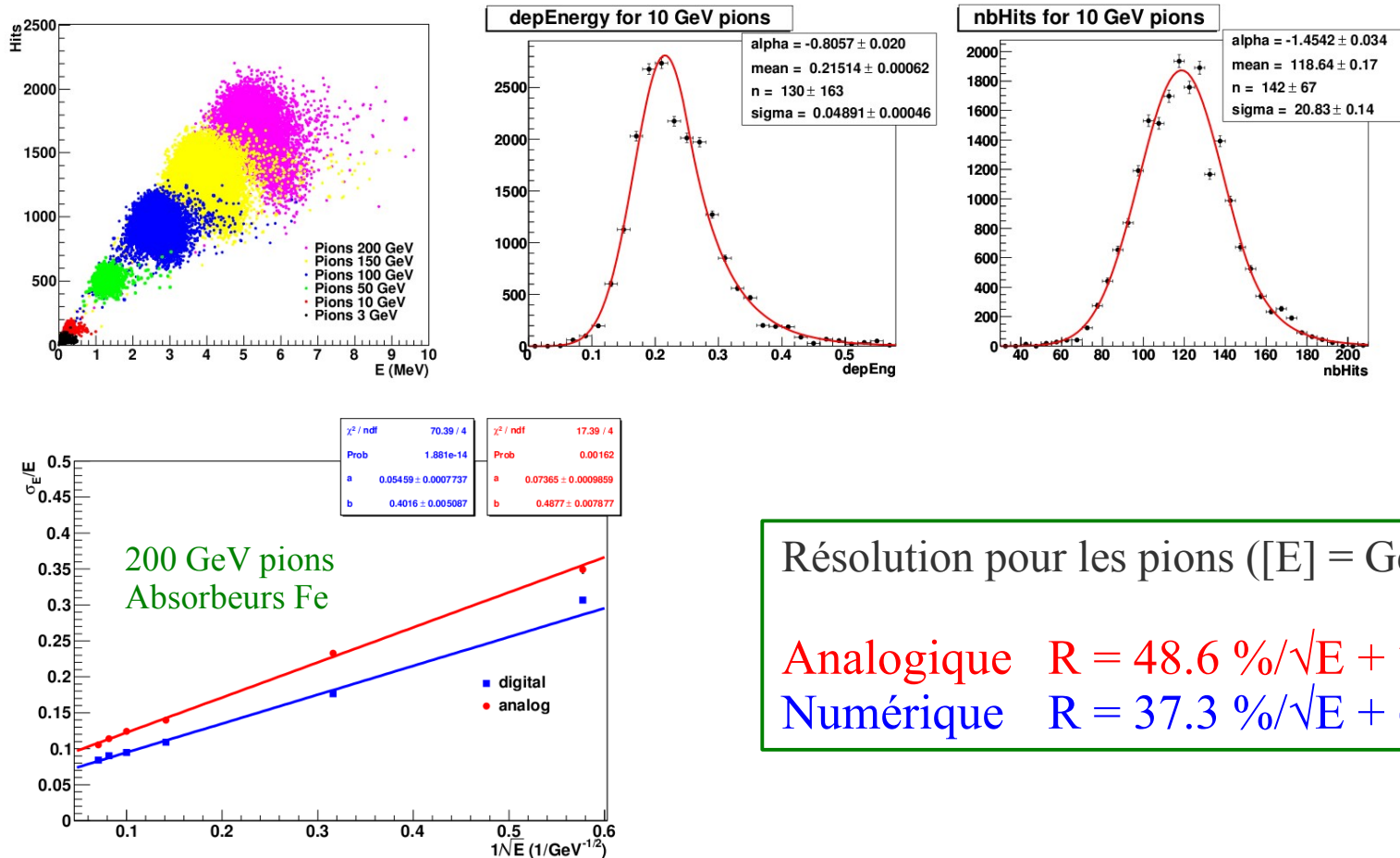
<http://fc.al.desy.de/>

Les calorimètres hadroniques gazeux à seuil(s)

Energie mesurée par comptage

- suppression des fluctuations de Landau
- saturation à haute énergie

Monte Carlo study of the physics performance of a digital hadronic calorimeter, C. Adloff, et al., JINST 4 (2009) 11009



Résolution pour les pions ($[E] = \text{GeV}$):

Analogique $R = 48.6 \% / \sqrt{E} + 7.1 \%$

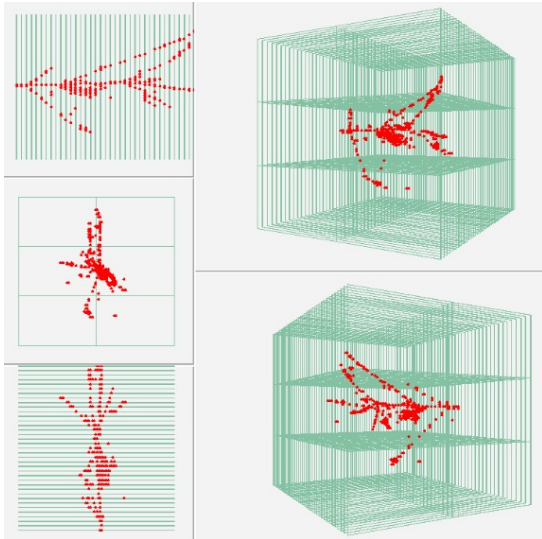
Numérique $R = 37.3 \% / \sqrt{E} + 6.0 \%$

Les calorimètres hadroniques gazeux à seuil(s)

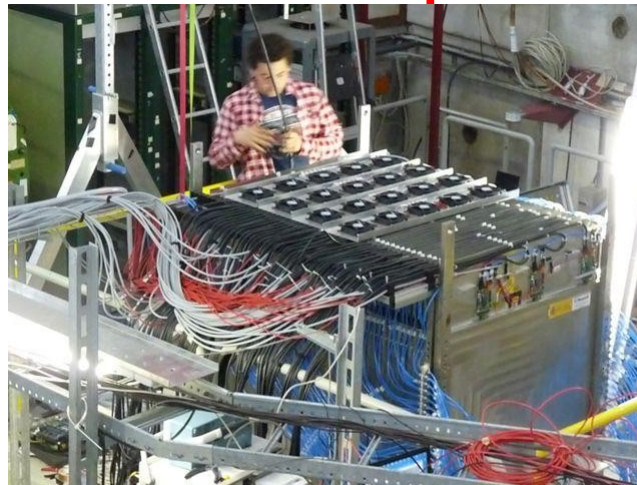
Projets m^3 de 40 RPC ($4.5 \lambda_{\text{int}}$)

US, Argonne : 1-bit, 3 chambres/plan

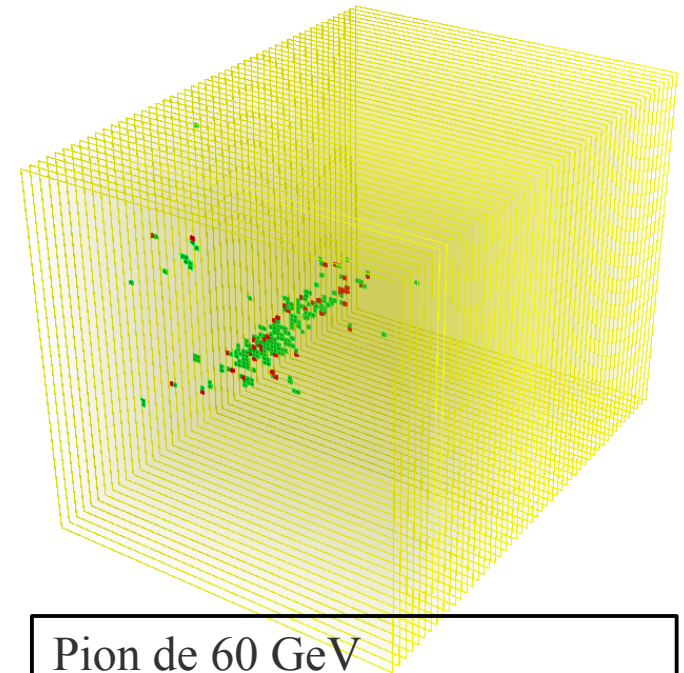
EU, Lyon : 2-bit, 1 chambre/plan, *power pulsing*



US DHCAL



EU sDHCAL



Pion de 60 GeV

couleur = seuil

Event display: Druid, M. Ruan, LLR

sDHCAL RPC

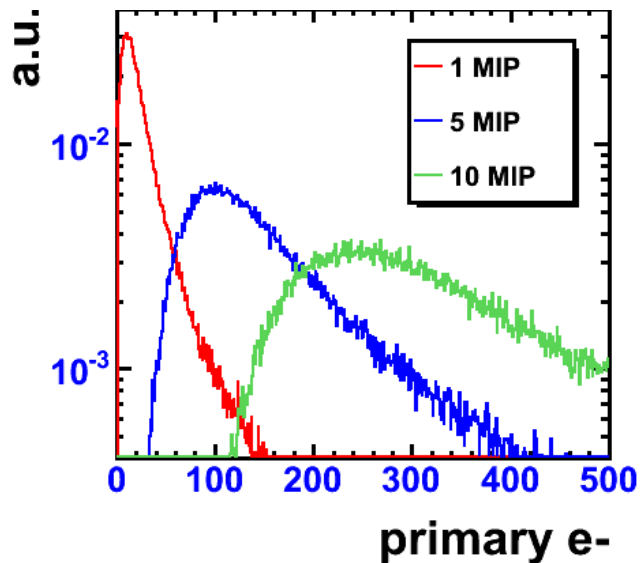
Campagne de test débutée en 2011 au CERN/SPS

Sera poursuivie en 2012, dès le mois de Mai

Utilisation des MPGD dans le HCAL

Tenue en flux
Amplification proportionnelle
Pas d'étalement de la charge d'avalanche
DéTECTEURS de grandes tailles
Haute tension < 500 V (Micromegas)
Mélanges standards (Ar/CO_2 , $\text{Ar}/i\text{C}_4\text{H}_{10}$)
Insensibilité aux neutrons

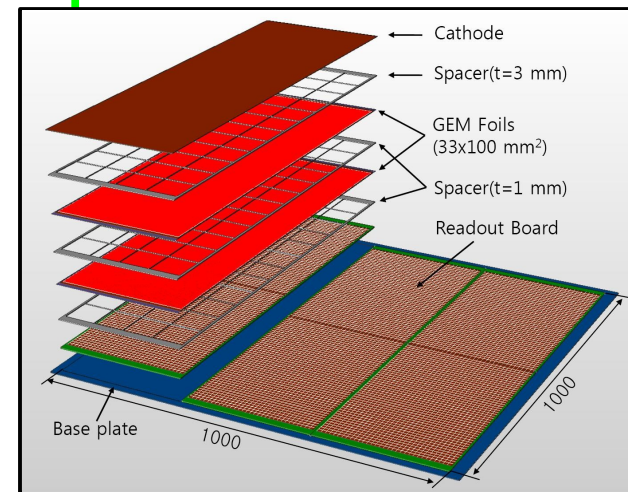
δ -électrons
Signal 10-20 fC, ASIC bas bruit
Étincelles, protections de l'électronique



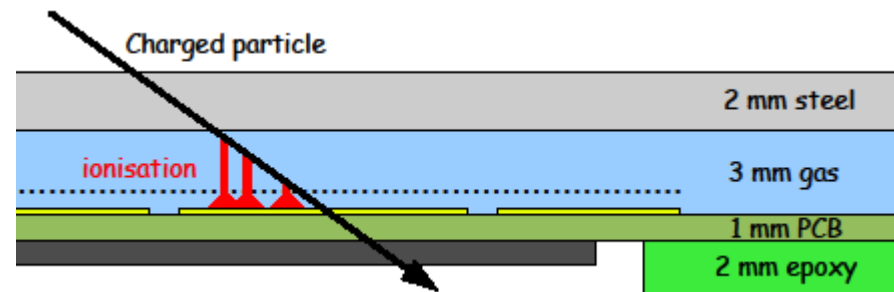
Projets multi-m² MPGD

GEM, US, Arlington : 1 bit

Micromegas, EU, Annecy : 2-bit



GEM DHCal



Utilisation de Micromegas dans le HCal (1/4)

MICROMEAS chambers for hadronic calorimetry at a future linear collider,
C. Adloff, et al., JINST 4 (2009) 11023

Procédé de fabrication « Bulk »

Grille en acier solidaire des cartes (robuste)

