

Détecteurs de traces

ECOLE IN2P3

"DU DETECTEUR A LA MESURE"

Roscoff 13 - 21 juin 2007

P.Siegrist CERN-PH

Plan

- Rappel Interaction particules/matière
- Historique des détecteurs de traces
- Les détecteurs de traces modernes
- Détecteurs de traces gazeux
- Détecteurs de traces à semi-conducteurs
- Applications & problèmes
- Problématique « gros détecteurs »

Interaction des particules avec la matière

- Tous les phénomènes observés finalement dans les détecteurs de traces sont dus à des interactions de particules chargées
- Généralement on distingue cependant 3 types:
 - particules lourdes chargées ($m \sim$ masse du noyau)
 - électrons
 - rayonnement électromagnétique (X, γ)
- Les interactions à considérer sont électromagnétiques.

Les particules détectées par leurs traces

En général on peut en faire des faisceaux

- électron e^- e^+ $m = 0.511$ MeV
- muon μ^- μ^+ 105.66
- pions π^- π^+ 139.58
- kaon k^- k^+ 493.84
- proton p^- p 938.26 ~ 1 GeV
- (γ ν π^0 k^0 n) ??? !!!

Parcours et atténuation

- Seules les particules lourdes chargées ont un parcours R (range)
- Les électrons subissent de grands changements de direction dus à leur forte perte d'énergie par rayonnement électromagnétique (grande valeur de e/m)
- Pour le rayonnement électromagnétique (faisceau γ) l'absorption est exponentielle
$$N=N_0 e^{-\lambda x}$$
 avec $\lambda = \text{prob d'interaction/cm}$

Interaction avec électrons atomiques

Perte d'énergie par ionisation

Collision de la particule lourde chargée avec les électrons atomiques du milieu traversé.

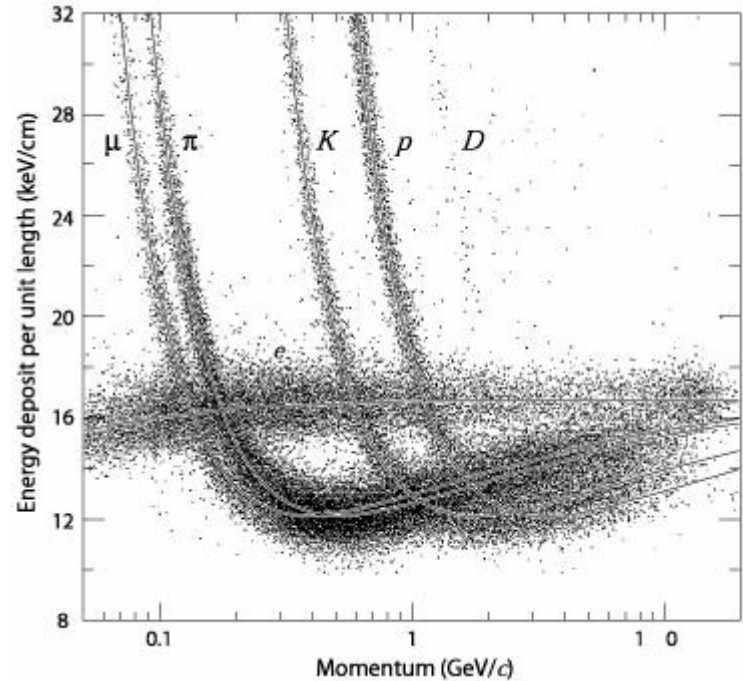
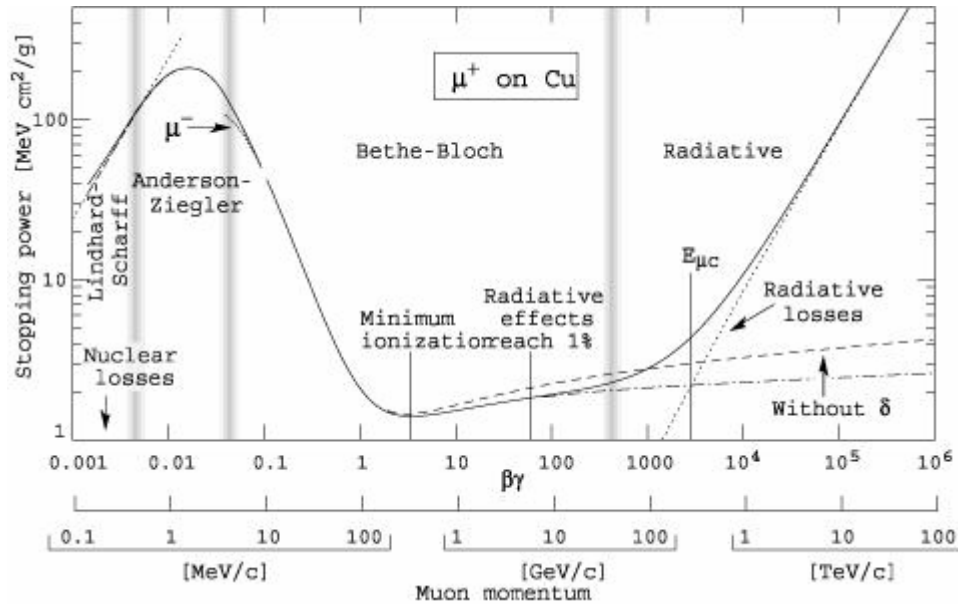
La plus grande perte d'énergie se produit lors de ces collisions

