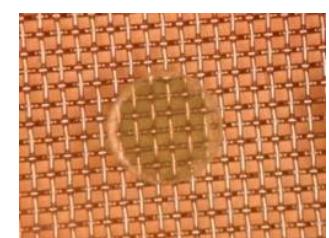
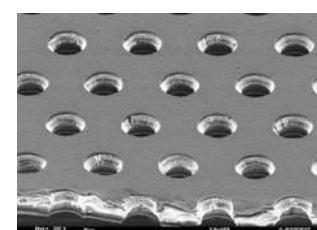
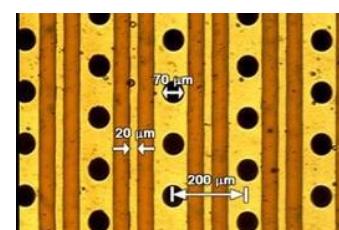
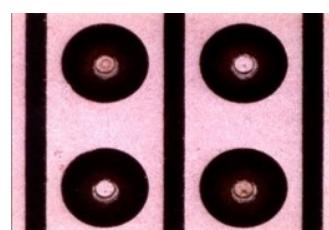
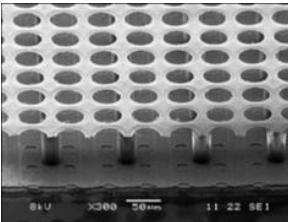


DéTECTEURS à microSTRUCTURES pour les collisionneurs à haute luminosité

Maximilien Chefdeville, LAPP, Annecy



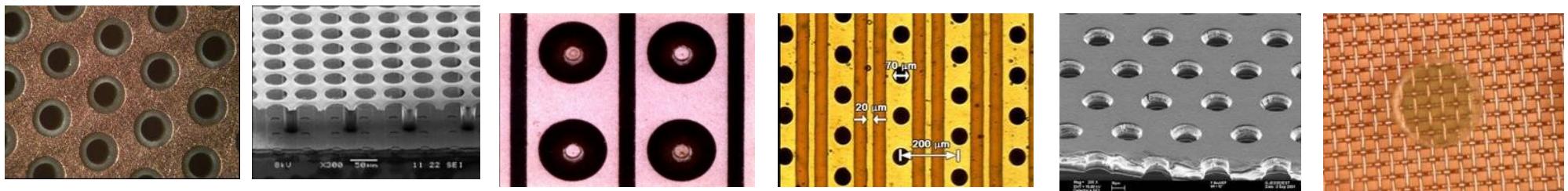
Sommaire

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



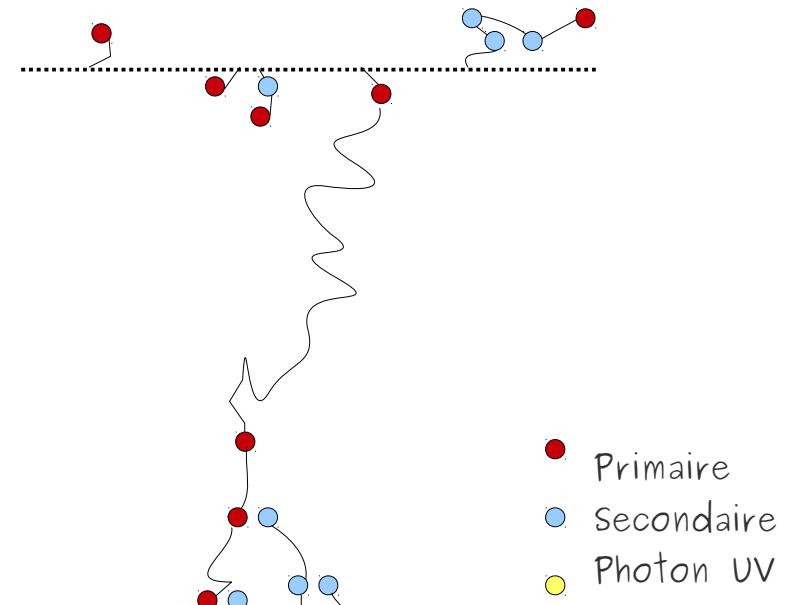
Fonctionnement des détecteurs gazeux

1. Interaction particule chargée/molécule

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

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

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



2. Dérive des électrons

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

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

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

3. Multiplication des électrons

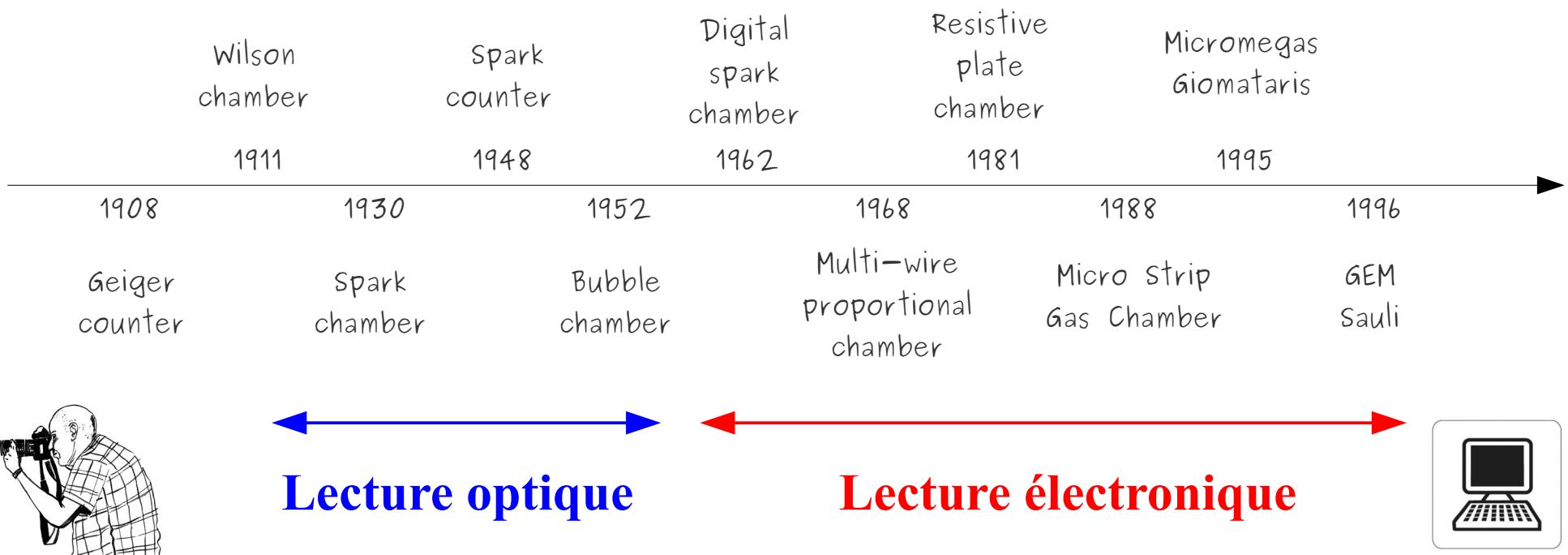
Townsend $\alpha > 0$ à $E > qq \text{ kV/cm}$

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

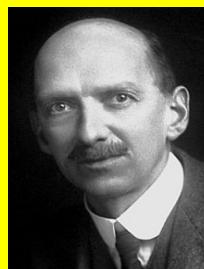
Remarque : Ces 3 étapes ne sont pas toujours présentes.

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

Une chronologie des détecteurs gazeux



H. Geiger



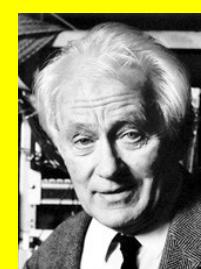
CTR. Wilson



F. Kreinen



DA. Glaser



G. Charpak



A. Oed



F. Sauli



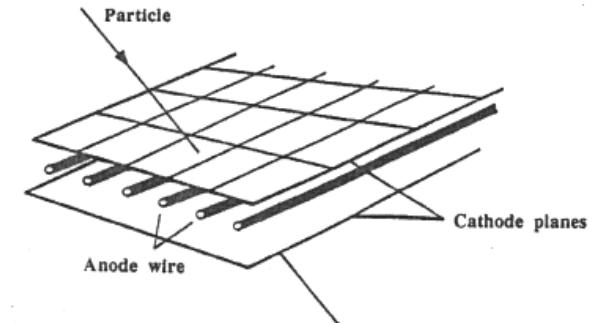
I. Giomataris

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

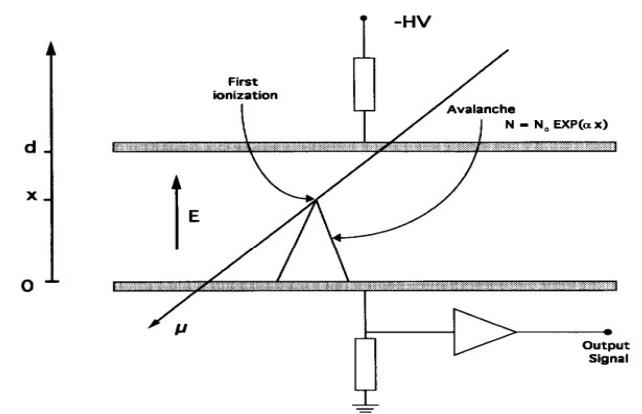
Champ électrique radial + distance fil/cathode \sim cm
Le temps de collection des ions est long (\sim ms)
Baisse de gain à haut flux



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



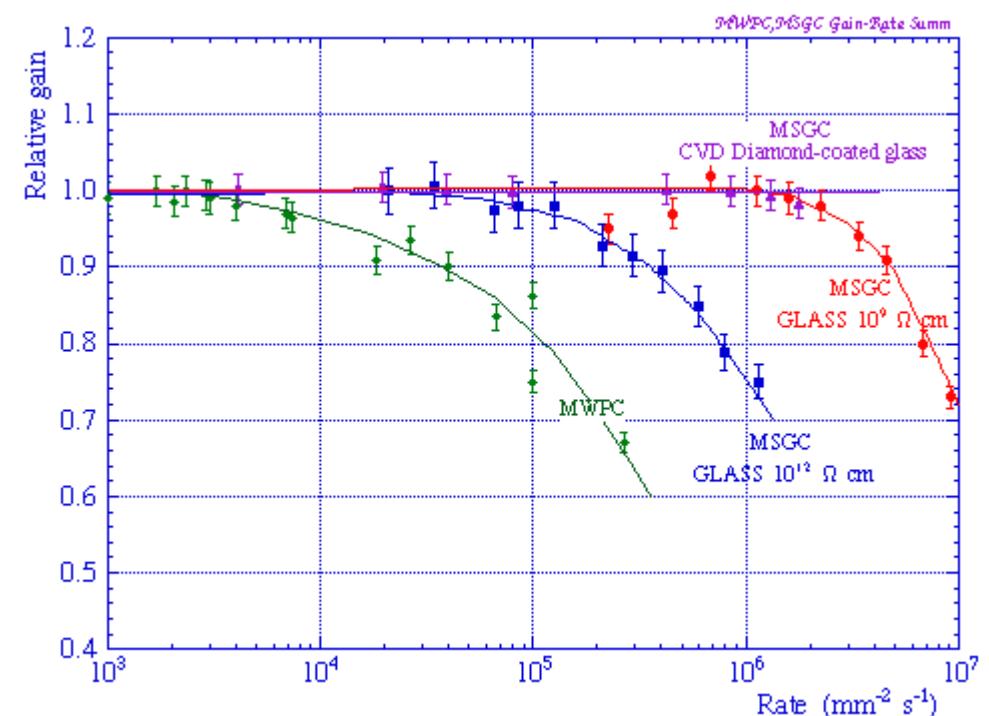
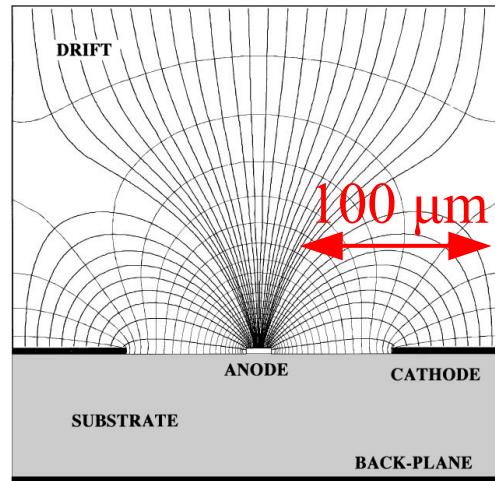
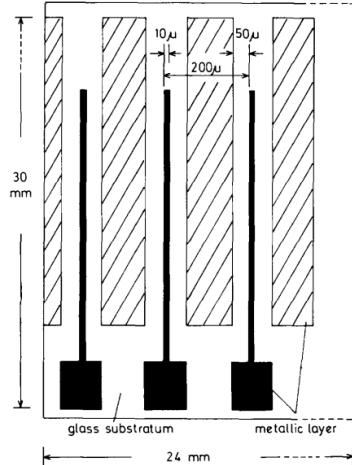
Le compteur gazeux à micropistes

Limitation en flux des fils → Rapprochement des fils → electrodes 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 $> 10 \text{ mC/cm}^2$
Gain modeste $< 10^4$
Peu résistant aux étincelles



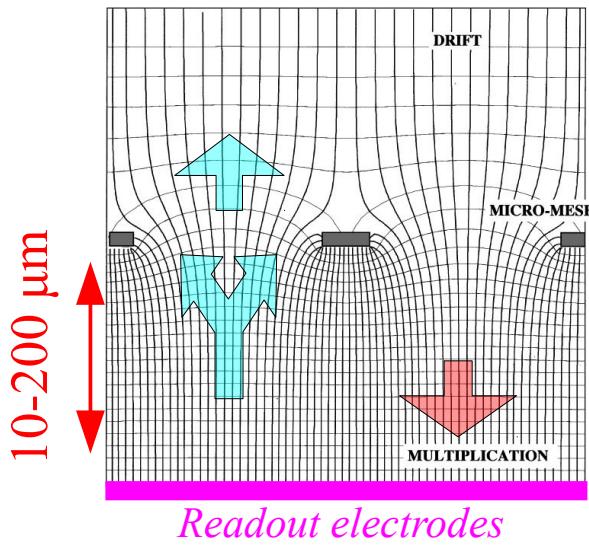
Microstructures à faces parallèles

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

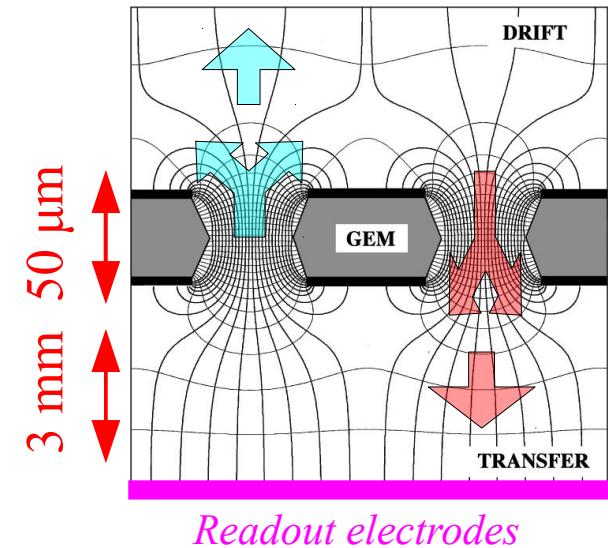
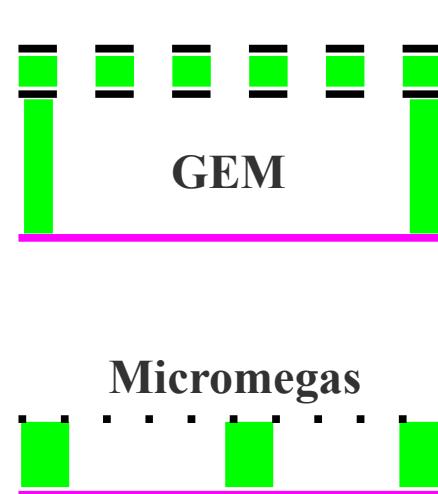
Support: pilliers isolants



GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors
F. Sauli, NIMA 386 (1997) 531

Multiplication sur plusieurs étages (1-4)
Etalement des électrons sur l'anode
Chargement des isolants + perte d' e^- sous les feuilles

Support: cadre isolant



Trajectographie à haut flux

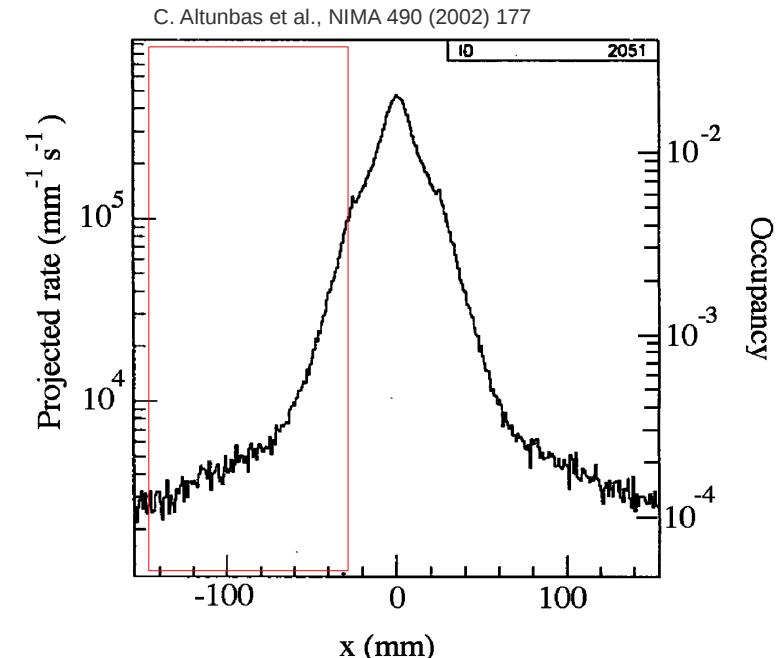
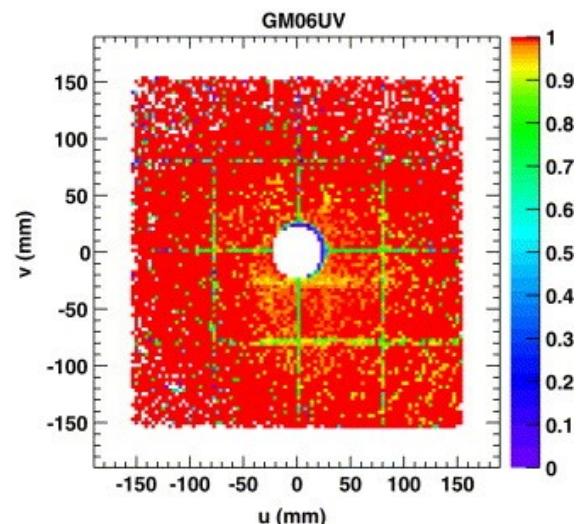
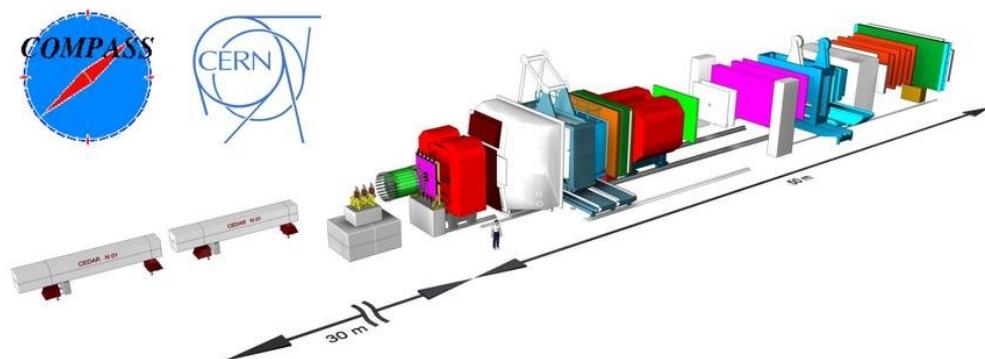
Expérience COMPASS au CERN

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



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 similiaires

Résolution en énergie (rayons X)