Grandes tailles, jusqu'à $1 \times 2 \text{ m}^2$

Dessin mécanique du prototype m^2

6 cartes de $48 \times 32 \text{ cm}^2$ espacées de 5 mm

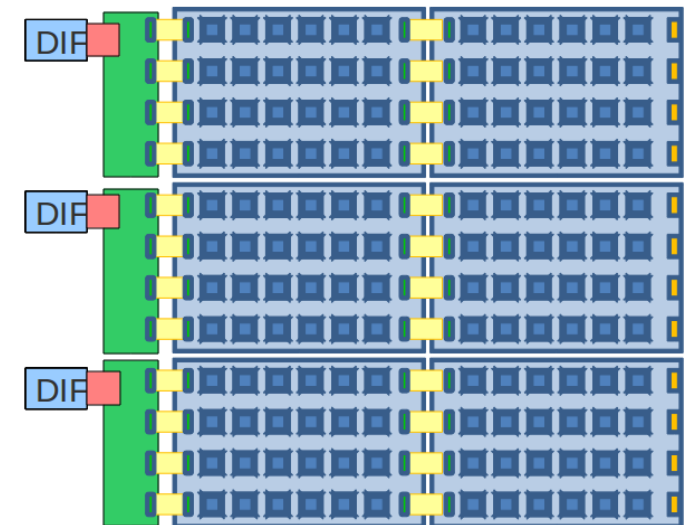
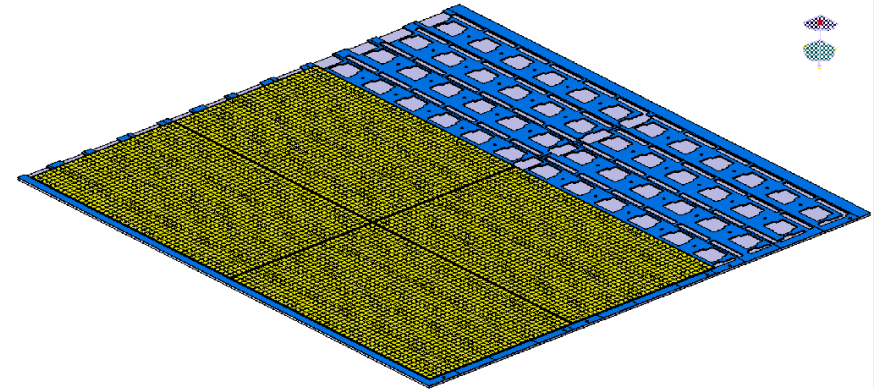
Epaisseur de 12 mm, zones mortes $< 2\%$

Intégration de l'électronique

Cartes = PCB + 1536 anodes + 24 ASIC + diodes

Lecture des ASIC en chaîne, de carte en carte

En principe, *scalable* pour des modules ILC



Utilisation de Micromegas dans le HCAL (2/4)

ASIC : MICROROC

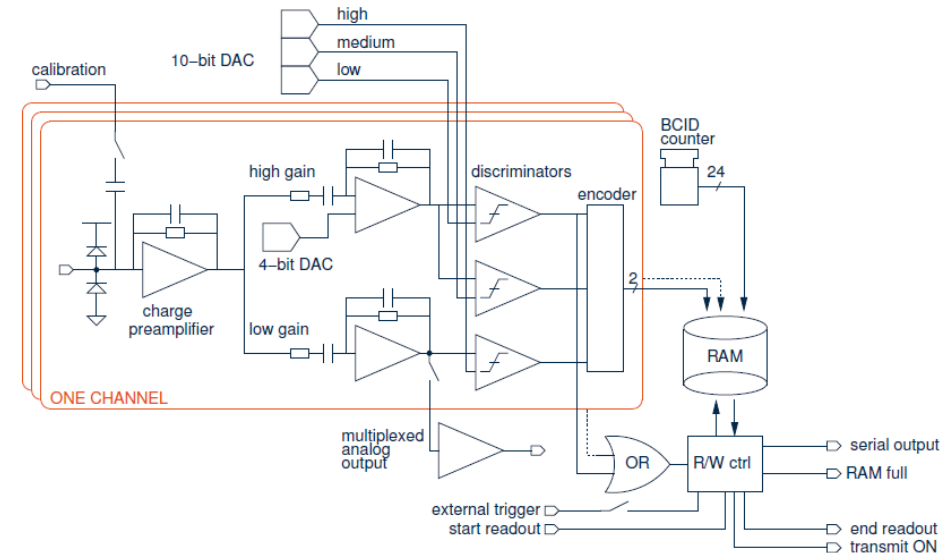
Collaboration LAL/Omega et LAPP

64 canaux avec timestamp de 200 ns

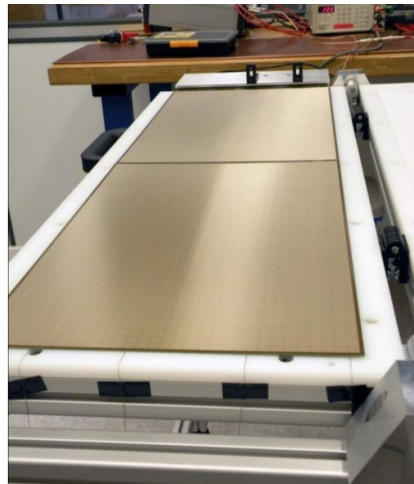
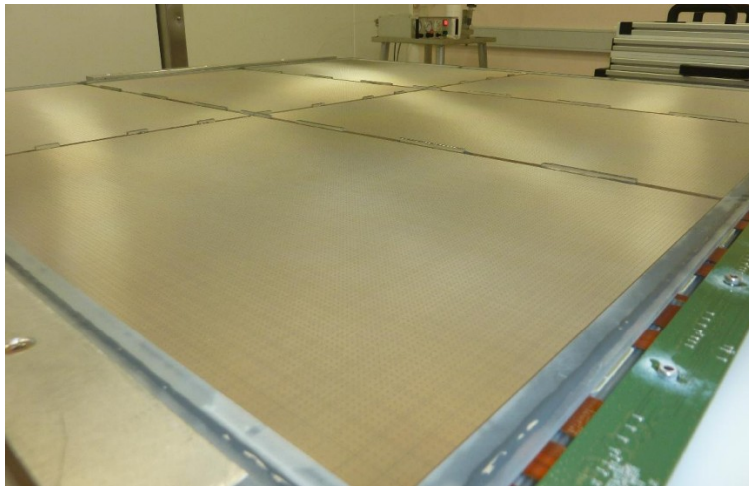
Par voie : préampli de charge + 2 shapers

Par ASIC : 3 discriminateurs et mémoire (127 evts)

Seuil bas sur détecteur : 1 fC = 5 % de la MIP



Assemblage



Utilisation de Micromegas dans le HCAL (3/4)

Comportement sur faisceau

Particules au minimum ionisant (muons)

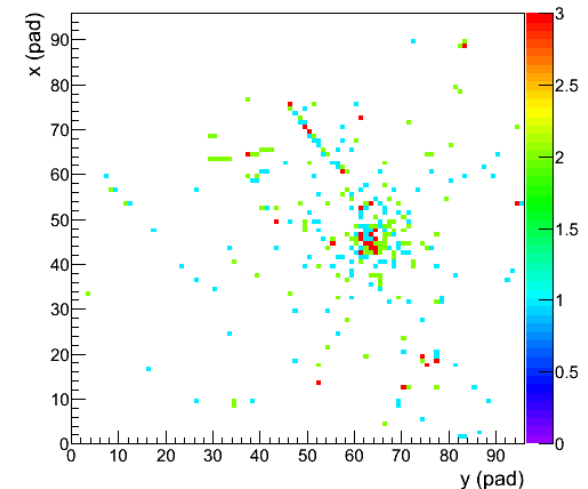
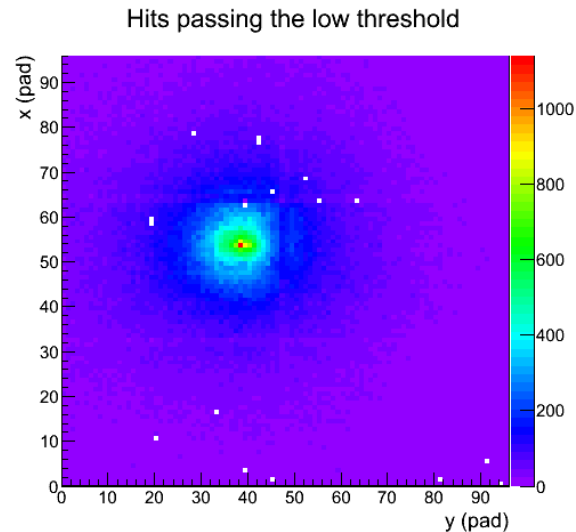
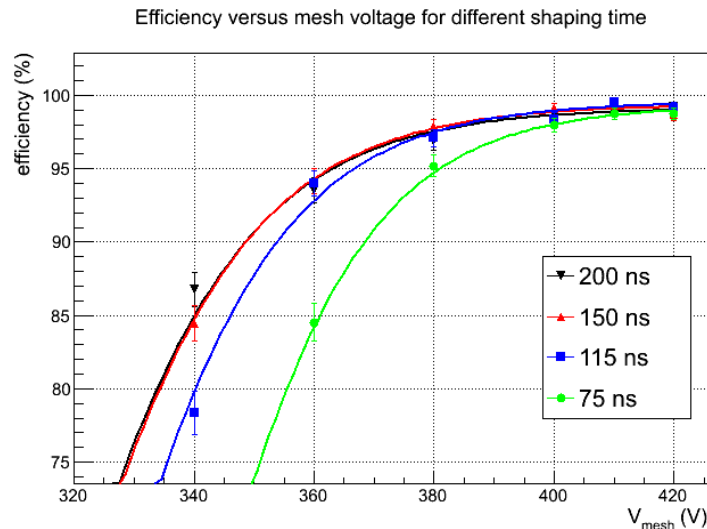
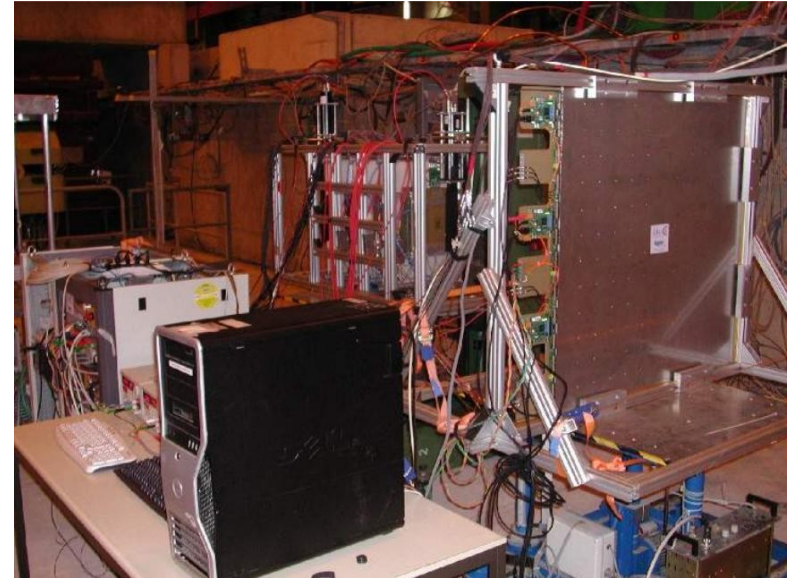
Efficacité de 98 % à bas gain (3000)

Multiplicité de damiers touchés < 1.1

Pions 150 GeV/c + bloc de fer ($1 \lambda_{\text{int}}$)

Symétrie azymuthale du profil : réponse uniforme

... jusqu'à 300 damiers touchés



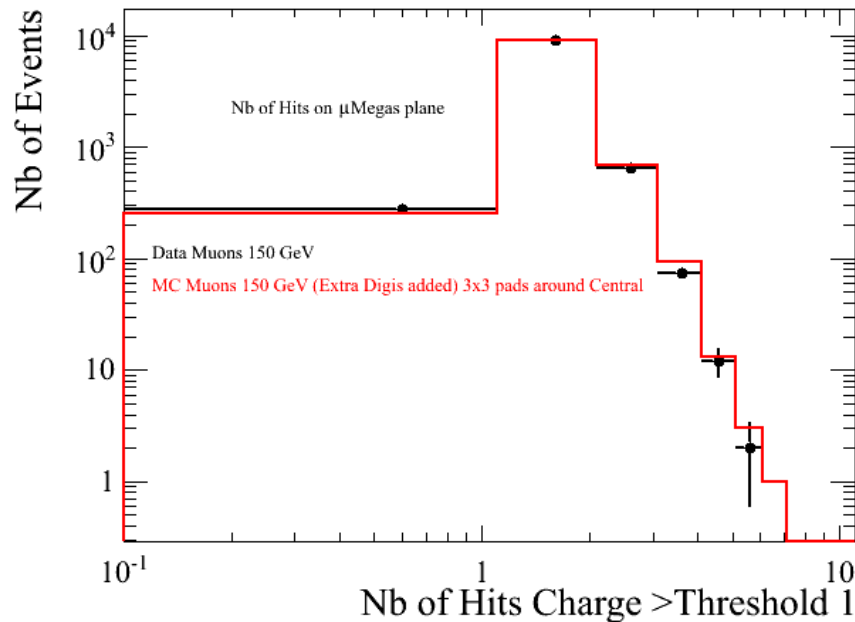
Utilisation de Micromegas dans le HCAL (4/4)