énergie cinétique part. incidente → atome excité ou ionisé

Notations

- M : masse de la particule incidente
- m : masse de l'électron
- Z : Numéro atomique
- e : charge de l'électron
- N : densité de centres diffuseurs (atomes/cm³)
- $\beta = v/c$: vitesse
- γ : Facteur de Lorentz, $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$
- z : charge de la particule incidente (en unités de e)
- η : Energie de transition séparant petits et grands transferts
- ΔE_{\max} : Energie cinétique maximale transférable par la particule incidente sur un e- au repos.

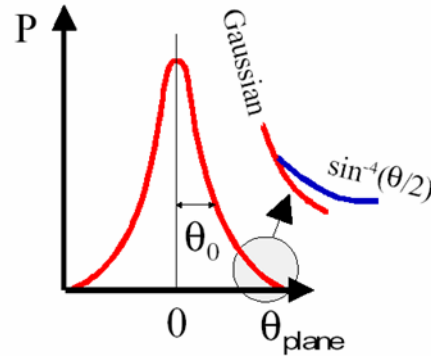
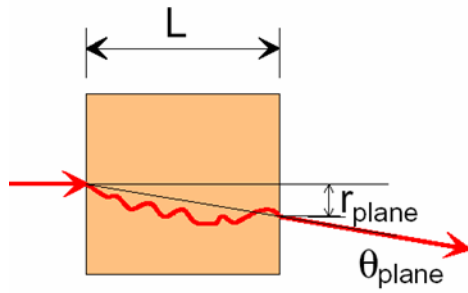
Bethe-Bloch



$$\frac{dE}{dx} = -2\pi N Z \frac{z^2 e^4}{m\beta^2} \left(\ln \frac{2m\gamma^2 \beta^2 E_{cut}}{I^2} - \frac{\beta^2}{2} \left(1 + \frac{E_{cut}}{\Delta E_{max}} \right) - \frac{\delta}{2} \right)$$

Diffusion multiple

- Diffusion coulombienne sur un noyau = répulsion électrostatique par le noyau = diffusion de Rutherford = collision nucléaire élastique → $d\sigma/d\Omega \sim 1/\sin^4(\theta/2)$
Grand changement de la direction de la particule mais pas grande variation d'énergie en moyenne
- Effet cumulé de plusieurs collisions = diffusion multiple → dist Gaussienne



$$\theta_0 = \theta_{plane}^{RMS} = \sqrt{\langle \theta_{plane}^2 \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2}} \theta_{space}^{RMS}$$

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{L}{X_0}} \left\{ 1 + 0.038 \ln \left(\frac{L}{X_0} \right) \right\} \quad X_0 = \frac{716.4 \text{ g.cm}^{-2} A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})}$$

Caractère semi empirique affiné suivant les progrès expérimentaux et moyens de calcul.

“Vieille formule”:

$$\sqrt{\langle \theta^2 \rangle} = \frac{15Z}{p\beta} \sqrt{\frac{L}{L_{rad}}}$$

La préhistoire

- Emulsions photos
- Chambre à brouillard (vapeur sursaturée, traces provoquent ionisation et apparition de gouttes le long des traces)

Premières utilisations dans les exp. de rayons cosmiques

- Les compteurs Geiger

Un peu plus tard

- Chambres à bulles 1952 (Glaser)

- 1965 ch. 2m du CERN

- 1970 - 80 Mirabelle Gargamelle BEBC

Principe: H₂ ou liquide lourds (propane) en phase liquide proche de la phase gazeuse (P_c, T_c) Détente → état surcritique et apparition de bulles le long des trajectoires

Si champ magnétique → traces courbées

$R = P/0.3H$ R en cm, P en Mev/c , H en KGauss

Synchro du faisceau et de la détente.

1 seule photo donc nombre limité de particules à envoyer

Détente P de 4 atm à 1.3 atm @ T 24 à 27 K

Durée: détente 10 ms, faisceau 5ms, photo 7 ms, re-compression 10 ms

Total ~ 30 ms

Et en même temps

- Compteurs à étincelles (compteur proportionnel)
- Chambres à étincelles (1965-1975)
 - Gaz entre 2 plaques avec $\Delta V = 2-3 \text{ KV}$
 - Temps de mémoire de 10 à 100 μs
 - Détection de l'étincelle optique, sonore, fil magnétostrictif...
 - Si pulse HT $< 20\text{ns}$ l'étincelle suit la trace
 - Si pulse HT $< 10\text{ns}$ chaque électron donne une avalanche. Pour champ $\sim 15 \text{ KV/cm}$ avalanche lumineuse. Si on coupe la HT rapidement (avant passage du courant \rightarrow chambre à dards (streamer))

1968...