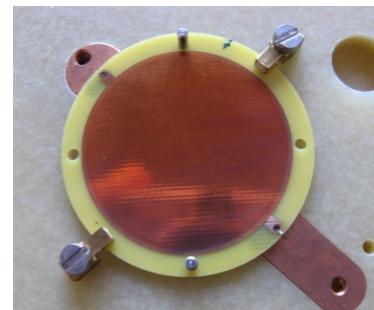
Expérience CAST au CERN

Détection de rayons X (conversions d'axions)

Rejection du bruit de fond : trace et énergie

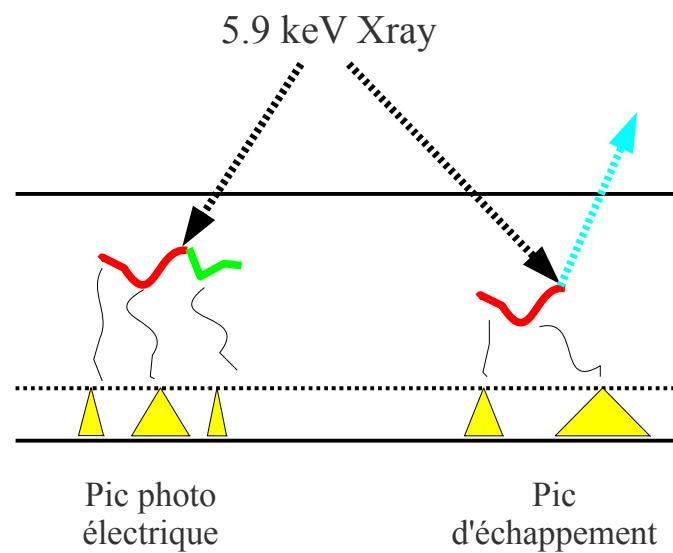
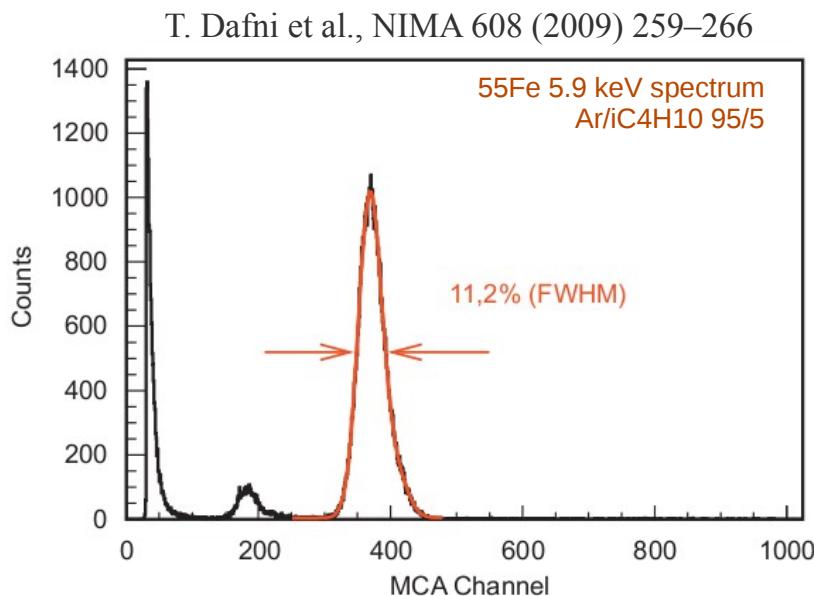
Segmentation fine (pistes XY pas de 350 μm)

Peu de fluctuations de gain : microBulk



Micromegas microBulk

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



Résolution en énergie (rayons X)

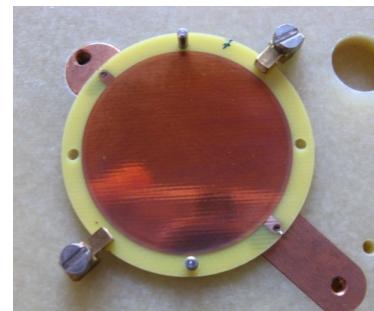
Expérience CAST au CERN

Détection de rayons X (conversion d'axions)

Rejection du bruit de fond : trace et énergie

Segmentation fine (pistes XY pas de 350 μm)

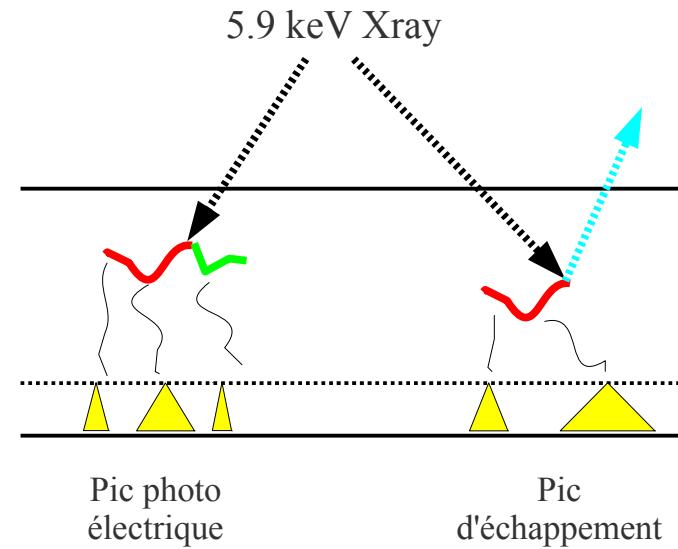
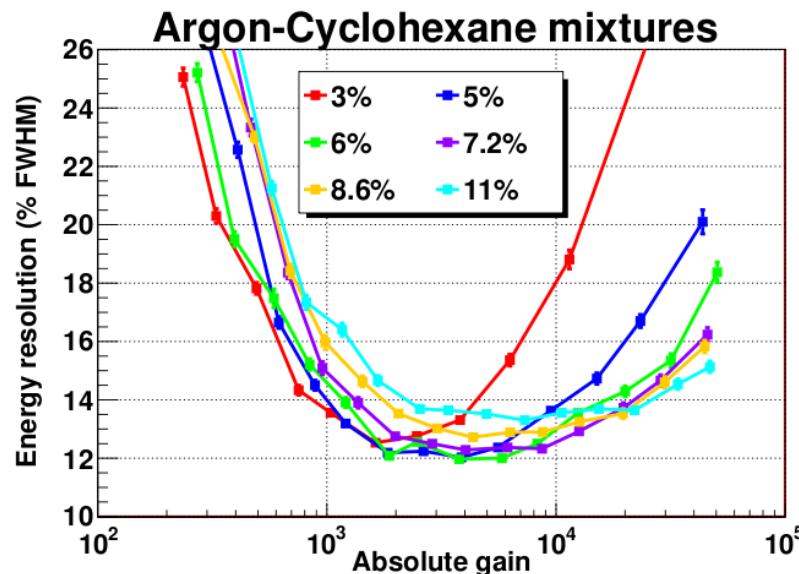
Peu de fluctuations de gain : microBulk



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

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

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

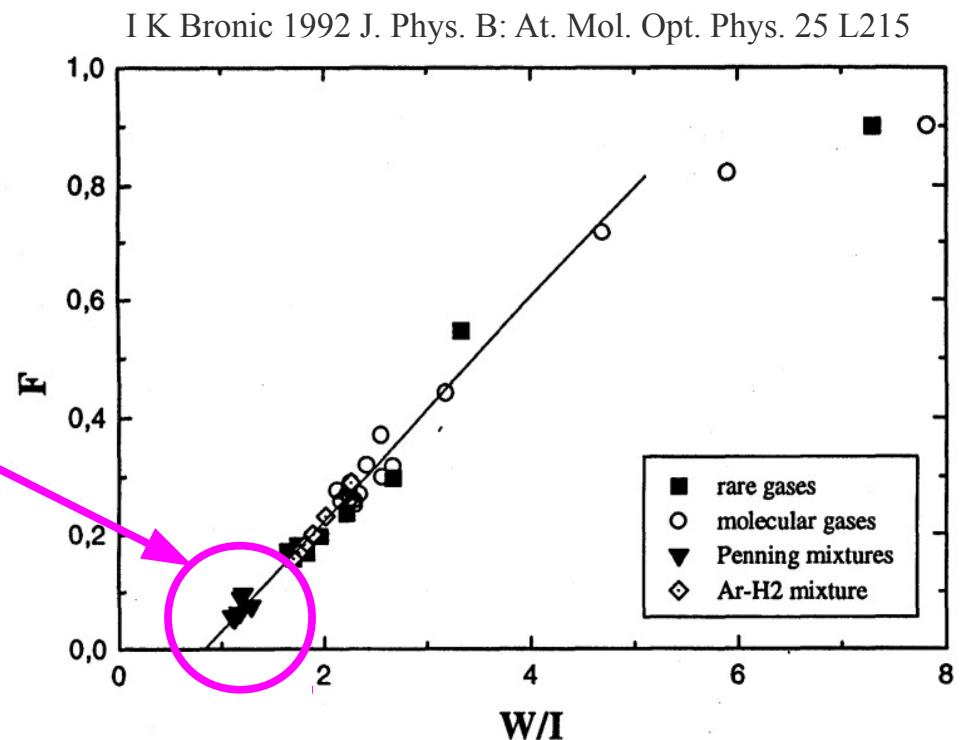
$$W \rightarrow I$$

$$F \rightarrow 0$$

Résolution $\rightarrow 0$

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

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



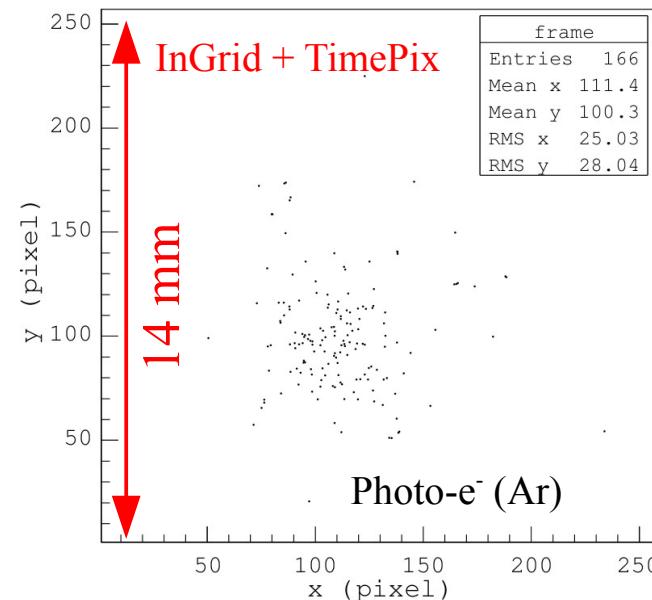
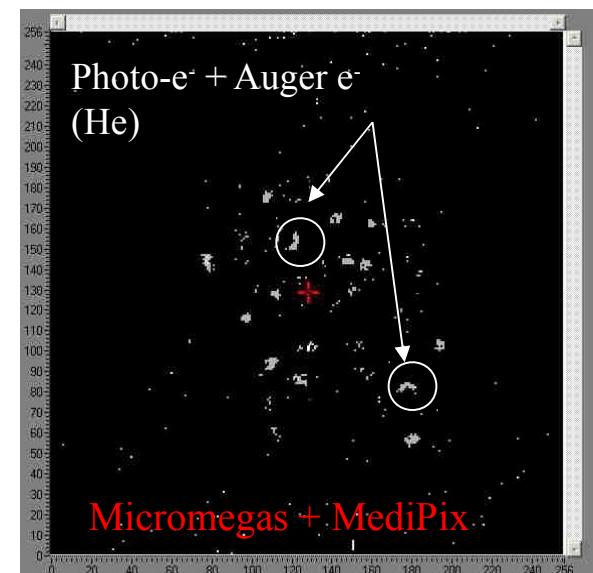
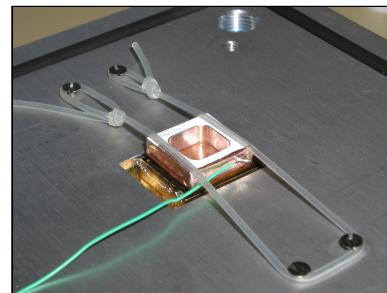
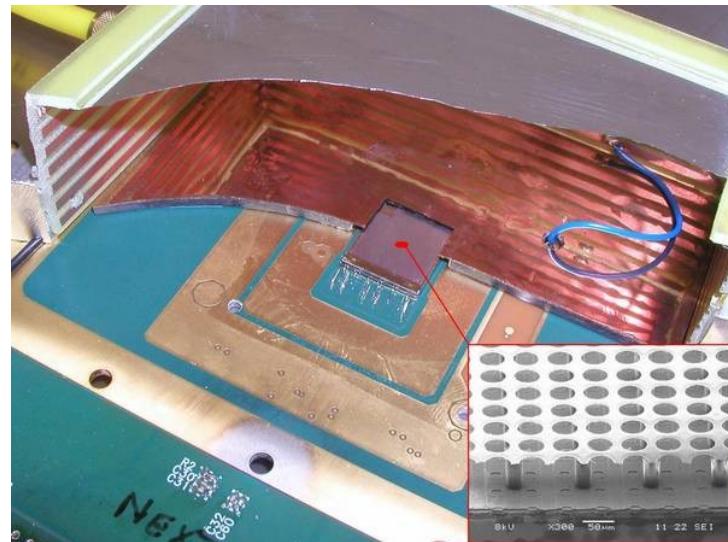
Suppression des fluctuations de gain

Comptage des électrons primaires *Lecture à pixels*

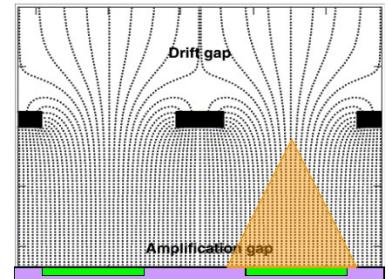
Pixels de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$, surface totale $15 \times 15 \text{ mm}^2$

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

Polarimétrie rayons X
GEM + PIXI, INFN, Bellazzini



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



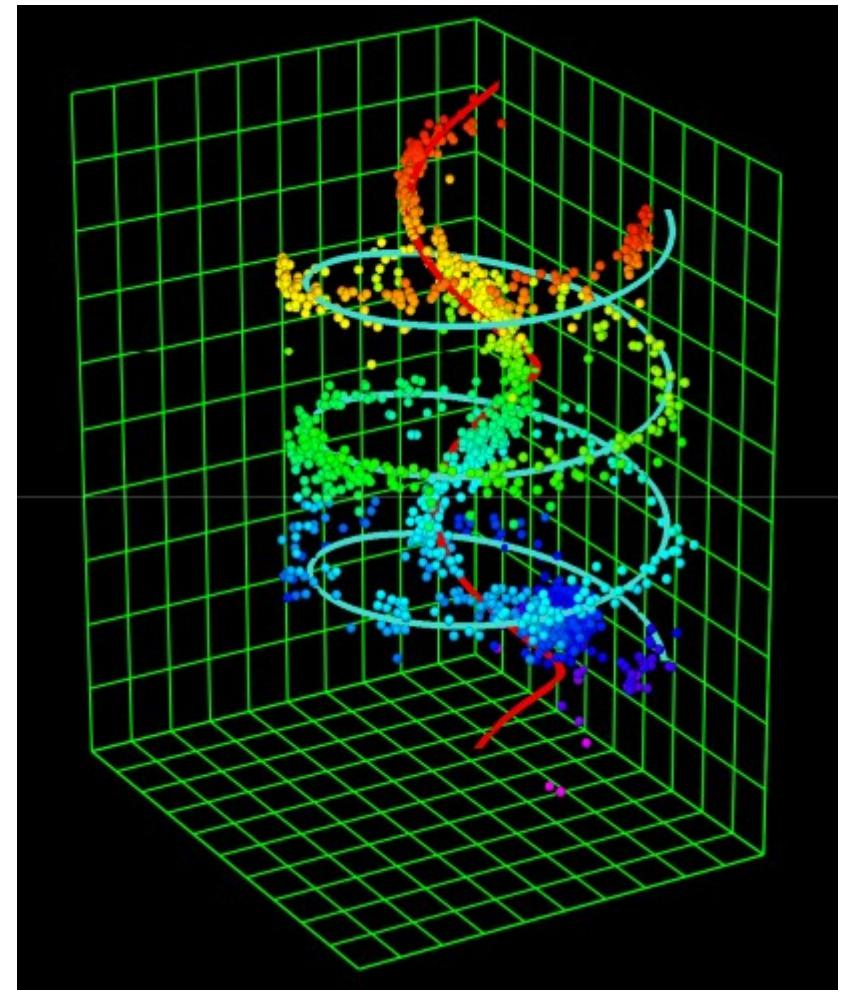
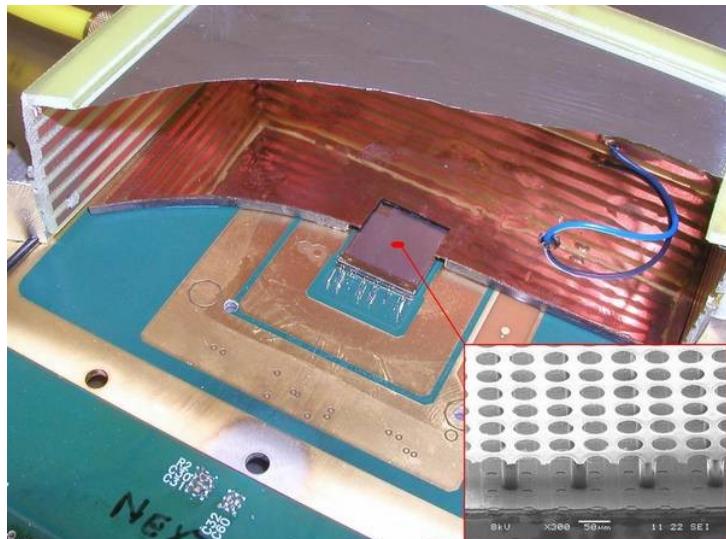
Suppression des fluctuations de gain

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

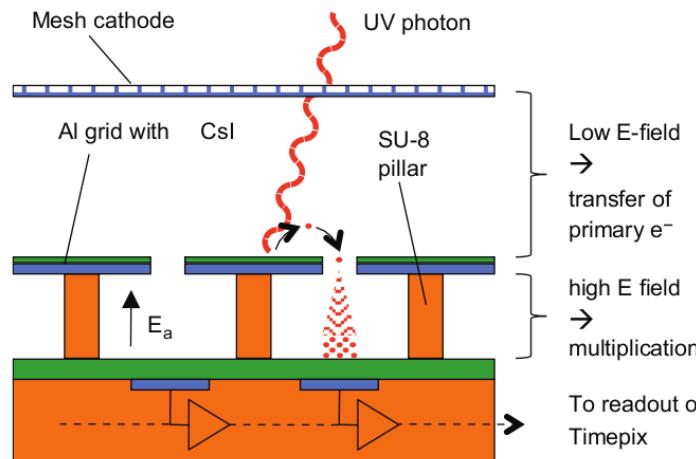
Polarimétrie rayons X
GEM + PIXI, INFN, Bellazzini



