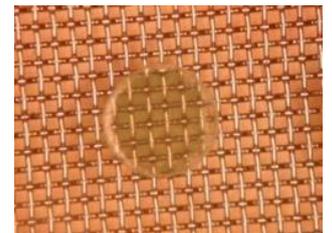
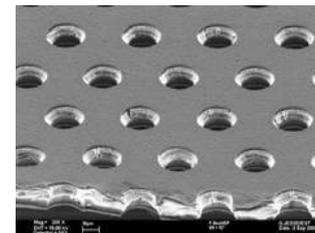
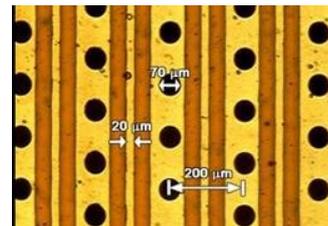
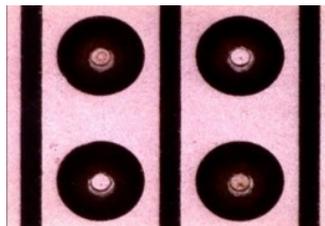
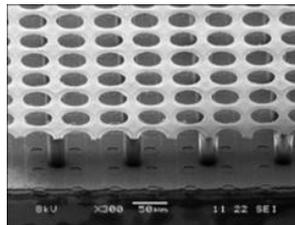
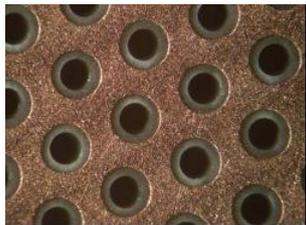


Détecteurs à micromotifs pour les collisionneurs à haute luminosité

Maximilien Chefdeville, LAPP, Annecy



Sommaire

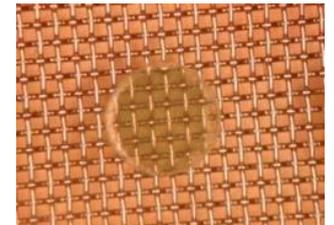
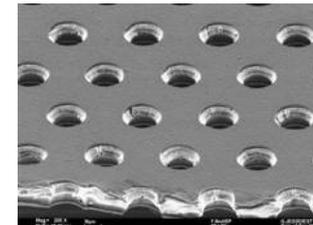
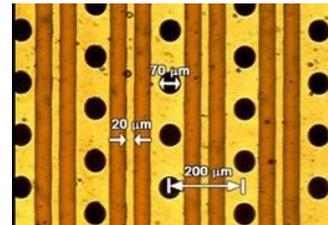
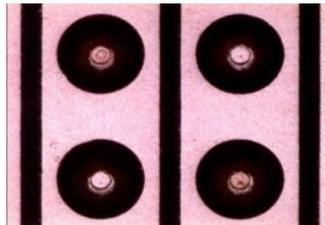
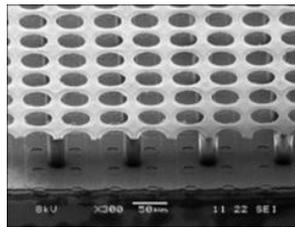
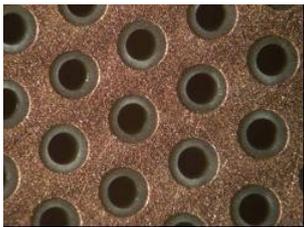
1. Introduction aux détecteurs à microstructures

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

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

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

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

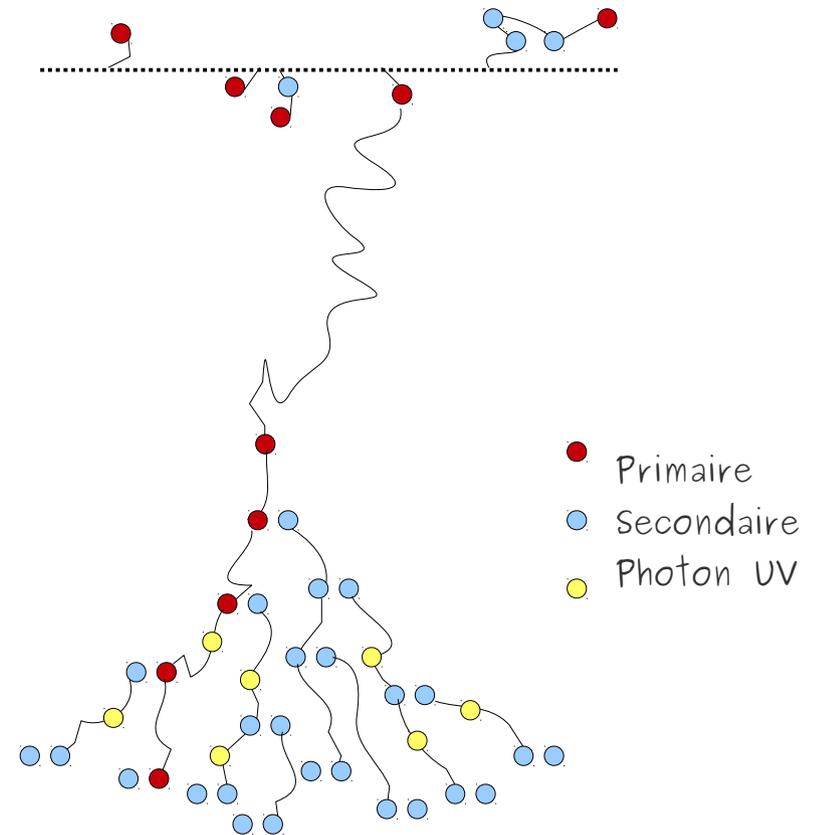
3. Multiplication des électrons

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

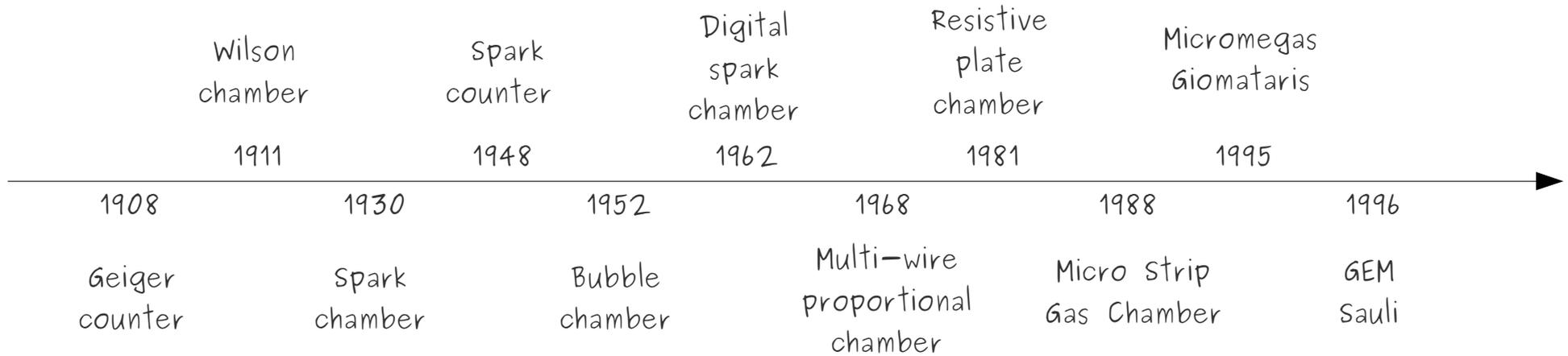
$$\text{Limite de Raether : } (N_t \cdot G)_{\text{max}} = 10^7$$

Remarque : Ces 3 étapes ne sont pas toujours présentes.

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



Une chronologie des détecteurs gazeux



Lecture optique

Lecture électronique



H. Geiger



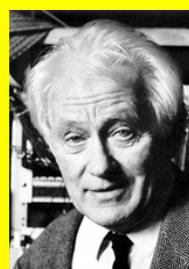
CTR. Wilson



F. Kreinen



DA. Glaser



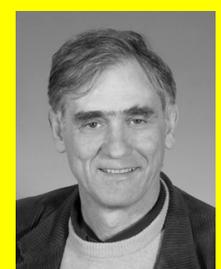
G. Charpak



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

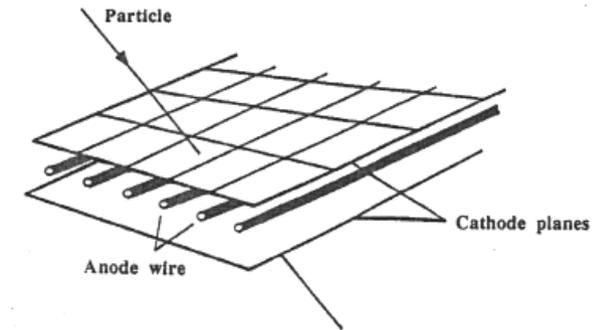
Pad response function étalée :

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

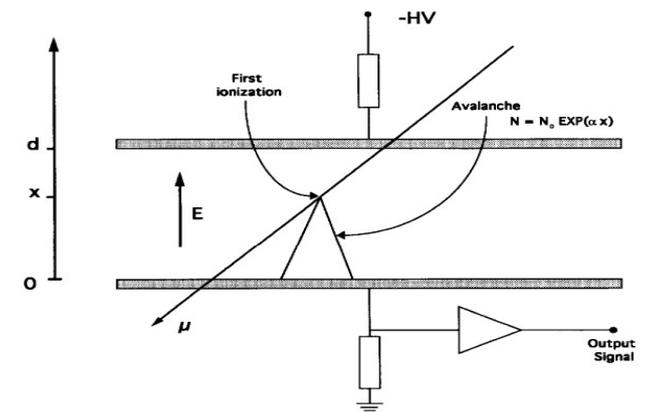
Champ élevé (50 kV/cm) et uniforme

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



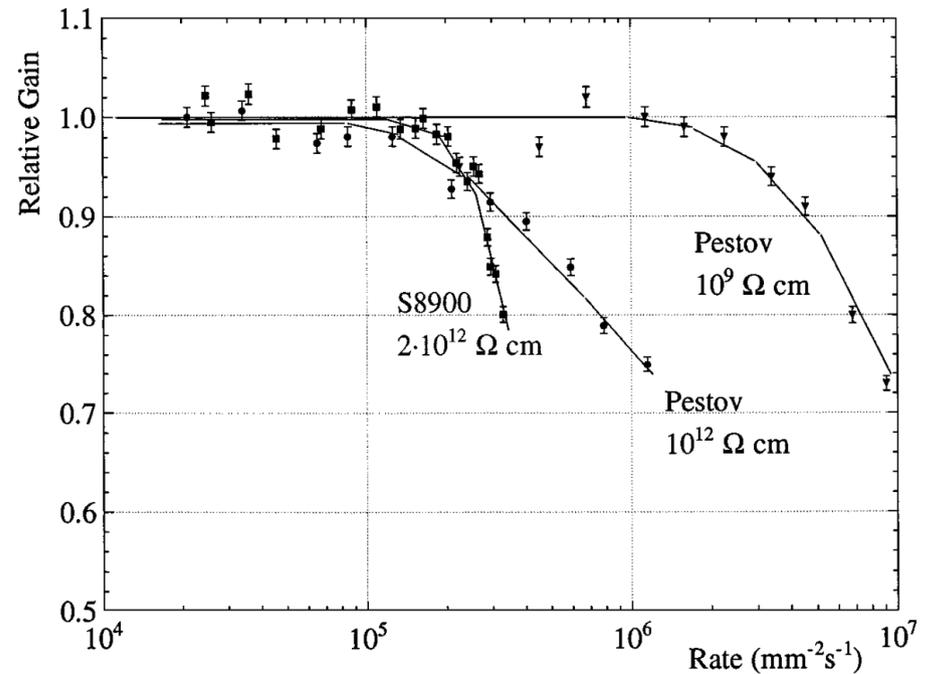
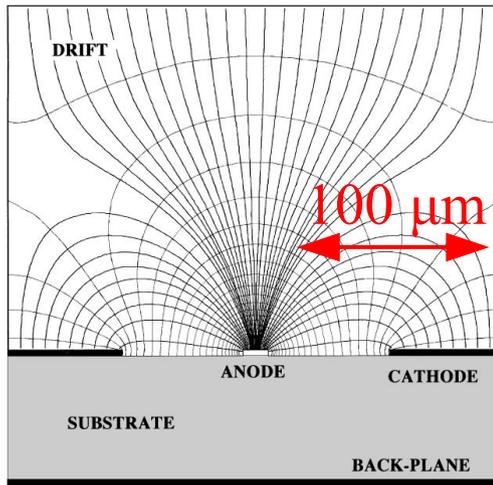
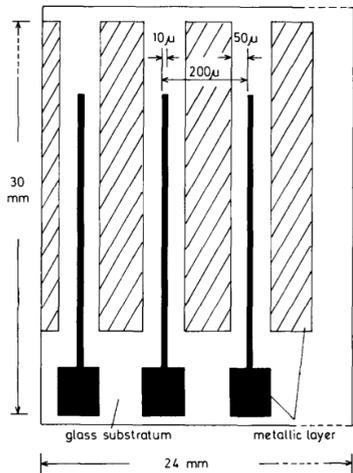
Le compteur gazeux à micropistes

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

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

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

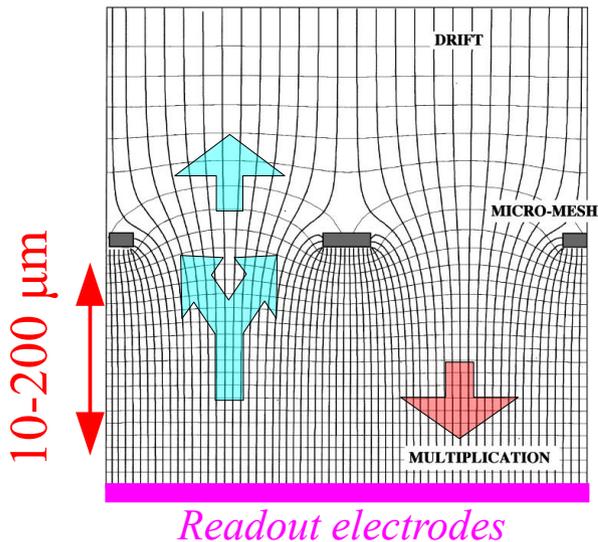
Y. Giomataris, et al., NIMA 376 (1996) 29

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

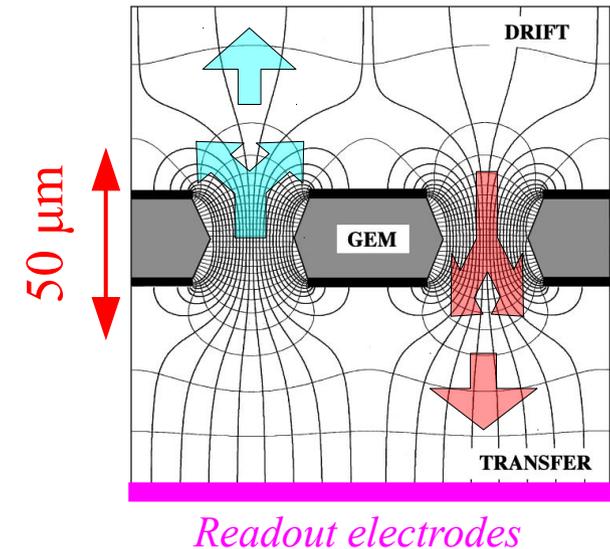
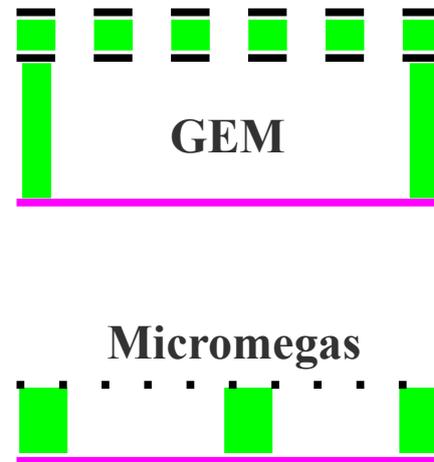
F. Sauli, NIMA 386 (1997) 531

Plusieurs étages possible (1-4)

Étalement des électrons sur l'anode

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

Support: cadre isolant



Trajectographie à haut flux

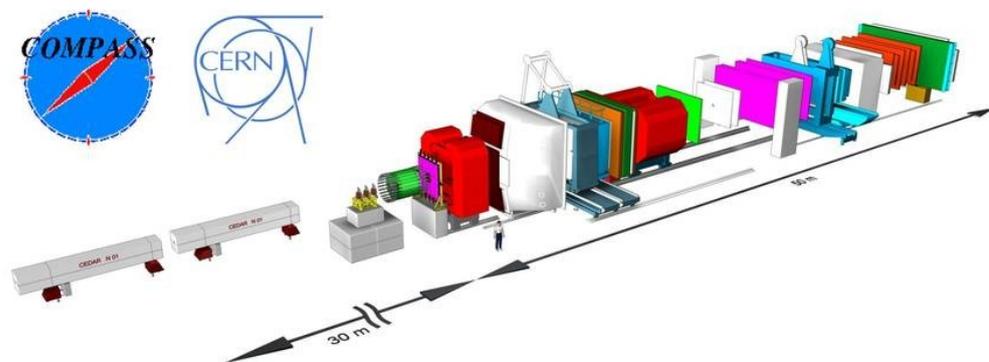
Expérience COMPASS au CERN

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

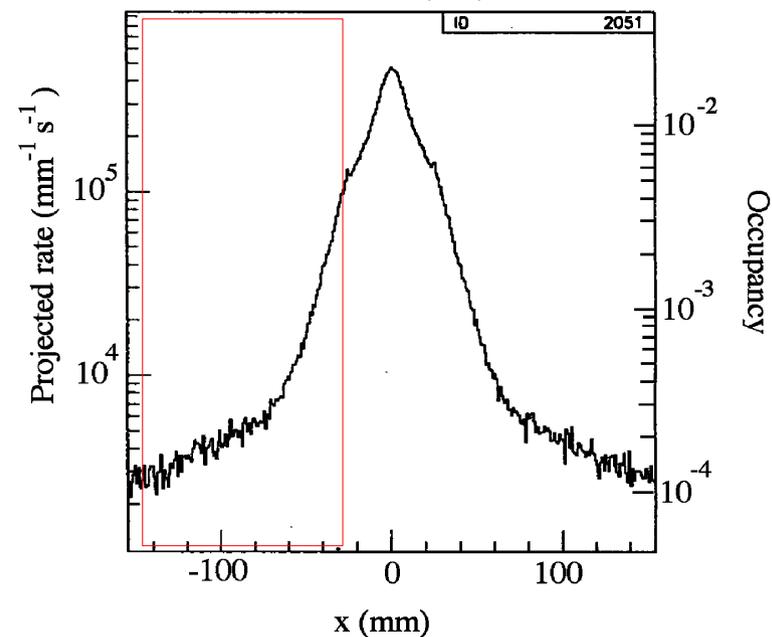
En aval de la cible proche du faisceau : plusieurs dizaine de kHz/mm²