- **G.Charpak**:Chambre proportionnelle CPMM, ou MWPC. « Mise à plat » du compteur proportionnel cylindrique

- Plan de fils de lecture entre 2 plans (grilles) HT

Bonne résolution en temps (faible temps de mémoire, sépare 2 traces à moins de 200 ns)

Pas de déclenchement HT

Premiers spectromètres ~ 1970

Rapidement chambres de grandes dimensions

60x60 cm² → 1.3x1.3 m² (1973) → 4x4 m² (1978)

Améliorations et variantes

- Travail sur le gaz (gaz “magique”)
- Lecture 2 coordonnées
- Lecture sur cathodes (signal induit)
- Chambres à dérive
- Cathode segmentées

Chambres damiers LAL exp NA3 1978

- Géométries cylindriques pour les collisionneurs
- Enormes progrès en permanence sur l'électronique

Les chambres à dérive

- Concept post MWPC: Chambres a dérive planes (F.Sauli)
- Plan de fil = alternance fils de champ-fils sensible.
- On ne mesure que 1 fil sur 2 (moins d'électronique ou plus de surface pour le même prix)
- On mesure le temps d'arrivée sur le fil sensible

Un Point d'Histoire... La TPC LBL PEP-4

PROPOSAL FOR A PEP FACILITY

BASED ON THE TIME PROJECTION CHAMBER

A. R. Clark, O. Dahl, P. Eberhard, D. Fancher, L. Galtieri, M. Garnjost,
R. W. Kenney, S. C. Loken, L. T. Kerth, R. Madaras, D. R. Nygren,
P. Oddone, M. Pripstein, P. Robrish, M. Ronan, G. Shapiro, M. L. Stevenson,
M. Strovink, H. Wenzel, and M. Urban†

Lawrence Berkeley Laboratory
University of California
Berkeley, California 94720

C. D. Buchanan, J. M. Hauptman, W. E. Slater, D. H. Stork, and H. K. Ticho

Department of Physics
University of California
Los Angeles, California 90024

J. N. Marx**, P. Nemethy, and M. E. Zeller

Department of Physics
Yale University
New Haven, Connecticut 06520

W. Gorn, A. Kernan, J. Layter, and B. Shen

Department of Physics
University of California
Riverside, California 92502

B. A. Barnett, C-Y. Chien, L. Madansky, J. A. J. Matthews, and A. Pevsner

Department of Physics
Johns-Hopkins University
Baltimore, Maryland 21218

* Scientific Spokesman.

† Visitor from Ecole Polytechnique, 1974-1976.

** Deputy Scientific Spokesman, Visitor LBL, 1976-1977.



Idée Originale

D. R. Nygren: "Proposal to investigate the Feasibility of a Novel Concept in Particle Detection", LBL internal report, Feb. 1974

Aux nouveaux accélérateurs e^+e^- (PEP, PETRA), il faudra mesurer des jets d'environ 15 particules (12 chargées), sur une acceptation de 4π stéradians avec une très haute efficacité, pouvoir mesurer précisément les impulsions, identifier les particules, mesurer les énergies et les directions de tous les photons émis et être insensible au bruit de fond supérieur de plusieurs ordres de grandeur.

Approche conventionnelle: gros solénoïde + détecteur très segmenté (EXB) + identification (dE/dx sur au moins 100 échantillons) difficile!

→ Nouveau concept $E // B$ et longue dérive pour la coordonnée z

Concept de longue dérivation

- Si B et E // une longue dérivation est possible, limitée par HT max. \rightarrow 1m ou plus. (150 KV max!)
- Vitesse de dérivation
- Diffusion transverse «réduite » par $B \rightarrow B=1.5$ T
- Choix judicieux du gaz, exemple Ar-CH₄
- $V_d \sim$ qq cm/msec \rightarrow résolution en z de 1mm sur 1m

Diffusion transverse

Elargissement de la trace au cours de la (longue) dérive L
 $\sigma \sim (D \cdot L)^{1/2}$

D = coefficient de diffusion

$D = V \lambda / 3$, V vitesse des électrons,
 λ = parcours moyen dans le gaz

Si B champ // et E champ de dérive
 $V \sim [\mu / (1 + (\omega \tau)^2)] \cdot E$

Avec $\mu = (e \tau / m_e)$ mobilité des électrons,
 τ temps moyen des électrons entre 2 collisions
et $\omega = eB / m_e$ fréquence cyclotron de l' électron

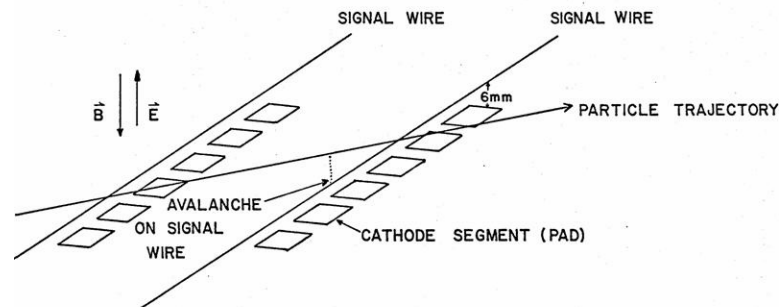
$\omega \tau$ peut varier de 1 à 10...!