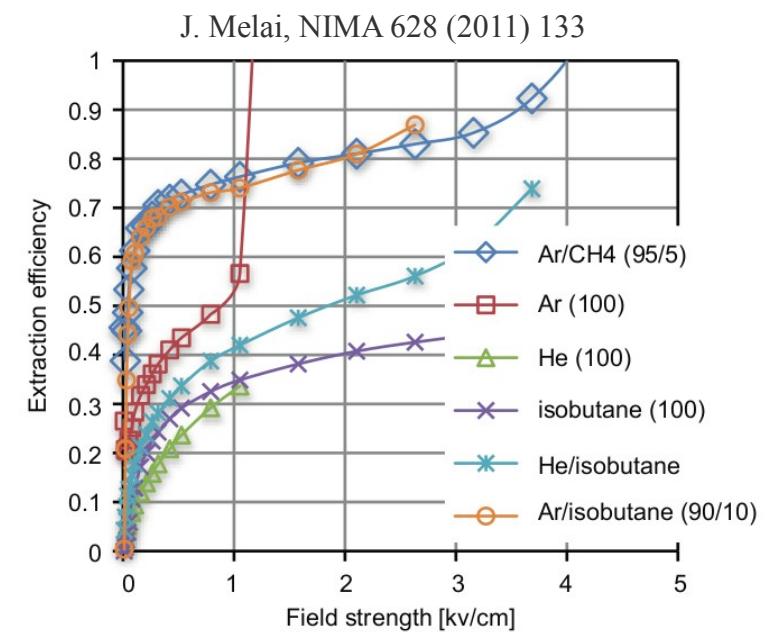
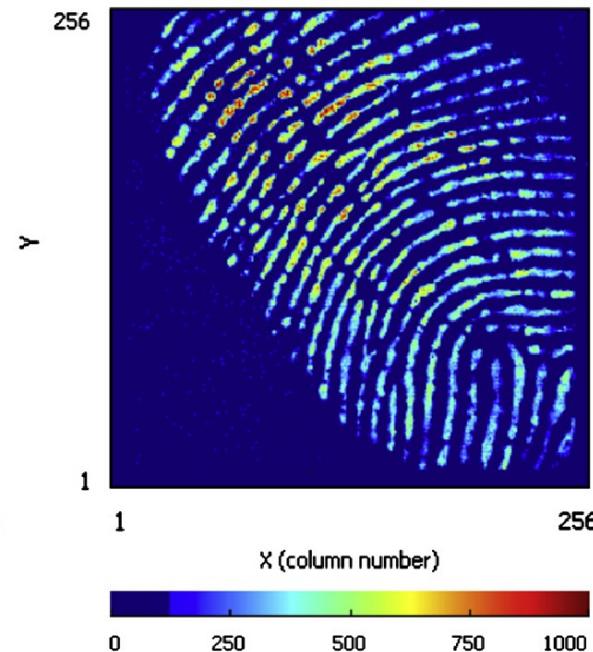
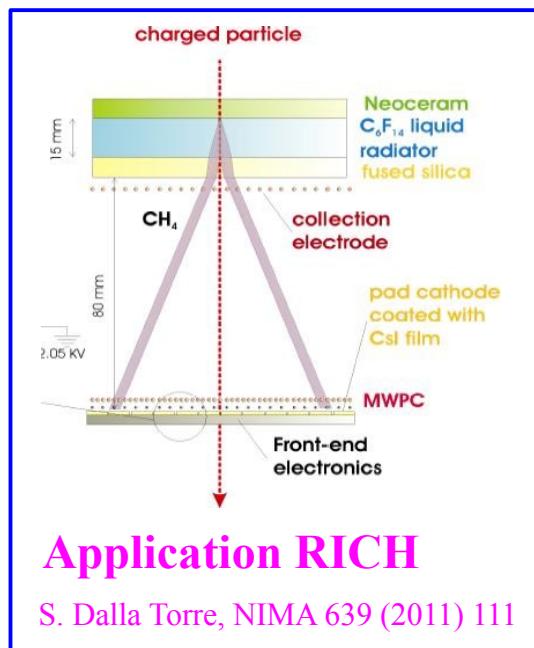
Efficacité de détection aux e- uniques > 95 %

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

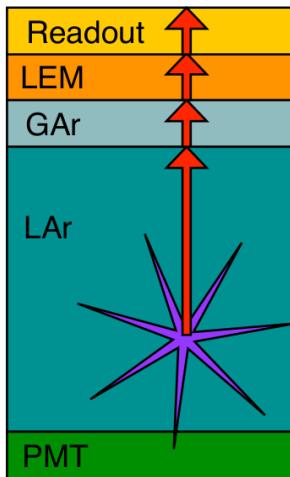
Détection de lumière UV



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



Application dans les TPC double phase

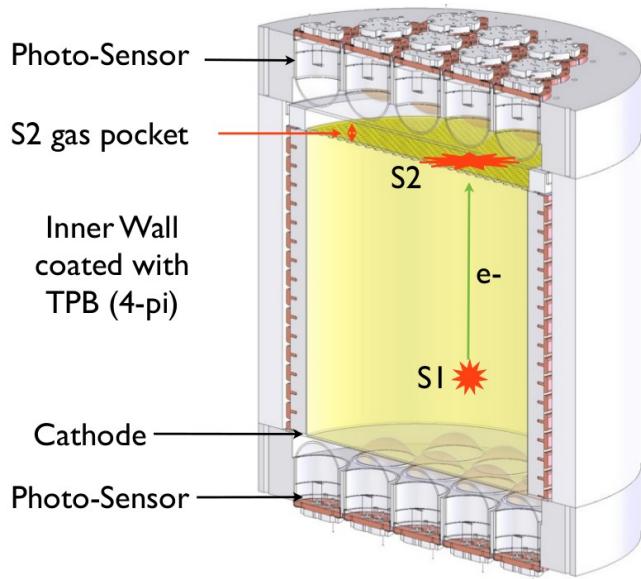
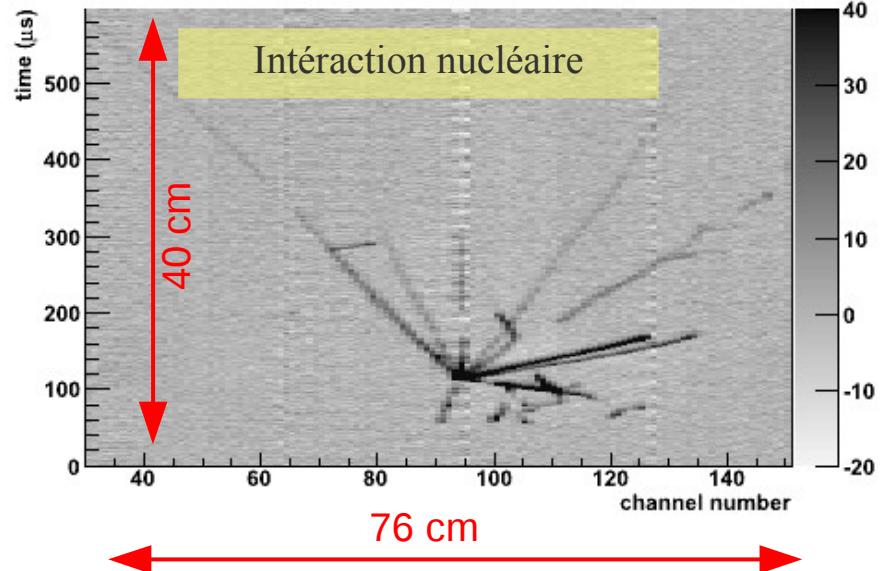


Trajectographe 3D
+ calorimètre homogène

Large Electron Multiplier

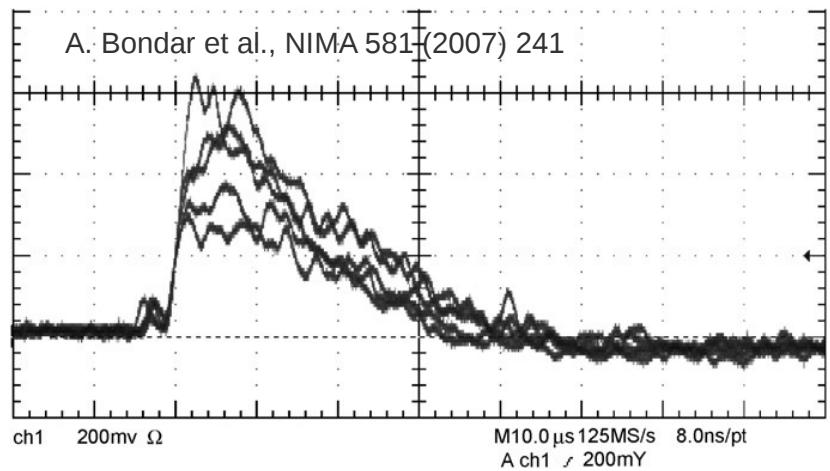
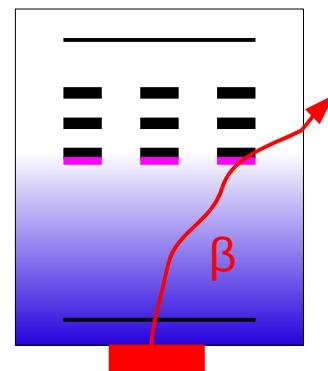
Epaisseur 1 mm, 5.10^5 trous
diamètre/pas trous : 500/800 μm
Pas des pistes XY 3 mm

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



PMT → MPGD

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

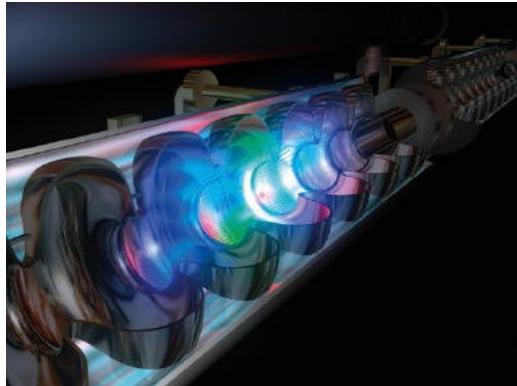


Les collisionneurs haute luminosité

- 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

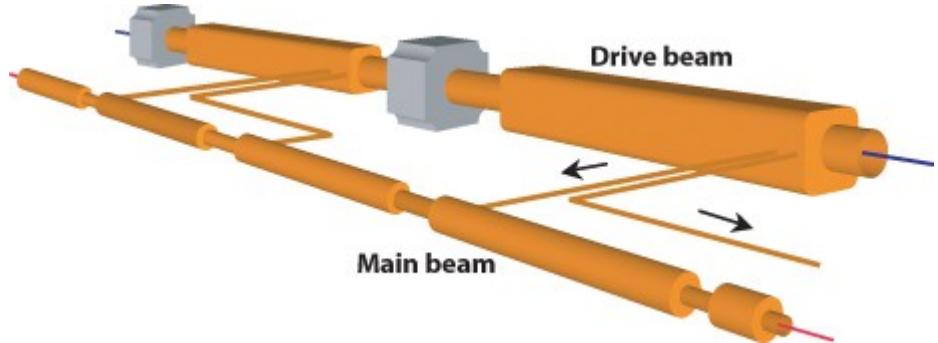
Le futur collisionneur linéaire

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

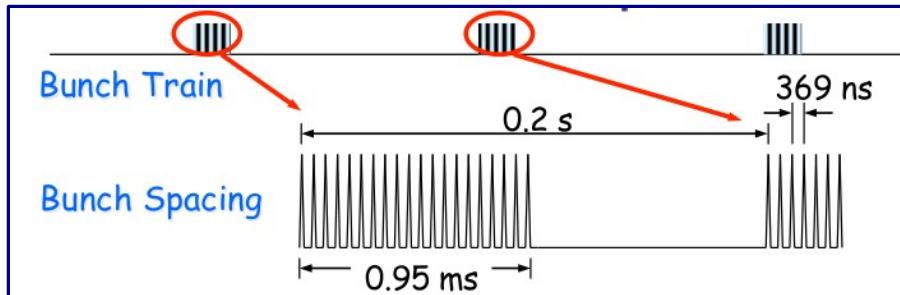
Compact Linear Collider



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 $2.10^{34} \text{ /cm}^2/\text{s}$

Objectifs physiques ILC

Brisure de symétrie électrofaible

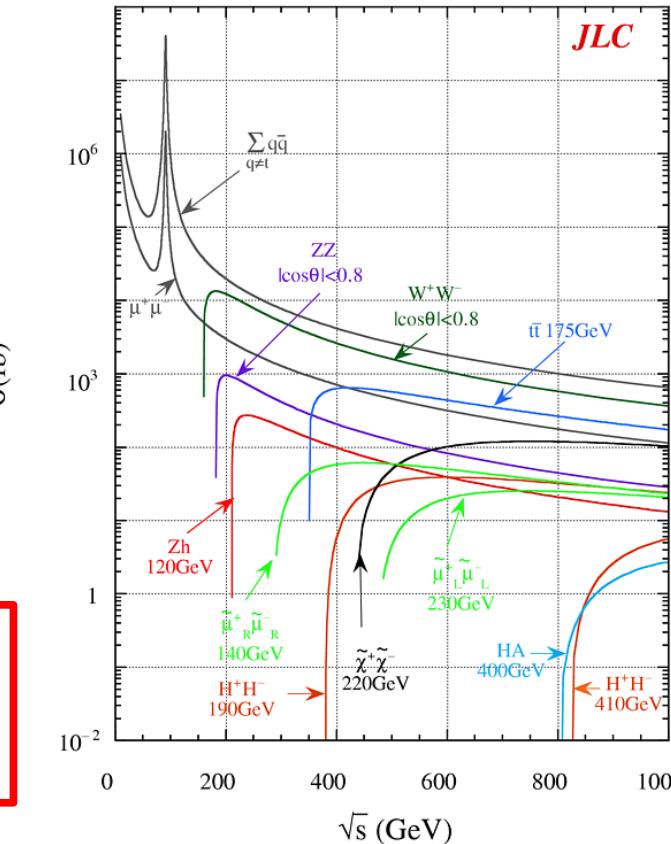
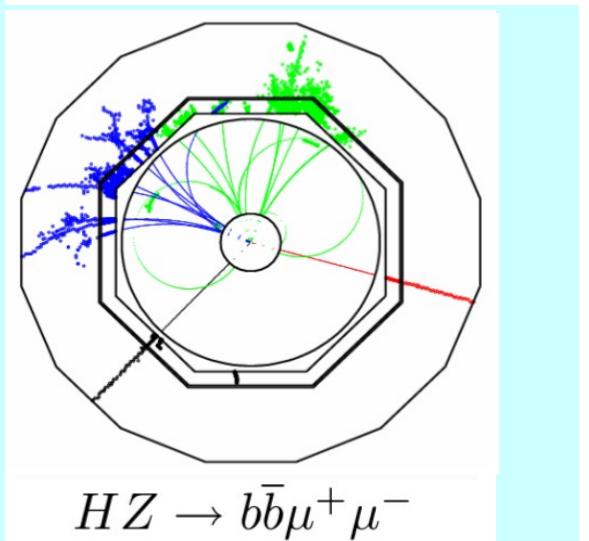
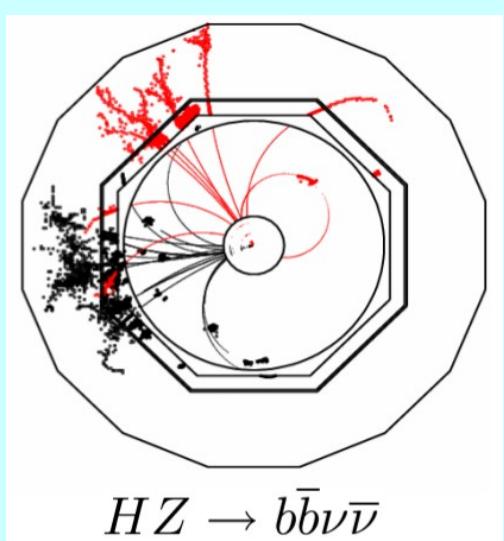
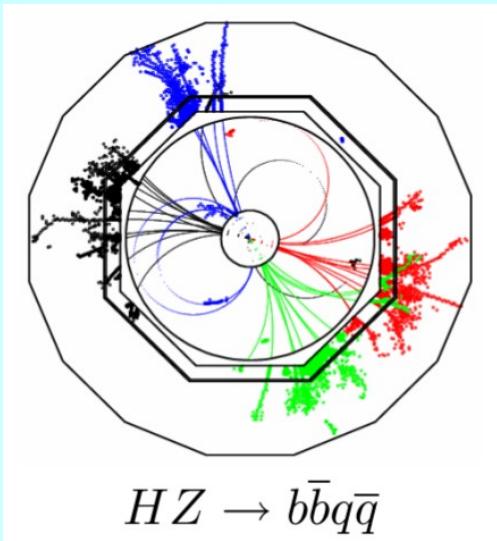
Spectre des particules supersymétriques

Propriétés des particules lourdes du SM (W, top)

Au-delà du SM (dimensions supplémentaires)

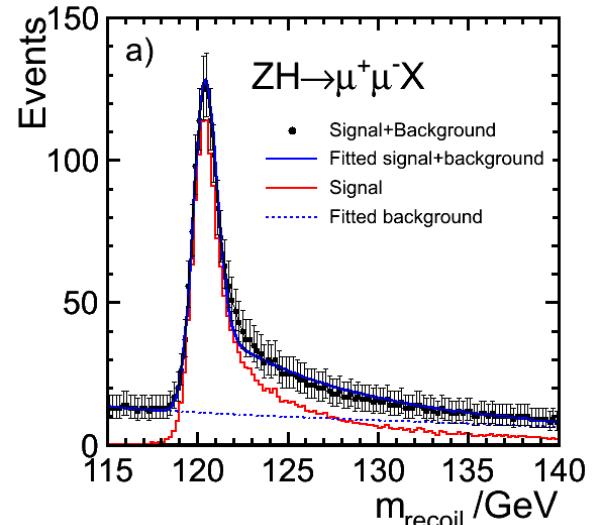
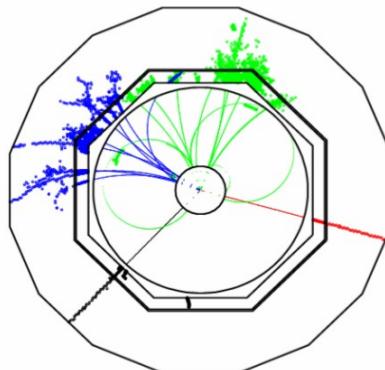
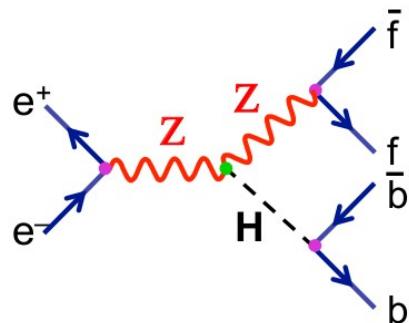
Mesure des propriétés du boson de Higgs

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

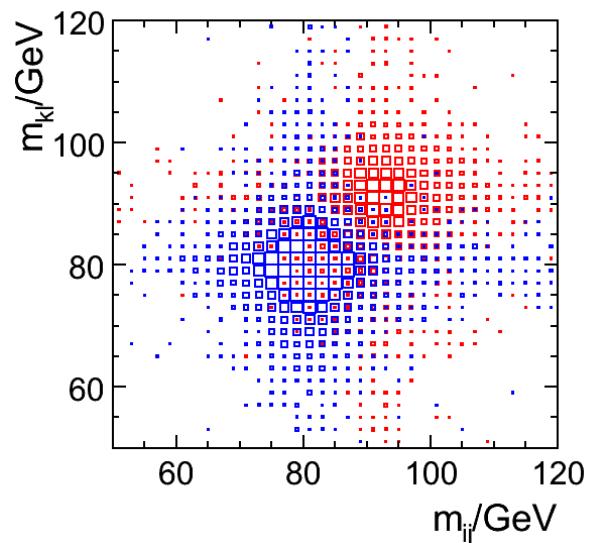
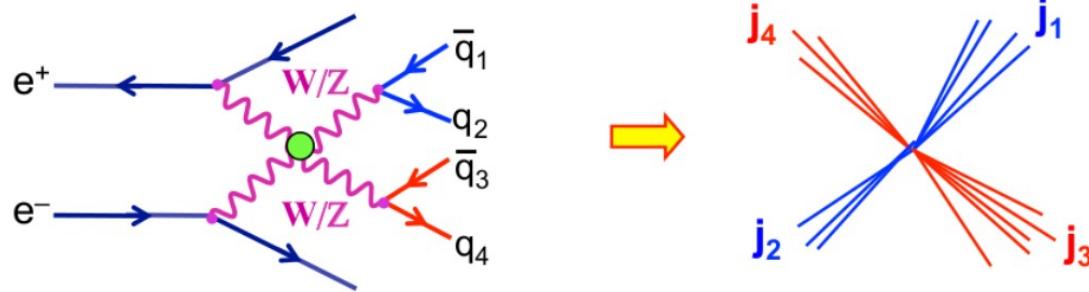


Objectifs physiques à l'ILC

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)

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

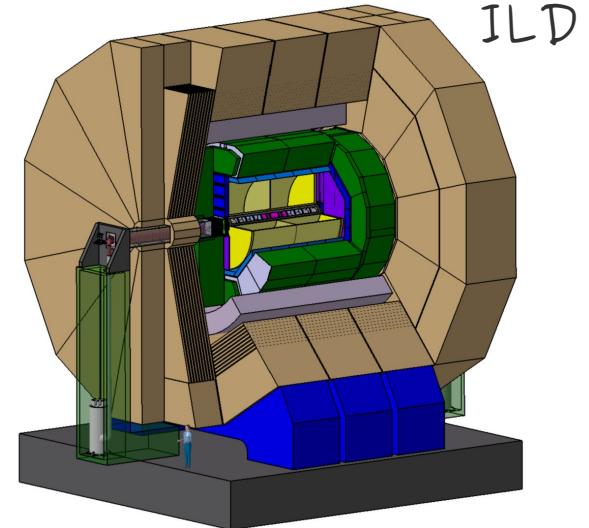
Vertex

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

ILD

TPC de grand diamètre (3.6 m)