Comparaison à la simulation

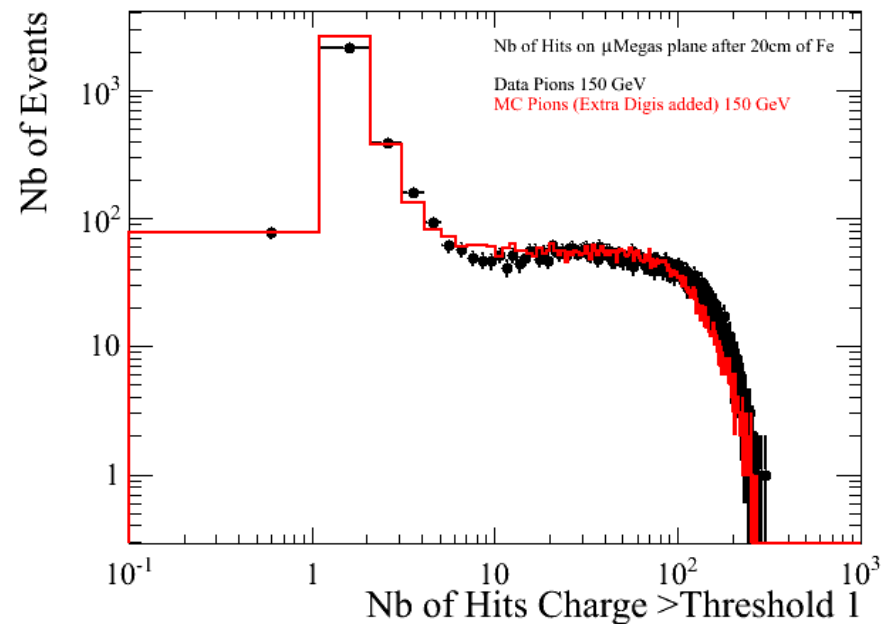
Distribution numérique et spatiale des damiers touchés

Test des listes de physique de Geant4

Muons de 150 GeV/c

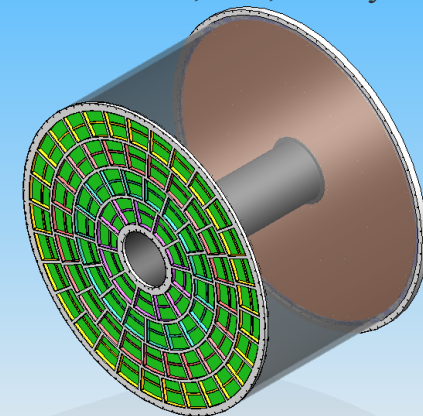


Pions de 150 GeV/c
après 1 λ_{int}



La TPC du project ILD

Dessin 1/2 TPC, Irfu, Saclay



Objectif : $\sigma_{pt}/p_t^2 = 2.10^{-5} \text{ c/GeV}$

avec le trajectographe complet

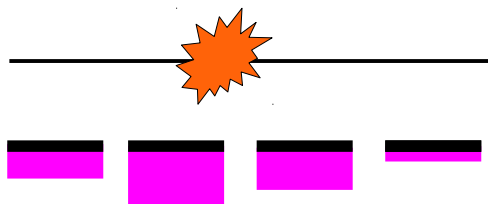
200 points / traces: $\sigma_{r\phi} = 100 \text{ } \mu\text{m}$ et $\sigma_z = 500 \text{ } \mu\text{m}$

Diamètre = 3.6 m, longueur = 4.3 m

Bouchon: modules sur 3-4 anneaux concentriques

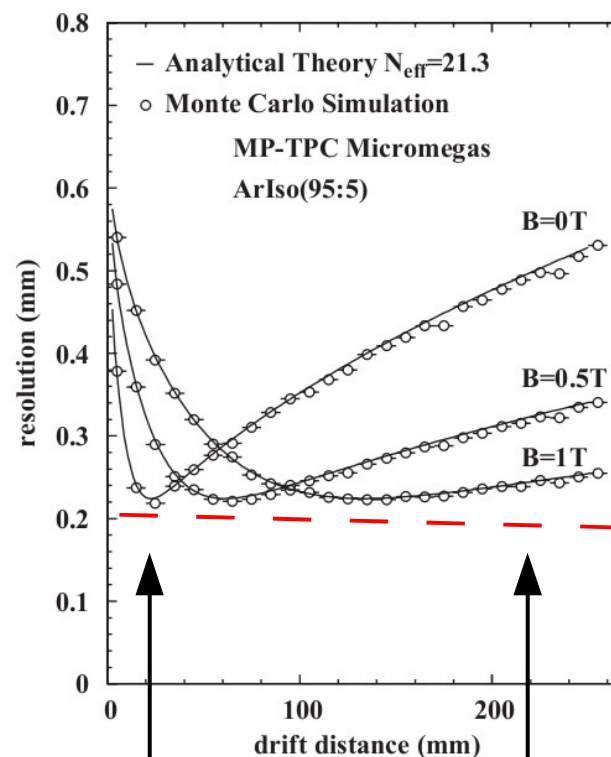
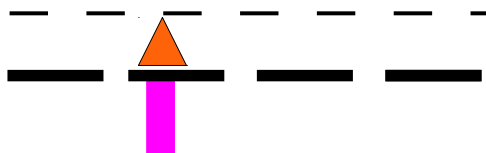
Amplification à fils

Centre de gravité



Amplification MPGD

ExB~0 mais 1 damier touché



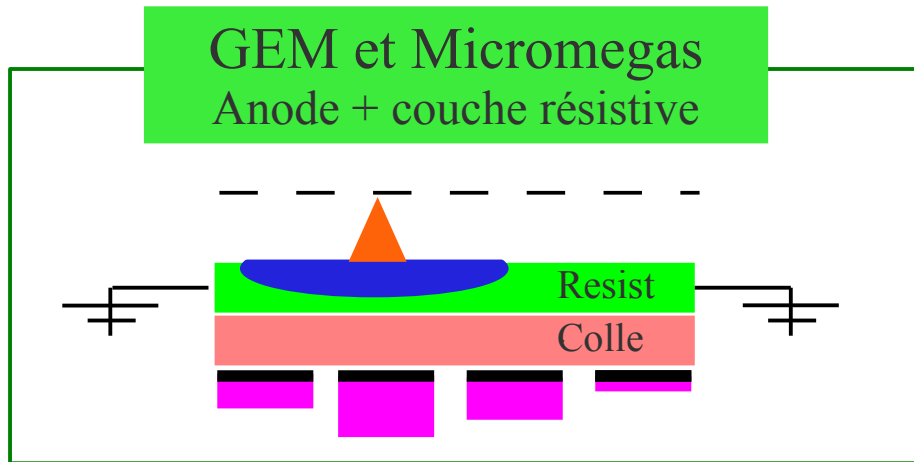
Damiers de pas 2.3 mm

Etalement + damier

Gas

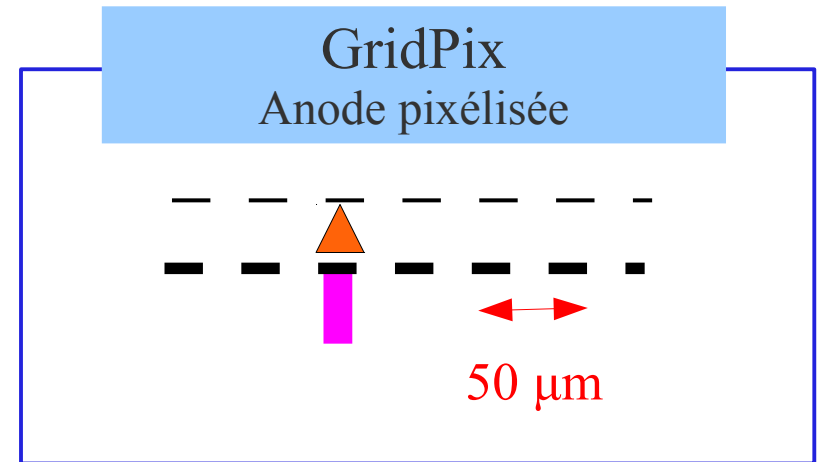
Options technologiques

Etaler davantage la charge

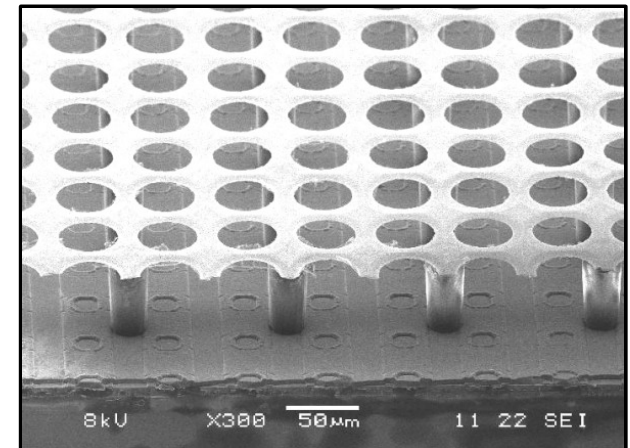
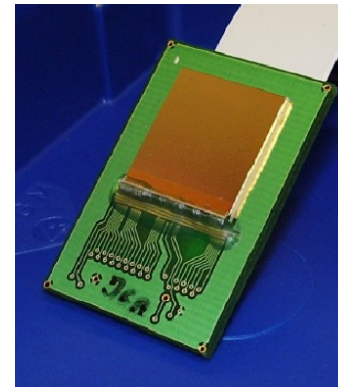
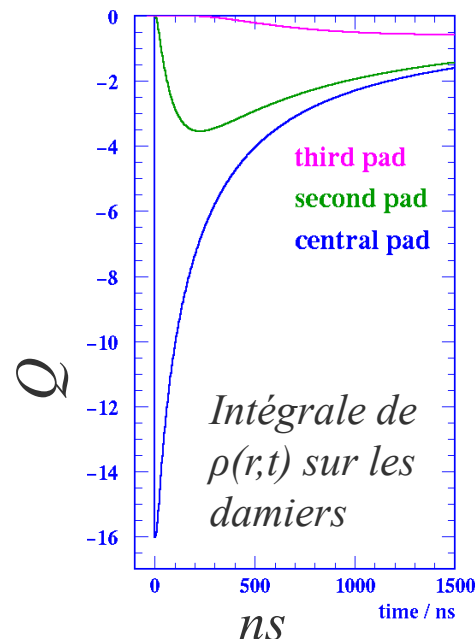
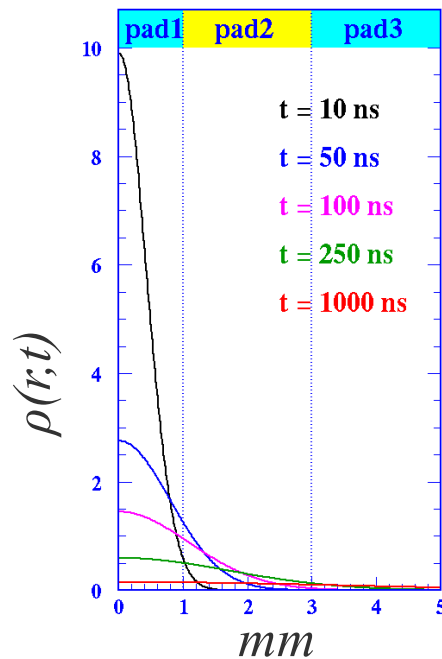


M. Dixit, A. Rankin, NIMA 566 (2006) 28

Opter pour des damiers plus petits



M. Campbell, et al., NIM A540 (2005) 295



Infrastructure de test

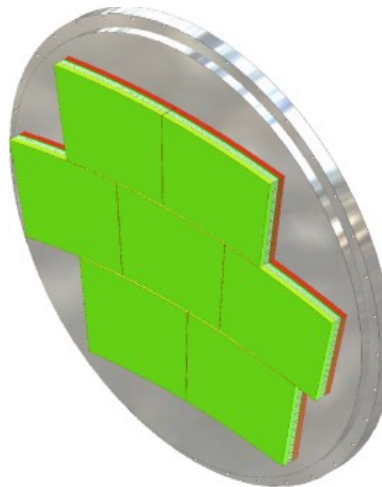
Infrastructure de test EUDET: grand prototype DESY