Résolution spatiale

Mesurer sur des pads les signaux positifs issus du mouvement des ions positifs générés près de l'avalanche sur le fil proportionnel (Charpak et al.)

Etendre la charge sur 2 ou 3 pads → mesure du centre de gravité

→ Amplificateurs de bas bruit sur cathode segmentée



Résultat

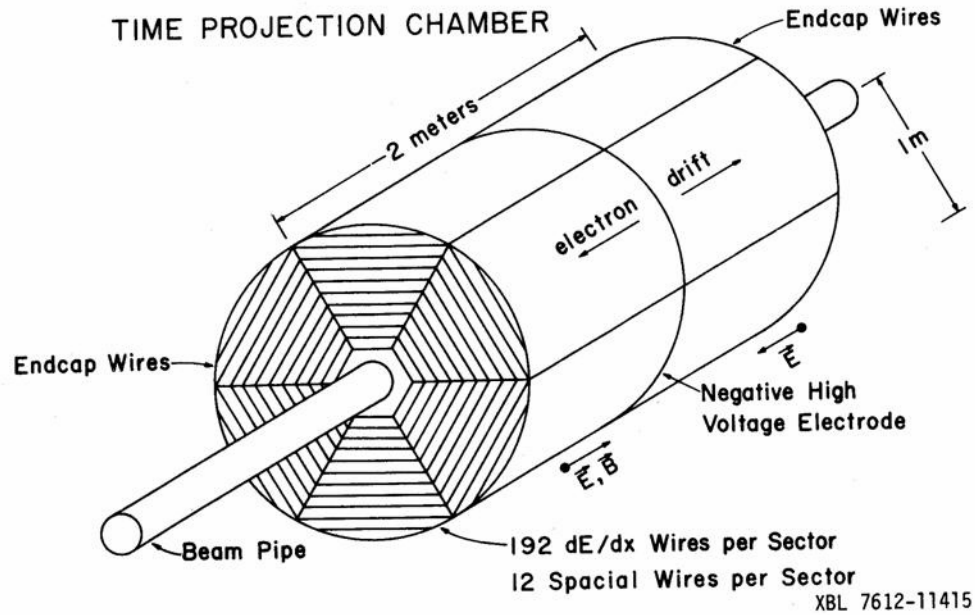
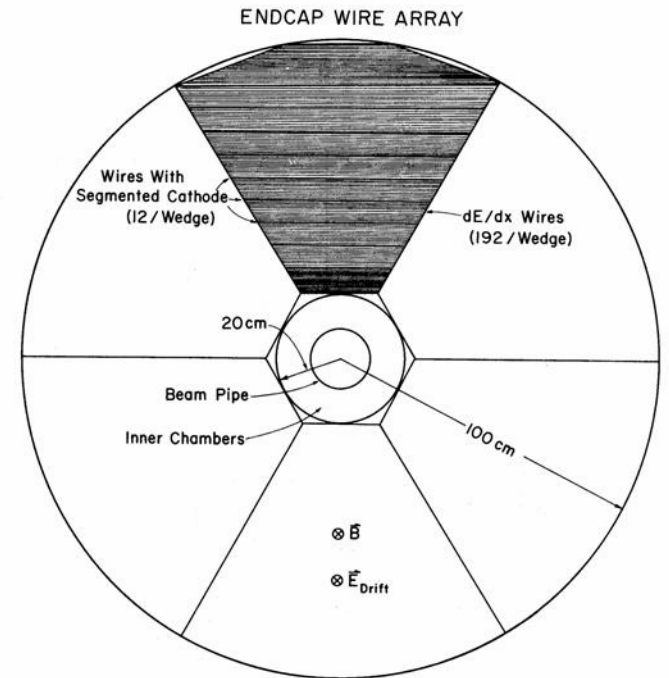