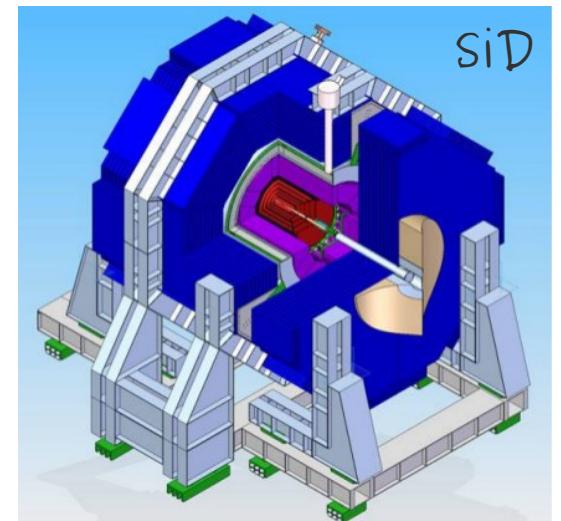
Champ magnétique de 3.5 T



SiD

Trajectographe silicium compact (2.4 m)

Champ magnétique de 5 T



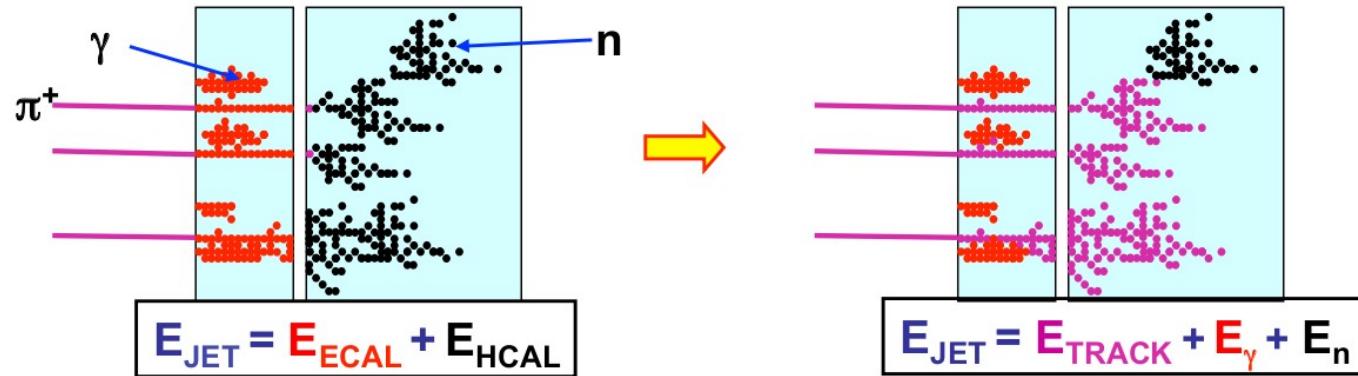
Mesure de l'énergie des jets

Résolution des calorimètres hadroniques à échantillonage 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

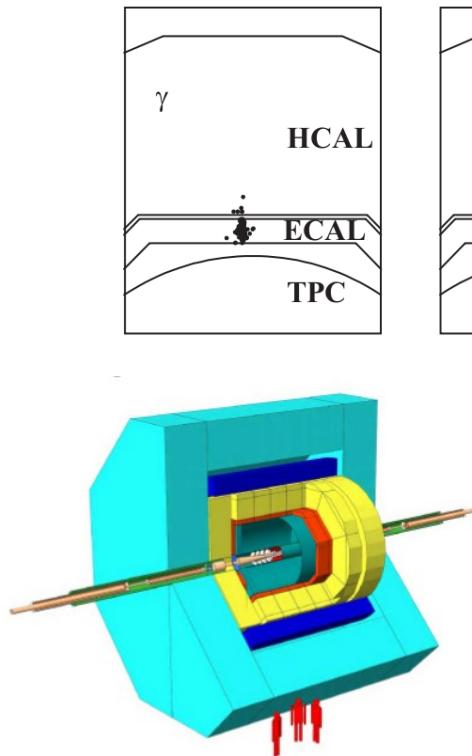
The DREAM project—Towards the ultimate in calorimetry, NIMA 617 (2010) 129

Les performances du « *Particle Flow* »

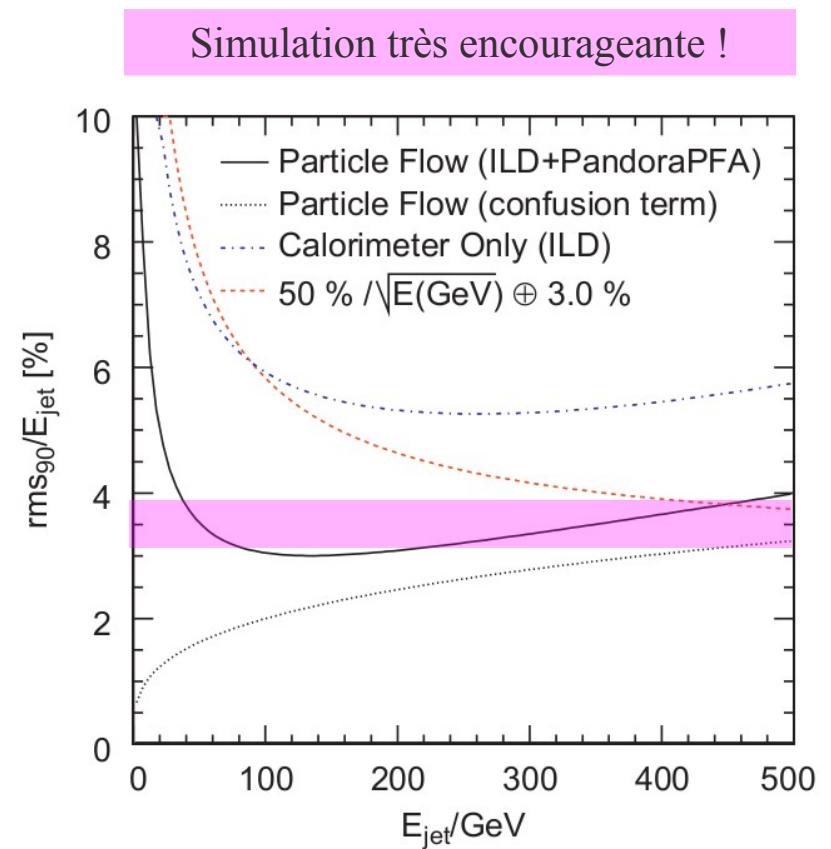
Les performances du Particle Flow dépendent de

- 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 %



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

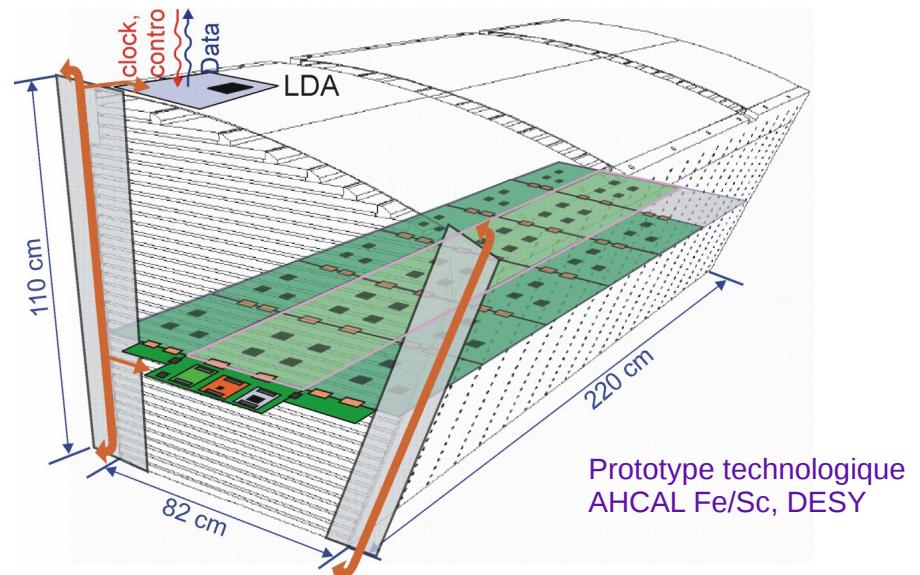
> 5 mrad, zone mortes et fuites minimales
→ Détecteurs fins, de grande taille
et vers l'avant, tolérants aux radiations

Résolution

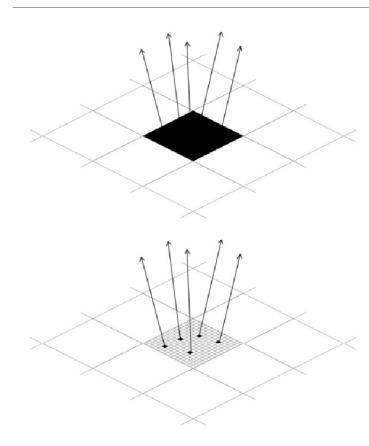
Mesure des neutres (photons et hadrons)
→ Somme de l'énergie (10-12 bits)
ou comptage (1-2 bits)

Stabilité

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



Analogue VS digital



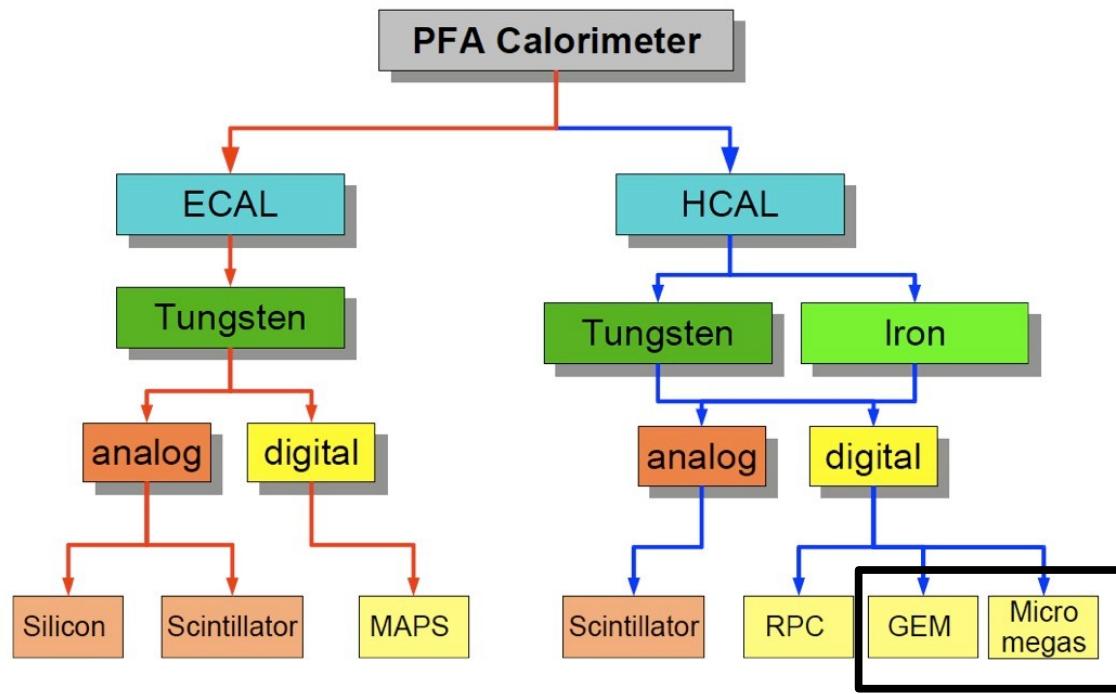
ASIC développés au LAL (Omega):
HARDROC, SPIROC, SKIROC...

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

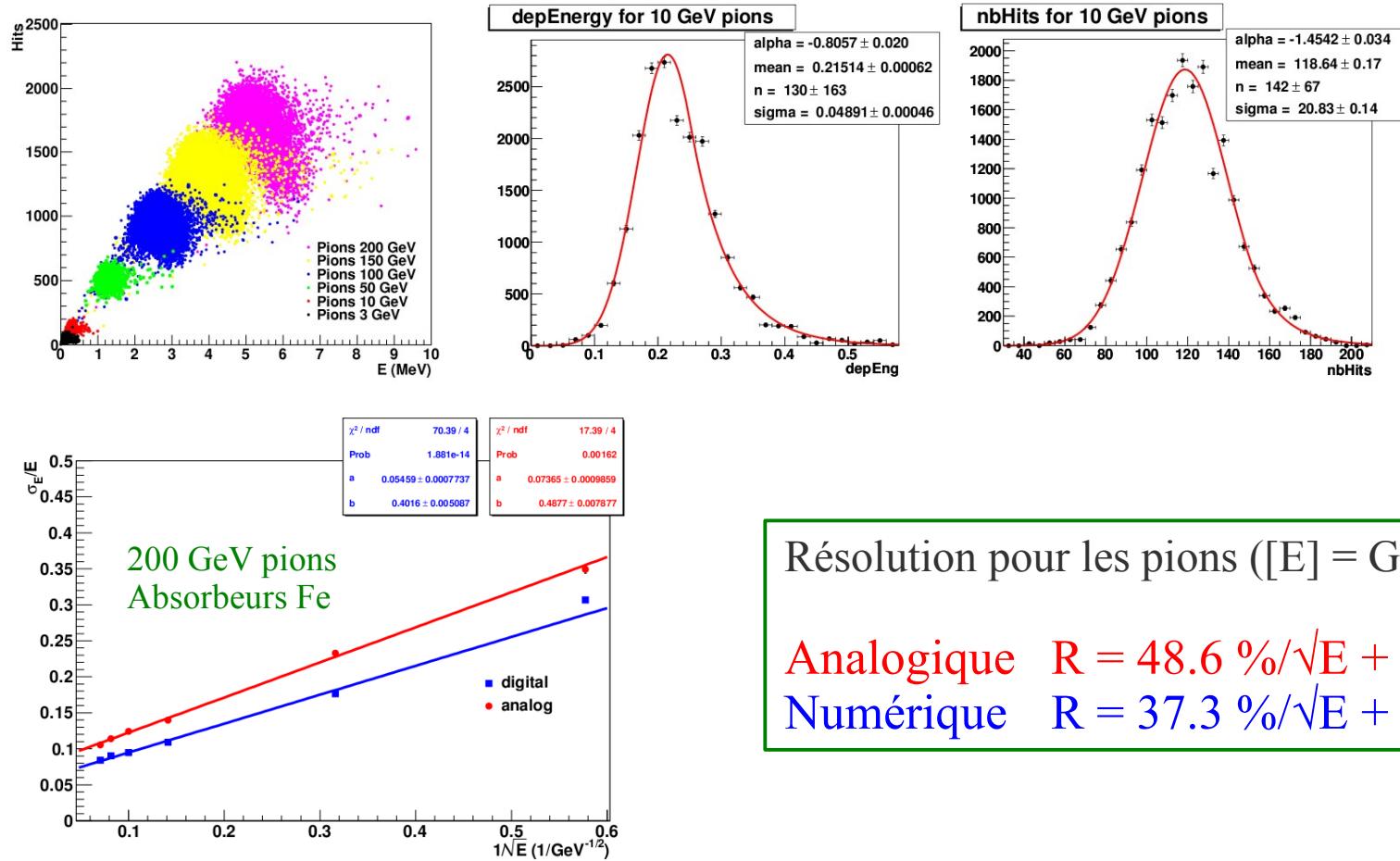
Capteurs tolérants aux radiations et ASIC/ADC rapides

<http://fcal.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

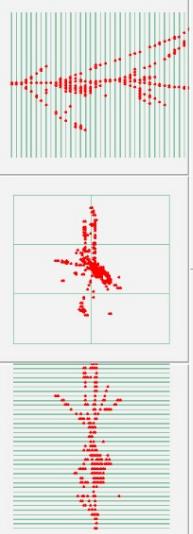


Les calorimètres hadroniques gazeux à seuil(s)

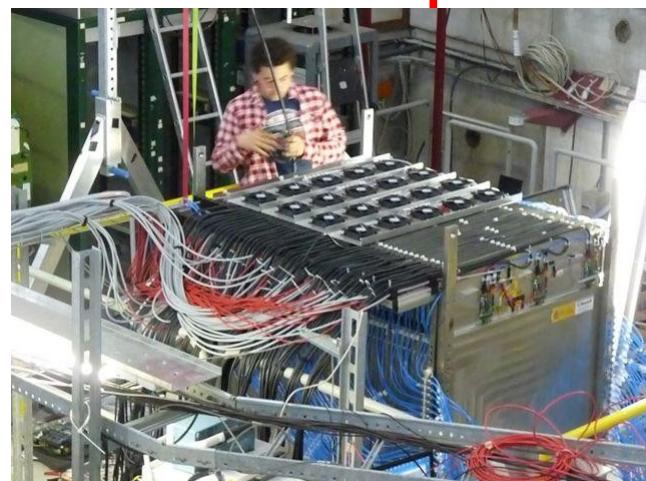
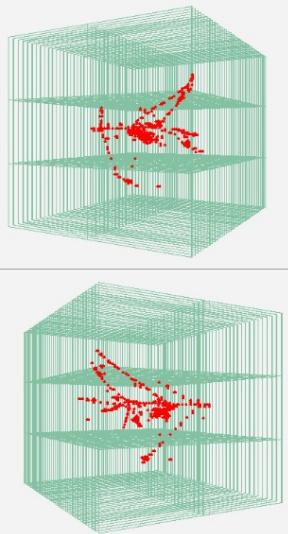
Projets m^3 de 40 RPC ($4.5 \lambda_{int}$)

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

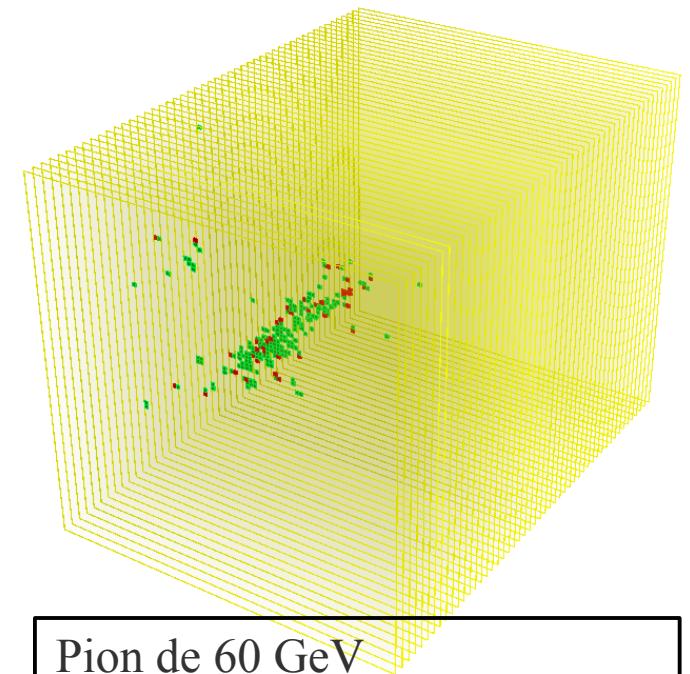
EU, Lyon : 2-bit, 1 chambre/plan, *power pulsing*



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)

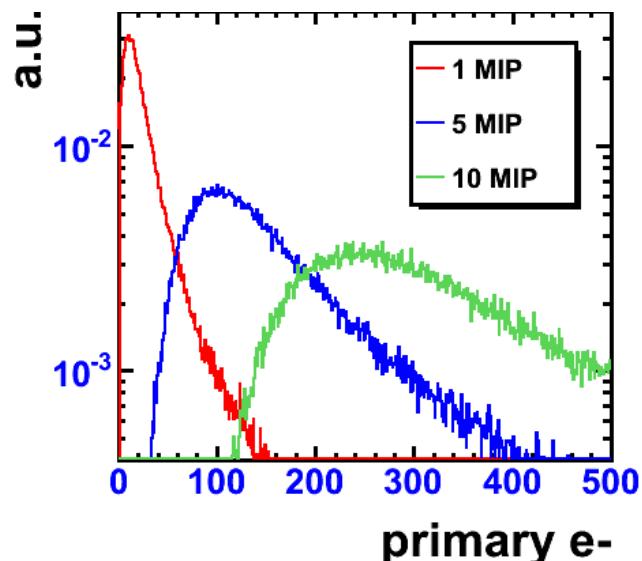
Mélanges standards (Ar/CO₂, Ar/iC₄H₁₀)