Micromegas: 3 stations de 4 chambres avec pistes XYUV

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



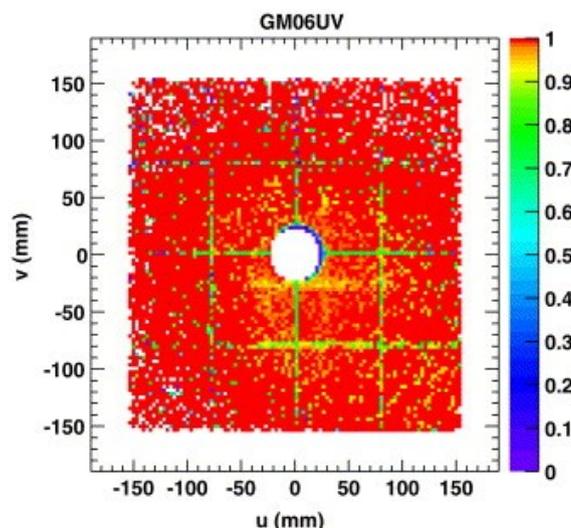
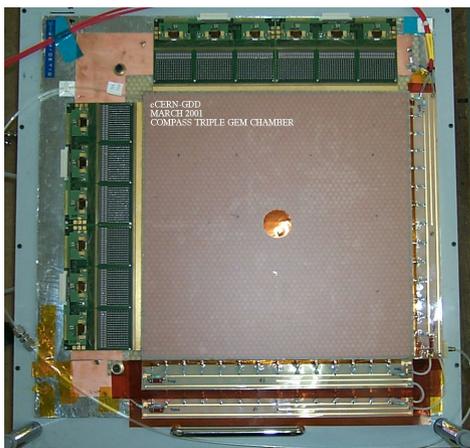
C. Altunbas et al., NIMA 490 (2002) 177



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)

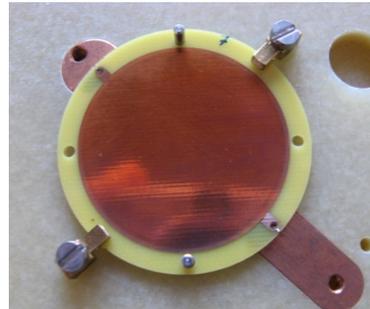
Expérience CAST au CERN

Détection de rayons X provenant de la 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



Micromegas microBulk

Photolithographie d'une feuille de kapton

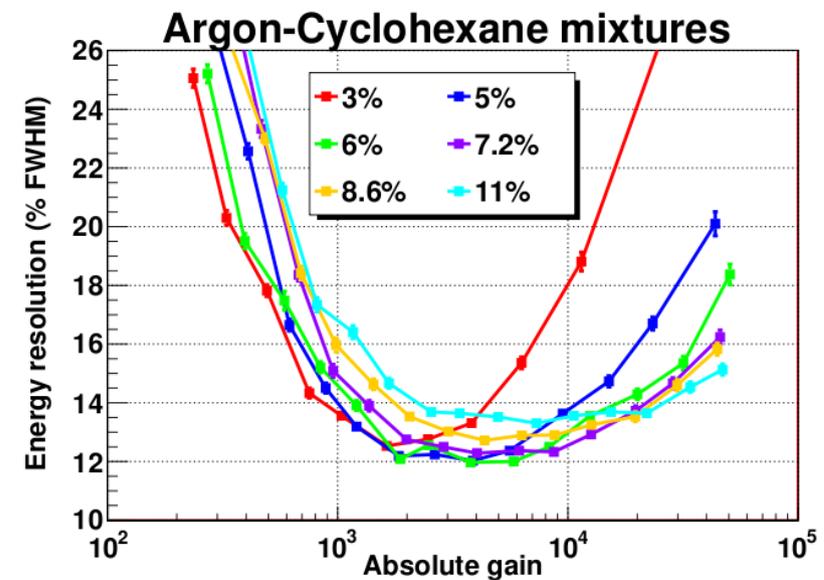
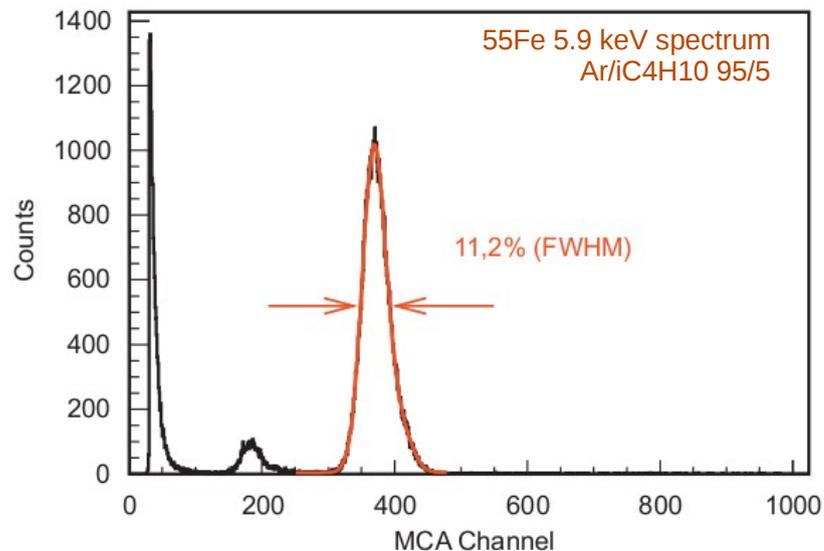
Contrôle précis de la distance anode/grille

Fluctuations d'avalanche

Uniformité du champ électrique

Photons UV (photoionisation)

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



Résolution en énergie (rayons X)

Limite intrinsèque au gaz

Fluctuation du nombre d'électrons primaire

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

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

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

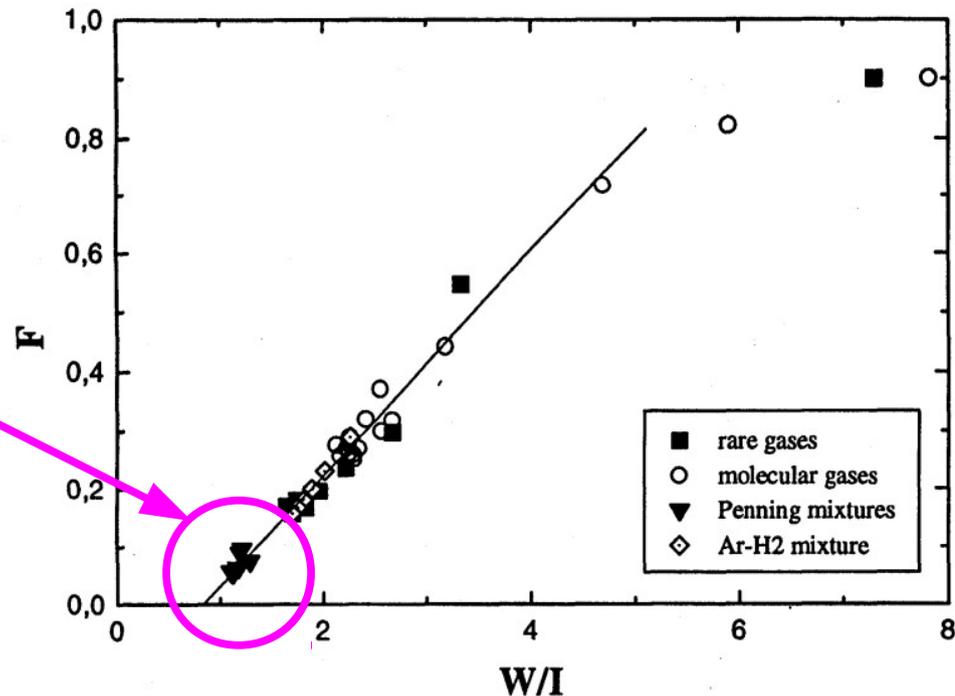
Mélanges à fort effet Penning

$W \rightarrow I$
 $F \rightarrow 0$
 Résolution $\rightarrow 0$

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



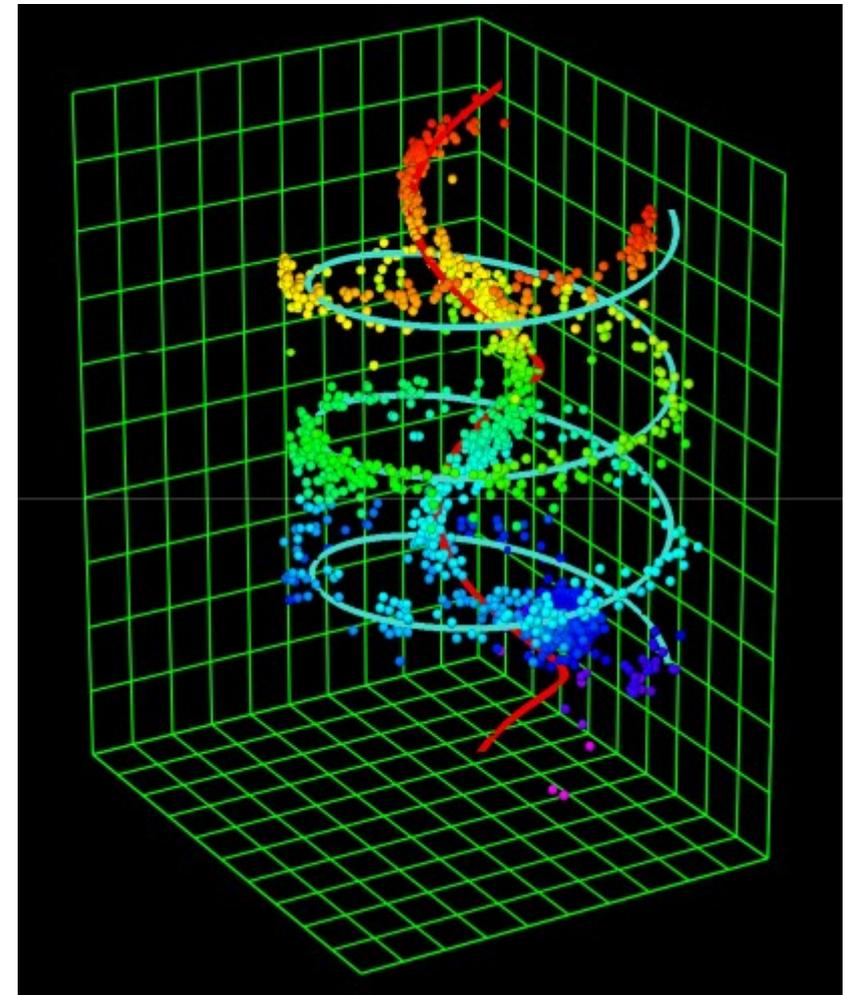
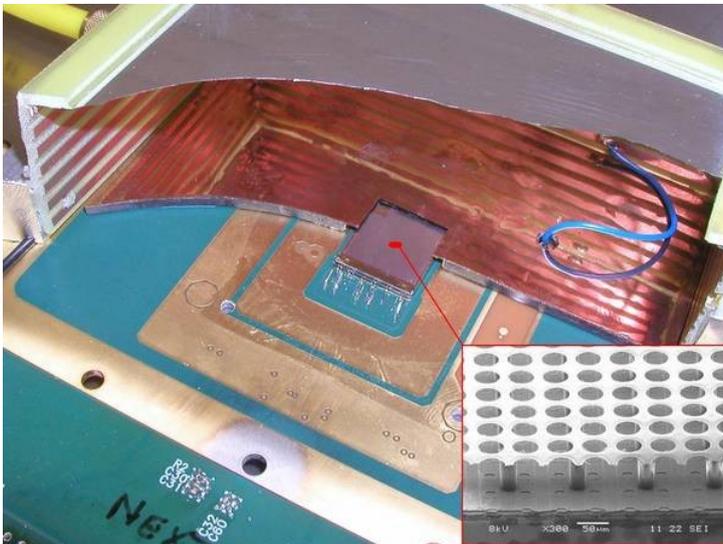
Suppression des fluctuations de gain

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

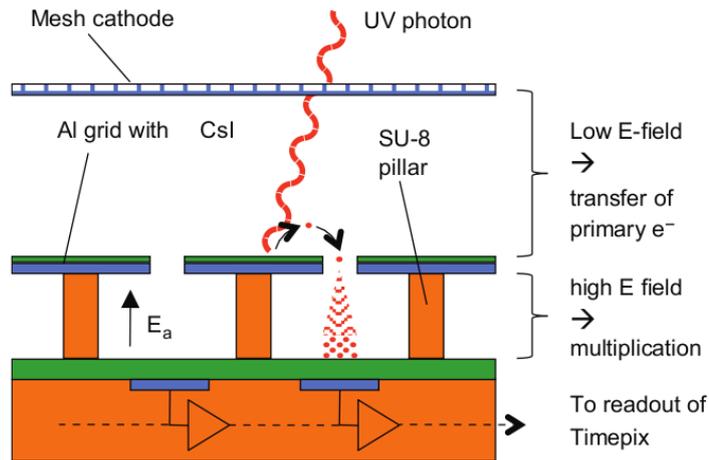
Polarimétrie rayons X
GEM + PIXI, INFN, Bellazzini



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

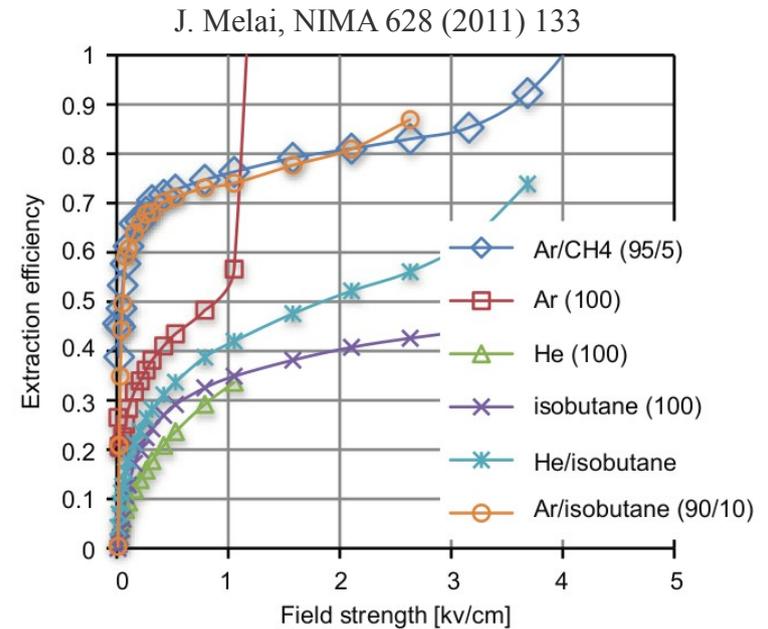
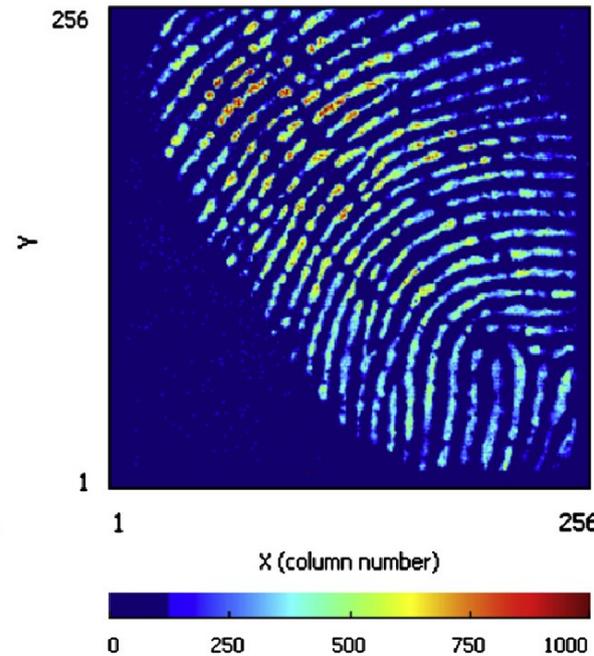
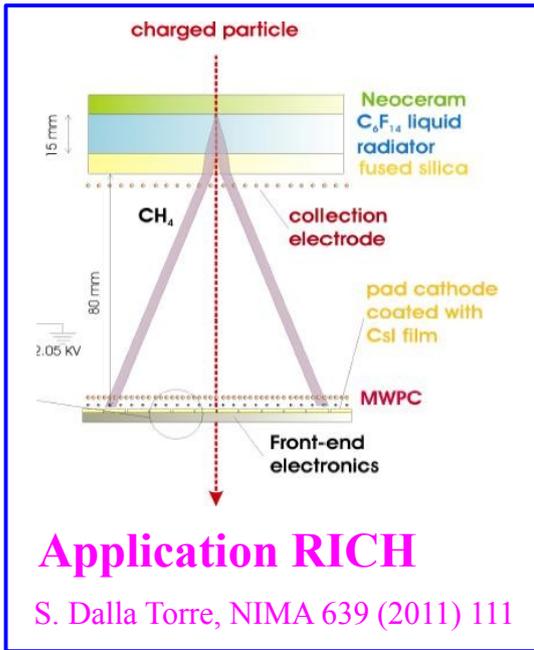
Image de 2 traces d'électrons (^{90}Sr)
dans un champ vertical de 0.2 T