Fig. IIIA.2



XBL 7612-11328

Fig. IIIA.6

Table IIIA.1

TPC Operating Conditions

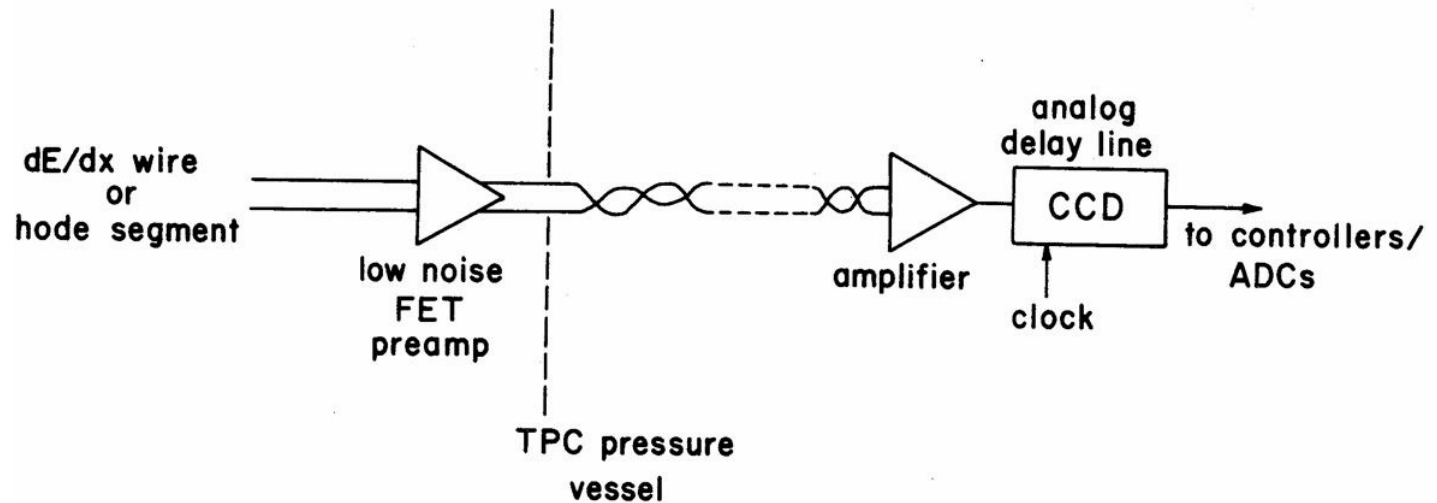
\vec{B}	= 15 KG
Gas:	80% Argon + 20% CH ₄
E/P:	0.2(V/cm/Torr)
E:	150 KV/m
Pressure:	10 atmospheres
Drift distance:	1 m
Momentum resolution:	$\approx 0.6\% \times P(\text{GeV}/c)$
Drift velocity:	$\sim 7 \text{ cm}/\mu\text{s}$
Spatial resolution:	$\Delta z: 2 \text{ mm}$
	$\Delta\phi: \frac{150 (\mu\text{m})}{R}$
# readout elements:	9600
# wedges/endcap:	6
# dE/dx wires/wedge:	192
# spatial wires/wedge:	12

Electronique

- Préampli faible bruit (1000 e RMS) FET à l'intérieur du volume (à qq cm du pad ou du fil) (Preamp ~ 110mW). Refroidissement
- Ampli-shaper distant (salle de comptage) → shaping pour résolution en temps et en amplitude
- Stockage analogique de l'information en temps et amplitude → registres à décalage analogique: CCD Fairchild, vitesse avec horloge externe. 15 MHz, 240 échantillons (tous les 4mm). Vidange a 20-50 KHz.
- Opération à température de 10 degrés C !
- Courant noir, piédestal dépend du bucket

Electronique TPC PEP4

TPC READOUT ELECTRONICS (ONE CHANNEL)