Insensibilité aux neutrons

δ-électrons

Signal 10-20 fC, ASIC bas bruit

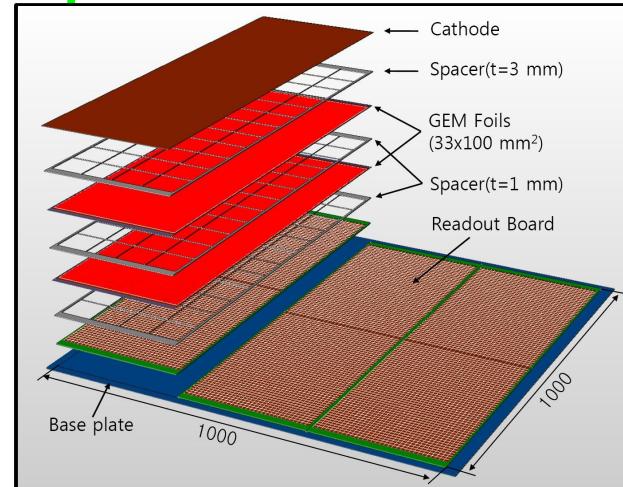
Etincelles, protections de l'électronique



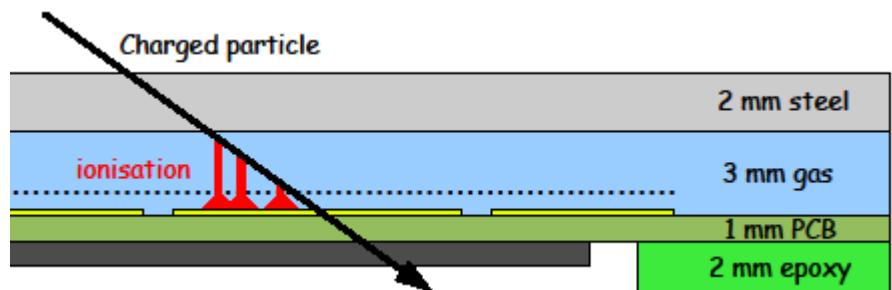
Projets multi-m² MPGD

GEM, US, Arlington : 1 bit

Micromegas, EU, Annecy : 2-bit



GEM DHCAL



Utilisation de Micromegas dans le HCAL (1/4)

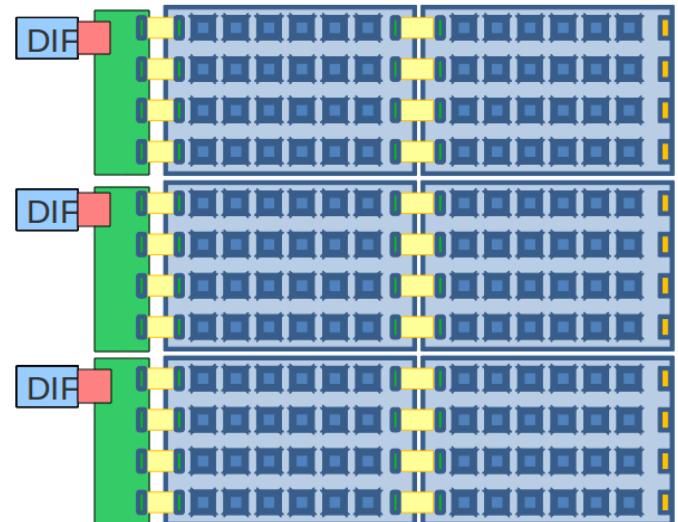
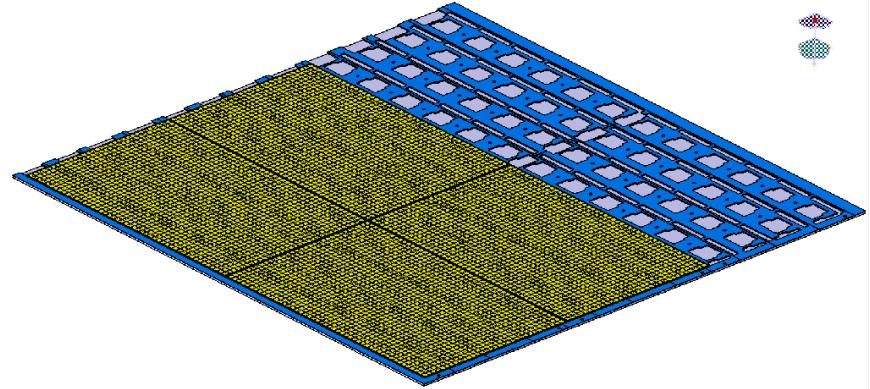
MICROMEGAS chambers for hadronic calorimetry at a future linear collider,
C. Adloff, et al., JINST 4 (2009) 11023

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

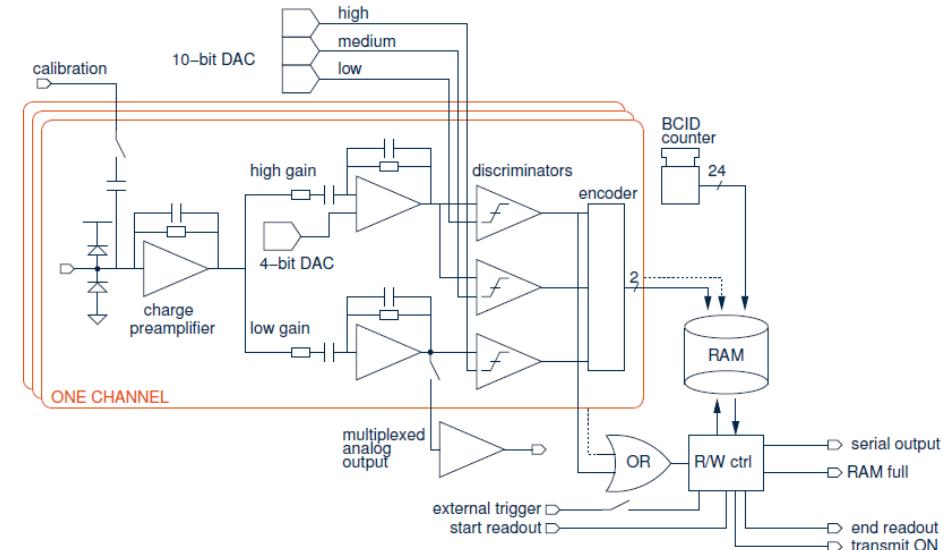
Collaboration LAL/Omega et LAPP

64 canaux avec timestamp de 200 ns

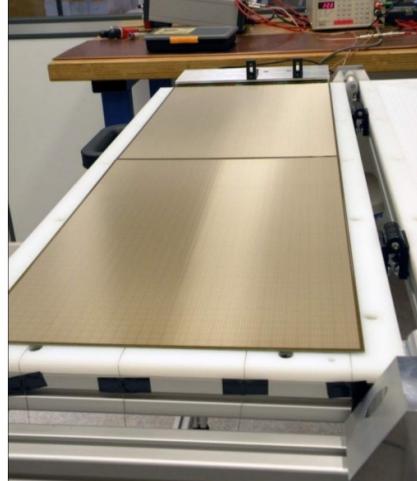
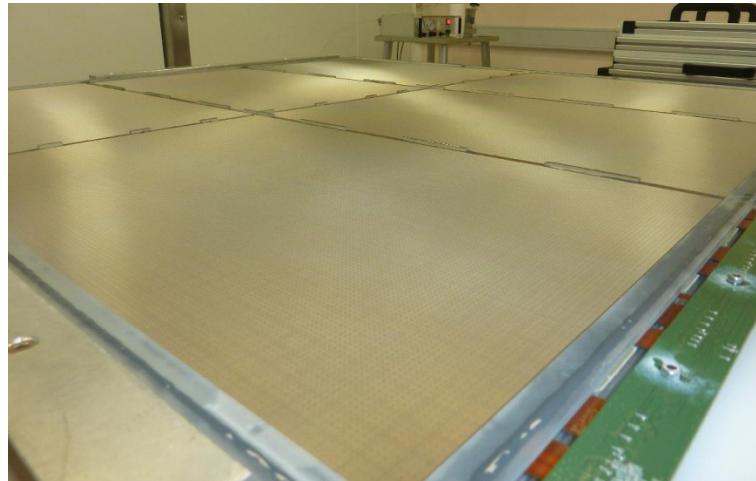
Par voie : préampli de charge + 2 shapers

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

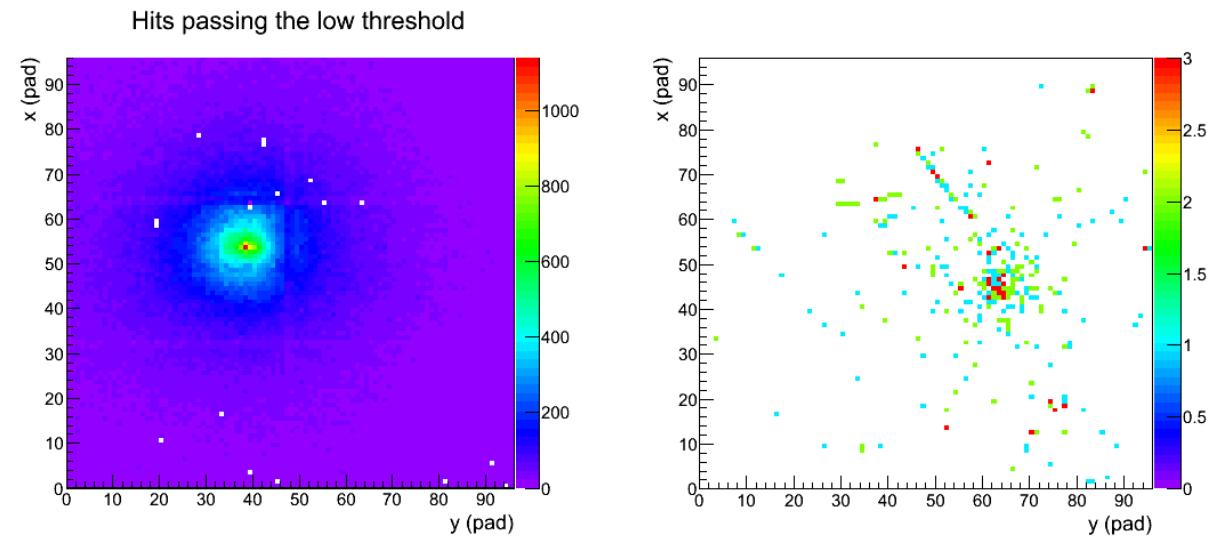
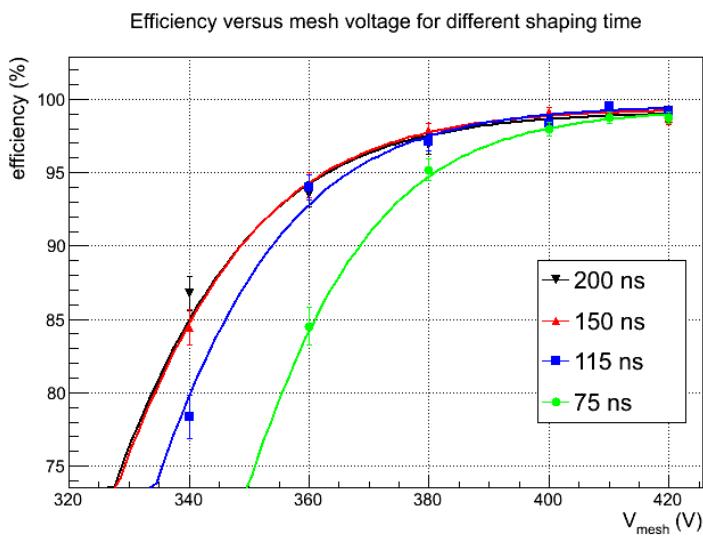
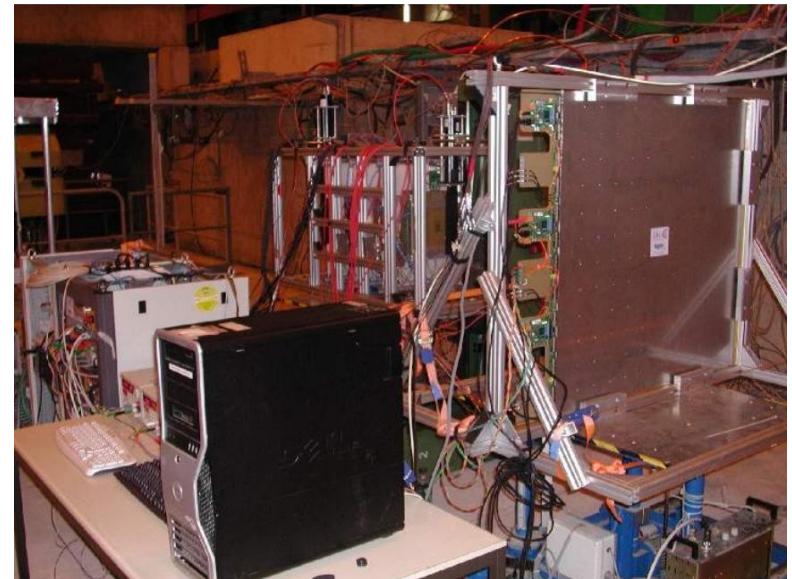
Particules au minimum ionisant (muons)

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

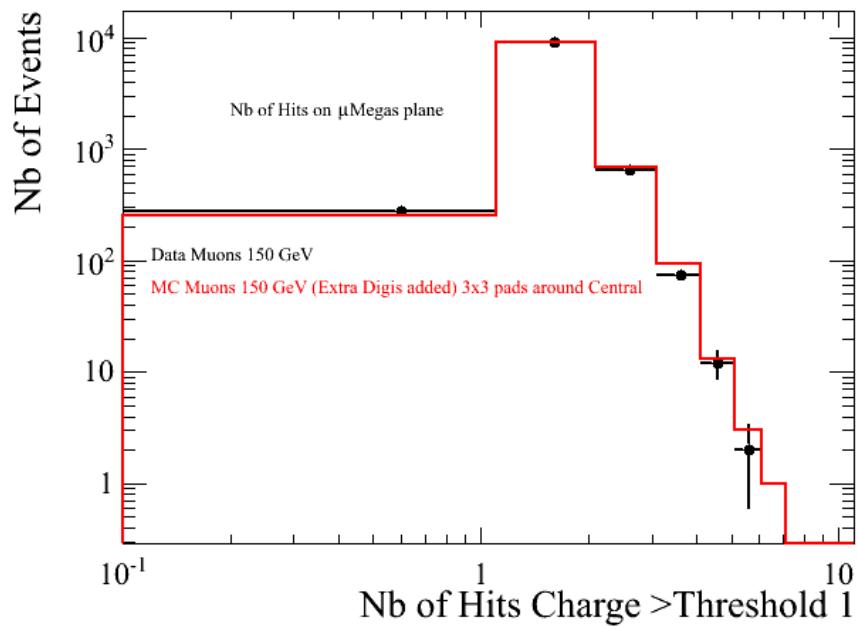


Utilisation de Micromegas dans le HCAL (4/4)

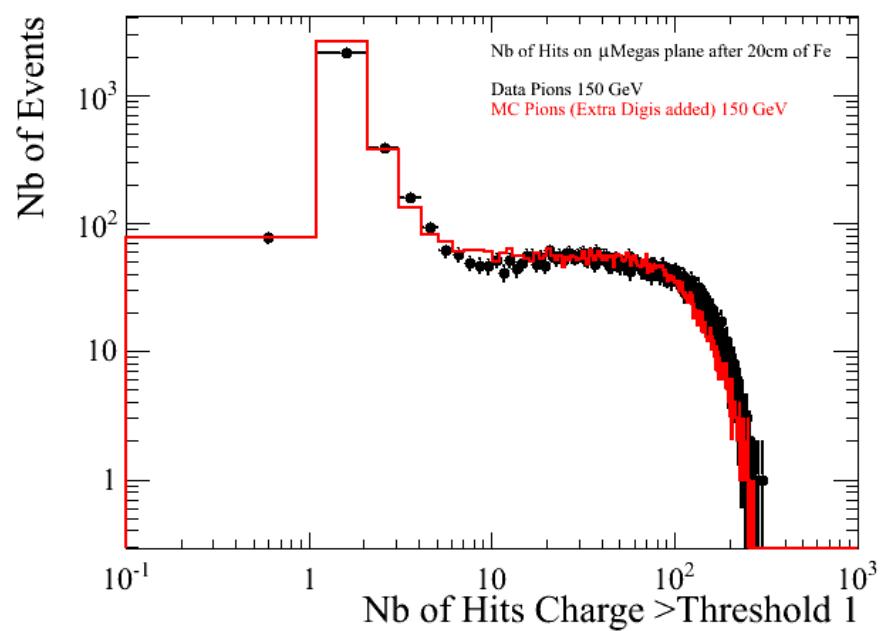
Comparaison à la simulation

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 ½ TPC, Ifru, Saclay

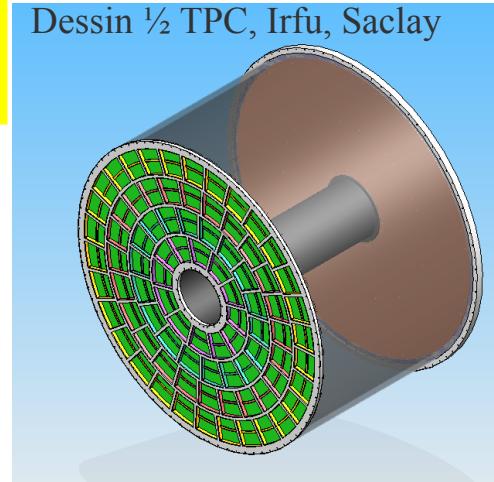
Objectif : $\sigma_{pt}/p_t^2 = 2.10^{-5} \text{ c/GeV}$

avec le trajectographe complet

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

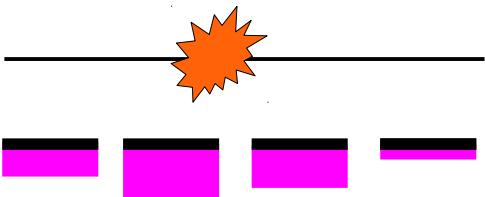
Diamètre = 3.6 m, longueur = 4.3 m

Bouchon: modules sur 3-4 anneaux concentriques



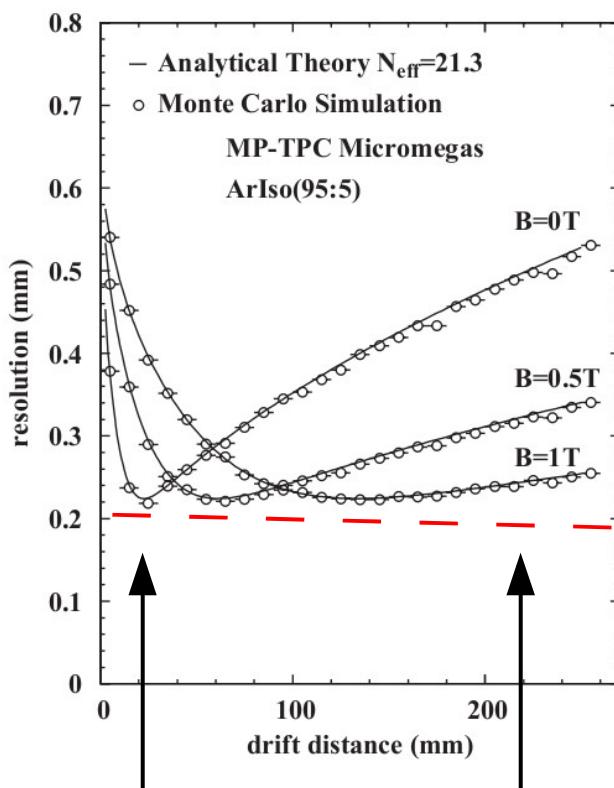
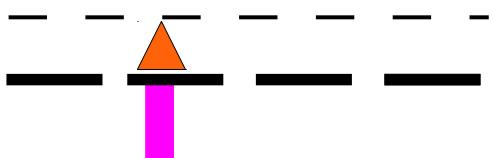
Amplification à fils