Détection de lumière UV

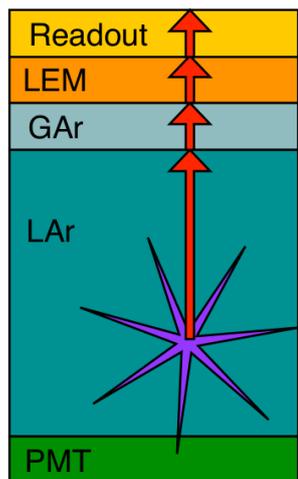


Micromegas + TimePix
Multi-GEM + damiers

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



Application dans les TPC double phase

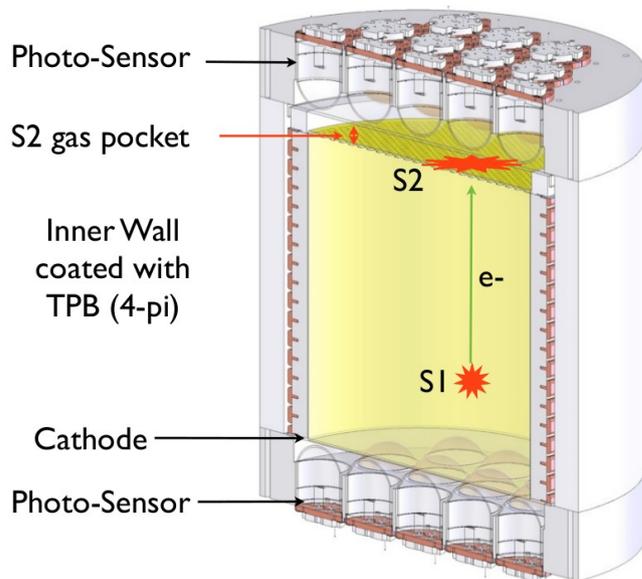
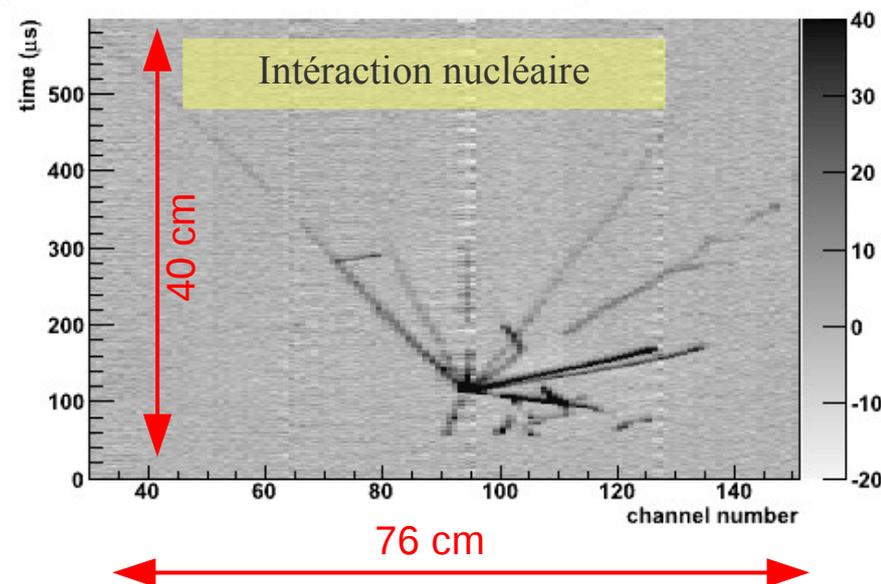


**Trajectographe 3D
+ calorimètre homogène**

Large Electron Multiplier

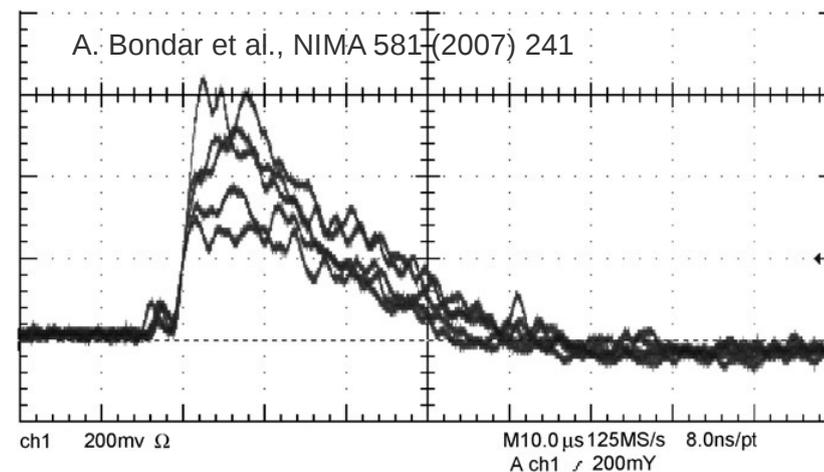
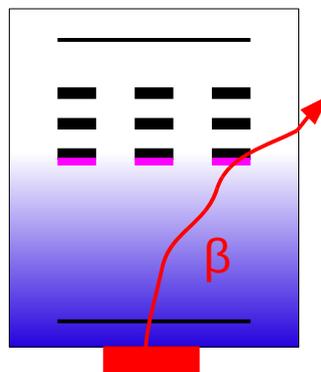
Epaisseur 1 mm, $5 \cdot 10^5$ trous
diamètre/pas trous : 500/800 μm
Pas des pistes XY 3 mm

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



PMT \rightarrow MPGD

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

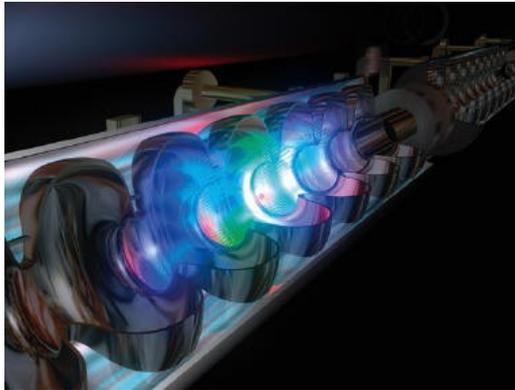


Les collisionneurs haute luminosité

- 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
→ stratégies contre les étincelles

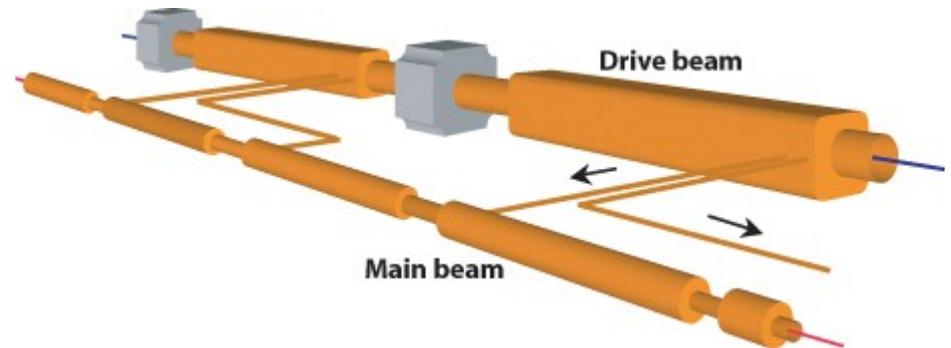
Le futur collisionneur linéaire

International Linear Collider

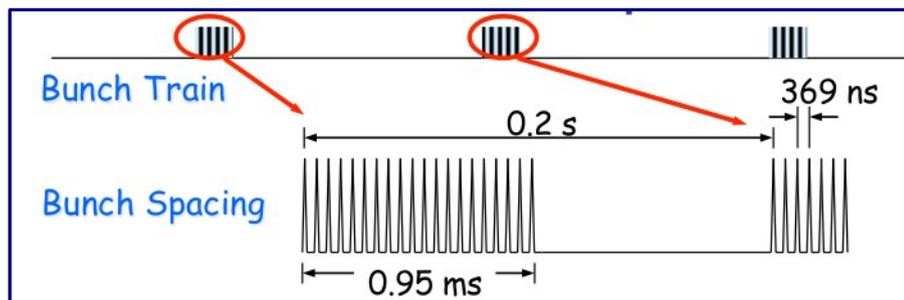


Cavités RF supraconducteurs
Gradient 35 MV/m
Energie c.m. 500 GeV (1 TeV)
Période BX 369 ns
Taille paquets x/y 600/6 nm
Beam-strahlung 0.2 paire/BX

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



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

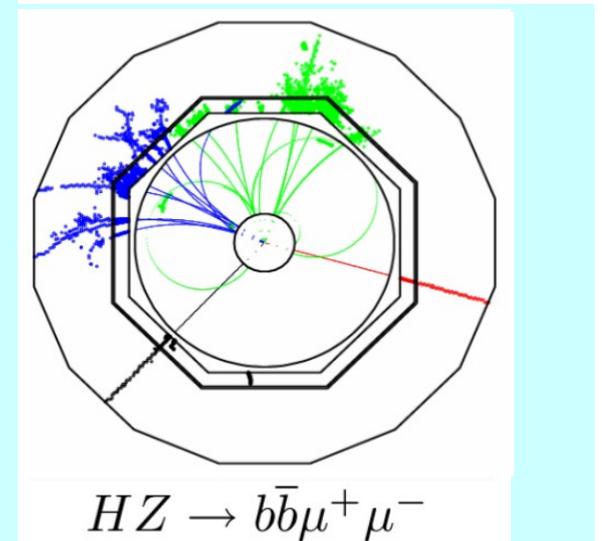
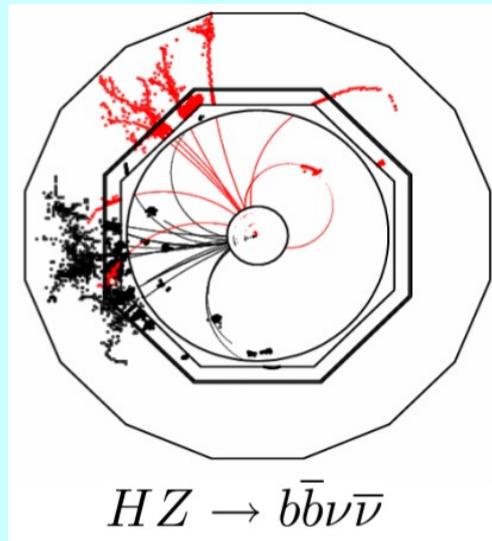
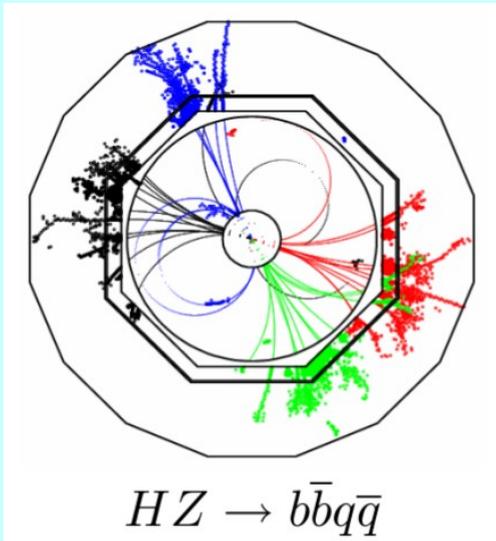
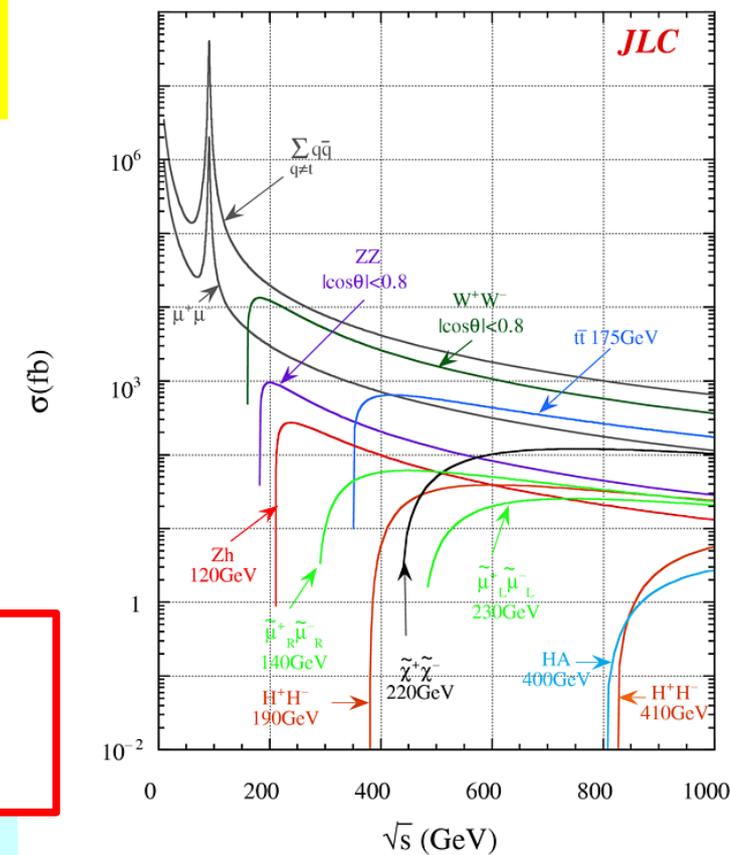
Spectre des particules supersymétriques

Propriétés des particules lourdes du SM (W, top)

Au-delà du SM (dimensions supplémentaires)

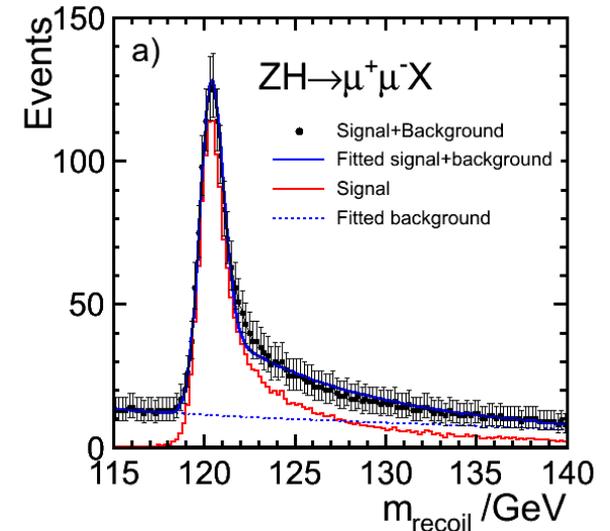
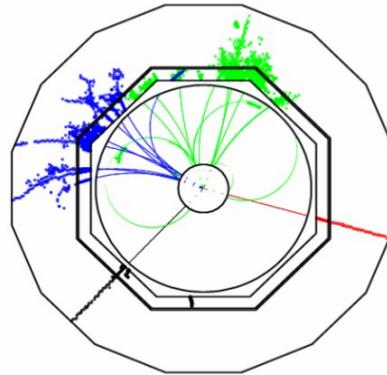
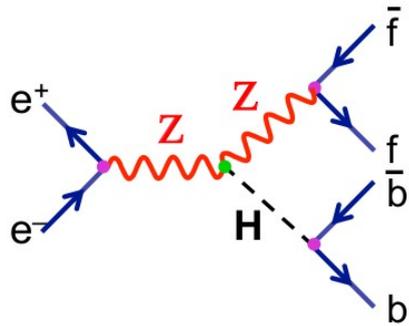
Mesure des propriétés du boson de Higgs

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

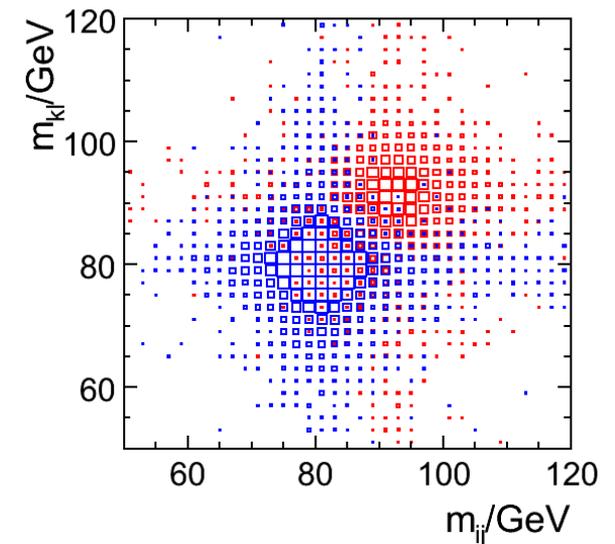
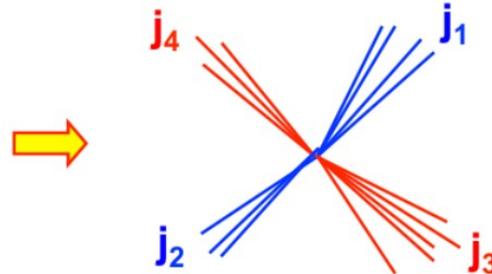
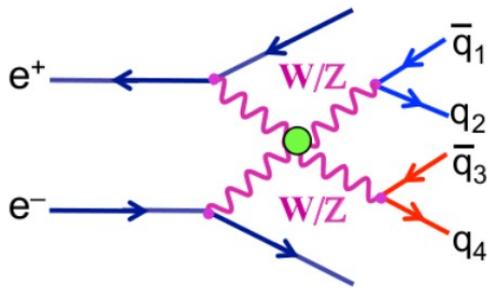


Objectifs physiques à l'ILC

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

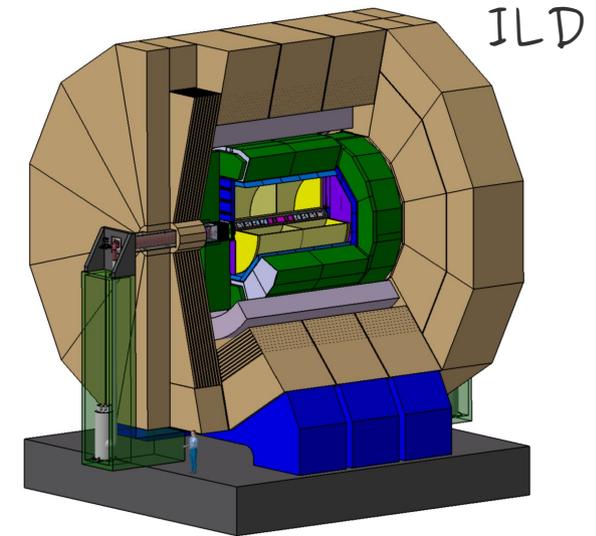
$$\sigma_{1/p} < 5 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-1}$$

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

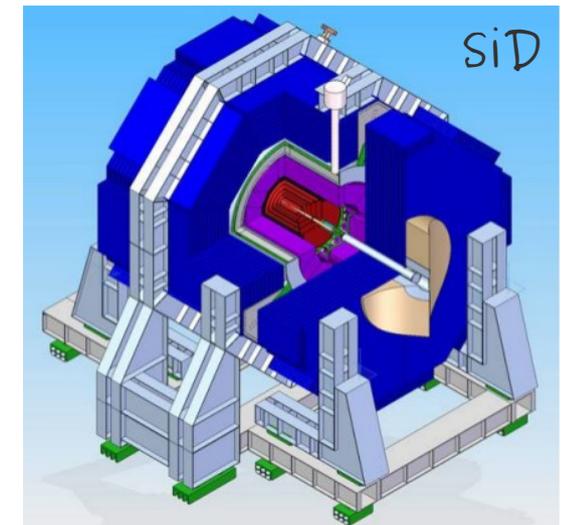
TPC de grand diamètre (3.6 m)