Particules cosmiques et faisceau d'électrons 1-6 GeV/c

Bouchon pouvant accueillir 7 modules

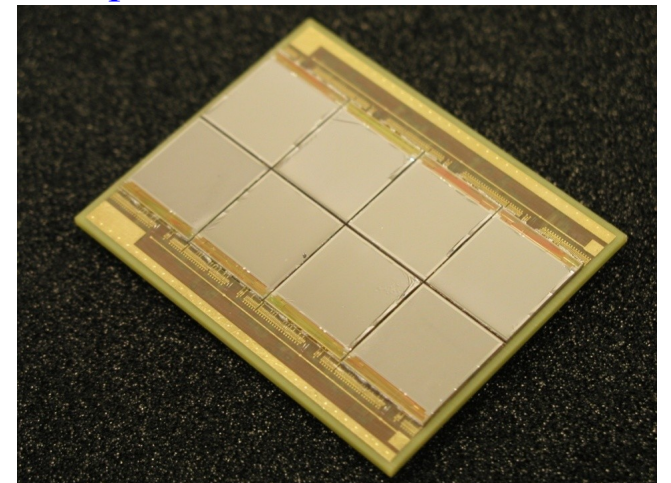
Aimant supraconducteur (1 T)

Trajectographe silicium externe



Module Micromegas

Octopuce, 8 GridPix



La collaboration LCTPC

<http://www.lctpc.org>

Lecture à pixels

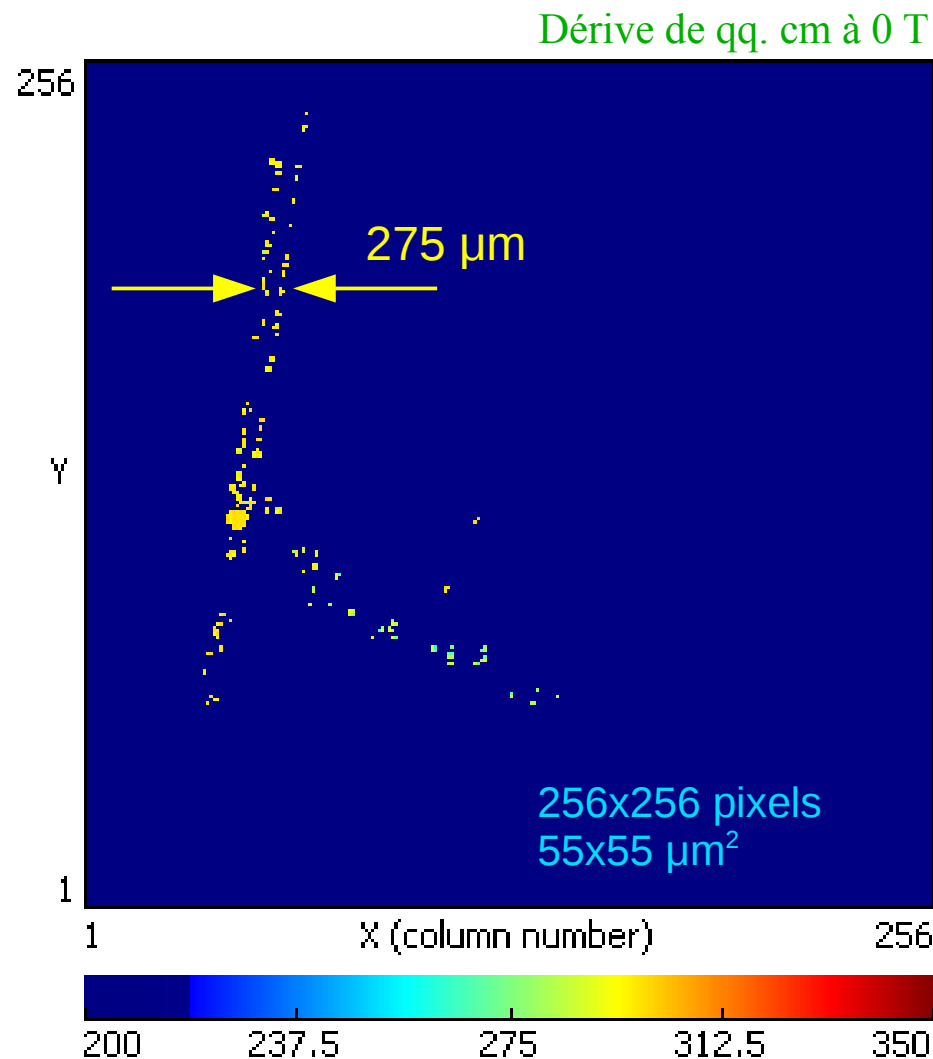
Séparation des traces limitée par la diffusion

A 4 T dans Ar/CF₄/iC₄H₁₀ 95/3/2, à 2 m:

$$\sigma_{r\phi}(z) = 20 \sqrt{200} = 300 \mu\text{m}$$

+ point très précis
pour les traces traversant les bouchons

+ comptage des paquets d'électrons



Micromegas avec revêtement résistif

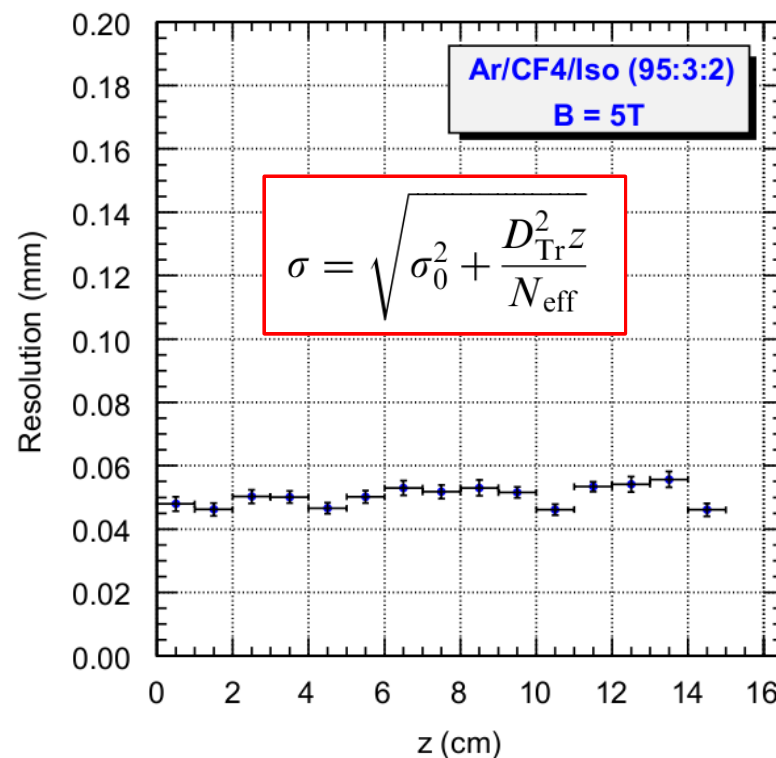
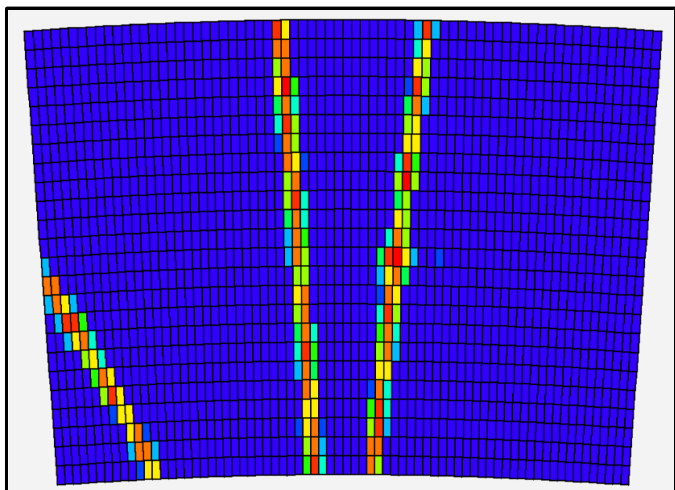
Résolution spatiale

A 5 T, $D_t = 16 \mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$

$\sigma_{r\phi}(z) = 50 \mu\text{m}$ avec des damiers 2x6 mm

Indépendante de la distance de dérive!

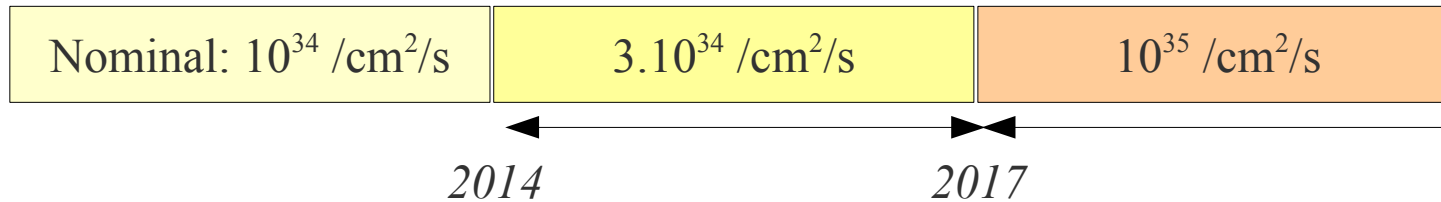
M. Dixit, et al., NIMA 581 (2007) 254



**Atout supplémentaire: le film résistif
peut protéger contre les étincelles...**

Application au LHC haute luminosité

Augmentation de la luminosité



Empilement, Vieillesse, baisse d'efficacité, remplacement de certaines parties...

Les chambres à muons d'ATLAS

Taux max. vers l'avant: 500 Hz/cm² x 10

Possible remplacement des CSC, MDT, TGC

Muon Atlas MicroMegas Activity (MAMMA)

Cahier des charges

Résolutions: 80 μ m, 5 ns

Taux: 5 kHz/cm² (0.2 des neutrons)

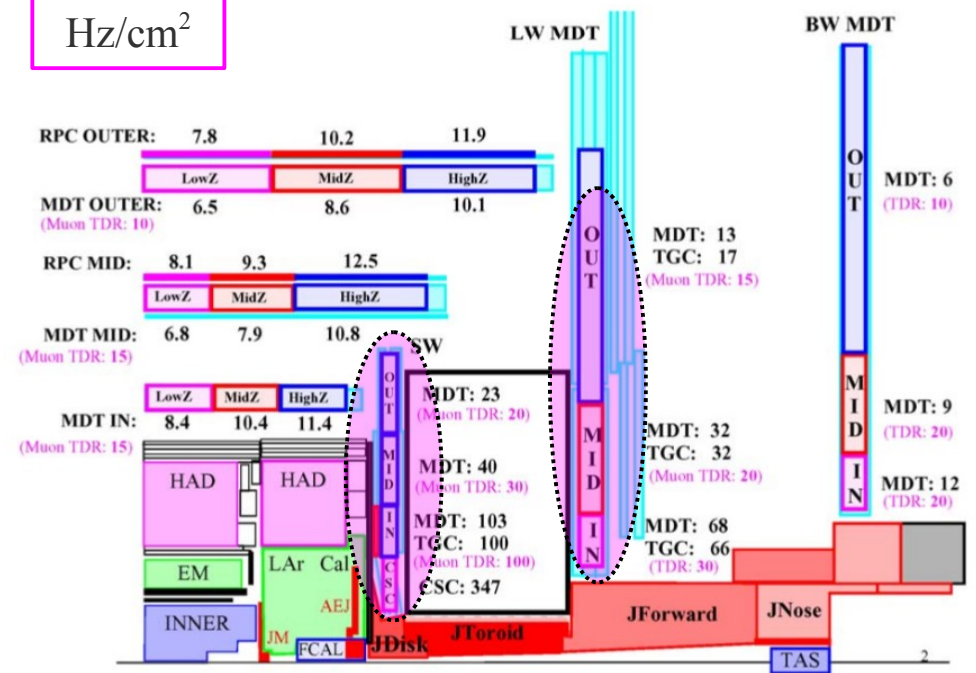
Opération > 5 ans SLHC

Efficacité 99 %

Grandes tailles 1x2 m² → 400 m²

$$\text{Single plane counting rate} = n \times \epsilon_n + \gamma \times \epsilon_\gamma + p + \pi + \mu + f_e \times e$$