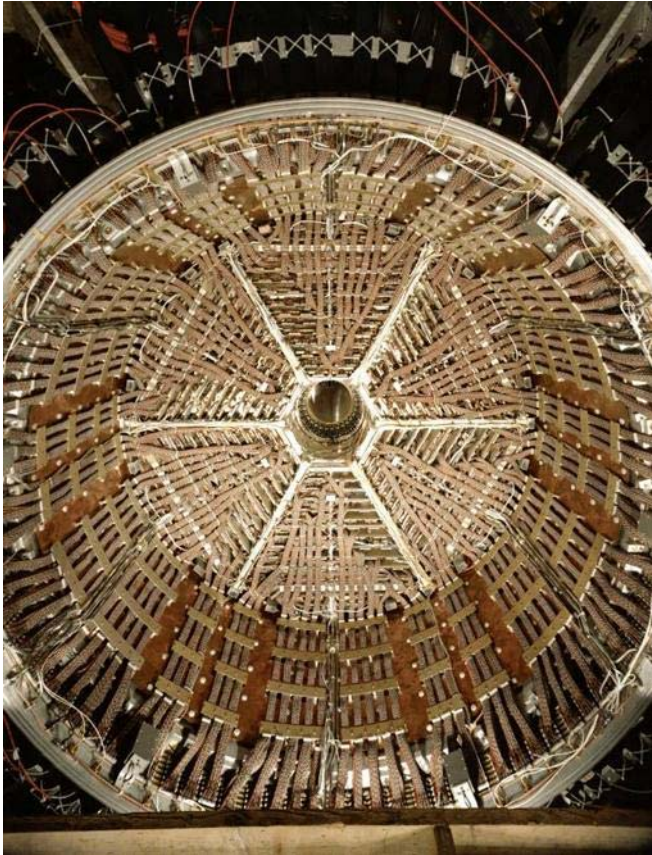


Preamp ~ 110mW

XBL 7612-11414

Fig. IIIA.10

Secteurs TPC+ Cables



dE/dx

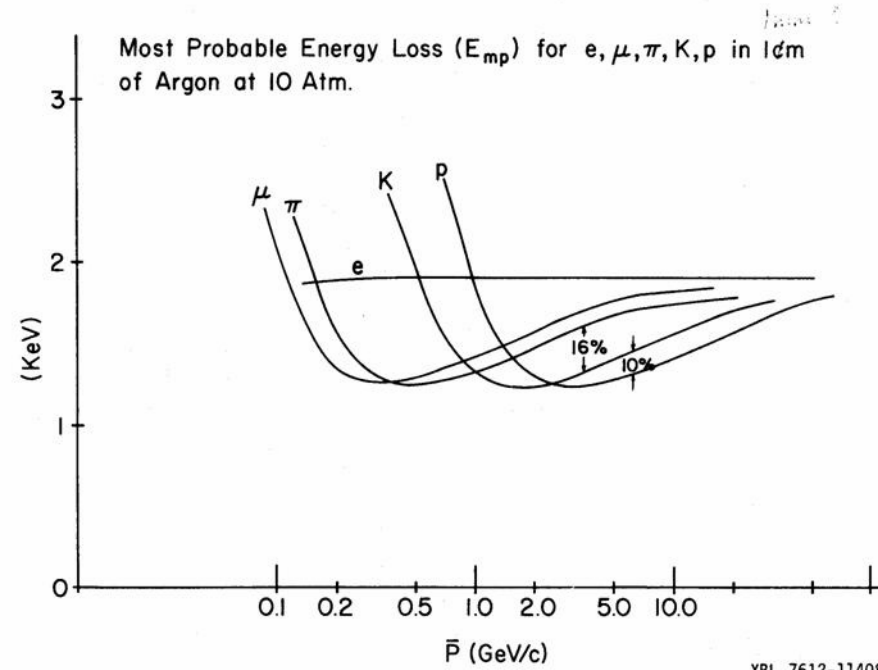


Fig. IIIA.4

Lecture TPC

Stockage info analog. Dans CCD

Relecture à 20KHz (50 msec)

r = numéro du fil (12)

ϕ = numéro du pad

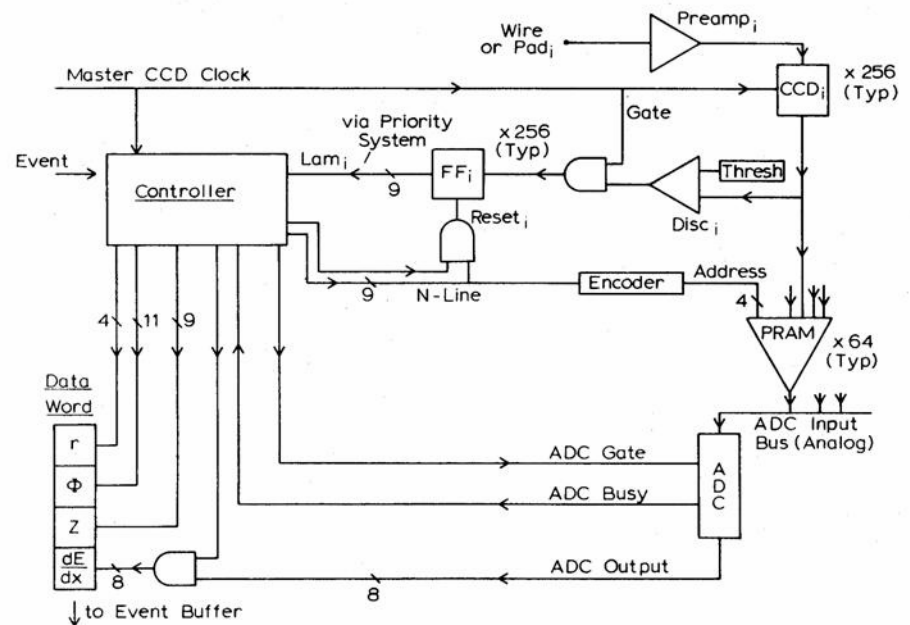
z = ccd bucket

Zéro suppression

par priorités sur ADC

Pads 8 bits

Fils 9bits



XBL 7612-11319

Fig. A10.2

Complications

Forte amplification sur les fils \rightarrow charge d'espace du nuage d'ions lents \rightarrow distorsions

\rightarrow opération en "gating grid". Perturbation sur électronique, moins de gain sur la chambre et plus de gain demandé aux amplis.

Effets $E \times B$ au voisinage des fils (gradient de champ) et discontinuités de champ bords de cages et secteurs

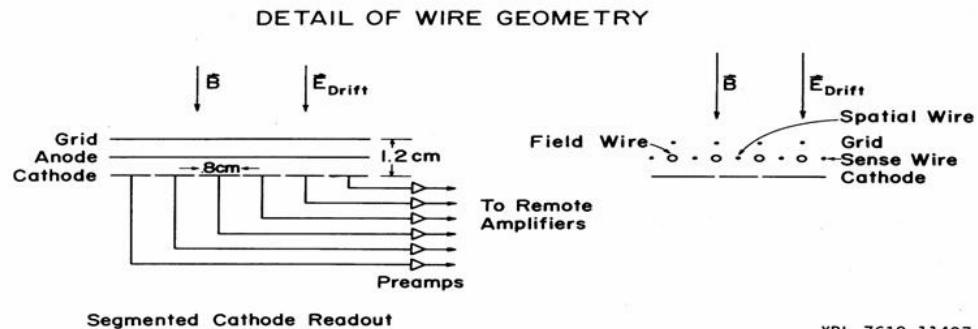


Fig. IIIA.9

“gating grid”