Champ magnétique de 3.5 T

SiD

Trajectographe silicium compact (2.4 m)

Champ magnétique de 5 T



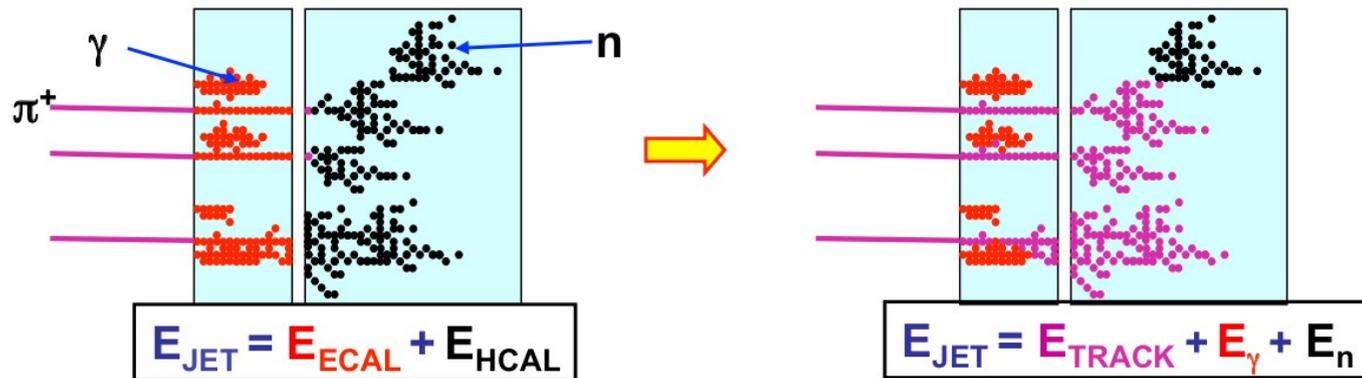
Mesure de l'énergie des jets

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

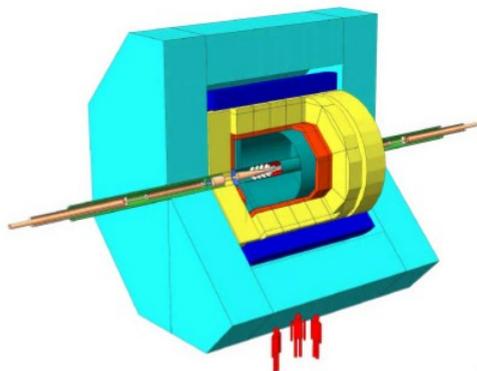
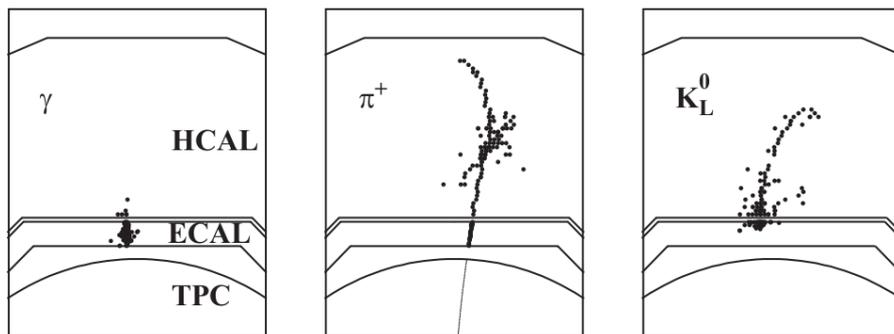
The DREAM project—Towards the ultimate in calorimetry, NIMA 617 (2010) 129

Les performances du « Particle Flow »

Les performances du Particle Flow dépendent de

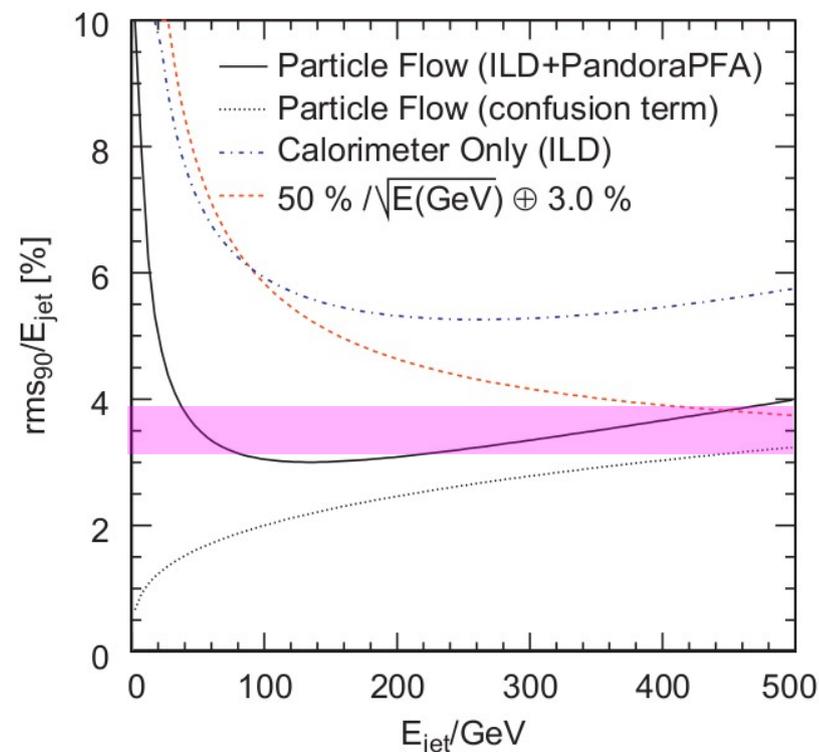
- la segmentation des calorimètres
- l'efficacité du programme de reconstruction

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

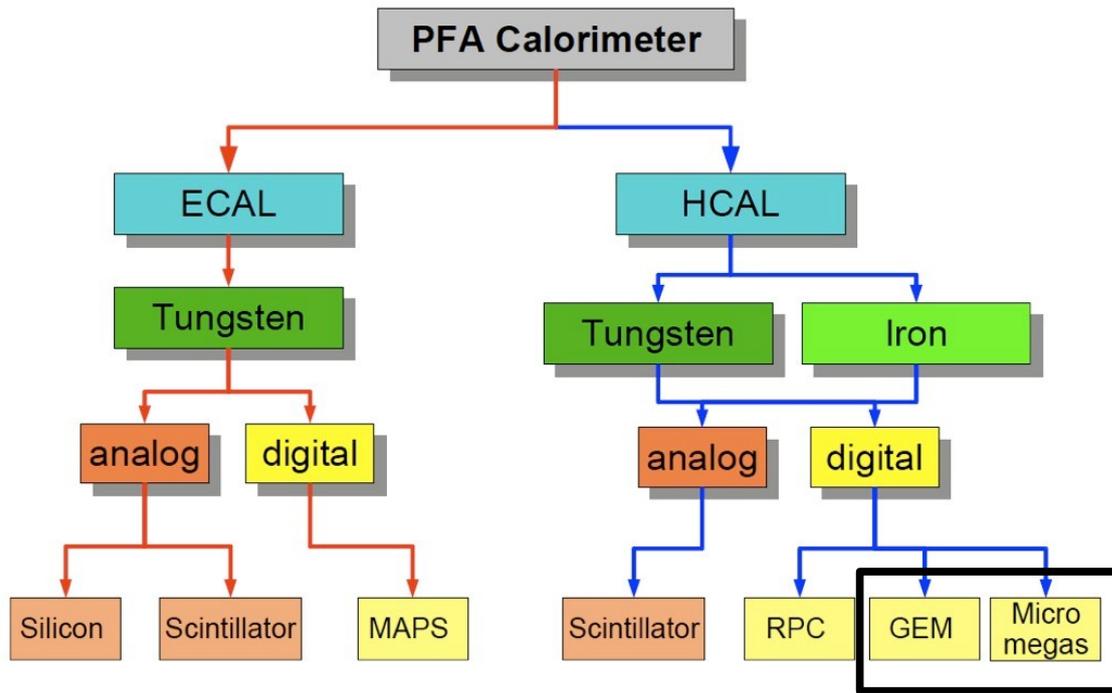
→ Systèmes de contrôle et de calibration, techniques de correction des signaux

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

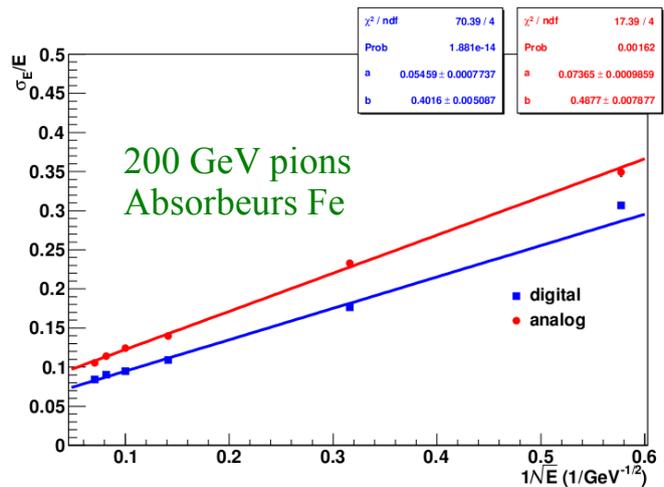
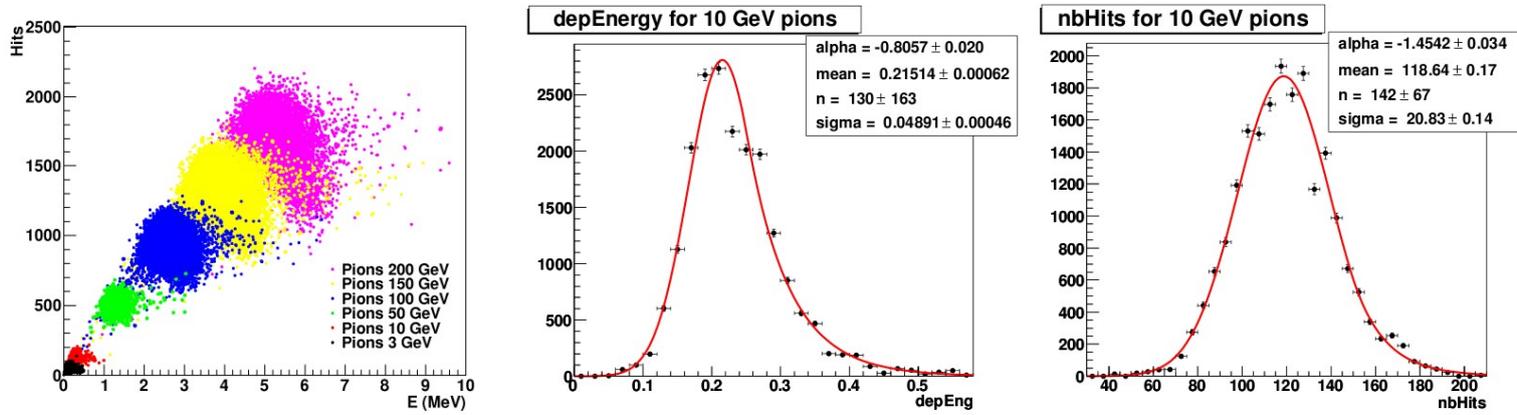
Capteurs tolérants aux radiations et ASIC/ADC rapides

<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



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

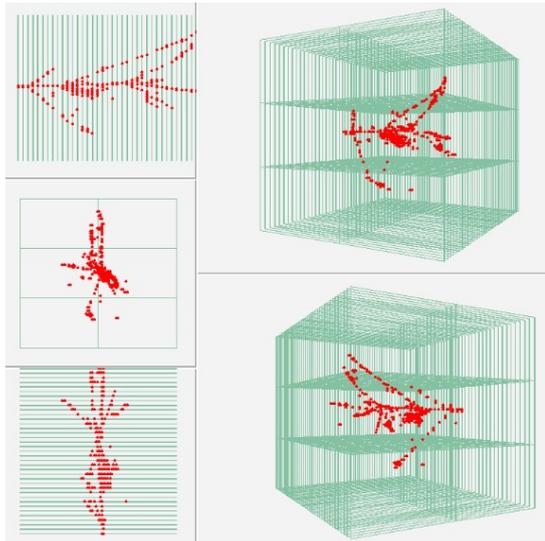
Analogique $R = 48.6 \%/ \sqrt{E} + 7.1 \%$
 Numérique $R = 37.3 \%/ \sqrt{E} + 6.0 \%$

Les calorimètres hadroniques gazeux à seuil(s)

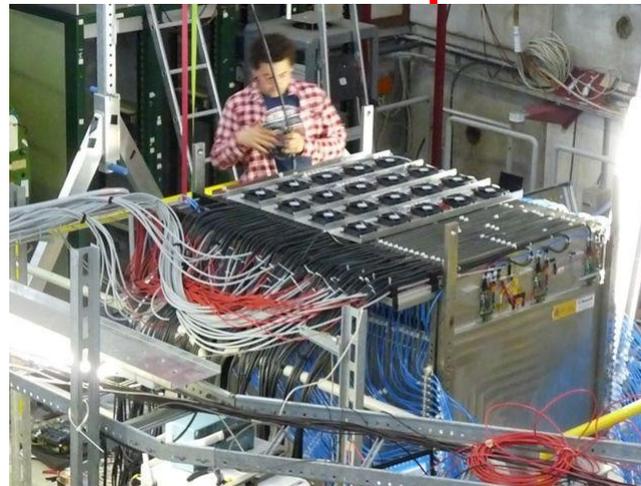
Projets m^3 de 40 RPC ($4.5 \lambda_{\text{int}}$)

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

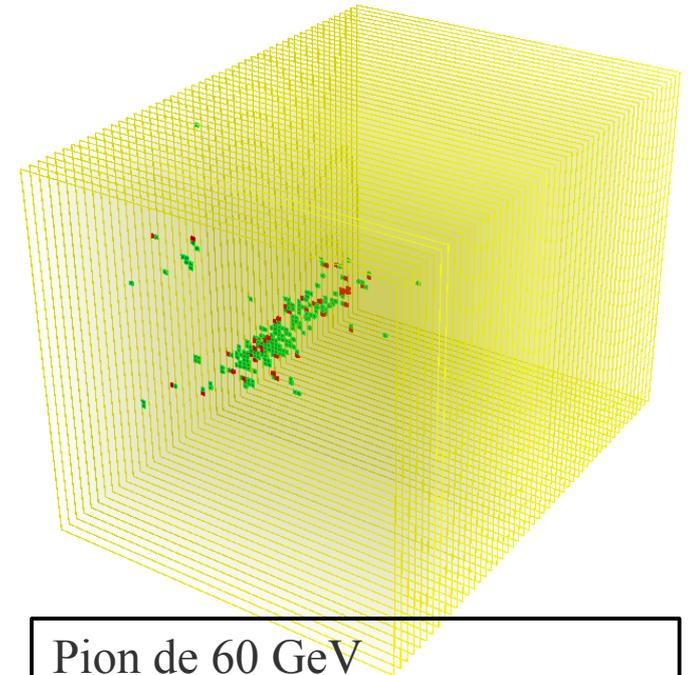
EU, Lyon : 2-bit, 1 chambre/plan, *power pulsing*



US DHCAL



EU sDHCAL



Pion de 60 GeV

couleur = seuil

Event display: Druid, M. Ruan, LLR

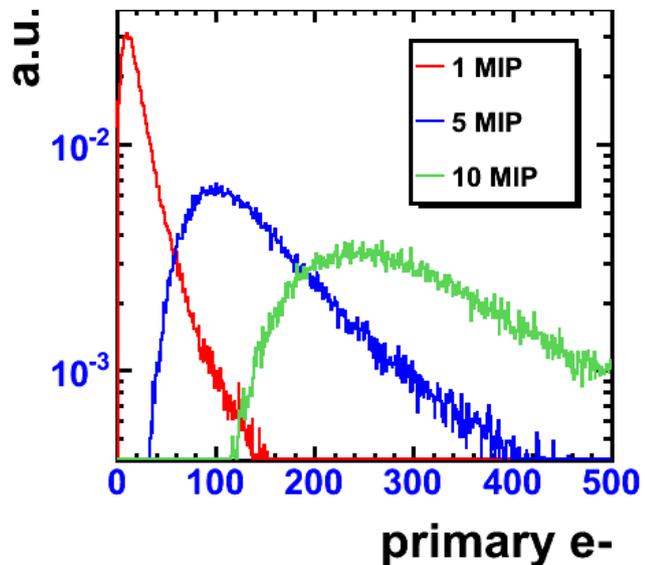
sDHCAL RPC

Campagne de mesures 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

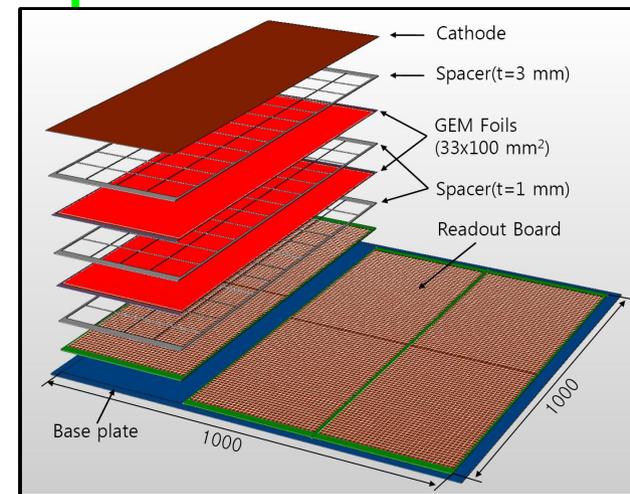
δ-électrons
Signal 10-20 fC, ASIC bas bruit
Étincelles, protections de l'électronique