Hz/cm²



Les étincelles dans les MPGD

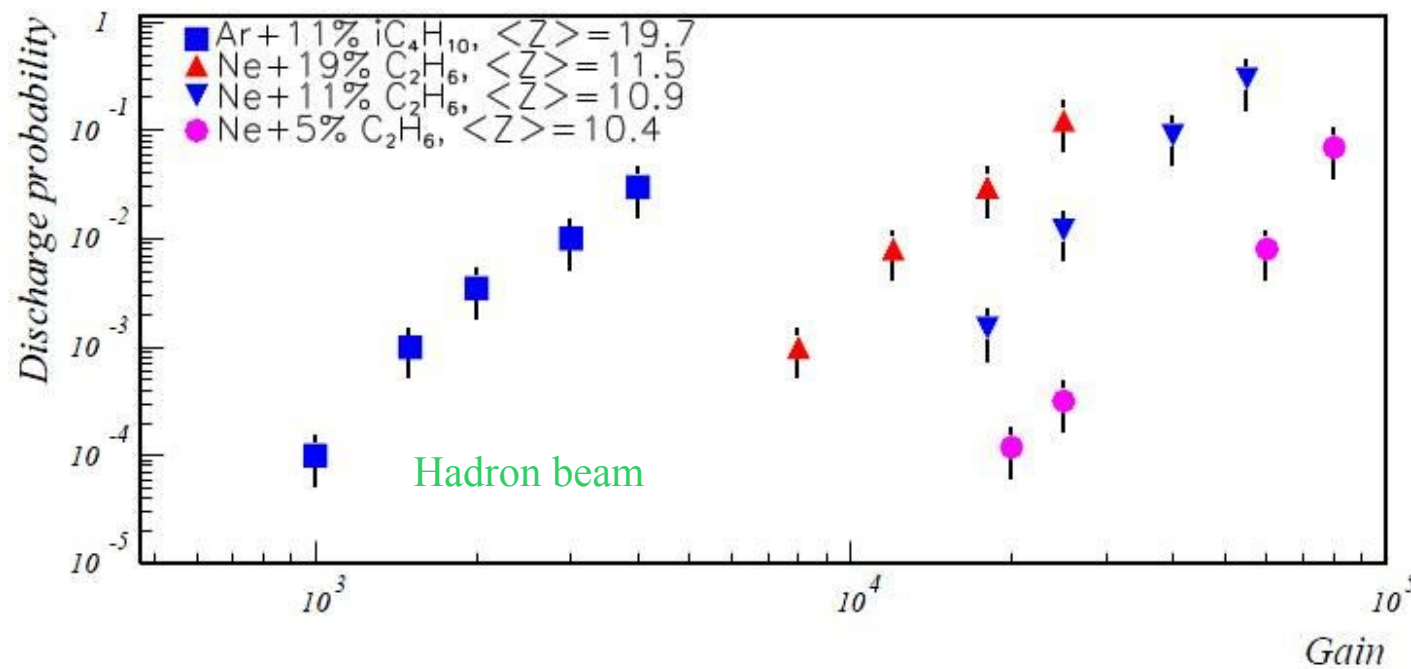
Limite empirique de Raether

Au delà de 10^7 electrons: streamer et court-circuit

De +, à haut flux, les avalanches se superposent

probabilité = $f(\text{gas}, \text{radiation}, \text{gain } G)$

D. Thers, et al. / NIMA 469 (2001) 133



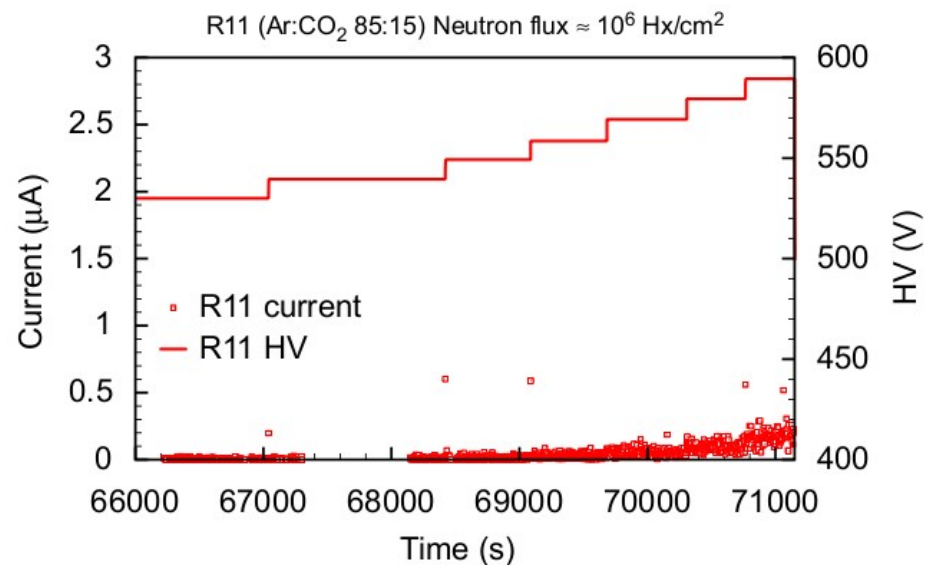
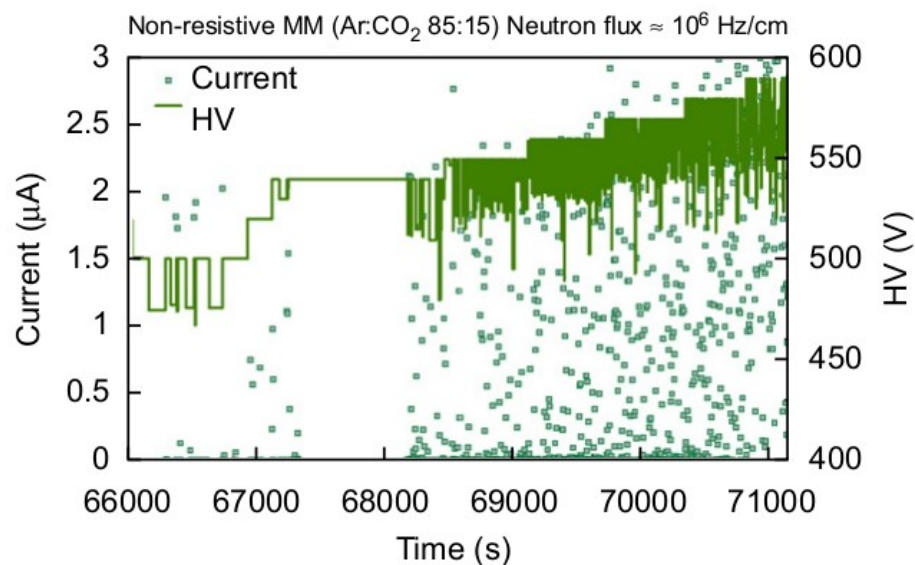
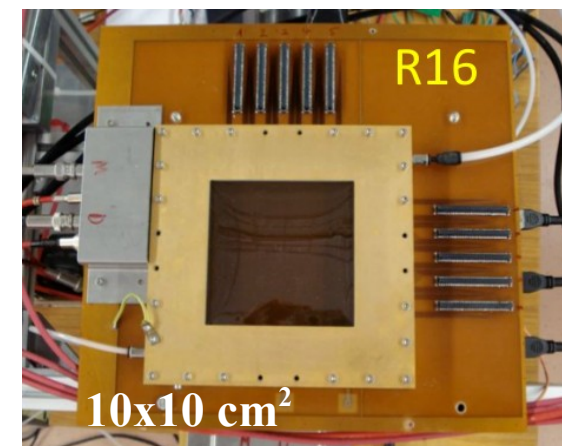
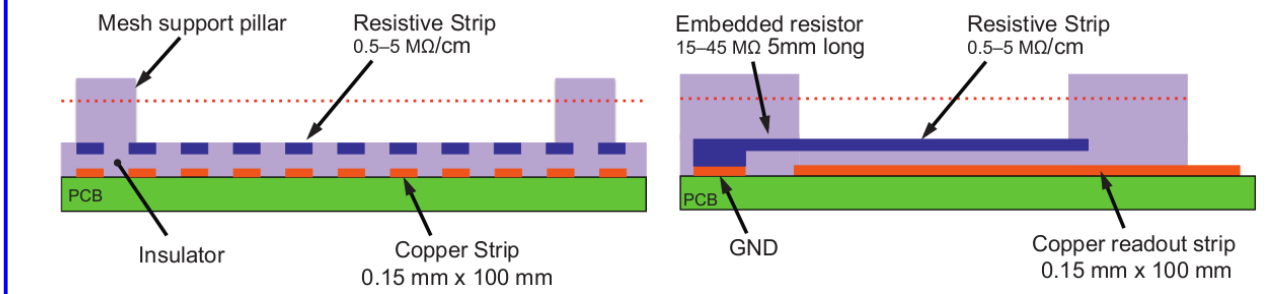
Stratégies de protection du détecteur et de l'électronique

- **diodes polarisées en inverse**, décharge/charge de la grille, temps mort
- **électrodes résistives reliées à la masse**, modification (x,t) du signal, baisse locale de gain

Résultats de prototypes Micromegas

Rendre le détecteur insensible aux décharges

T. Alexopoulos, et al., NIMA 640 (2011) 110



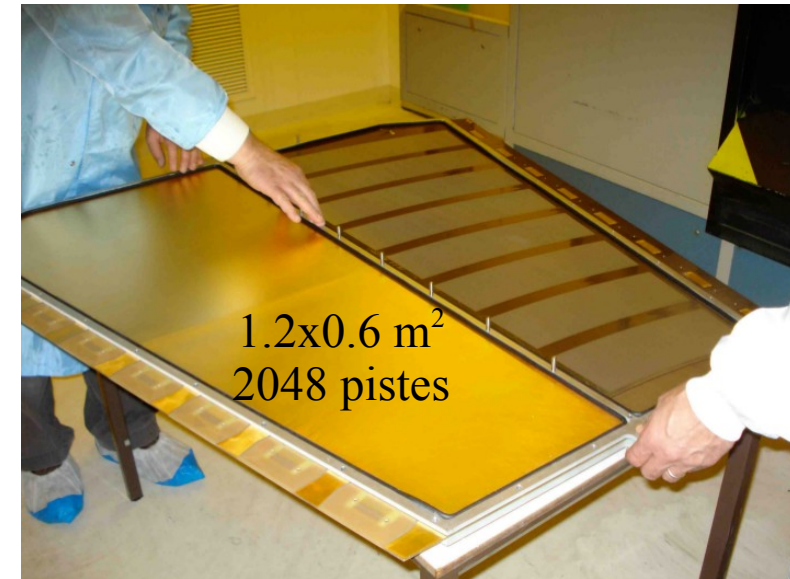
Industrialisation et la collaboration RD51

Développer des **procédés industriels** peu coûteux

Simplification des procédés de fabrication

Equippement et agrandissement de l'atelier CERN

Transfert de technologie vers l'industrie



Activement soutenus par la collaboration RD51

<http://rd51-public.web.cern.ch/rd51-public/Welcome.html>

RD51 – Micropattern Gas Detectors

	WG1 MPGD Technology & New Structures	WG2 Characterization	WG3 Applications	WG4 Software & Simulation	WG5 Electronics	WG6 Production	WG7 Common Test Facilities
Objectives	Design optimization Development of new geometries and techniques	Common test standards Characterization and understanding of physical phenomena in MPGD	Evaluation and optimization for specific applications	Development of common software and documentation for MPGD simulations	Readout electronics optimization and integration with MPGD detectors	Development of cost-effective technologies and industrialization	Sharing of common infrastructure for detector characterization

Conclusions

Depuis l'invention du compteur Geiger, les détecteurs gazeux ont toujours été des éléments clefs des dispositifs expérimentaux en physique des particules.

Les détecteurs à microstructures permettent aujourd'hui d'atteindre les résolutions limites imposées par le gaz (Fano et diffusion).

Grâce aux efforts actuels pour la fabrication de détecteurs de grande taille, les MPGD sont aujourd'hui plus que compétitifs avec les détecteurs traditionnels.

Ils équiperont certainement les TPC, calorimètres et chambres à muons des expériences de demain...

... et pourquoi pas leurs détecteurs de vertex?