Centre de gravité



Amplification MPGD

$\text{ExB} \sim 0$ mais 1 damier touché



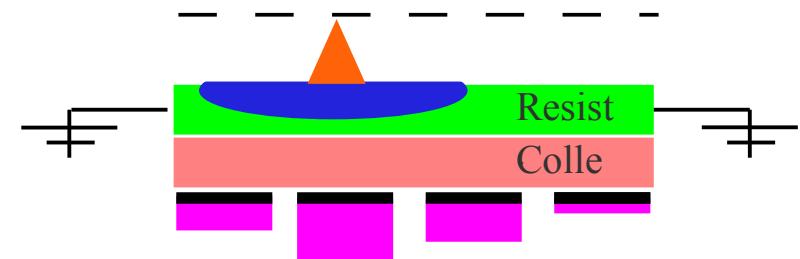
Etalement + damier

Gas

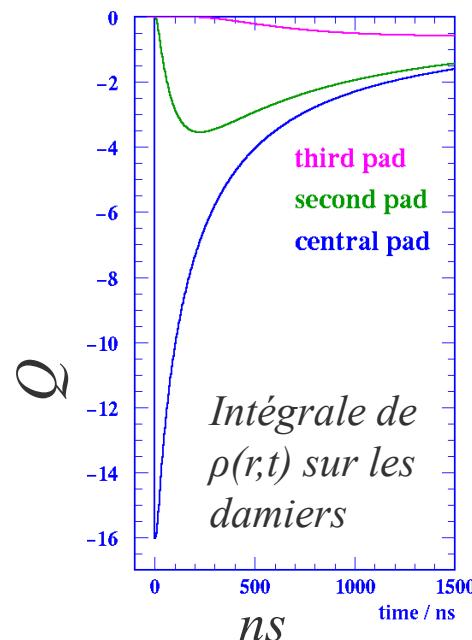
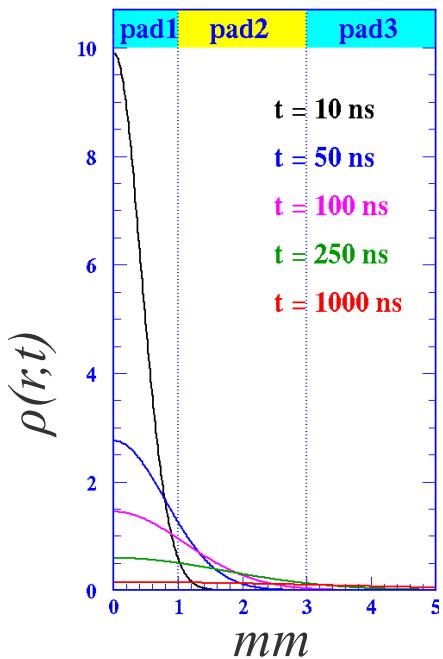
Options technologiques

Etaler davantage la charge

GEM et Micromegas
Anode + couche résistive



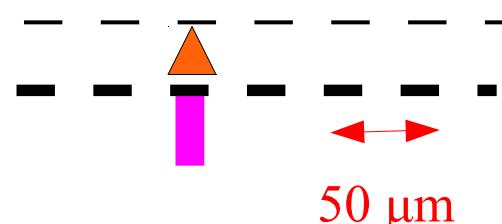
M. Dixit, A. Rankin, NIMA 566 (2006) 28



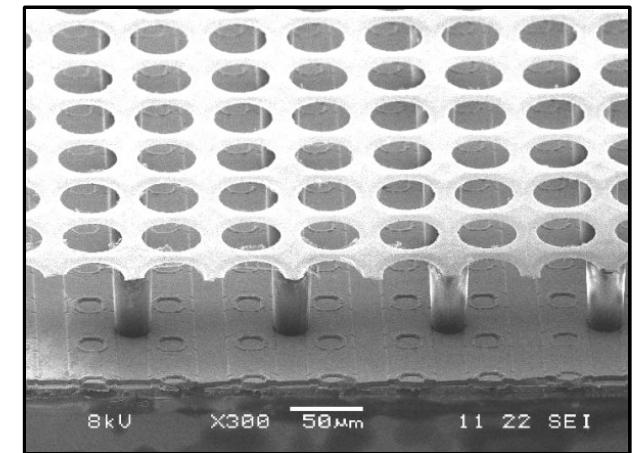
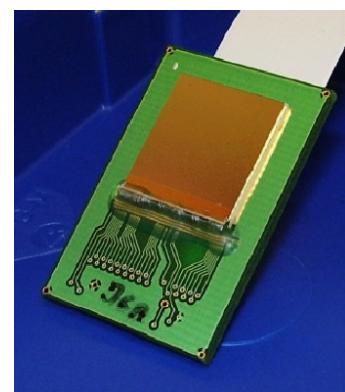
28/02/2012, LAL Orsay

Opter pour des damiers plus petits

GridPix
Anode pixélisée



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



MPGD pour les collisionneurs à haute luminosité, M. Chefdeville

33

Infrastructure de test

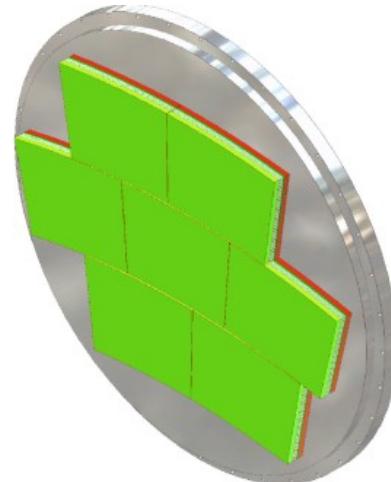
Infrastructure de test EUDET: grand prototype DESY

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

Bouchon pouvant accueillir 7 modules

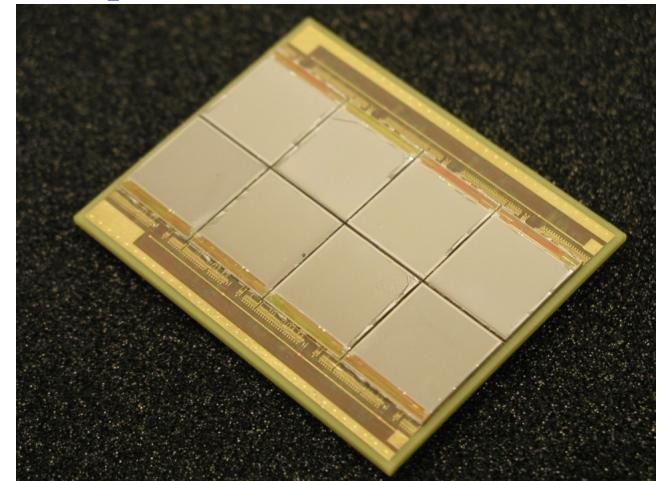
Aimant supraconducteur (1 T)

Trajectographe silicium externe



Module Micromegas

Octopuce, 8 GridPix



La collaboration LCTPC
<http://www.lctpc.org>

Lecture à pixels

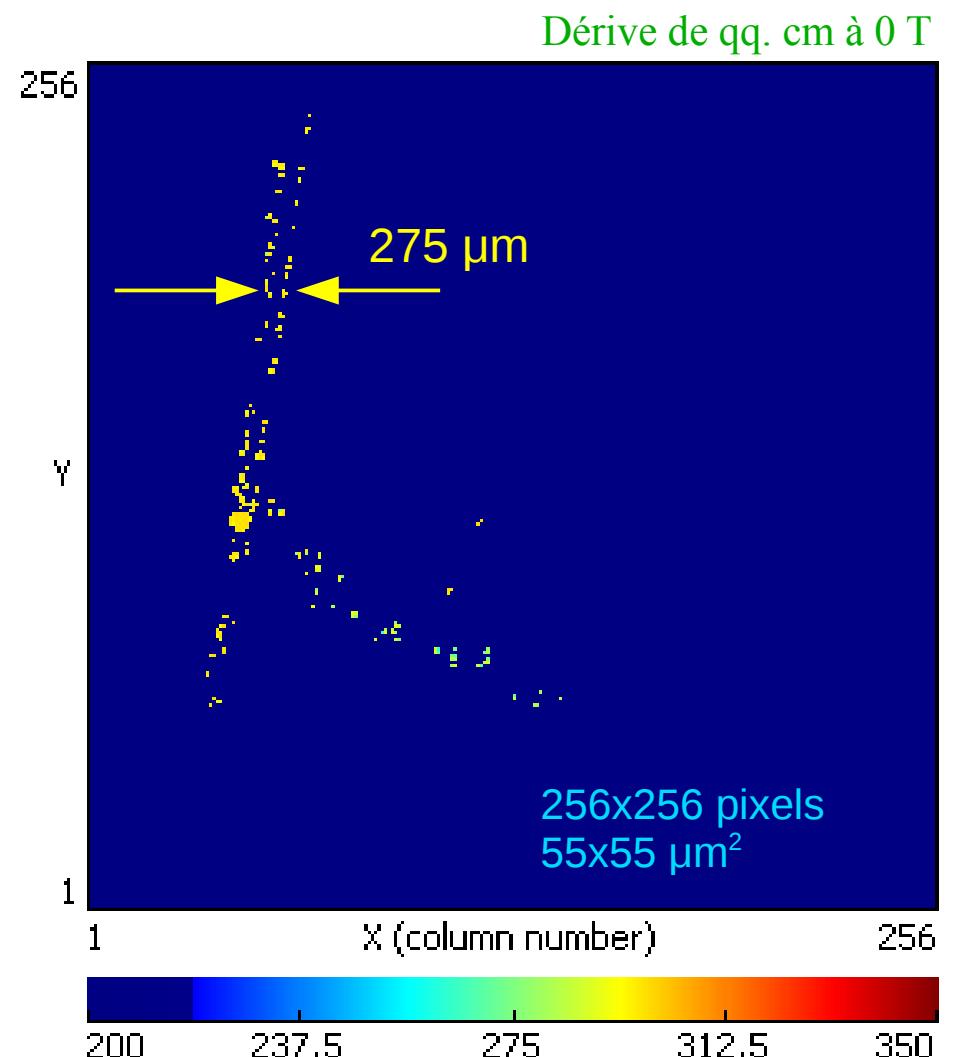
Séparation des traces limitée par la diffusion

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



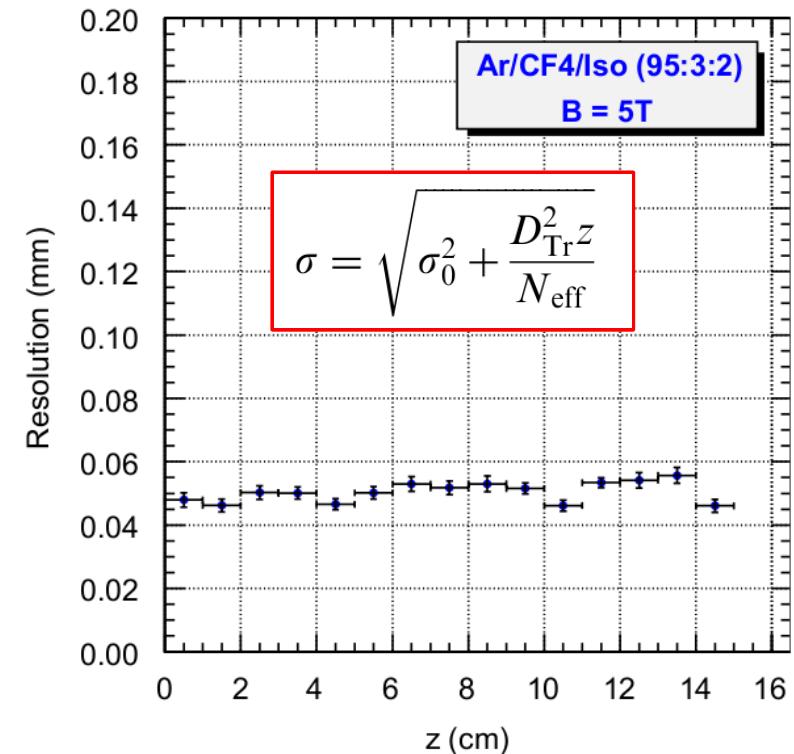
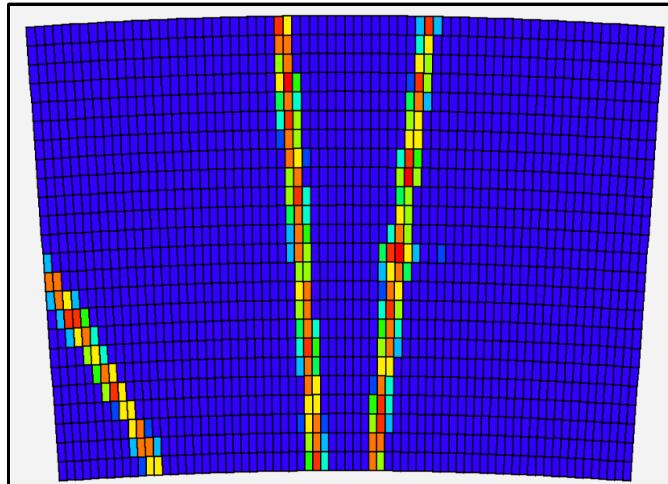
Micromegas avec revêtement résistif

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!

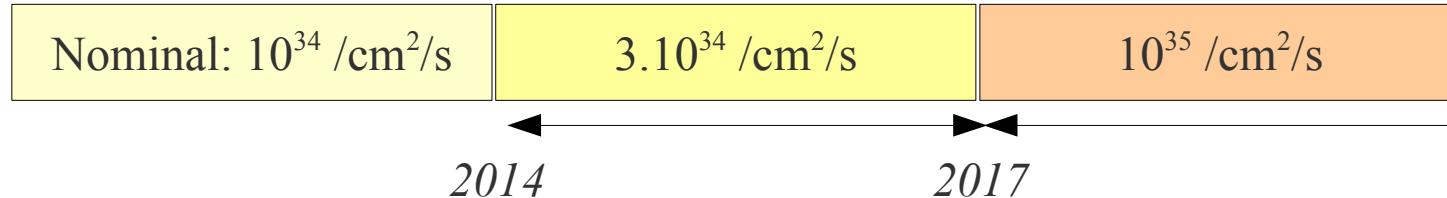
M. Dixit, et al., NIMA 581 (2007) 254



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

Application au LHC haute luminosité

Augmentation de la luminosité



Empillement, Vieillissement, baisse d'efficacité, remplacement de certaines parties...

Les chambres à muons d'ATLAS

Taux max. vers l'avant: $500 \text{ Hz/cm}^2 \times 10$

Possible remplacement des CSC, MDT, TGC

Muon Atlas MicroMegas Activity (MAMMA)

Cahier des charges

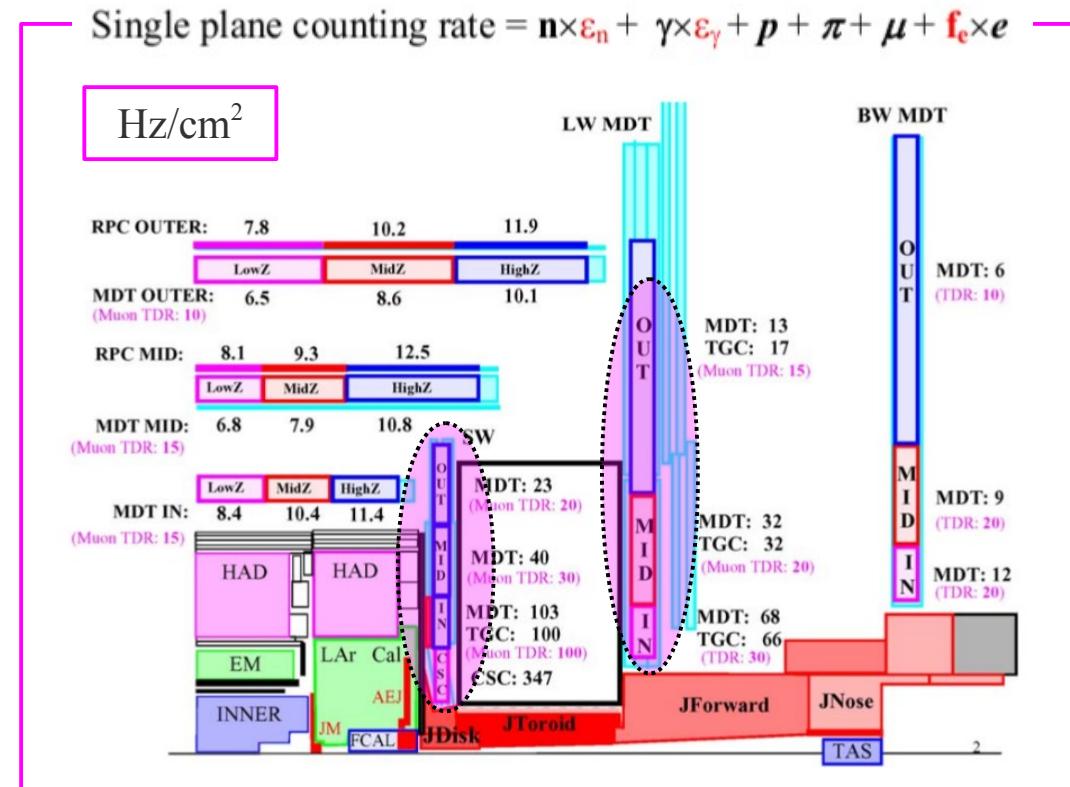
Résolutions: $80 \mu\text{m}$, 5 ns

Taux: 5 kHz/cm^2 (0.2 des neutrons)