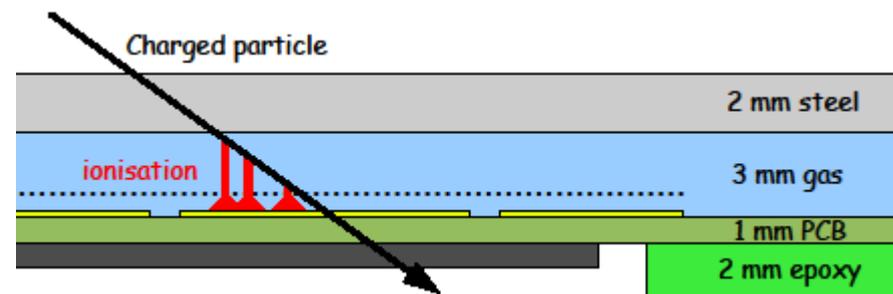
Projets multi-m² MPGD

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 $1 \times 2 \text{ m}^2$

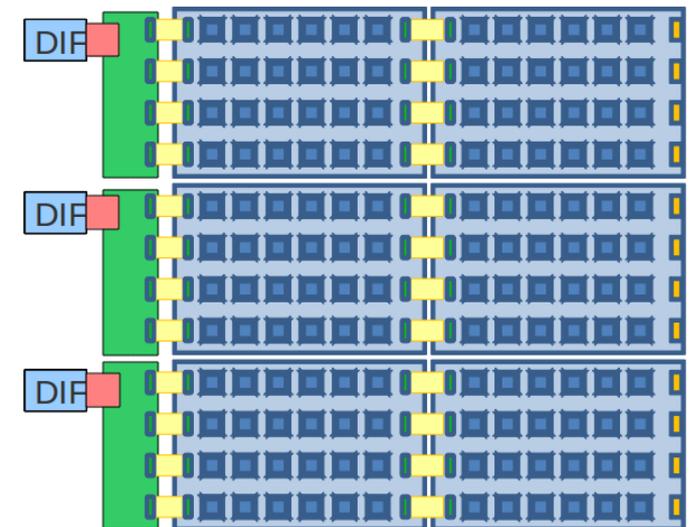
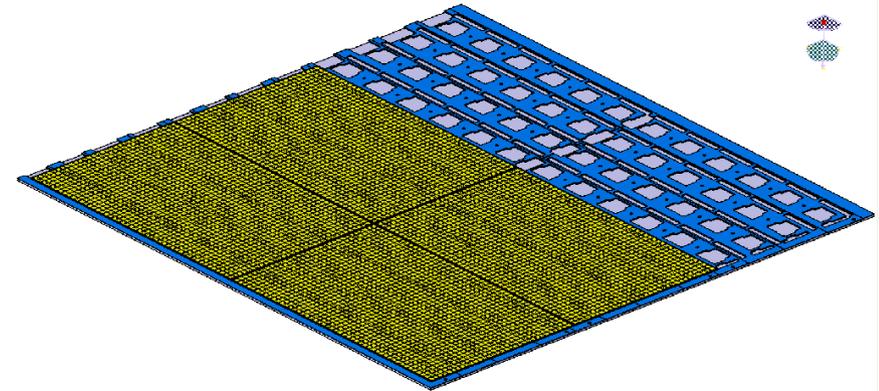
Dessin mécanique du prototype m^2

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

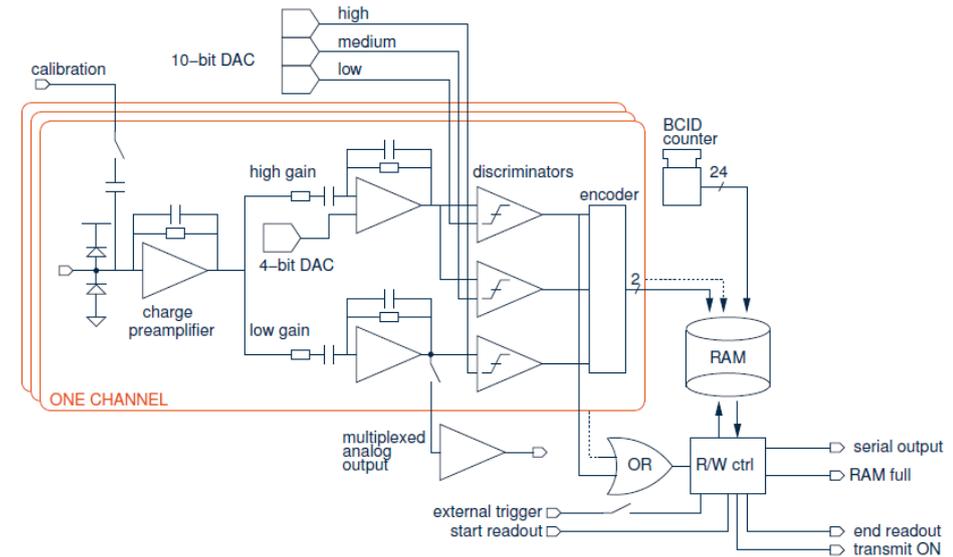
Collaboration LAL/Omega et LAPP

64 canaux avec timestamp de 200 ns

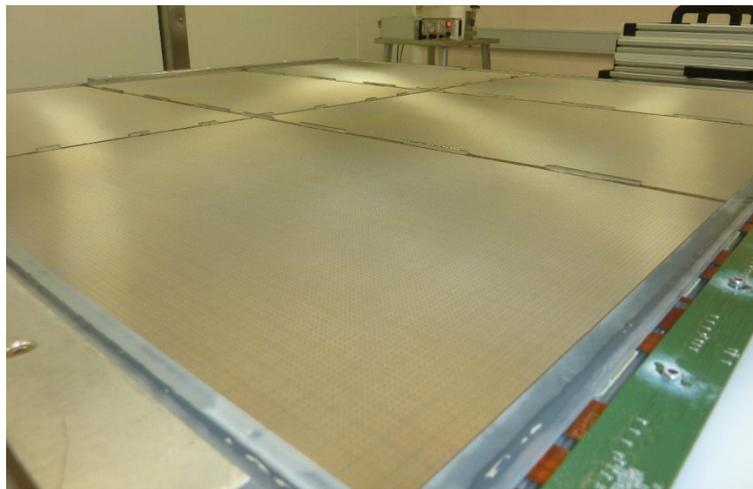
Par voie : préampli de charge + 2 shapers

Par ASIC : 3 discriminateurs et mémoire (127 evts)

Seuil bas sur détecteur : $1 \text{ fC} = 5\%$ de la MIP



Assemblage



Utilisation de Micromegas dans le HCAL (3/4)

Comportement sur faisceau

Particules au minimum ionisant (muons)

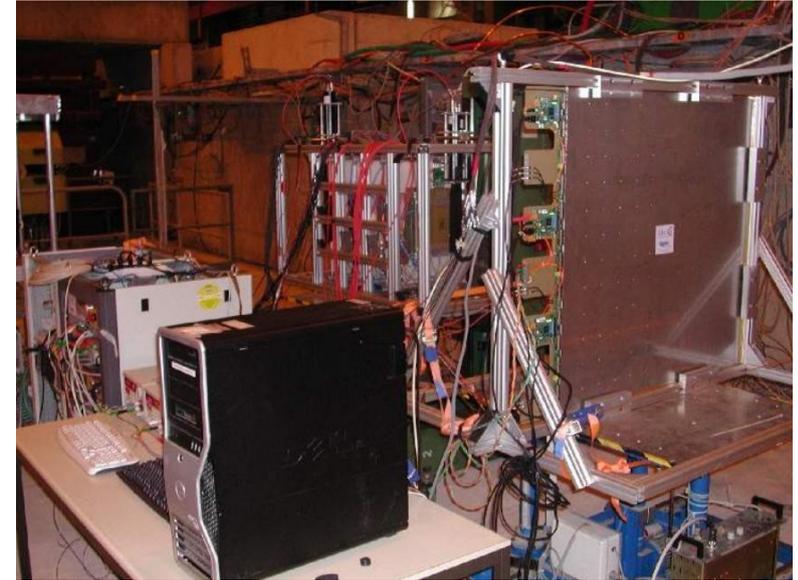
Efficacité de 98 % à bas gain (3000)

Multiplicité de damiers touchés < 1.1

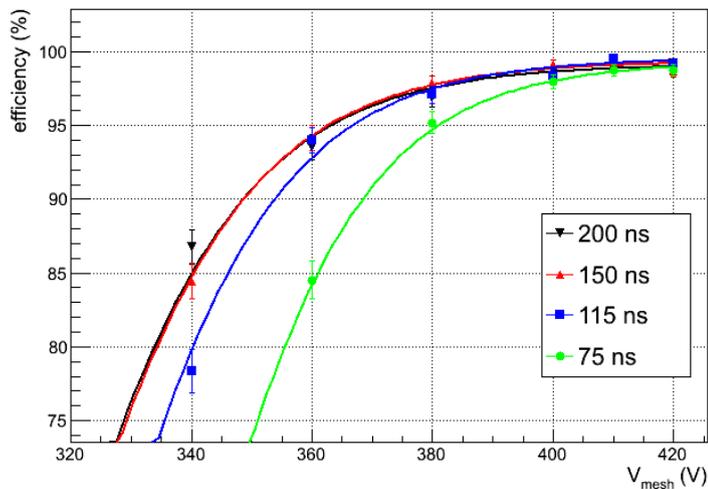
Pions 150 GeV/c + bloc de fer ($1 \lambda_{int}$)

Symétrie azymuthale du profil : réponse uniforme

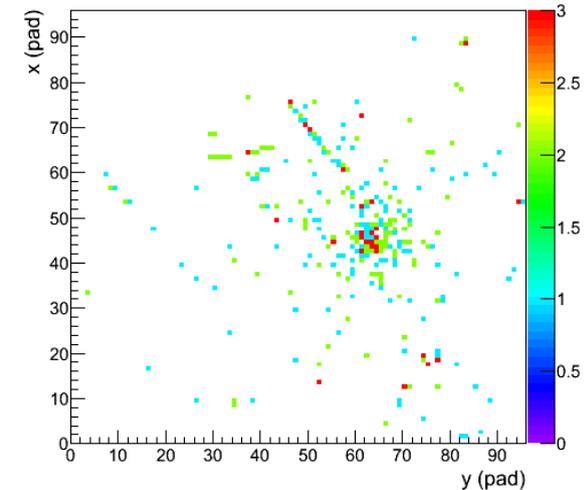
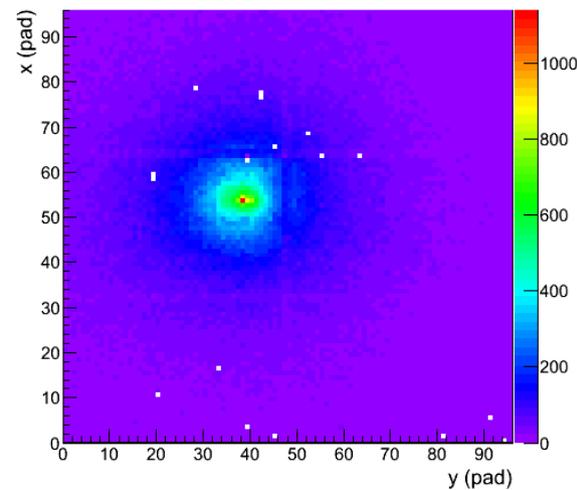
... jusqu'à 300 damiers touchés



Efficiency versus mesh voltage for different shaping time



Hits passing the low threshold



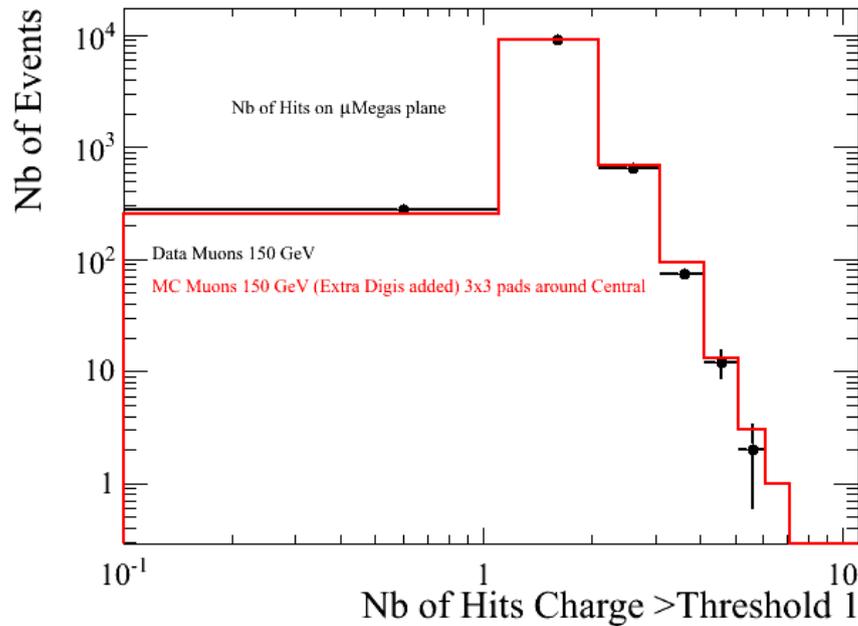
Utilisation de Micromegas dans le HCAL (4/4)

Comparaison à la simulation

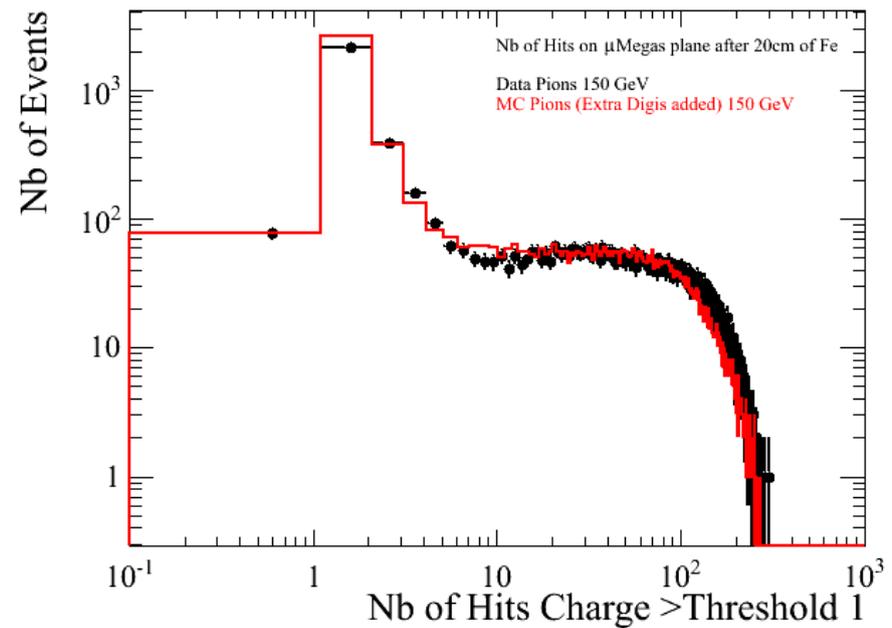
Distribution numérique et spatiale des damiers touchés

Test des listes de physique de Geant4

Muons de 150 GeV/c

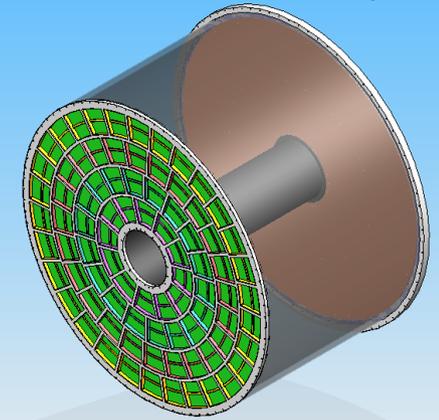


Pions de 150 GeV/c
après 1 λ_{int}



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

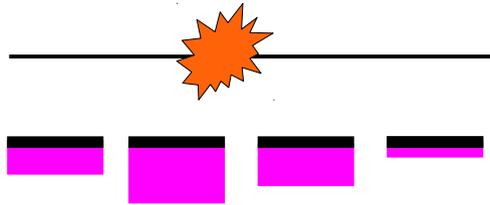
200 points / traces: $\sigma_{r\phi} = 100 \mu\text{m}$ et $\sigma_z = 500 \mu\text{m}$

Diamètre = 3.6 m, longueur = 4.3 m

Bouchon: modules sur 3-4 anneaux concentriques

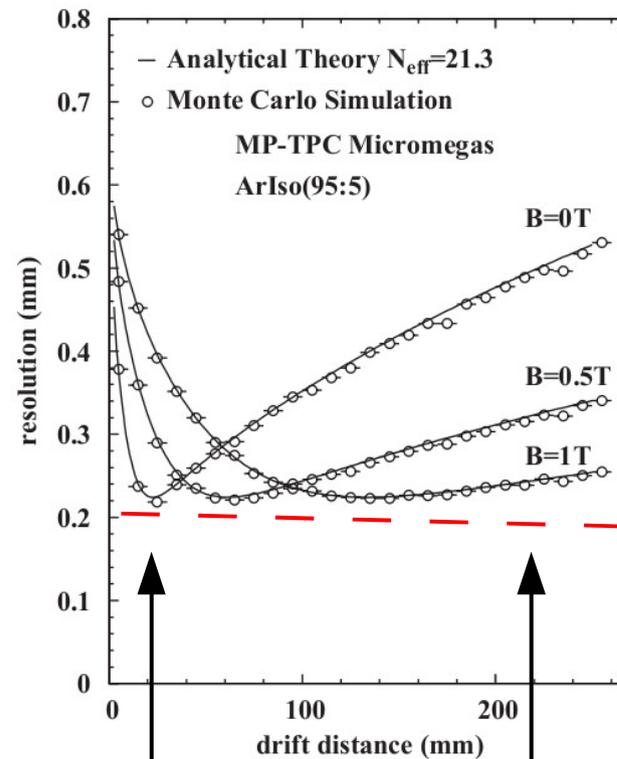
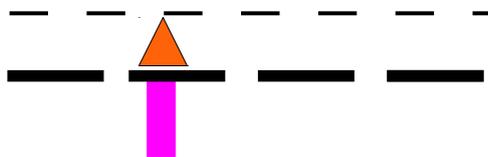
Amplification à fils