Appliquer $V_g \pm DV_g$ sur grille de gate

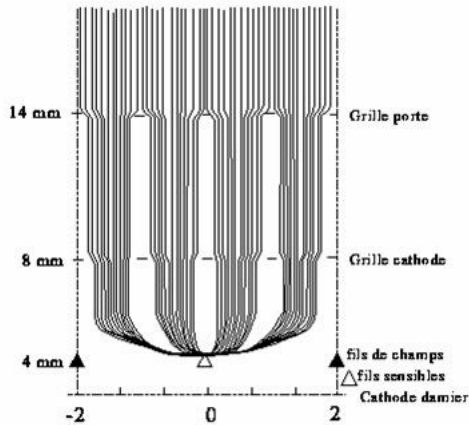
$DV_g = 100V$ dynamique ou $30 V$ statique

- TPC gate fermée + ouverture après trigger L1 OK

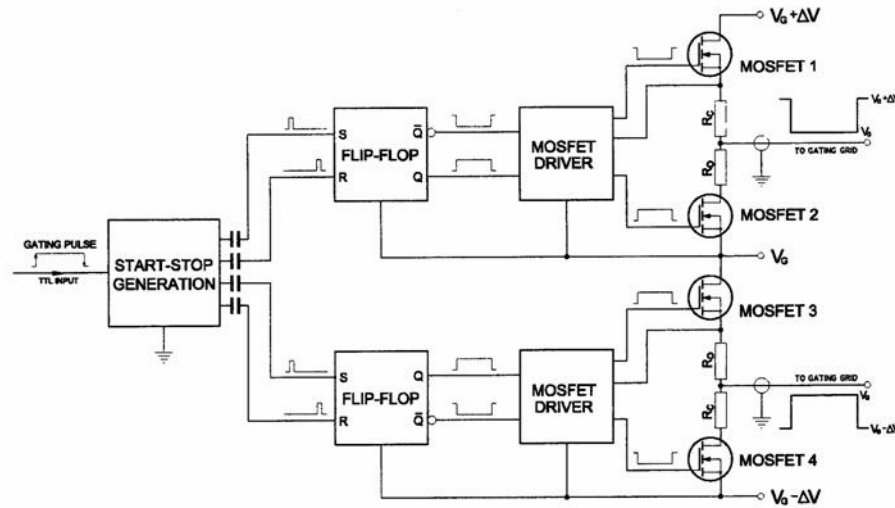
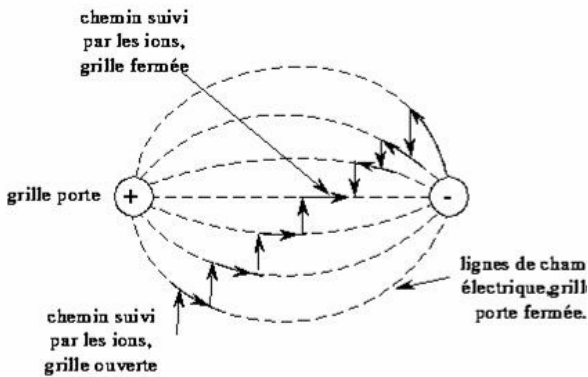
Perte début trace + perturbation électronique

- Ouverture permanente + fermeture après L1 NO

- Générateur pulse + et - très symétriques !



Géométrie des grilles des secteurs et lignes du champ électrique



(ALICE)

Figure 4.39: Block diagram of the gating pulser.

TPC PEP4 Conclusions

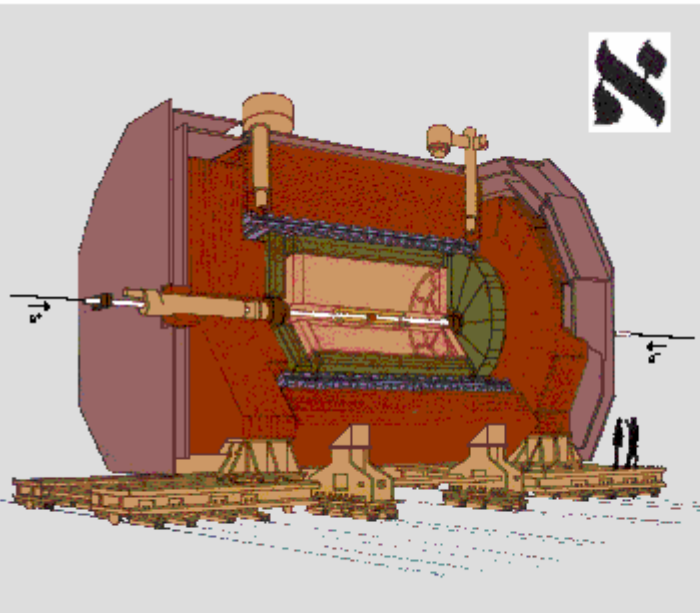
- A établi l'idée et les principes de base + validation

LA TPC C'EST POSSIBLE!