Merci pour votre attention

La chambre proportionnelle multi-fils

The use of multiwire proportional counter to select and localize charged particles

G. Charpak, et al., NIMA 62 (1968) 262

Pad response function étalée :

mesure de position le long du fil très précise

Champ électrique radial + distance fil/cathode \sim cm

Le temps de collection des ions est long (\sim ms)

Baisse de gain à haut flux

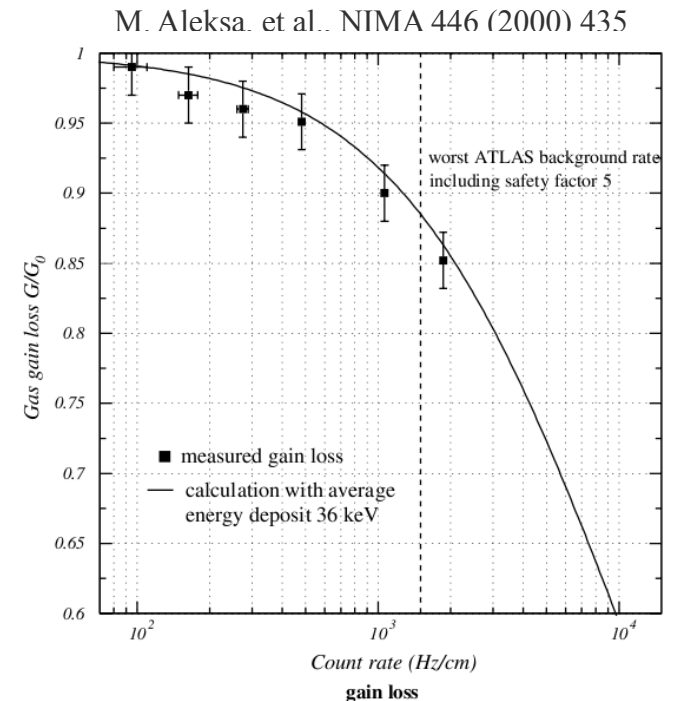
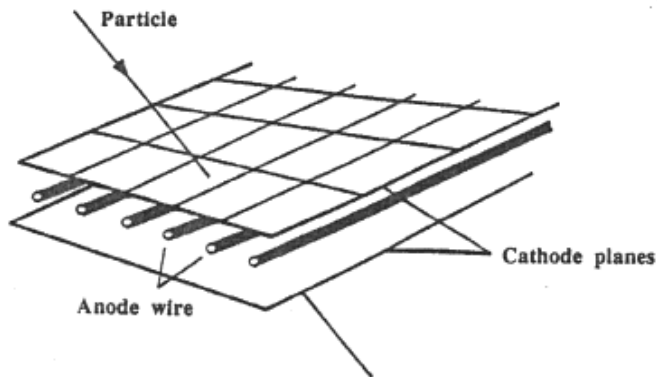


Fig. 3. Gas gain drop for the drift tubes of the ATLAS muon spectrometer [13].

Les détecteurs à faces parallèles

Champ élevé (50 kV/cm) et uniforme

Multiplication instantanée donc potentiellement très rapide

Gain est une fonction exponentielle de la distance entre les plaques

Uniformité de la distance critique pour la stabilité

Difficile à garantir sur de grandes surfaces

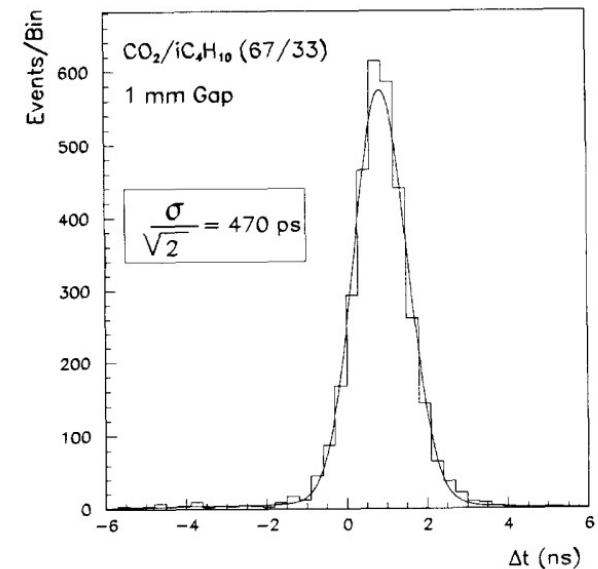
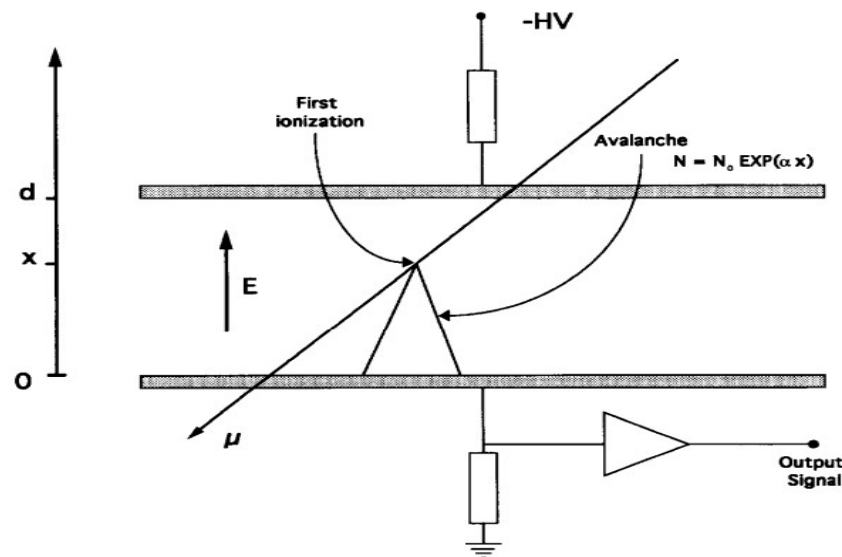


Fig. 7. Distribution of time differences between two PPCs using 7 ns rise time amplifiers. A Gaussian fit gives for each PPC a time resolution of 470 ps (assuming it is the same for both chambers).

A. Arefieu, et al., NIMA 348 (1994) 318-323

Mesure d'électrons de quelques keV

Désintégration double bêta dans le xénon



Energie maximale des $2e^- \approx 2.5 \text{ MeV}$

Identification des 2 traces : qq. cm à 10 bar
Mesure de l'énergie à \sim qq % FWHM

Expériences en cours: EXO et NEXT

Energie + topologie par lecture optique (PMT, SiPM, APD)

Micromegas microBulk pour NEXT

→ **Gain et résolution dans les gaz denses**

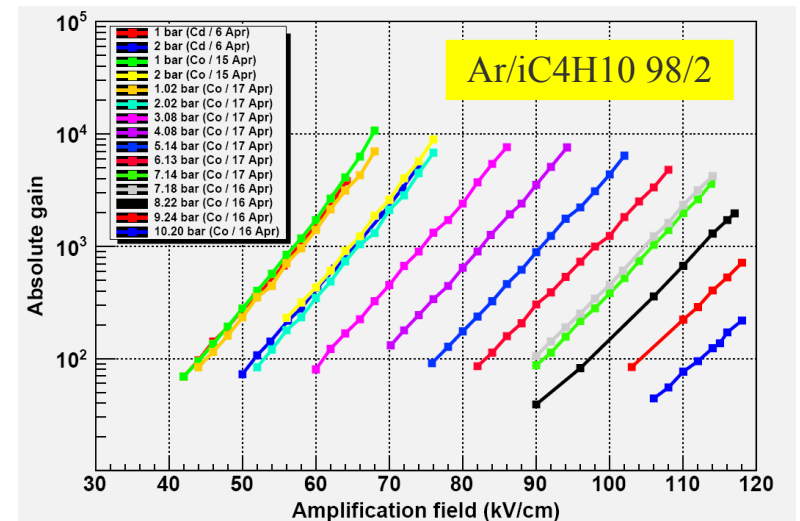
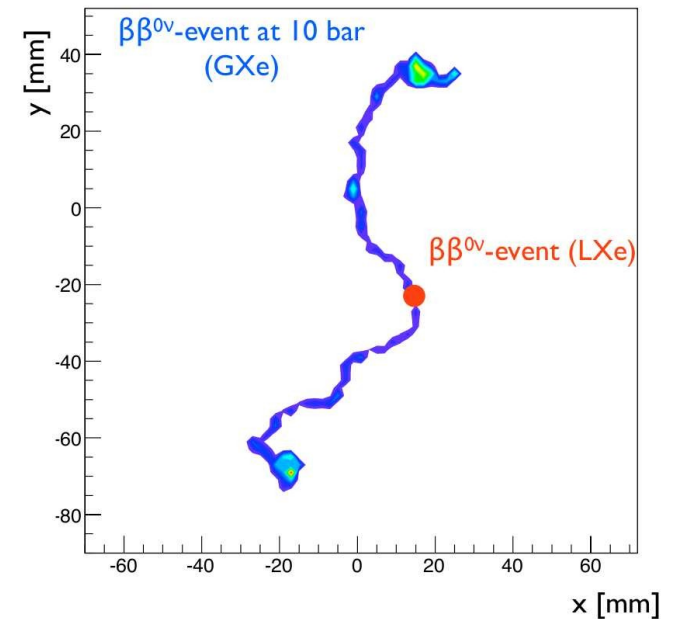
Mélange argon/isobutane

Gain supérieur à 100 jusqu'à 9 bar

Résolution de 1 % FWHM à 5.5 MeV et 5 bar

Xénon pur

2 % à 5.5 MeV et 4 bar, 5 % à 8 bar



Détection de la lumière ultraviolette

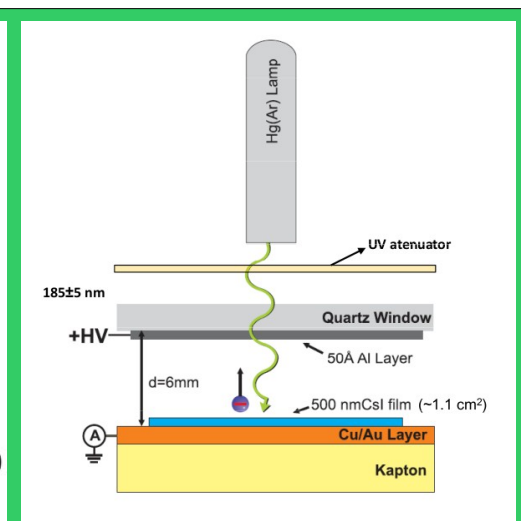
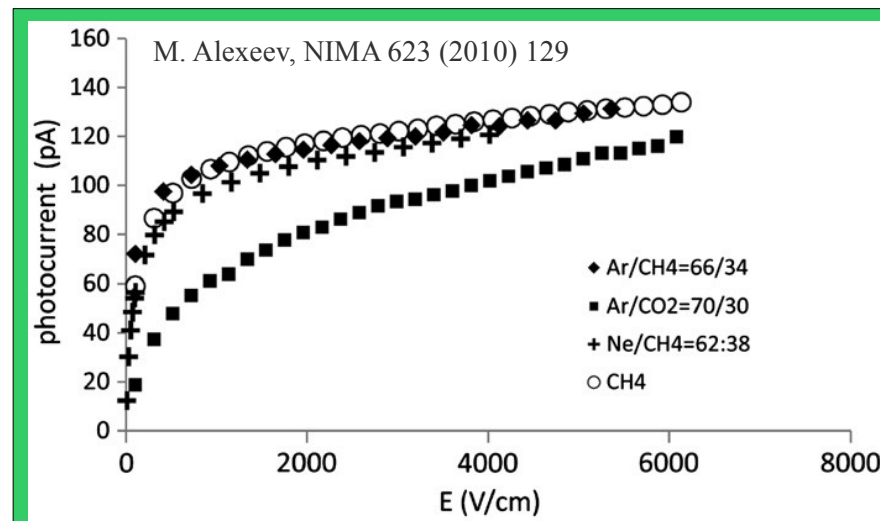
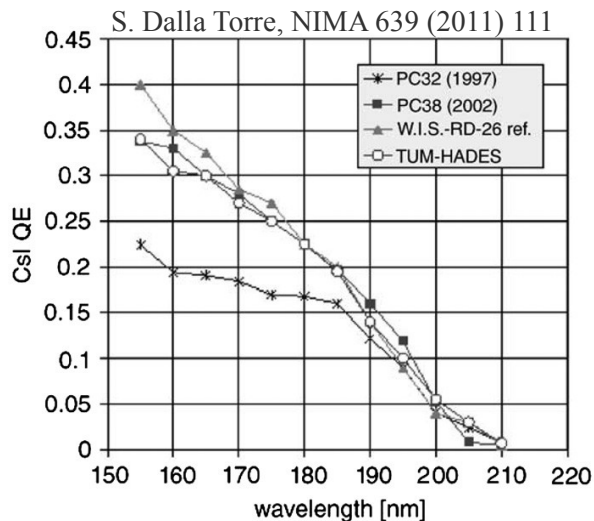
Principe de fonctionnement