Centre de gravité



Amplification MPGD

ExB~0 mais 1 damier touché



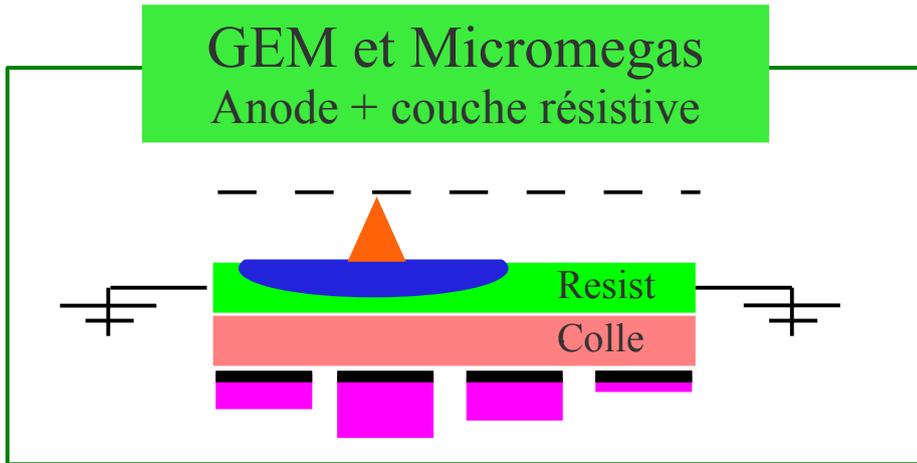
Damiers de pas 2.3 mm

Etalement + damier

Gas

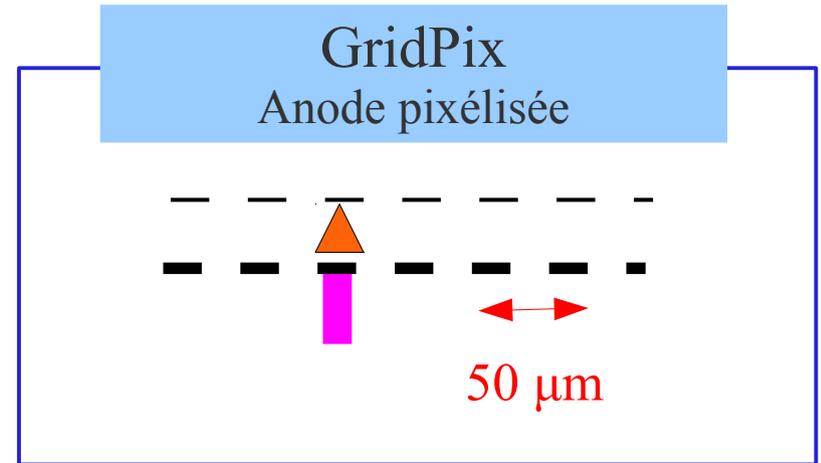
Options technologiques

Etaler davantage la charge

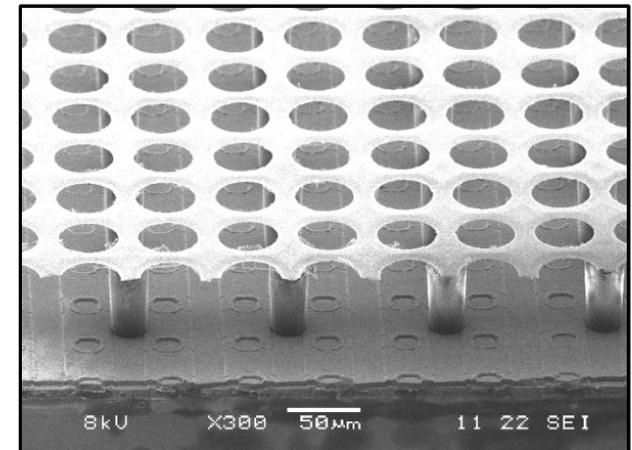
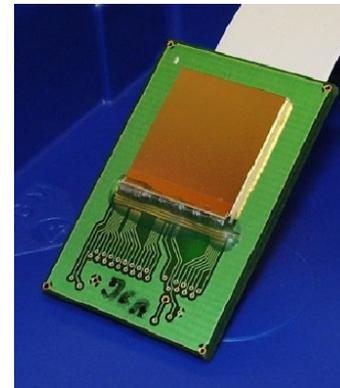
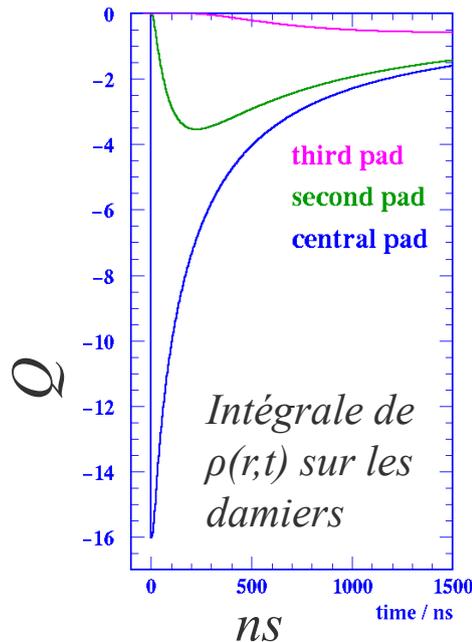
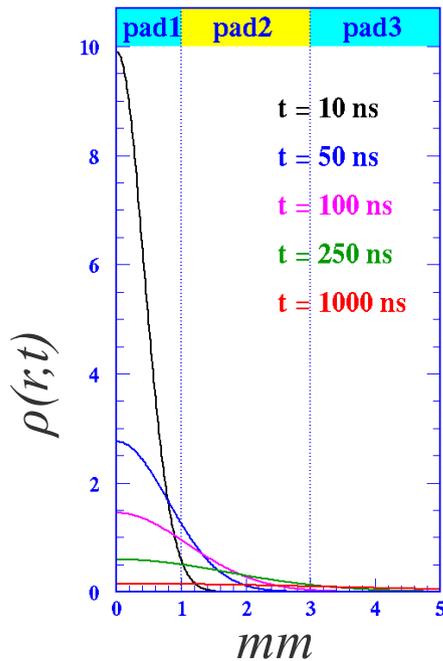


M. Dixit, A. Rankin, NIMA 566 (2006) 28

Opter pour des damiers plus petits



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



Infrastructure de test

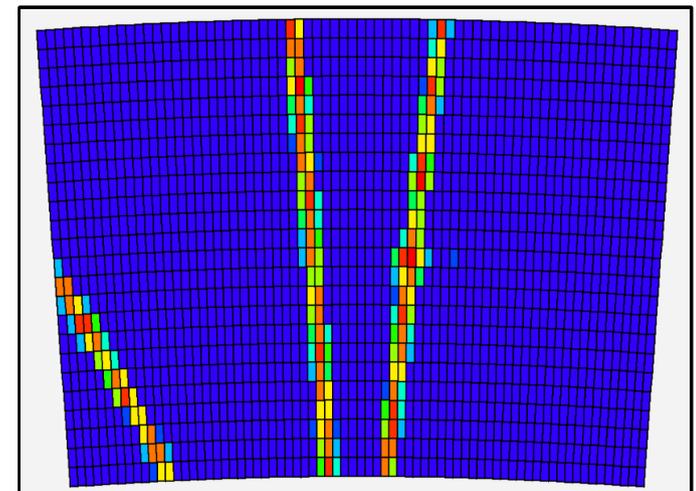
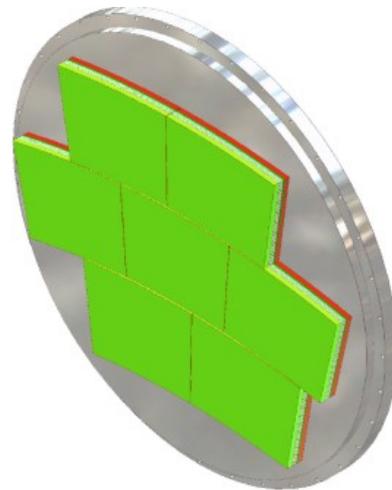
Infrastructure de test EUDET: grand prototype DESY

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

Bouchon pouvant accueillir 7 modules

Aimant supraconducteur (1 T)

Trajectographe silicium externe



La collaboration LCTPC

<http://www.lctpc.org>

Micromegas avec revêtement résistif

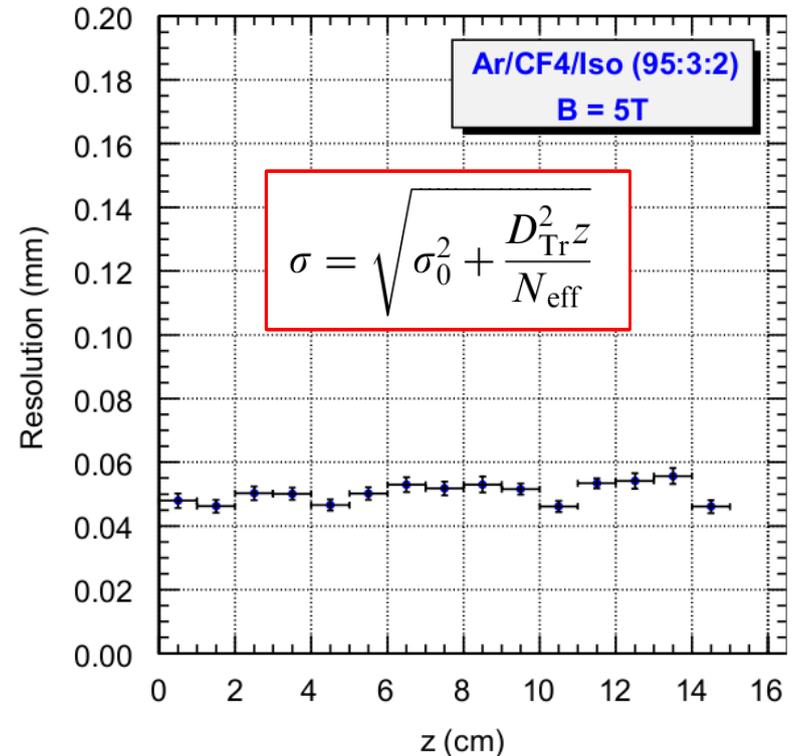
Résolution spatiale

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!

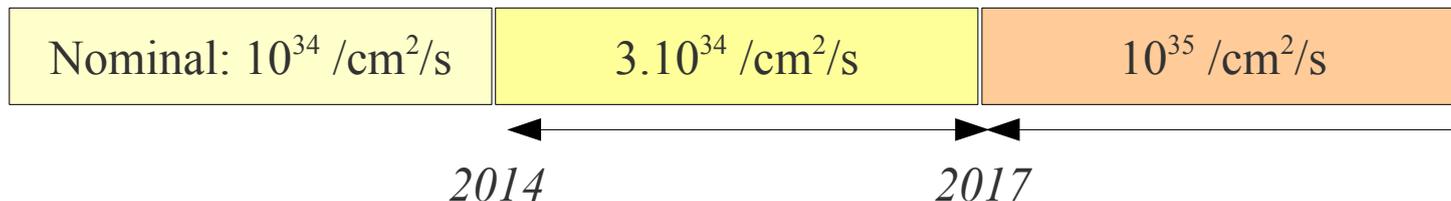
M. Dixit, et al., NIMA 581 (2007) 254



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: $500 \text{ Hz/cm}^2 \times 10$

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)

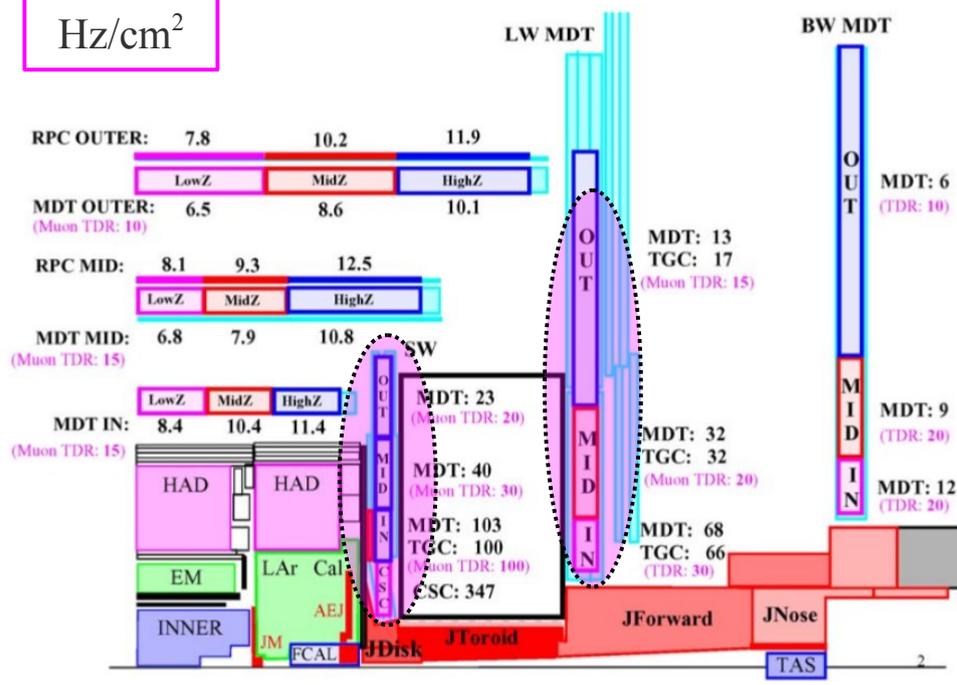
Opération > 5 ans SLHC

Efficacité 99 %

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

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

Hz/cm²



Les étincelles dans les MPGD

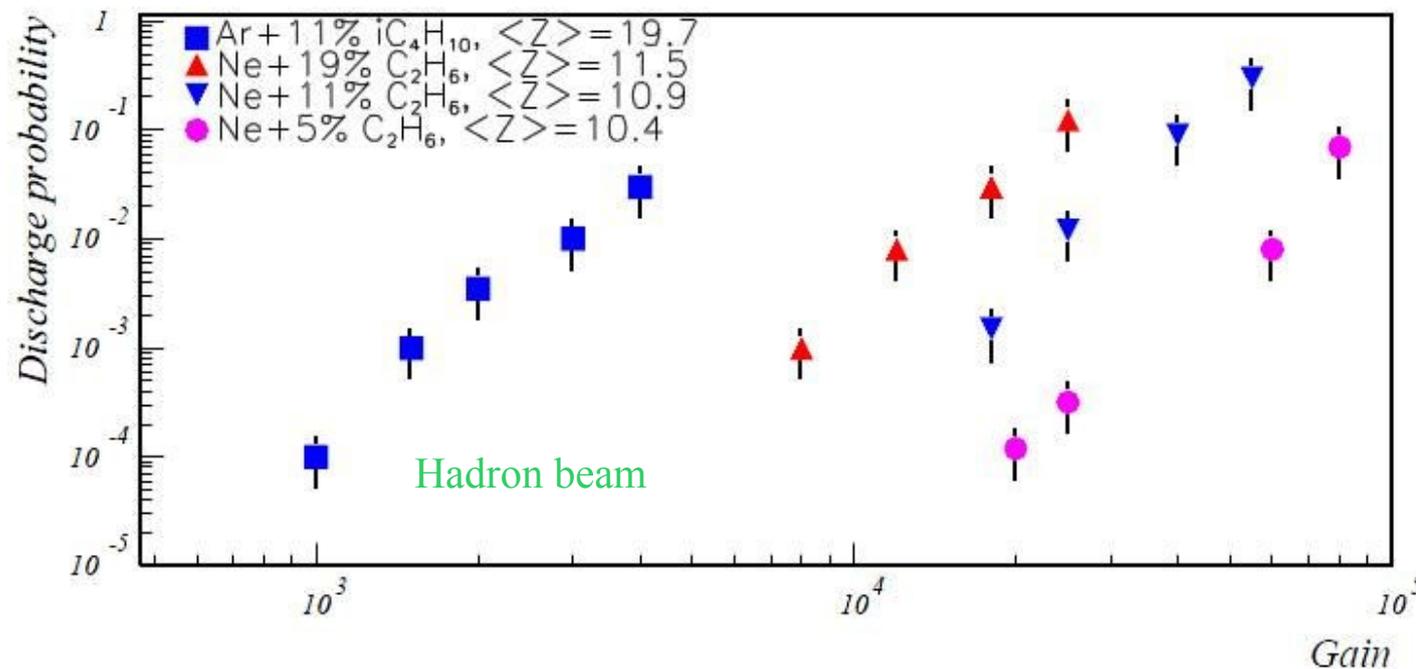
Limite empirique de Raether

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

De +, à haut flux, les avalanches se superposent

probabilité = f(gas, radiation, gain G)