Opération > 5 ans SLHC

Efficacité 99 %

Grandes tailles $1 \times 2 \text{ m}^2 \rightarrow 400 \text{ m}^2$



Les étincelles dans les MPGD

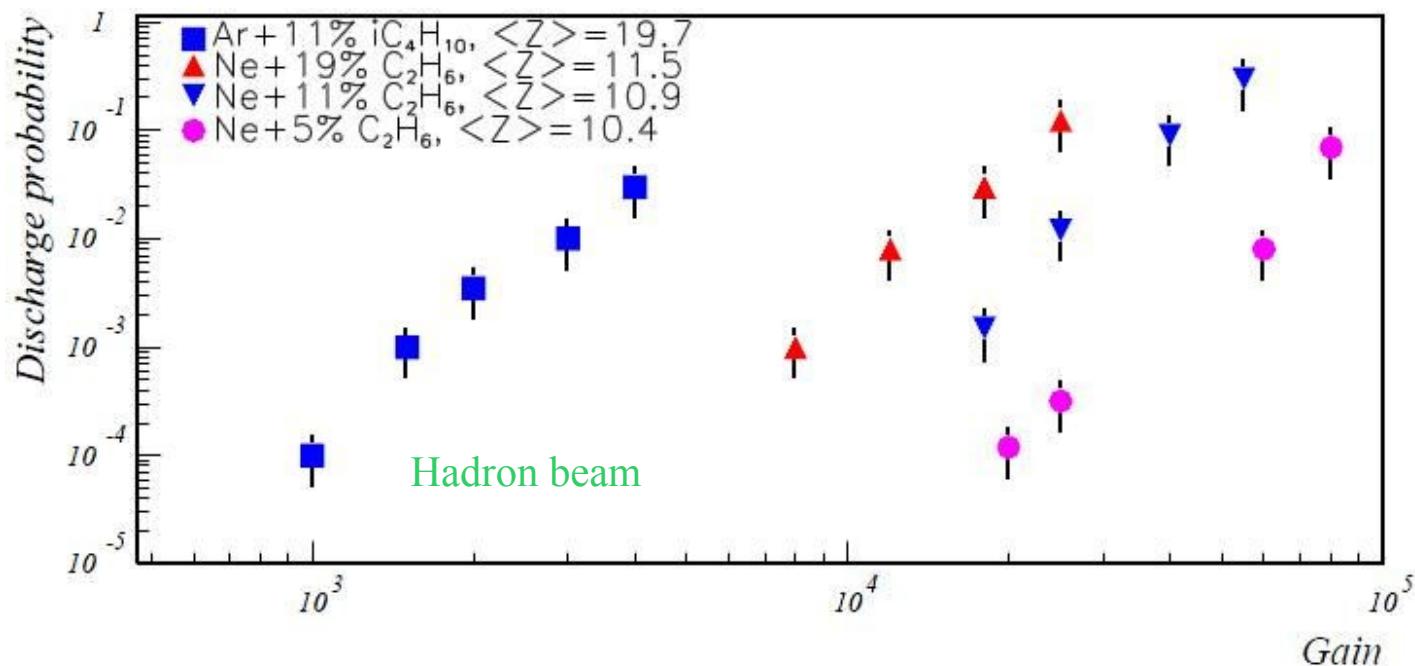
Limite empirique de Raether

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

De +, à haut flux, les avalanches se superposent

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

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



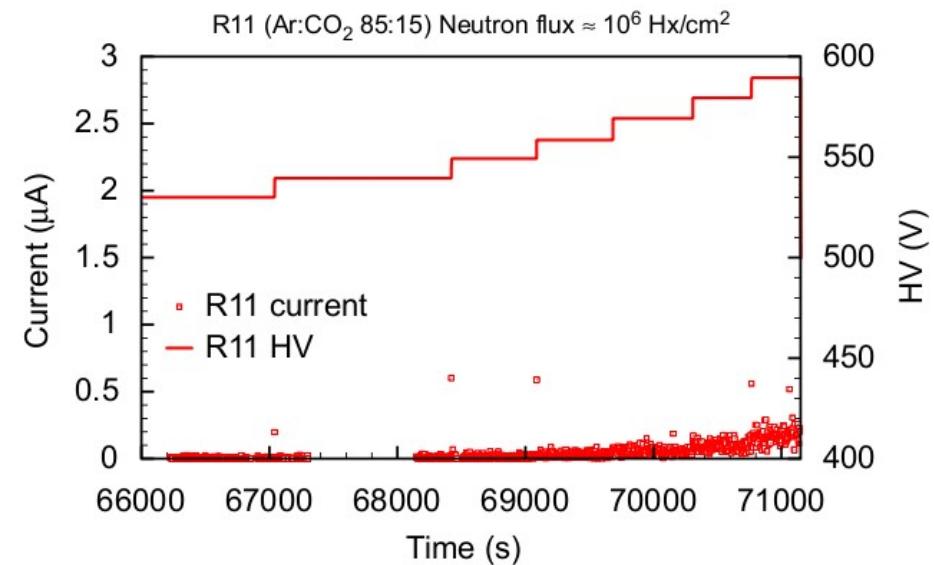
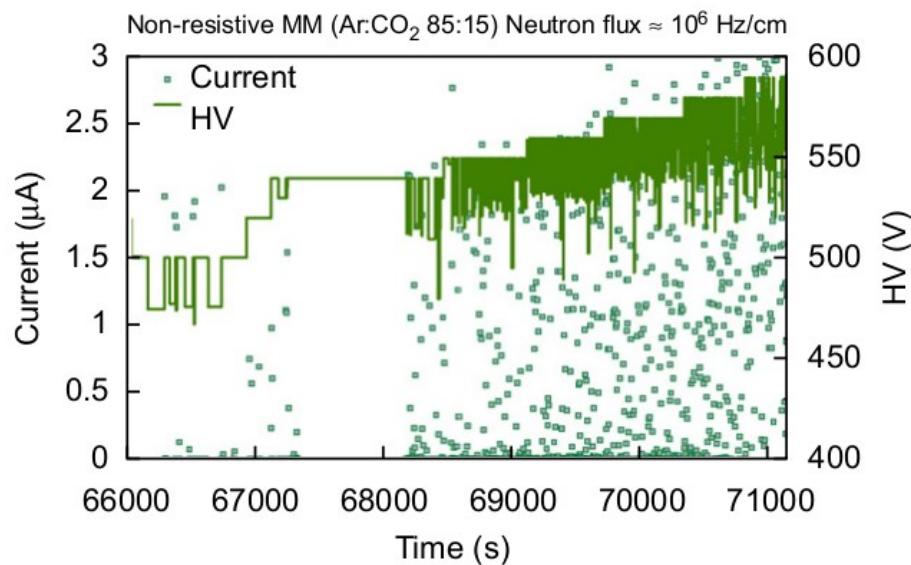
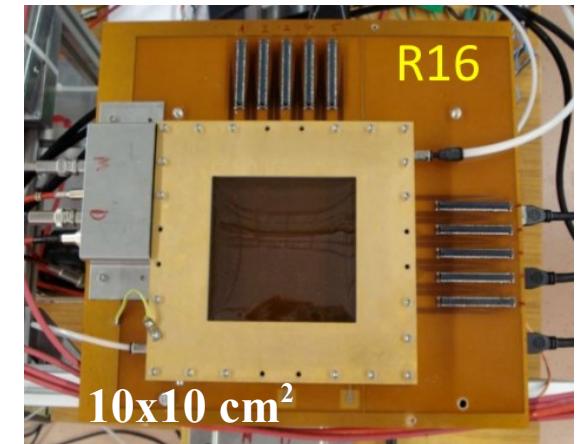
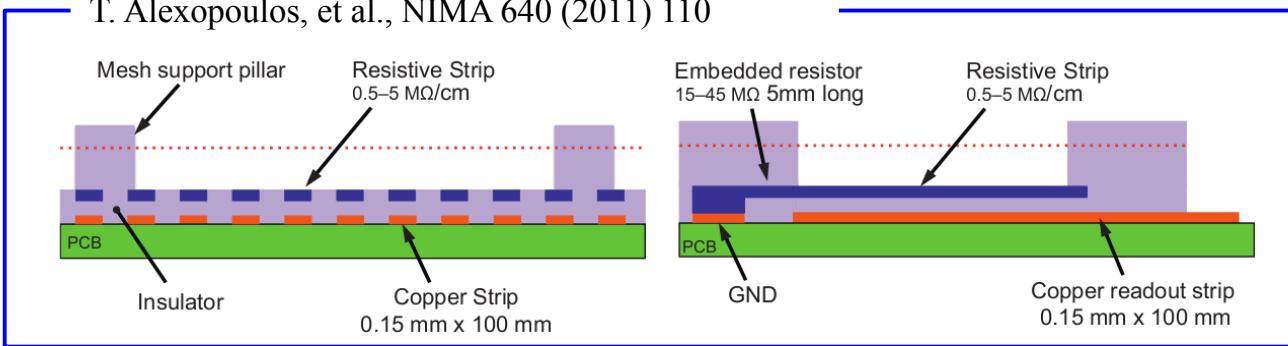
Stratégies de protection du détecteur et de l'électronique

- **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



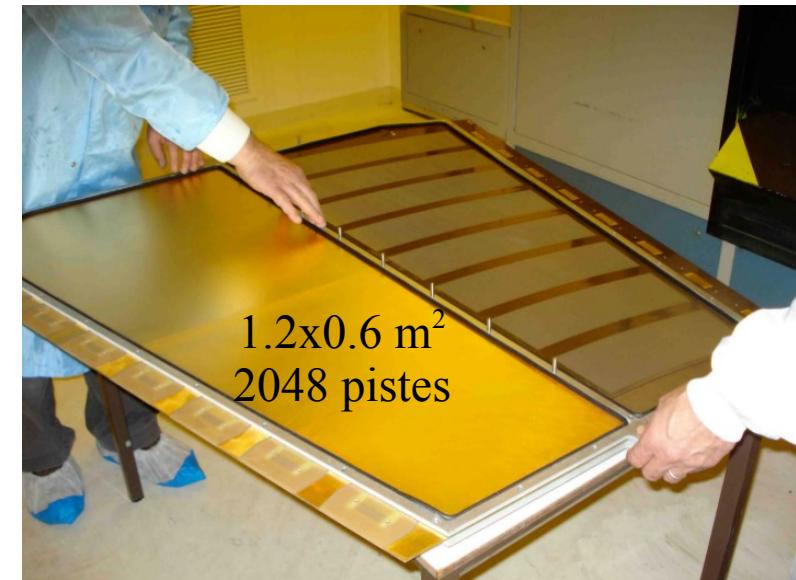
Industrialisation et la collaboration RD51

Développer des **procédés industriels** peu coûteux

Simplification des procédés de fabrication

Equipement et agrandissement de l'atelier CERN

Transfert de technologie vers l'industrie



Activement soutenus par de la collaboration RD51

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

RD51 – Micropattern Gas Detectors

Objectives	WG1 MPGD Technology & New Structures	WG2 Characterization	WG3 Applications	WG4 Software & Simulation	WG5 Electronics	WG6 Production	WG7 Common Test Facilities
	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

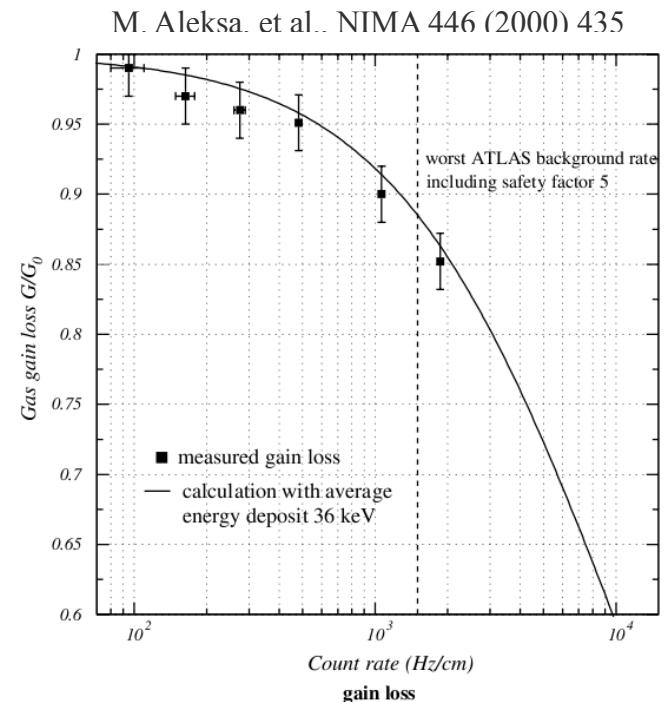
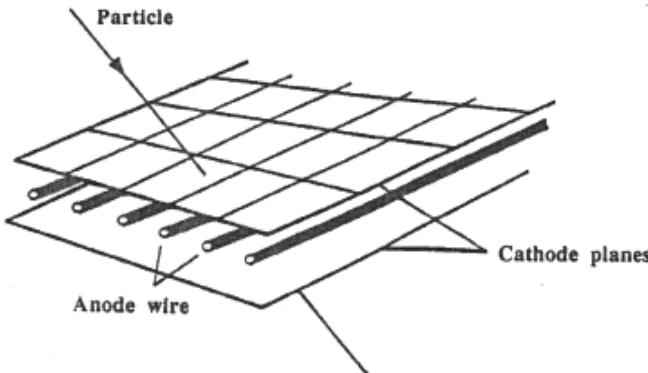


Fig. 3. Gas gain drop for the drift tubes of the ATLAS muon spectrometer [13].

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

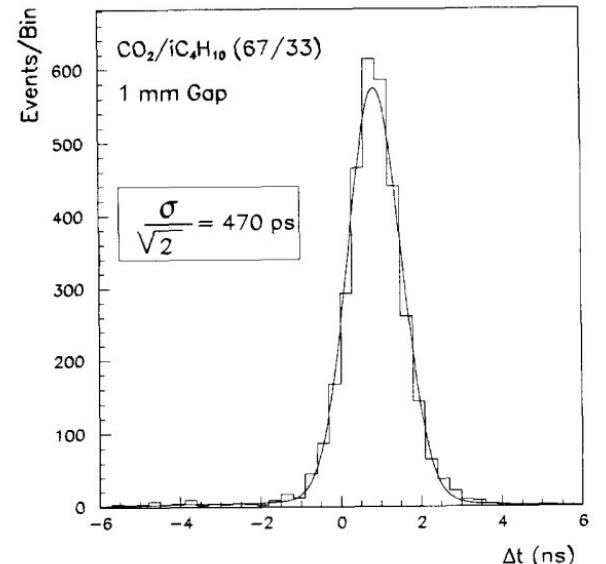
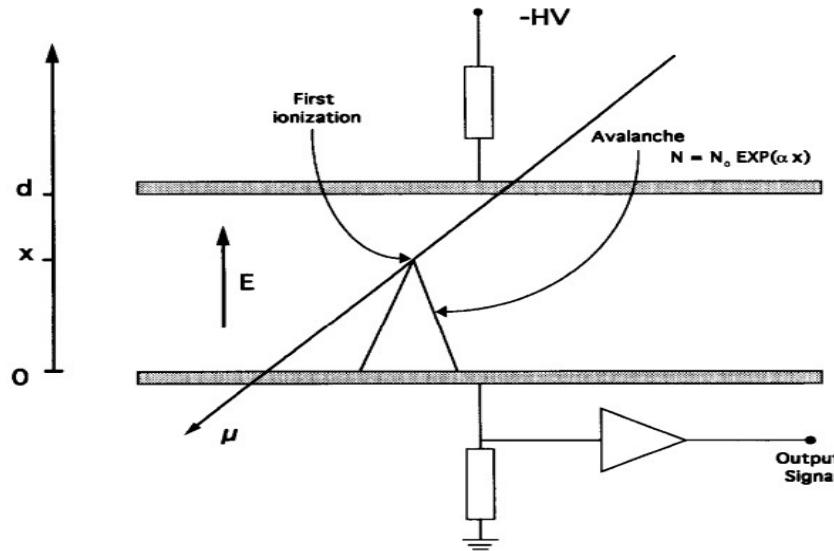


Fig. 7. Distribution of time differences between two PPCs using 7 ns rise time amplifiers. A Gaussian fit gives for each PPC a time resolution of 470 ps (assuming it is the same for both chambers).

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

Mesure d'électrons de quelques keV

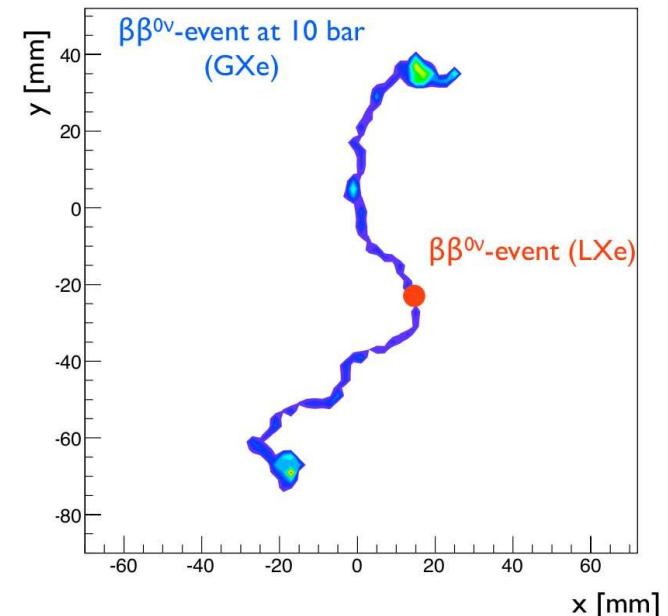
Désintégration double béta dans le xénon



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

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

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

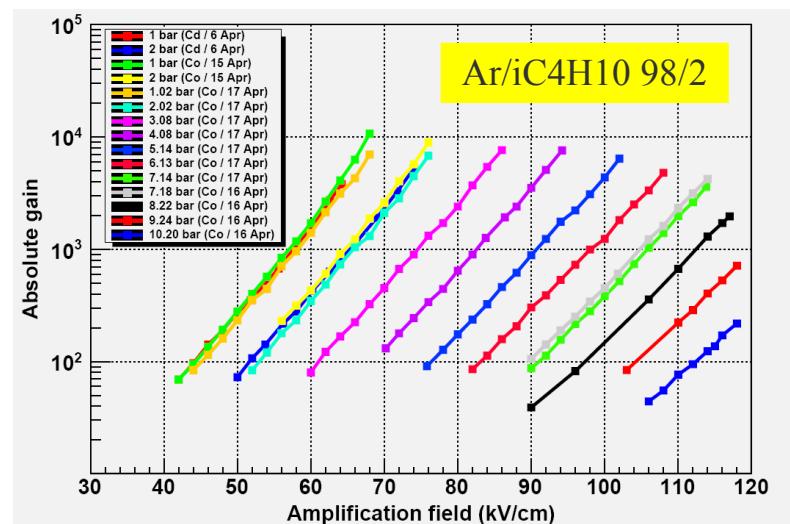
Mélange argon/isobutane

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

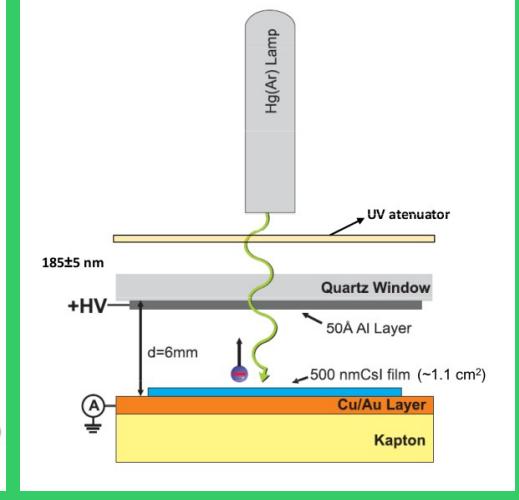
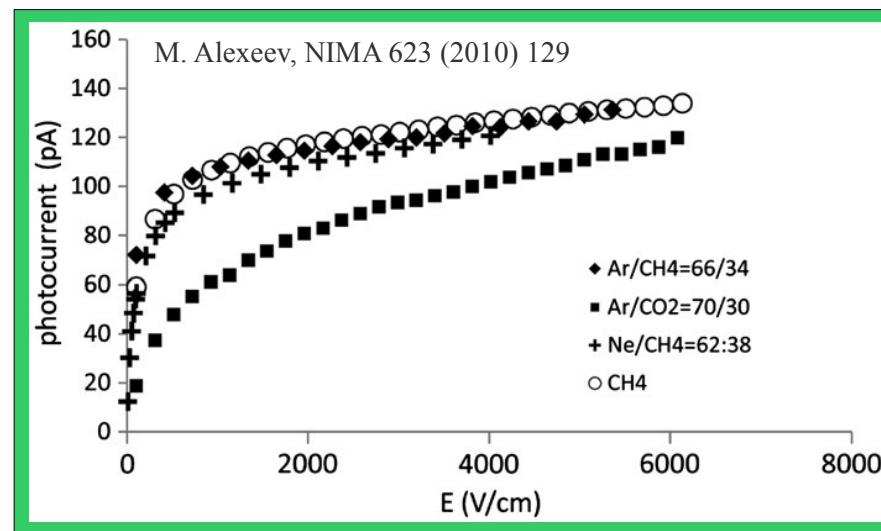
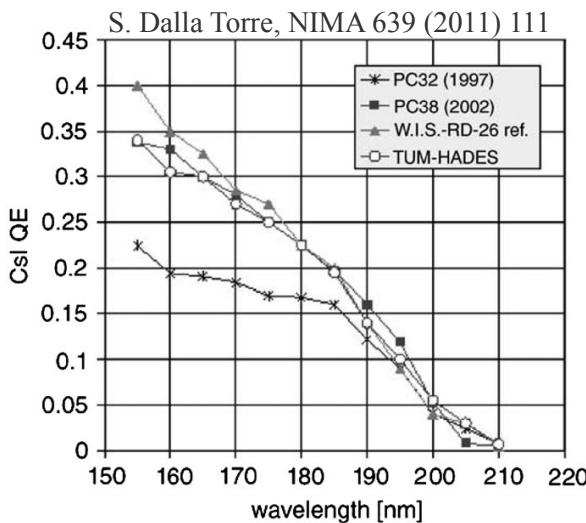
Principe de fonctionnement

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 $E > 1 \text{ kV/cm}$

Retour photons et ions d'avalanche
Vieillissement 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