Dépôt d'un film photosensible sur les électrodes
Emission d'un photoélectron (Quantum efficiency)
Extraction (champ électrique et « backscattering »)
Multiplication du photoélectron

Iodure de césium (CsI)

Eff. quantique > 30 % sous 170 nm
Extraction complète pour $E > 1$ kV/cm

Retour photons et ions d'avalanche
Vieillessement de la photocathode
Phénomènes limités dans les MPGD



Détection de la lumière ultraviolette

Les photomultiplicateurs gazeux
Détection de photons UV uniques

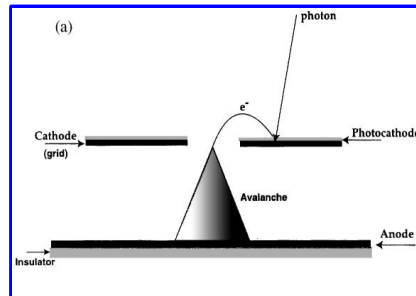
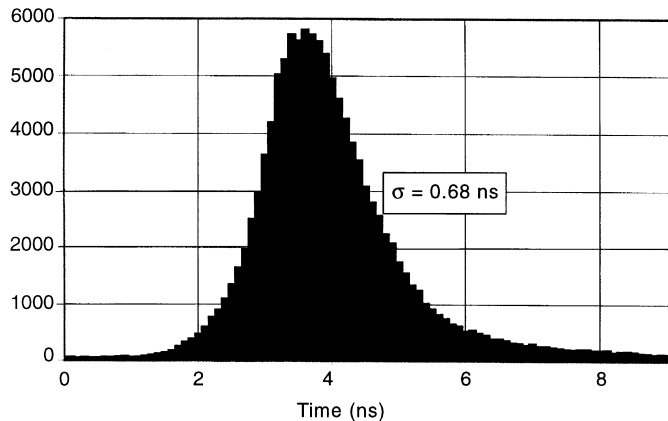
Micromegas + CsI

Gain maximum proche de 10^7
Temps de montée = 2 ns
Résolution en temps = 0.7 ns

Rivalise avec les tubes PM

- + segmentation possible
- + s'accomodent des champs magnétiques

J. Derré et al., NIMA 449 (2000) 314

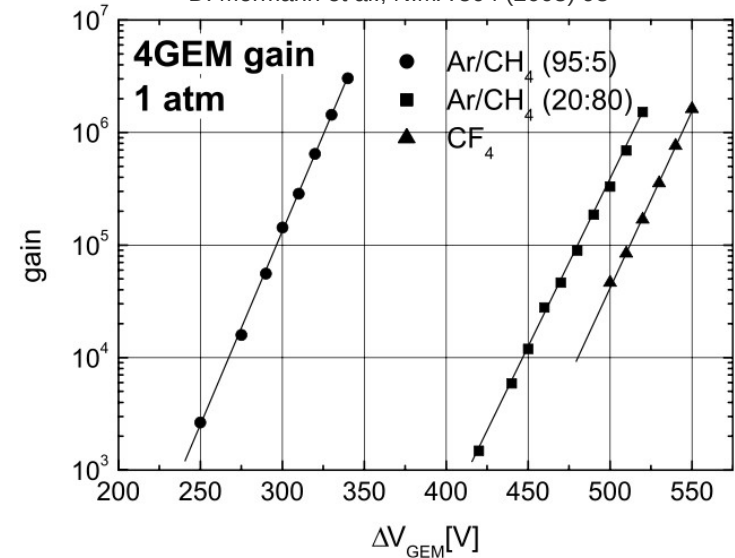


Combinaison 4 GEM + CsI

Gain proche de 10^7
Résolution < 2 ns

Gain dans les gaz purs et denses !
TPC double phase et détecteurs RICH

D. Mormann et al., NIMA 504 (2003) 93



Application dans les TPC double phase (1/2)

Motivations

Etude de la diffusion neutrinos sur les noyaux
Détection directe de matière noire

Noyaux de recul : scintillation (S1) et ionisation (S2)

TPC double phase

lecture optique de S1 et S2 avec PMT

Rapport S1/S2 permet de discriminer e^- et noyaux

PMT \rightarrow MPGD

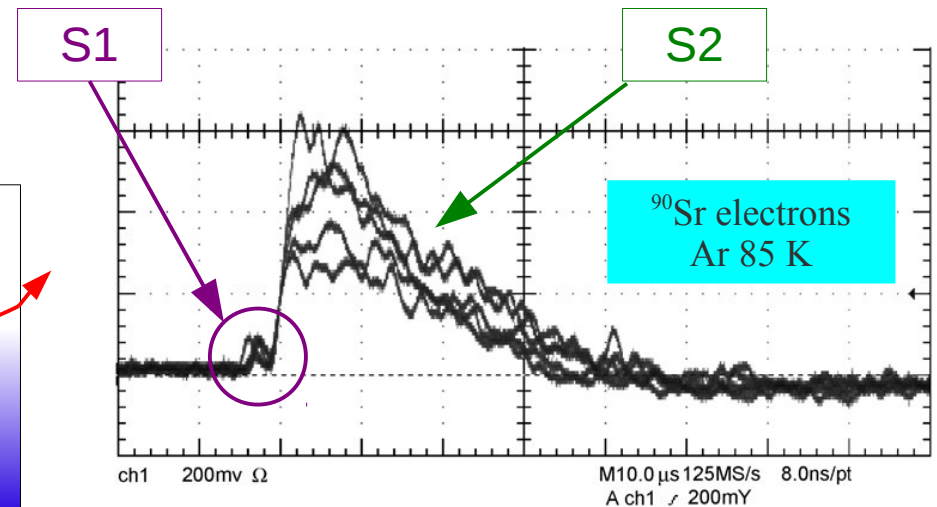
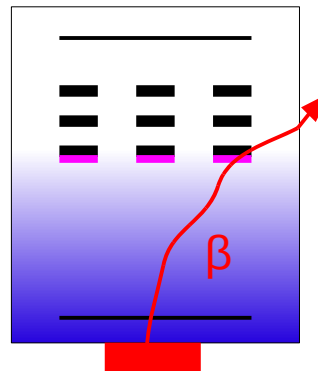
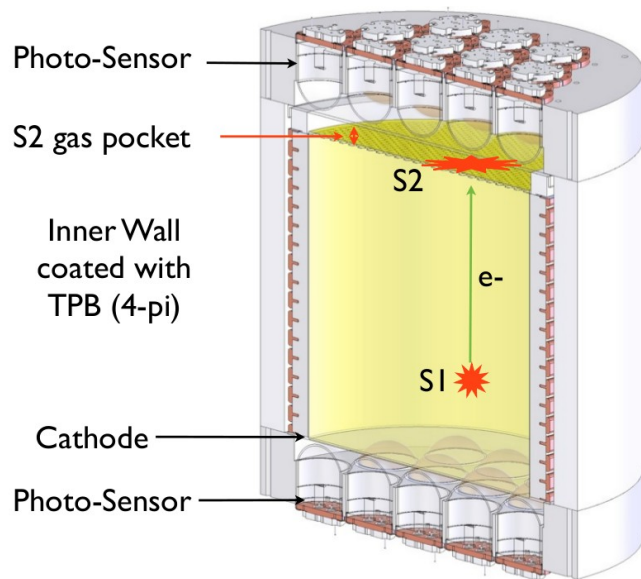
Scintillation convertie sur photocathode
Ionisation multipliée par plusieurs GEM

Démonstration dans l'Ar

Petit prototype avec 3 GEM

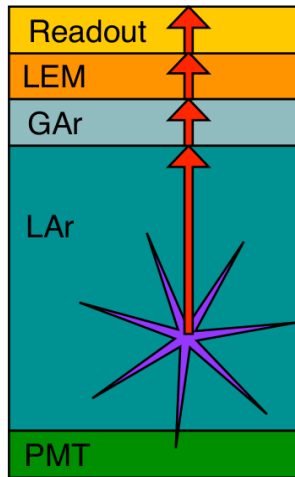
Volume $\sim 10 \text{ cm}^3$

Gain > 5000 à 85 K



A. Bondar et al., NIMA 581 (2007) 241

Application dans les TPC double phase (2/2)

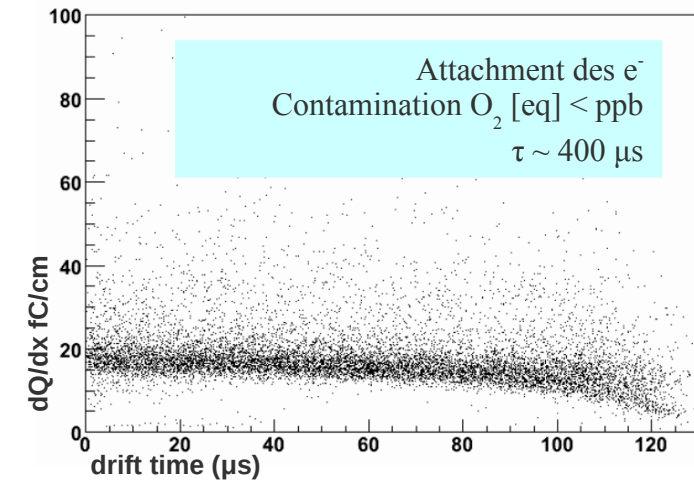


Lecture de plus grands volumes

MPGD pour GLACIER, prototype de 250 litres
Giant Liquid Argon Charge Imaging Experiment

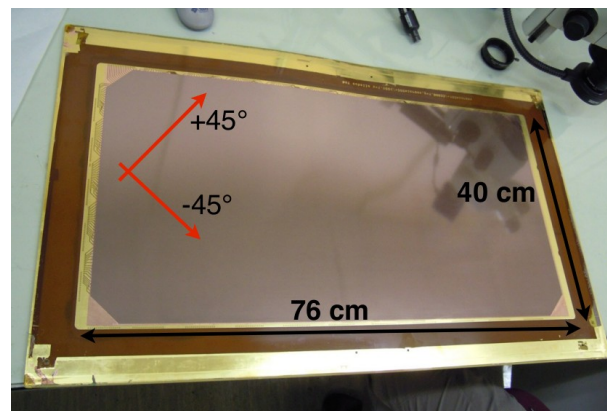
Pas de photocathode mais
segmentation du plan de lecture

Trajectographe 3D + calorimètre homogène

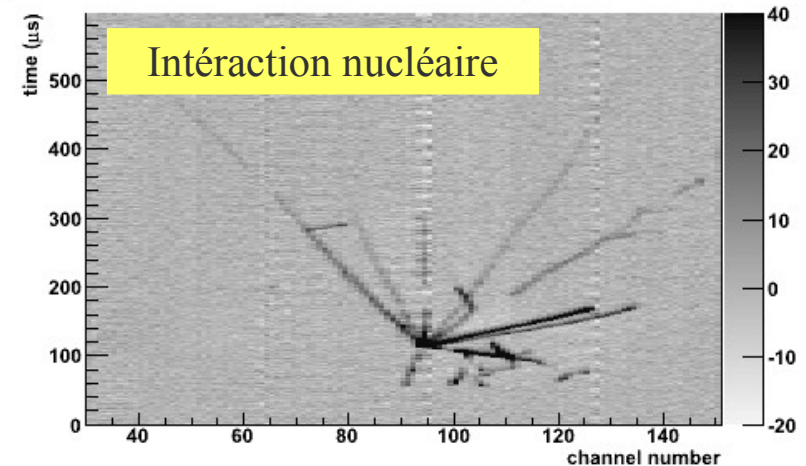


Large Electron Multiplier

Epaisseur 1 mm, 1/2.106 trous
diamètre/pas trous : 500/800 μm
Pas des pistes XY 3 mm