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



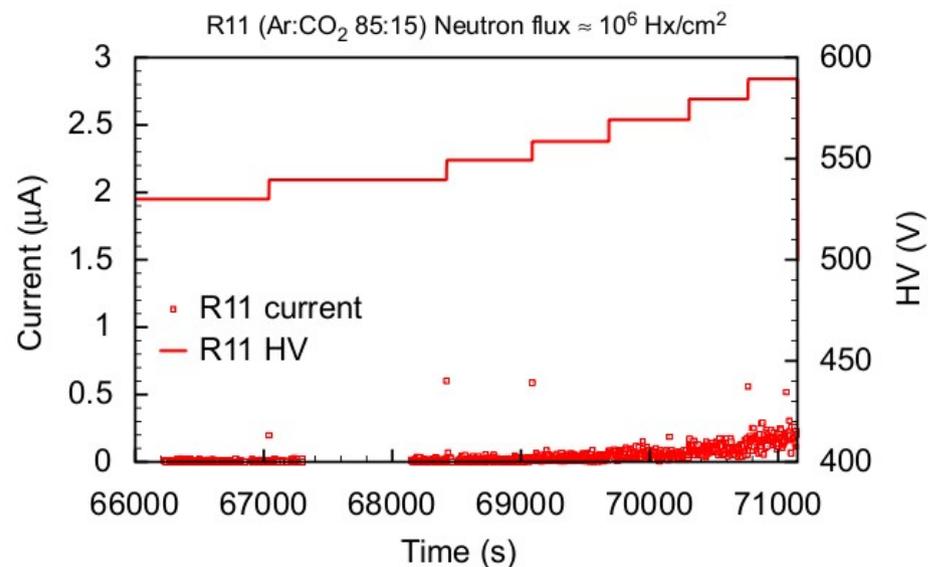
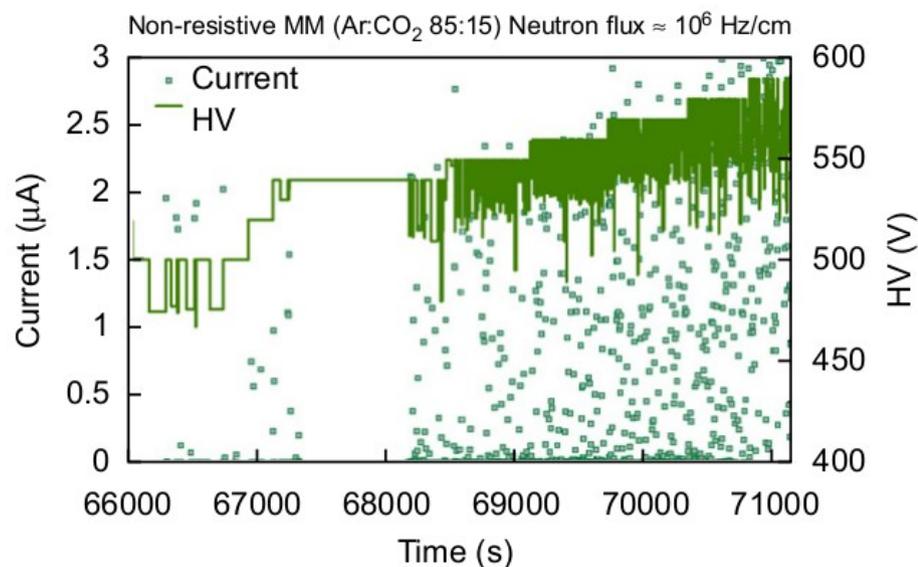
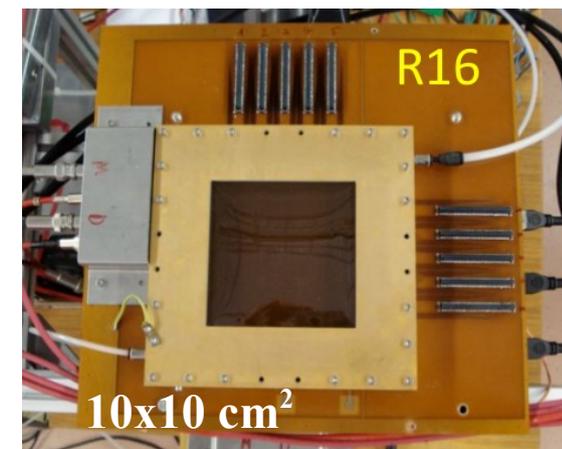
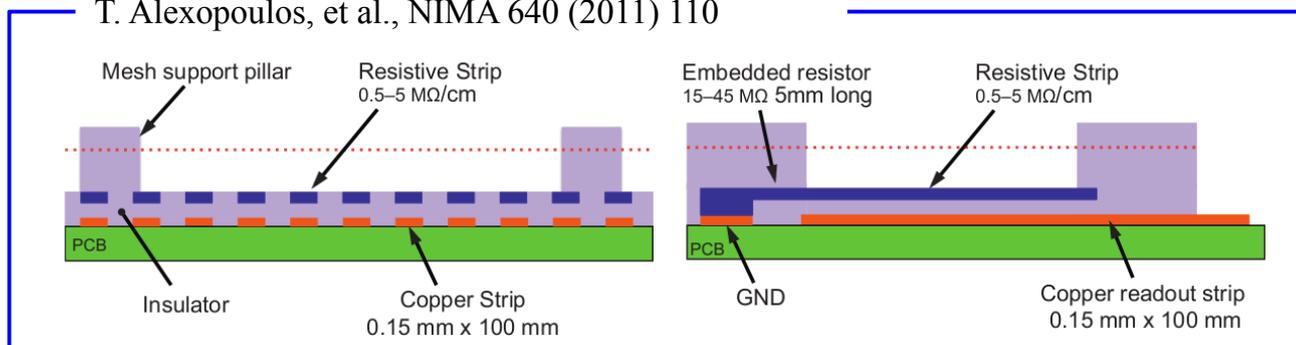
Stratégies de protection du détecteur et de l'électronique

- **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



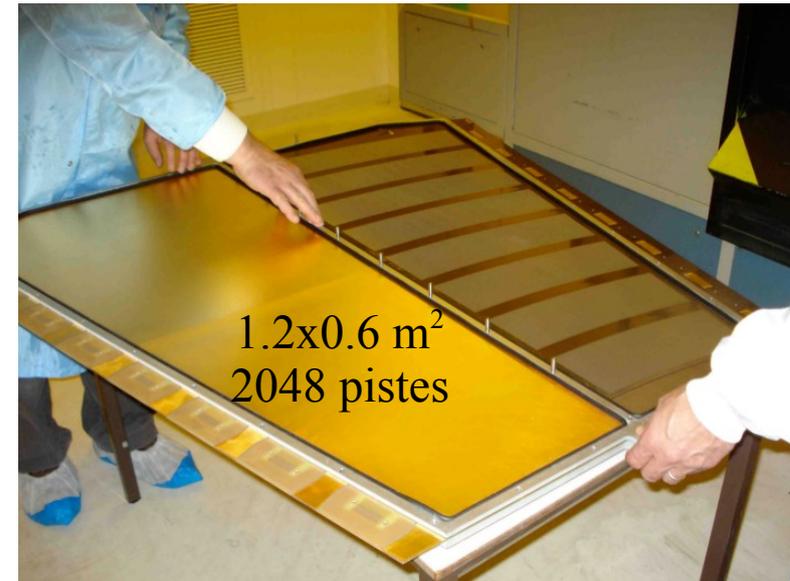
Industrialisation et la collaboration RD51

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 de 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

Les détecteurs gazeux, depuis l'invention du compteur Geiger, ont toujours été des éléments clés 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.

TPC, Calorimètres et chambres à muons
→ il reste à ré-inventer les détecteurs de vertex gazeux!

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

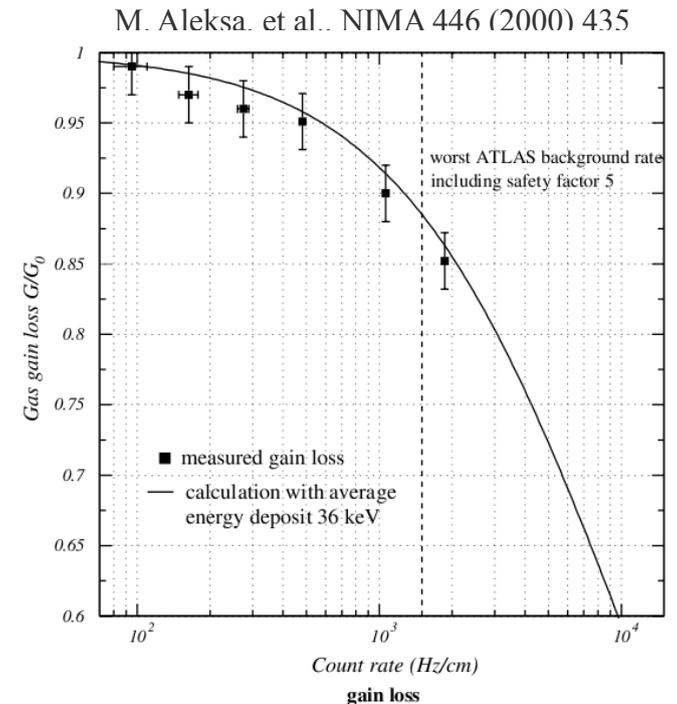
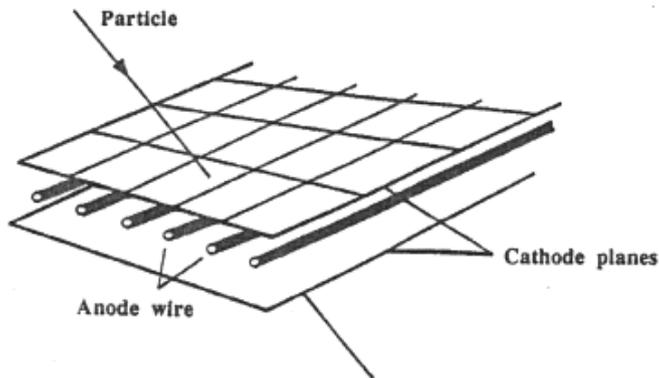


Fig. 3. Gas gain drop for the drift tubes of the ATLAS muon spectrometer [13].

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

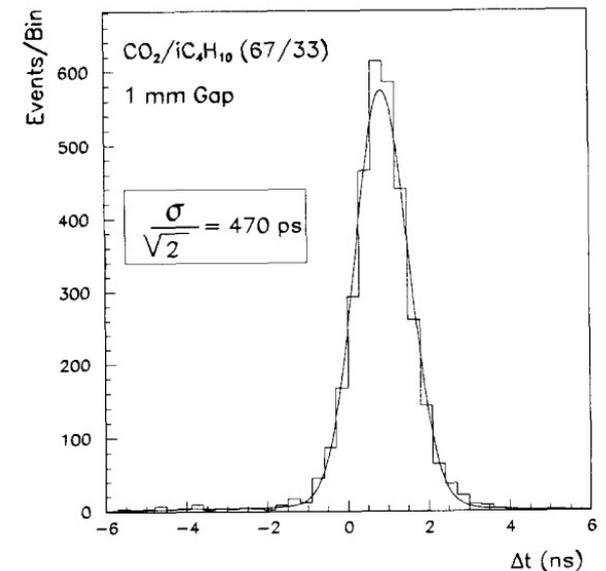
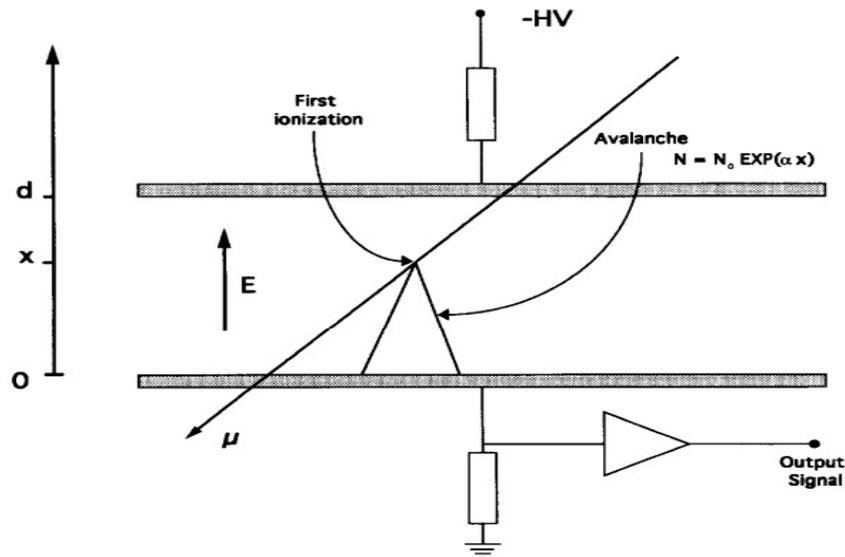


Fig. 7. Distribution of time differences between two PPCs using 7 ns rise time amplifiers. A Gaussian fit gives for each PPC a time resolution of 470 ps (assuming it is the same for both chambers).

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)

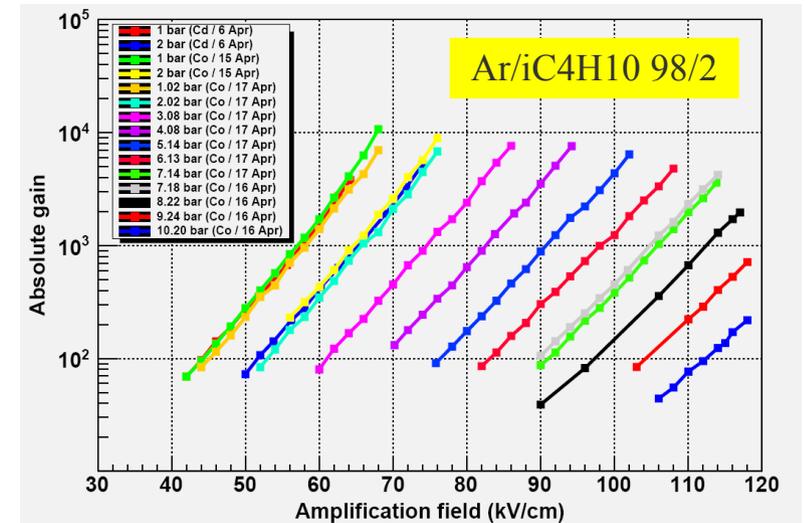
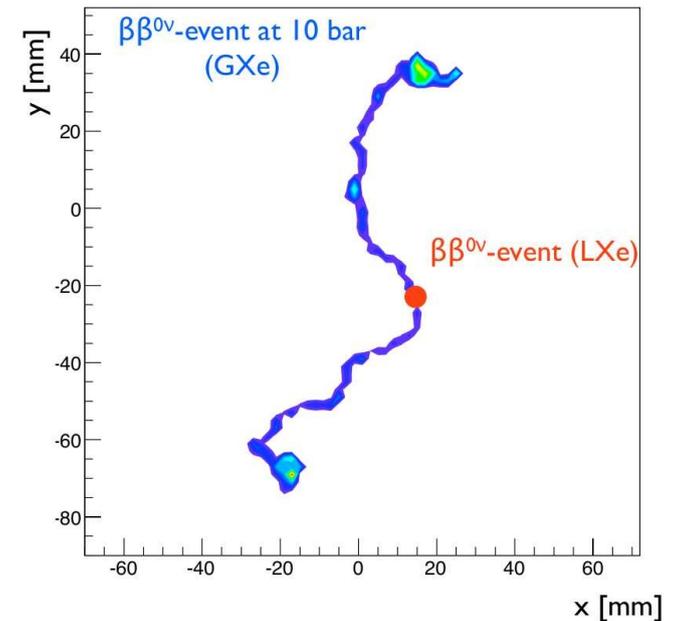
Micromegas microBulk pour NEXT
→ Gain et résolution dans les gaz denses

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

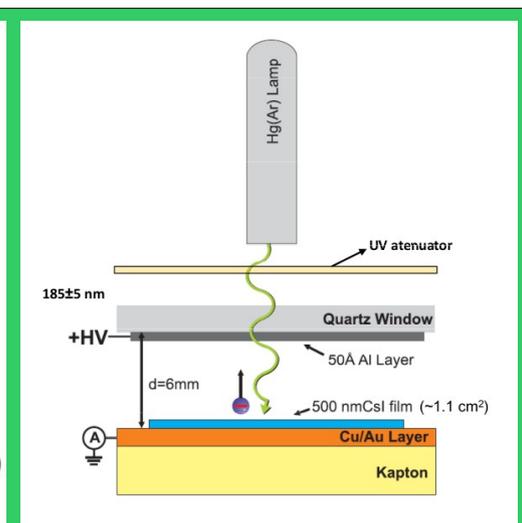
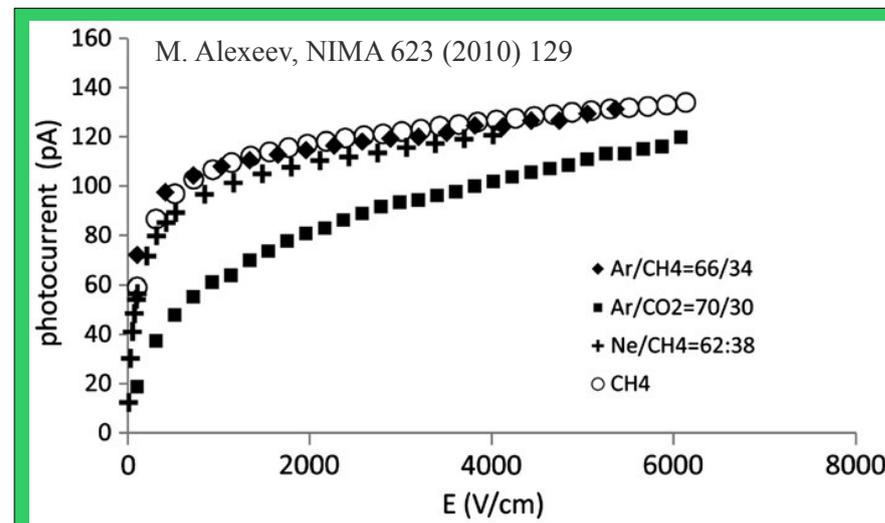
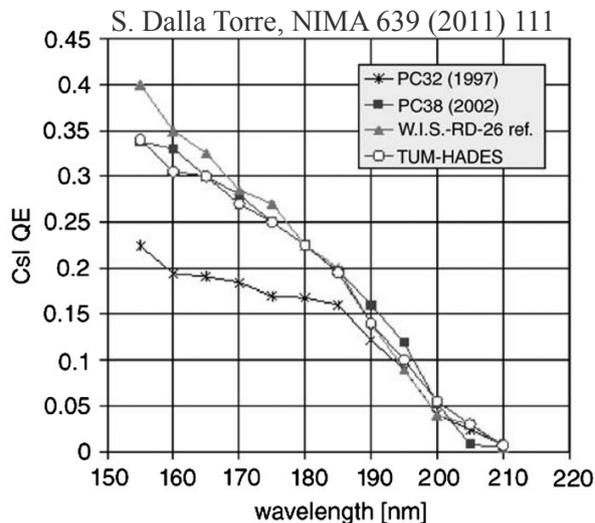
Principe de fonctionnement

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

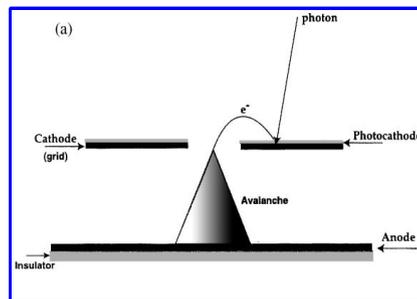
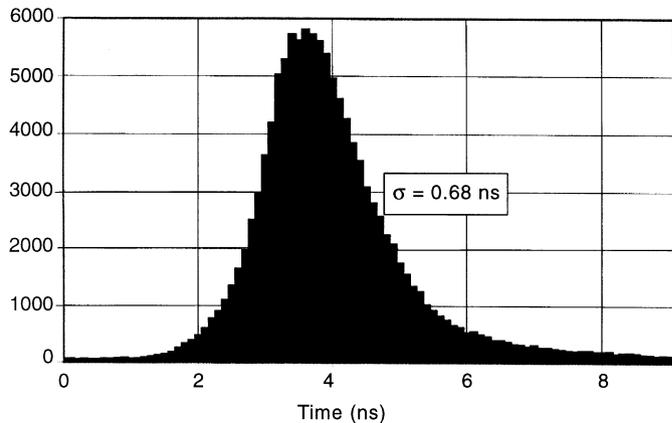
Micromegas + CsI