Combinaison 4 GEM + CsI

Gain proche de 10^7

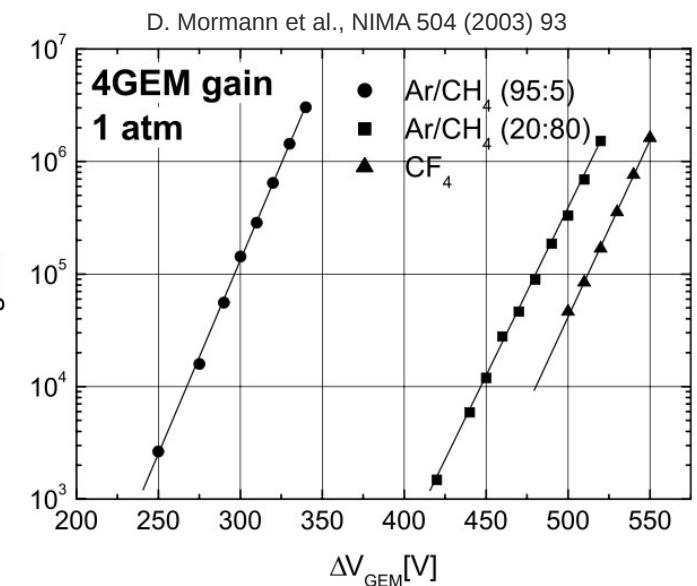
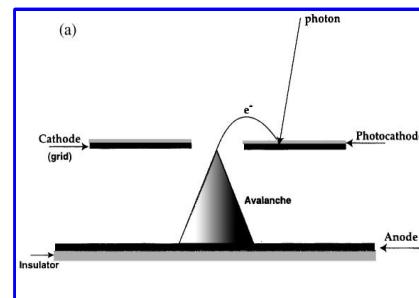
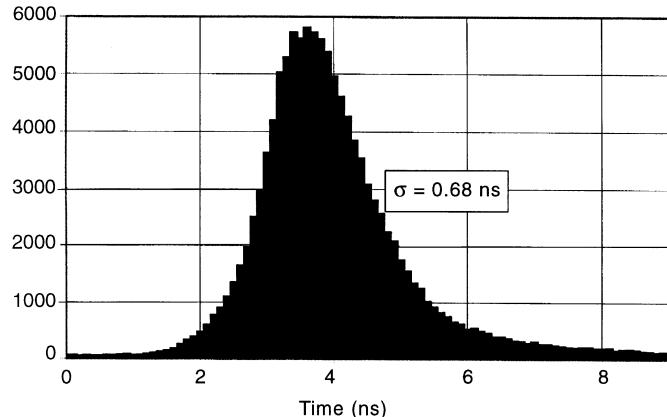
Résolution < 2 ns

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

Rivalise avec les tubes PM

+ segmentation possible
+ s'accomodent des champs magnétiques

J. Derré et al., NIMA 449 (2000) 314



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 → MPGD

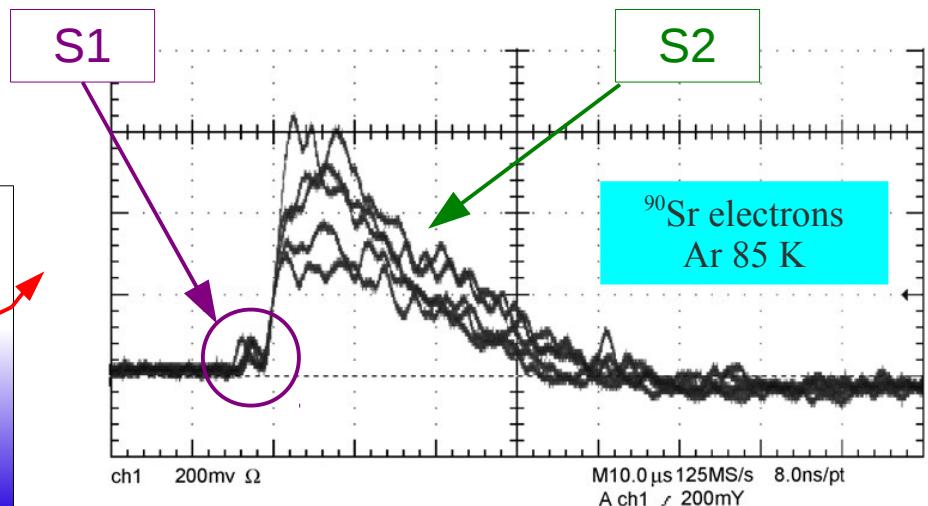
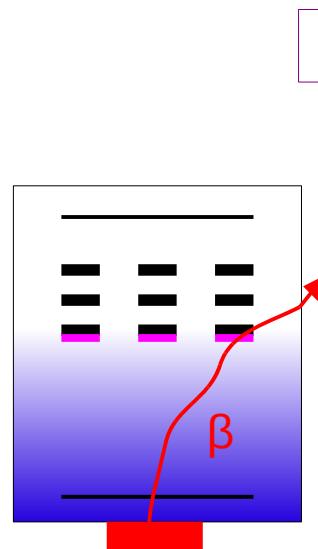
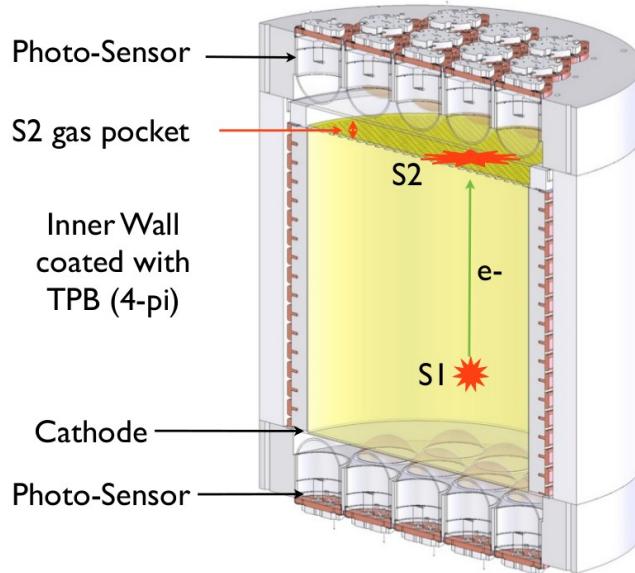
Scintillation convertie sur photocathode
Ionisation multipliée par plusieurs GEM

Démonstration dans l'Ar

Petit prototype avec 3 GEM

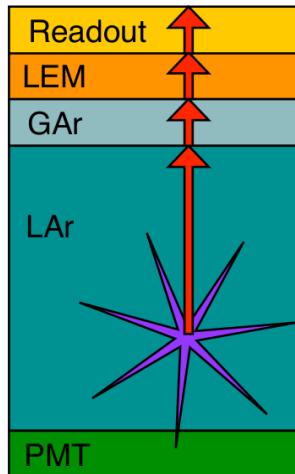
Volume $\sim 10 \text{ cm}^3$

Gain > 5000 à 85 K



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

Application dans les TPC double phase (2/2)

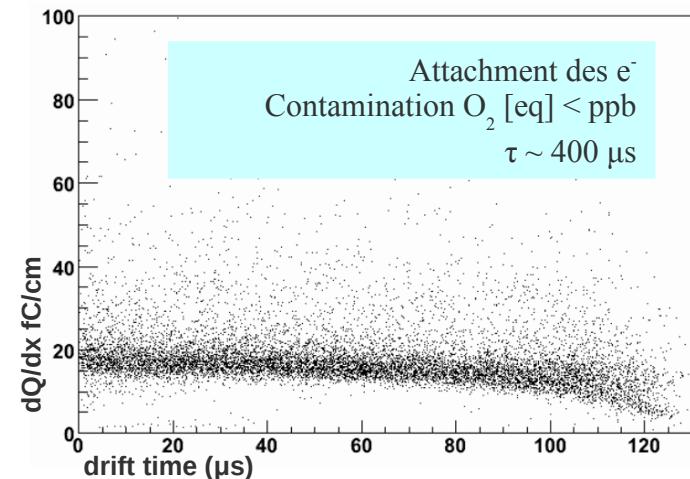
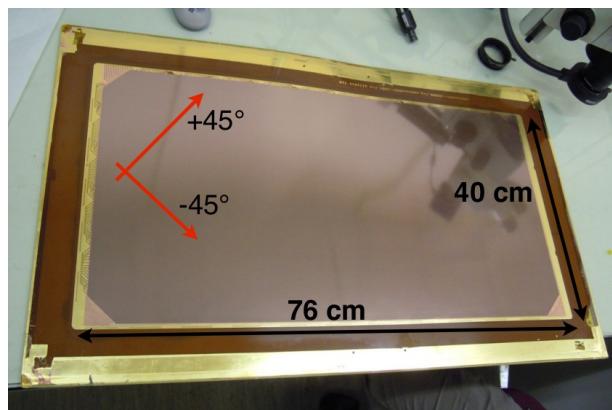


Lecture de plus grands volumes
MPGD pour GLACIER, prototype de 250 litres
Giant Liquid Argon Charge Imaging Experiment

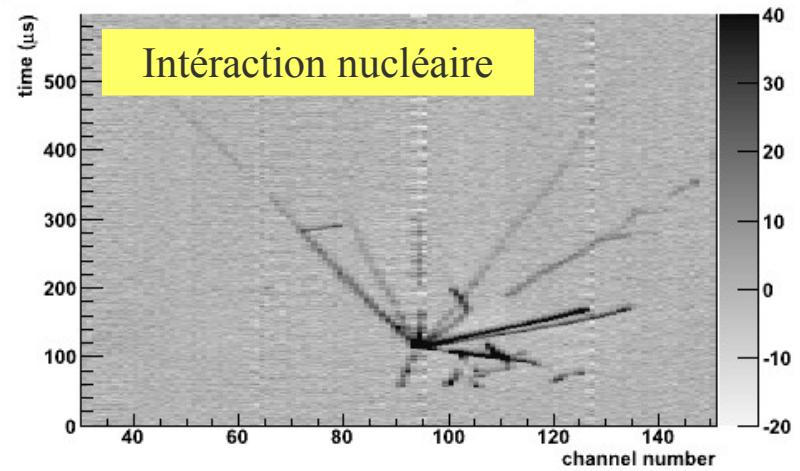
Pas de photocathode mais
segmentation du plan de lecture
Trajectographe 3D + calorimètre homogène



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



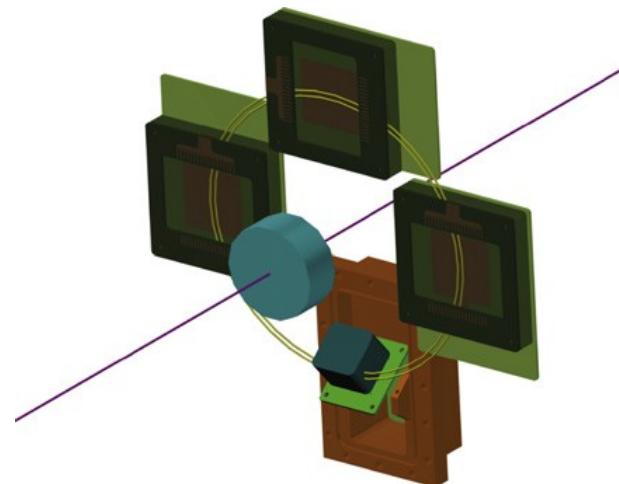
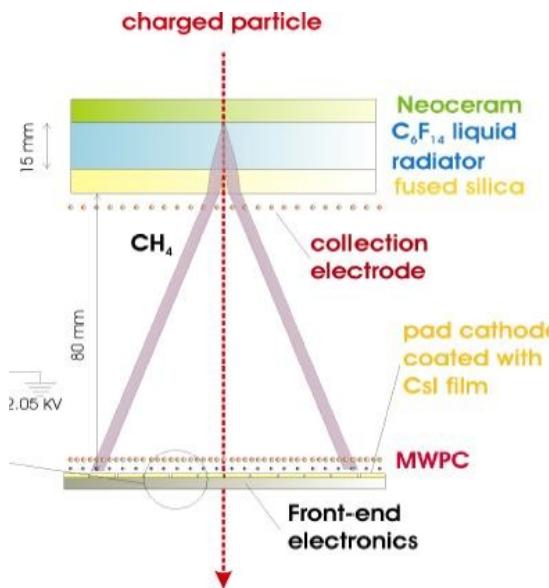
Application pour les compteurs Cerenkov

Générations de PM gazeux

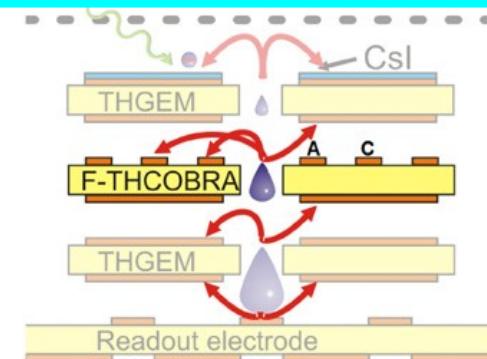
* Gaz photosensibles (TMAE, TEA)
→ DELPHI, SLD, CLEO

* MWPC dotées de photocathode (CsI)
→ COMPASS, STAR, ALICE

* **GEM avec dépôts photosensibles**



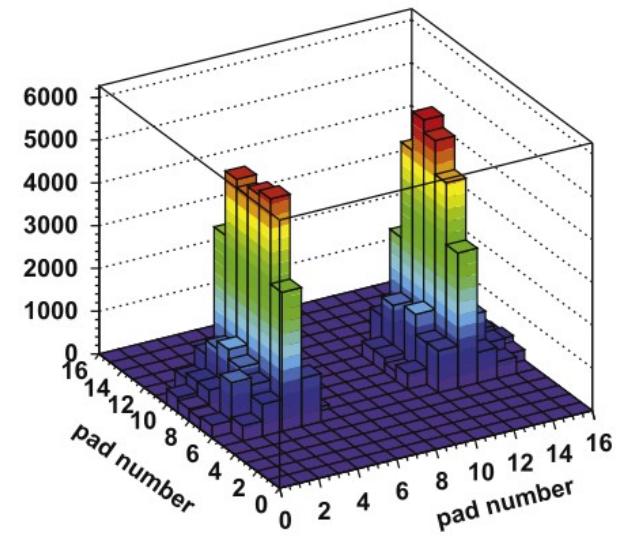
M. Alexeev et al., NIMA, In Press



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

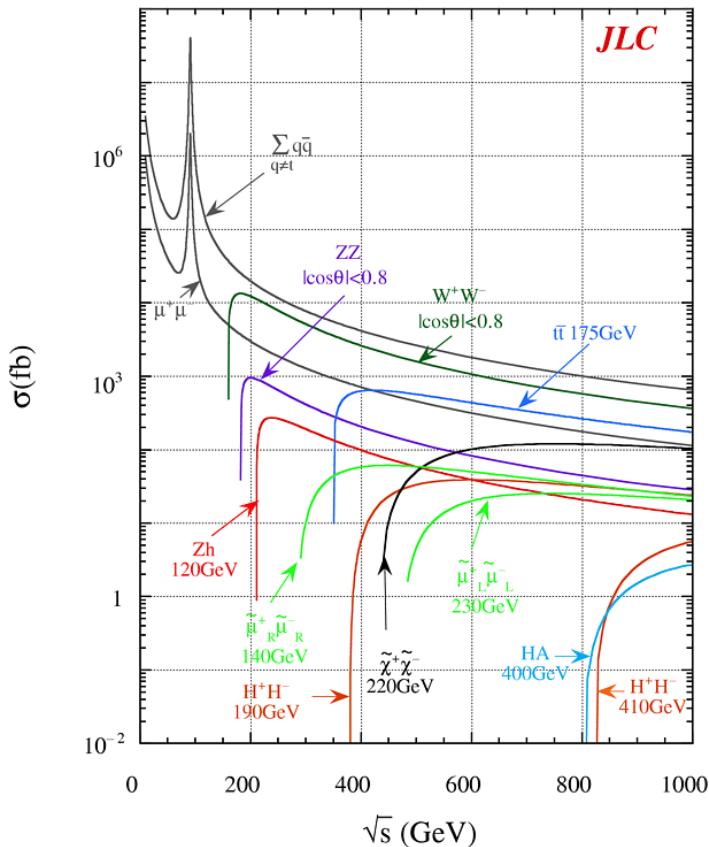
	HERA (DESY)	TEVATRON (Fermilab)	RHIC (Brookhaven)				LHC [†] (CERN)	
Physics start date	1992	1987	2001	2000	2004	2002	2009	2010
Physics end date	2007	—	—	—	—	—	—	—
Particles collided	ep	$p\bar{p}$	pp (pol.)	Au Au	Cu Cu	d Au	pp	Pb Pb
Maximum beam energy (TeV)	$e: 0.030$ $p: 0.92$	0.980	0.25 34% pol	0.1 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 $E_{cm} = 10.5$ GeV)	$e^- : 4.2$ $e^+ : 6.7$	$e^- : 7$ $e^+ : 4$	250 (upgradeable 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

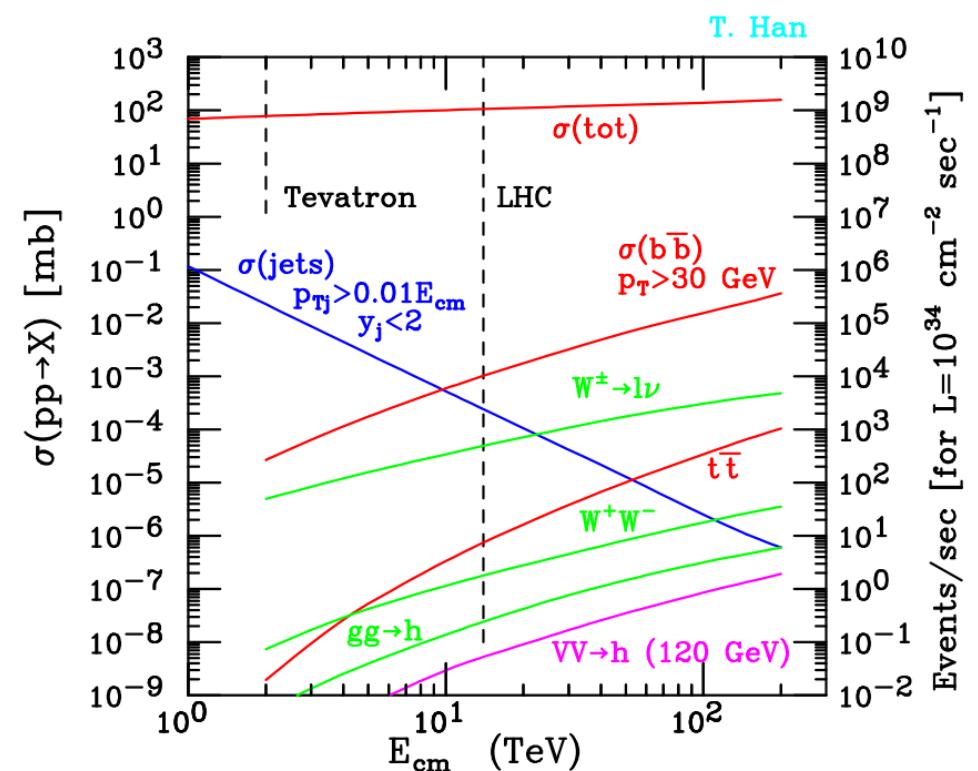
Les collisionneurs à haute luminosité

Futur Linear Collider (LC)



Mesures de précision

Large Hadron Collider (LHC)



Bruit de fond QCD élevé

La TPC du project ILD

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

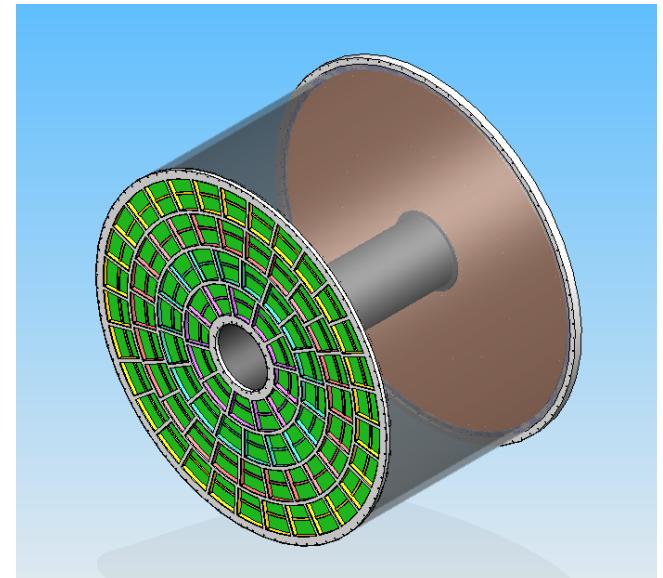
avec le trajectographe complet

200 points / traces

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

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

Dessin ½ TPC, Irfu, Saclay



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

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