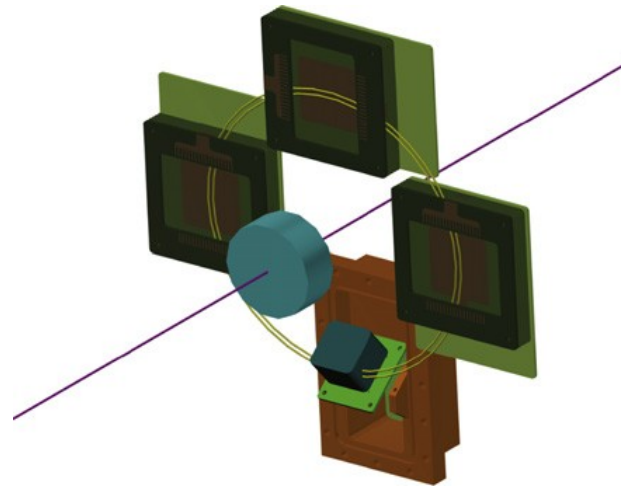
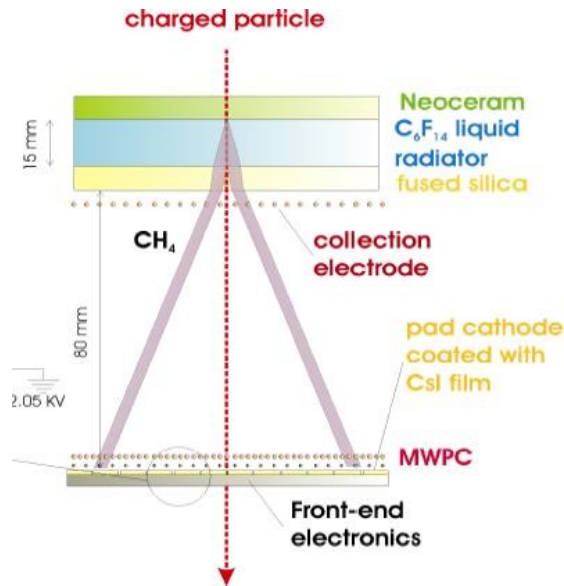
A. Badertscher et al., NIMA 641 (2011) 48



Application pour les compteurs Cerenkov

Générations de PM gazeux

- * Gaz photosensibles (TMAE, TEA)
→ DELPHI, SLD, CLEO
- * MWPC dotées de photocathode (CsI)
→ COMPASS, STAR, ALICE
- * **GEM avec dépôts photosensibles**

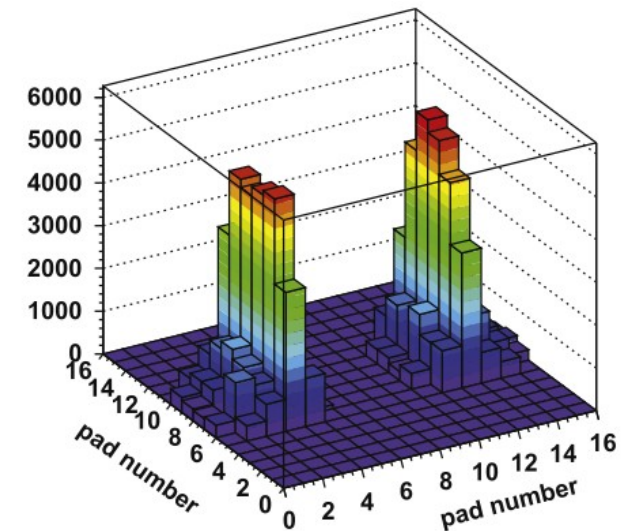
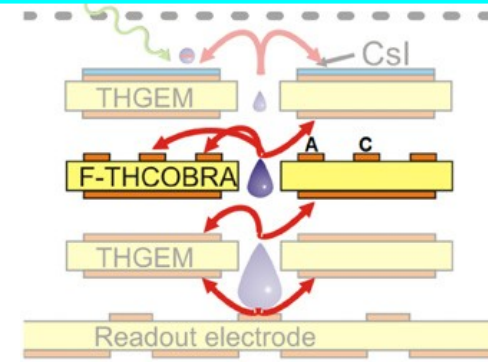


M. Alexeev et al., NIMA, In Press

Thick-GEM

Opération à haut gain ($< 10^7$) → e^- uniques
Fonctionnent dans les gaz purs (CH_4 , CF_4)

Ions captées par des pistes gravées sur l'envers :
1/10000 arrive à la photocathode



Les collisionneurs à haute luminosité

Luminosité

Facteur de proportionnalité entre le taux d'événement et la section efficace

Collisionneurs hadroniques

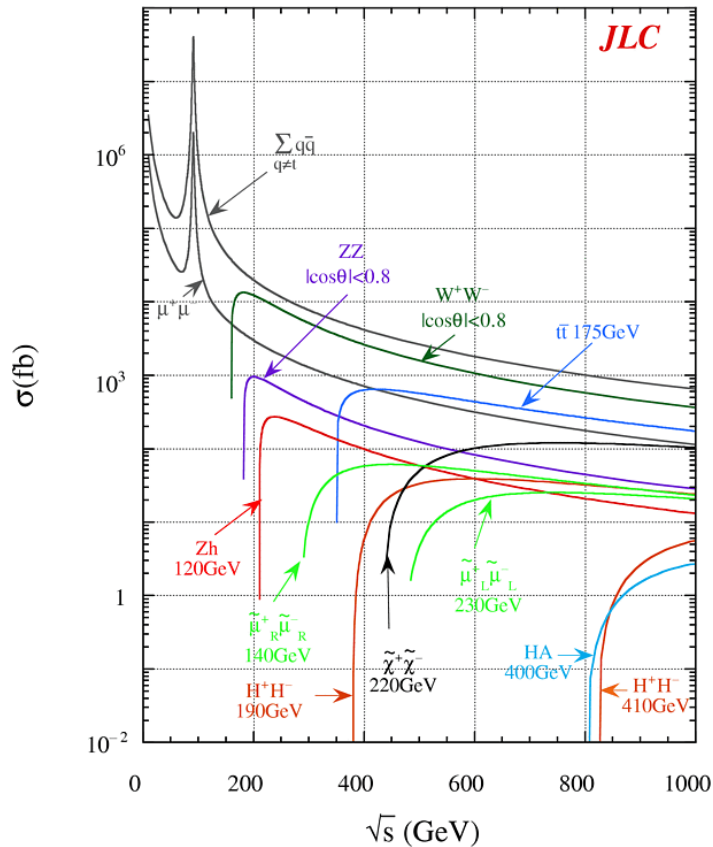
	HERA (DESY)	TEVATRON (Fermilab)	RHIC (Brookhaven)				LHC [†] (CERN)	
Physics start date	1992	1987	2001	2000	2004	2002	2009	2010
Physics end date	2007	—	—				—	
Particles collided	ep	$p\bar{p}$	pp (pol.)	Au Au	Cu Cu	d Au	pp	Pb Pb
Maximum beam energy (TeV)	e^- : 0.030 p : 0.92	0.980	0.25 34% pol	0.1 TeV/n	0.1 TeV/n	0.1 TeV/n	7.0 (3.5)	2.76 TeV/n (1.38 TeV/n)
Luminosity ($10^{30} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	75	402	85 (pk) 55 (ave)	0.0040 (pk) 0.0020 (ave)	0.020 (pk) 0.0008 (ave)	0.27 (pk) 0.14 (ave)	1.0×10^4 (170)	1.0×10^{-3} (1.3×10^{-5})

Collisionneurs à électrons

	KEKB (KEK)	PEP-II (SLAC)	SuperB (Italy)	SuperKEKB (KEK)	ILC (TBD)
Physics start date	1999	1999	TBD	2014?	TBD
Physics end date	—	2008	—	—	—
Maximum beam energy (GeV)	e^- : 8.33 (8.0 nominal) e^+ : 3.64 (3.5 nominal)	e^- : 7–12 (9.0 nominal) e^+ : 2.5–4 (3.1 nominal) (nominal $E_{\text{cm}} = 10.5 \text{ GeV}$)	e^- : 4.2 e^+ : 6.7	e^- : 7 e^+ : 4	250 (upgrade-able to 500)
Luminosity ($10^{30} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	21083	12069 (design: 3000)	1.0×10^6	8×10^5	2×10^4

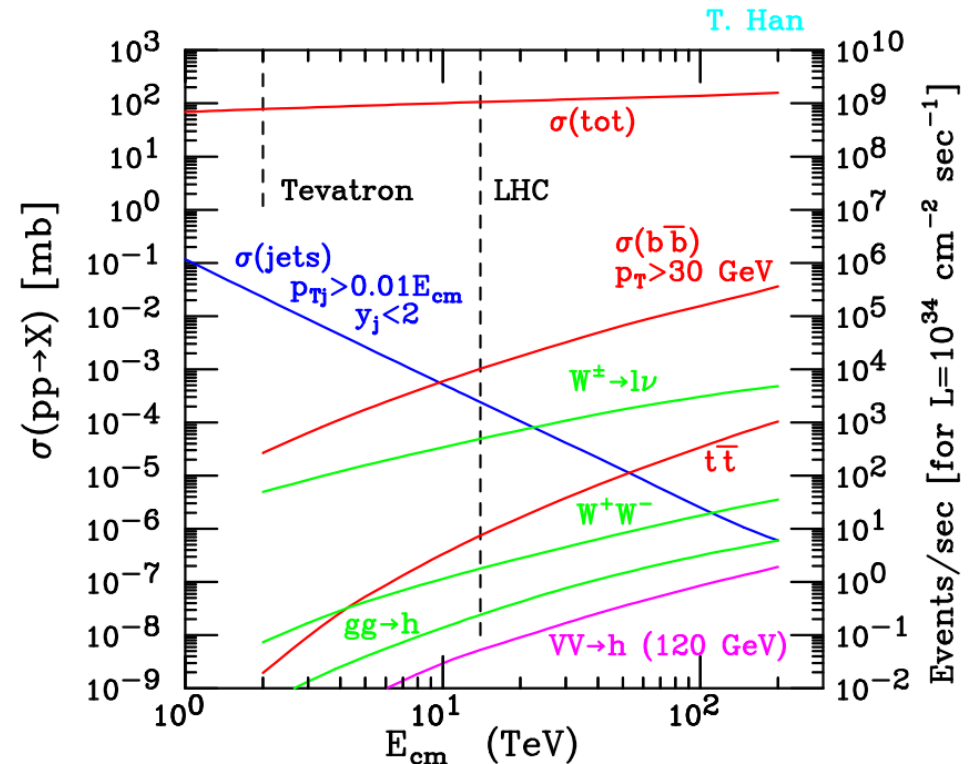
Les collisionneurs à haute luminosité

Futur Linear Collider (LC)



Mesures de précision

Large Hadron Collider (LHC)



Bruit de fond QCD élevé

La TPC du project ILD

Objectif : $\sigma_{pt}/p_t^2 = 2.10^{-5} \text{ c/GeV}$

avec le trajectographe complet

200 points / traces

$\sigma_{r\phi} = 100 \mu\text{m}$

$\sigma_z = 500 \mu\text{m}$

Grande taille

Diamètre = 3.6 m, longueur = 4.3 m

Bouchon: modules sur 3-4 anneaux concentriques

Granularité

Damiers 1 x 4-6 mm (1^{er} anneau)

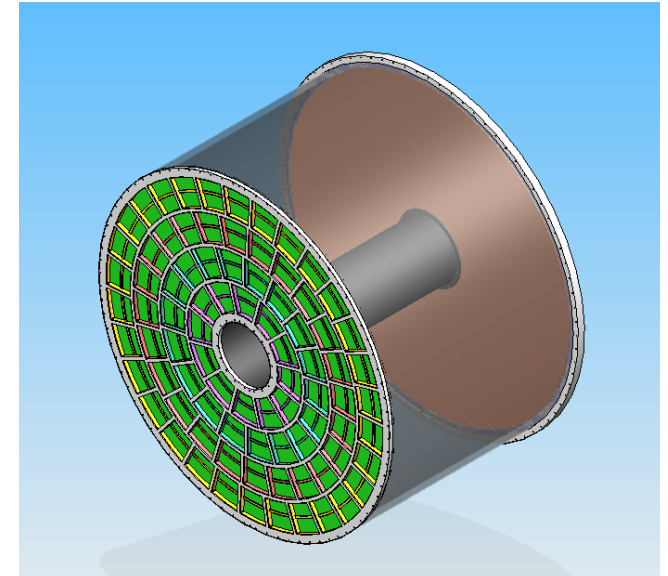
2 x 1 million de canaux

Faible masse

4 % x_0 cage de champ

15 % x_0 bouchons

Dessin 1/2 TPC, Irfu, Saclay



Jusqu'à aujourd'hui : amplification à fils
Récemment : T2K a opté pour Micromegas

Quelle résolution spatiale avec les MPGD?

Les calorimètres pour le « *Particle Flow* »

Granularité

10-50 mm² (ECAL) et 1-10 cm² (HCAL)

→ Electronique frontale sur les détecteur, *power-pulsée* et auto-déclenchée

Herméticité

> 5 mrad, zone mortes et fuites minimales

→ Détecteurs fins, de grande taille et vers l'avant, tolérants aux radiations

Résolution

Mesure des neutres (photons et hadrons)

→ Somme de l'énergie (10-12 bits) ou comptage (1-2 bits)

Stabilité

Dissipation de chaleur, variables environnementales

→ Systèmes de contrôle et de calibration, techniques de correction des signaux