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



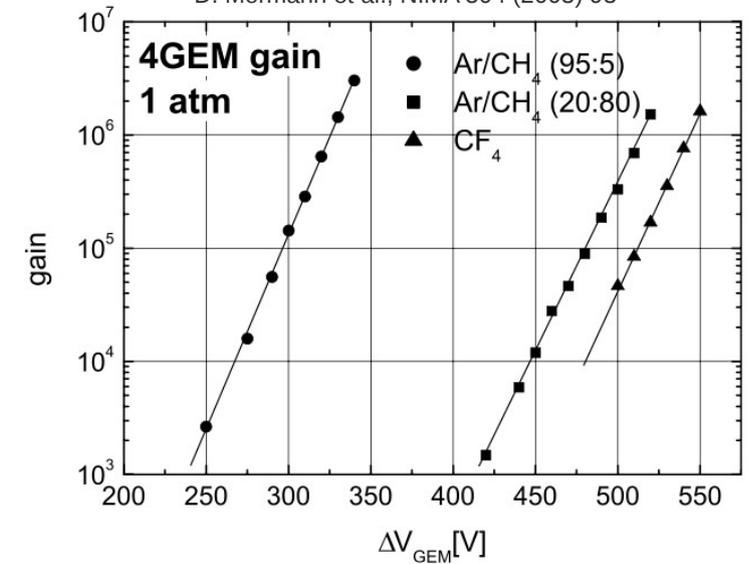
Combinaison 4 GEM + CsI

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

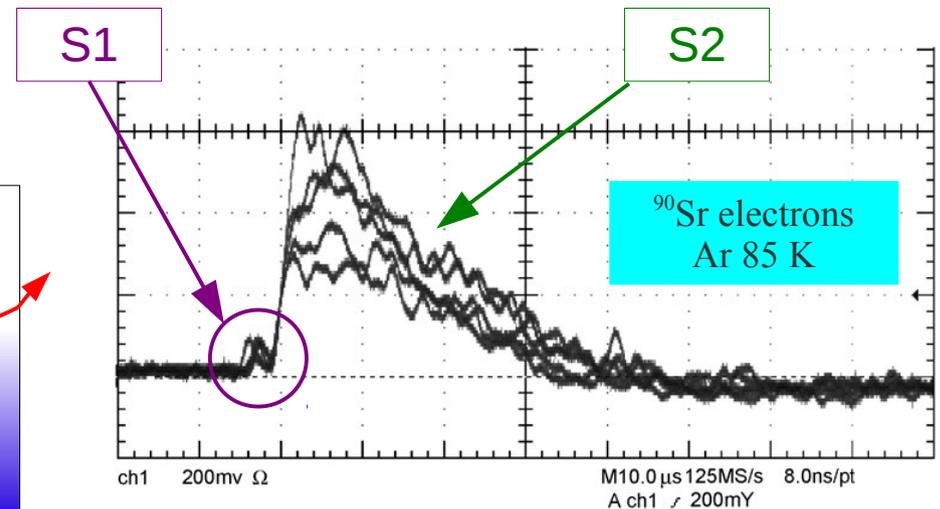
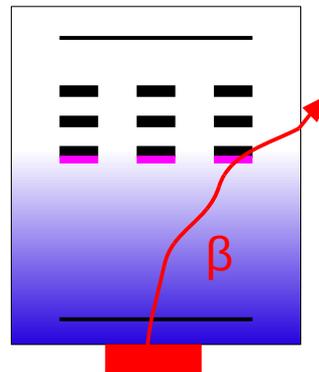
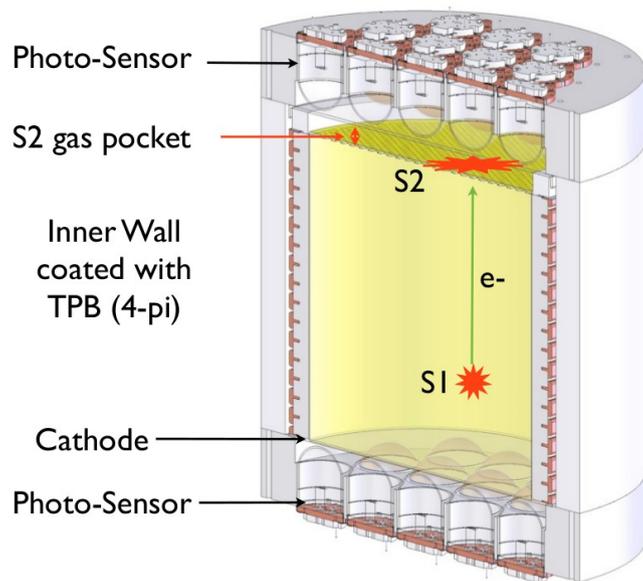
Scintillation convertie sur photocathode
Ionisation multipliée par plusieurs GEM

Démonstration dans l'Ar

Petit prototype avec 3 GEM

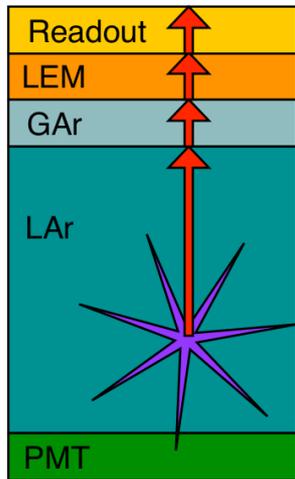
Volume $\sim 10 \text{ cm}^3$

Gain > 5000 à 85 K



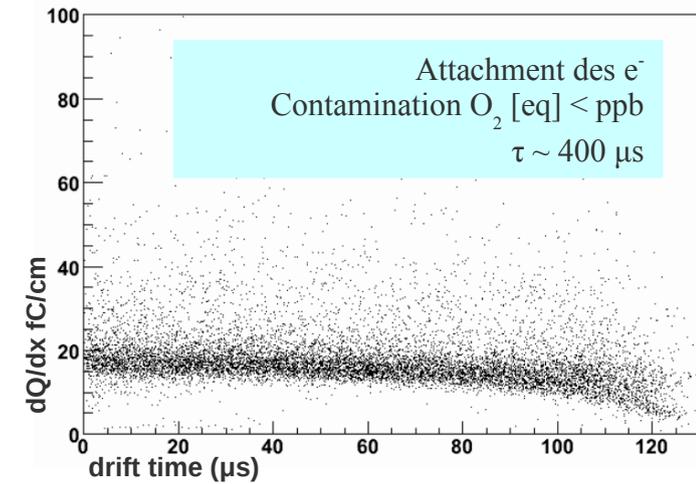
A. Bondar et al., NIMA 581 (2007) 241

Application dans les TPC double phase (2/2)

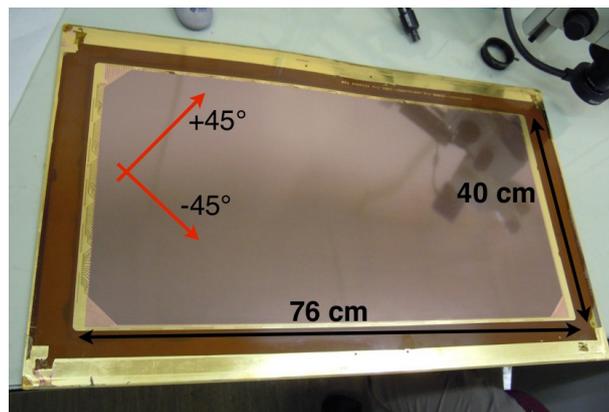


Lecture de plus grands volumes
 MPGD pour GLACIER, prototype de 250 litres
 Giant Liquid Argon Charge Imaging Experiment

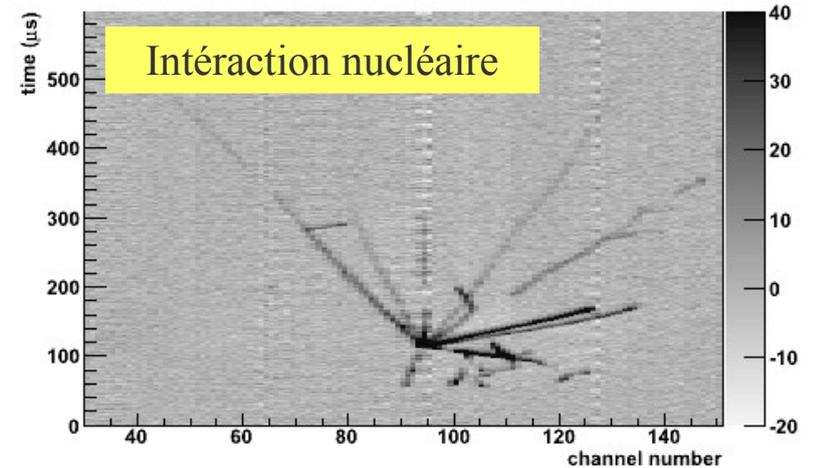
Pas de photocathode mais
 segmentation du plan de lecture
Trajectographe 3D + calorimètre homogène



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



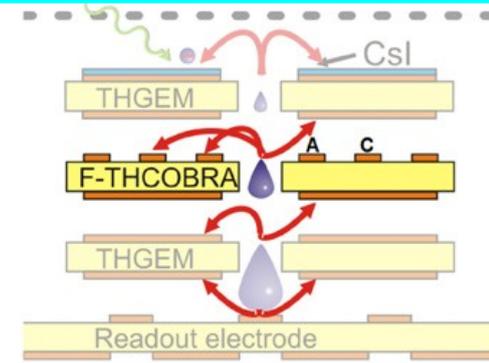
A. Badertscher et al., NIMA 641 (2011) 48



Application pour les compteurs Cerenkov

Générations de PM gazeux

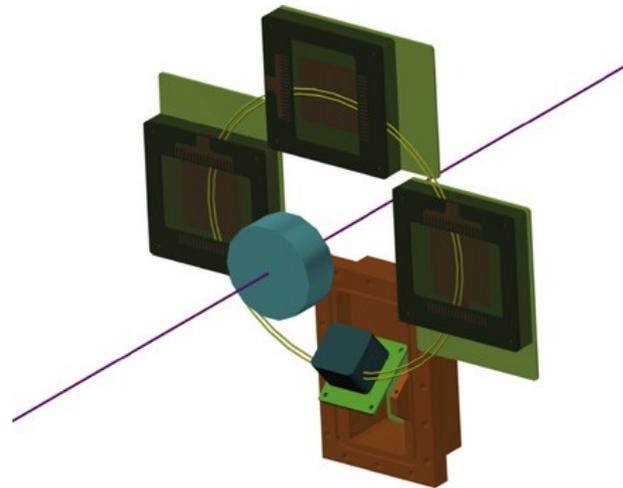
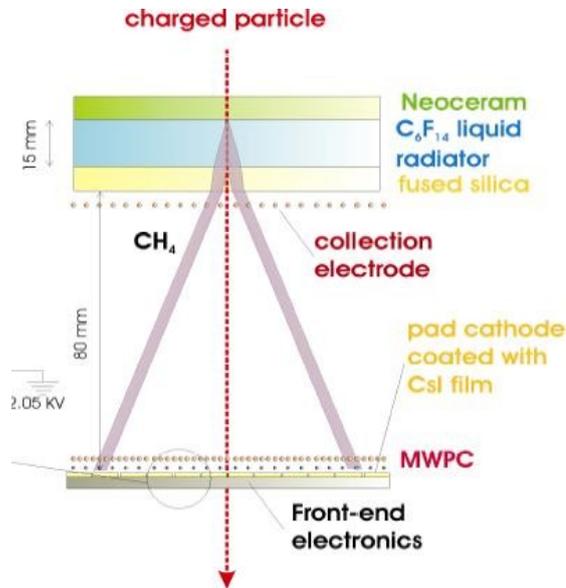
- * Gaz photosensibles (TMAE, TEA)
→ DELPHI, SLD, CLEO
- * MWPC dotées de photocathode (CsI)
→ COMPASS, STAR, ALICE
- * **GEM avec dépôts photosensibles**



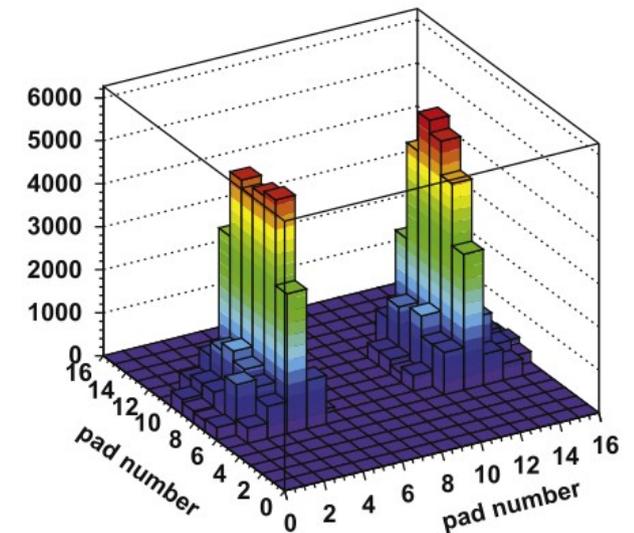
Thick-GEM

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



M. Alexeev et al., NIMA, In Press



Les collisionneurs à haute luminosité

Luminosité

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

Collisionneurs hadroniques

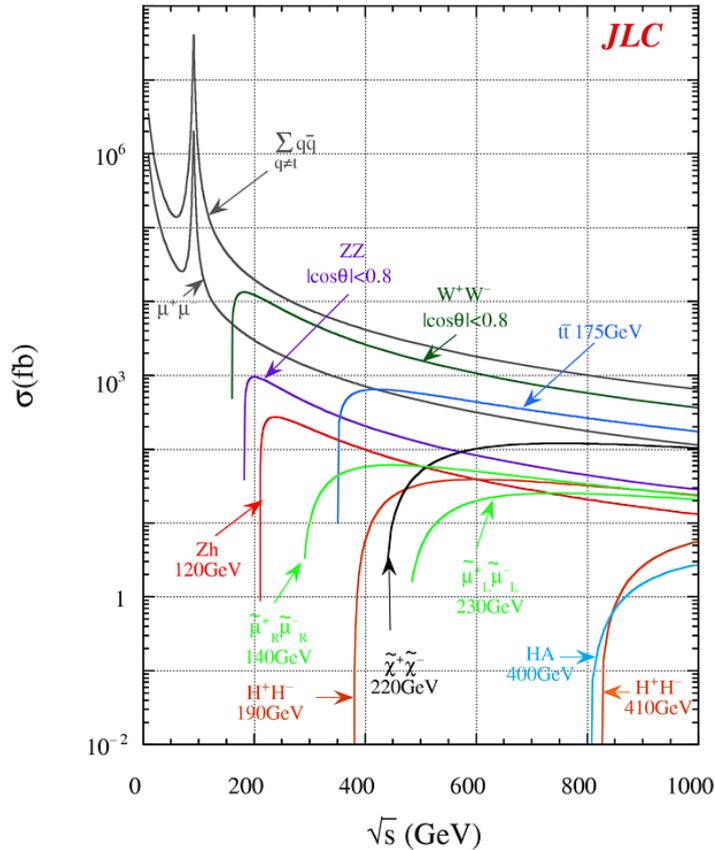
	HERA (DESY)	TEVATRON (Fermilab)	RHIC (Brookhaven)				LHC [†] (CERN)	
Physics start date	1992	1987	2001	2000	2004	2002	2009	2010
Physics end date	2007	—	—					
Particles collided	ep	$p\bar{p}$	pp (pol.)	Au Au	Cu Cu	d Au	pp	Pb Pb
Maximum beam energy (TeV)	e^- : 0.030 p : 0.92	0.980	0.25 34% pol	0.1 TeV/n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

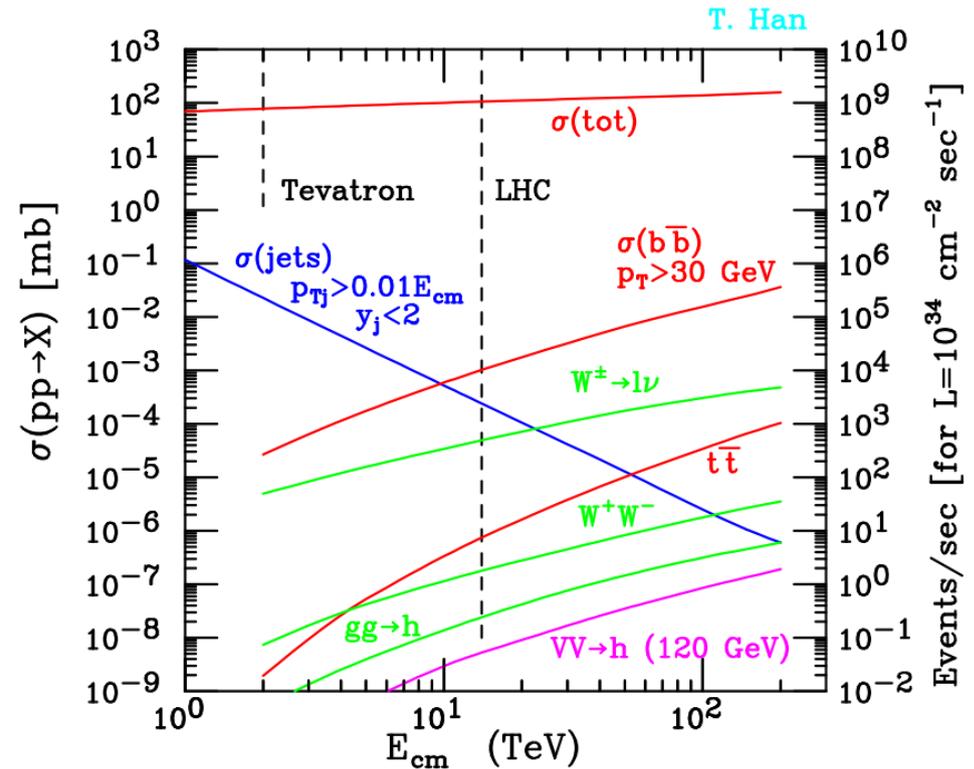
Les collisionneurs à haute luminosité

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)

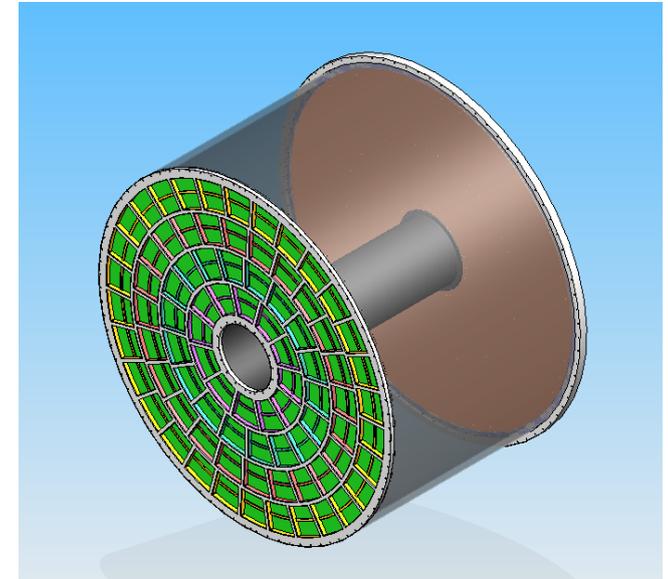
2 x 1 million de canaux

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?