- Sera l'inspiratrice des TPC de LEP
- A montré la possibilité d'utiliser un chaîne de préamplis-amplis à haut gain et faible bruit.
- Devant les difficultés d'utilisation a poussé la recherche sur les FADC
- dE/dx optimiste

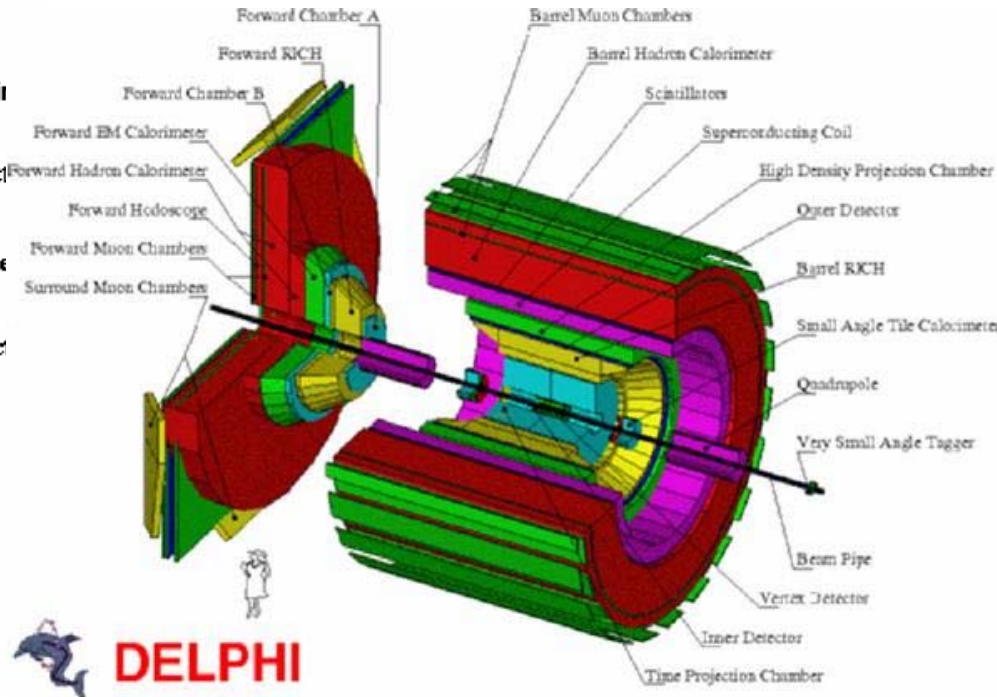
Les TPC à LEP

Aleph (1983-1989-2000) Delphi



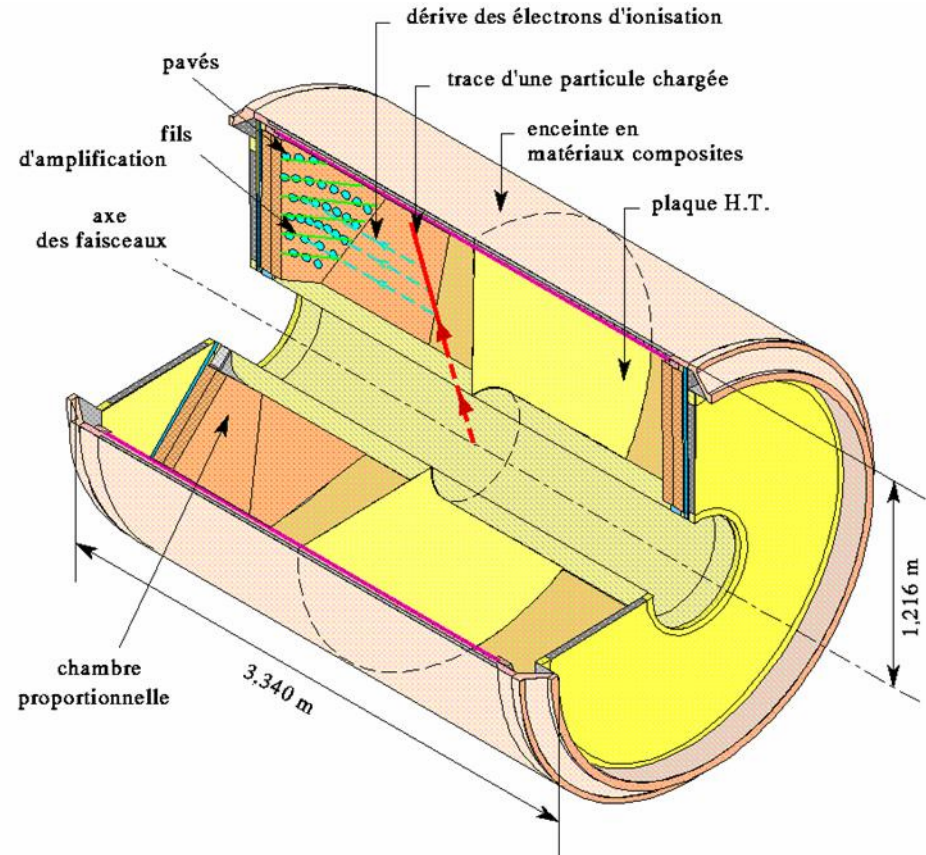
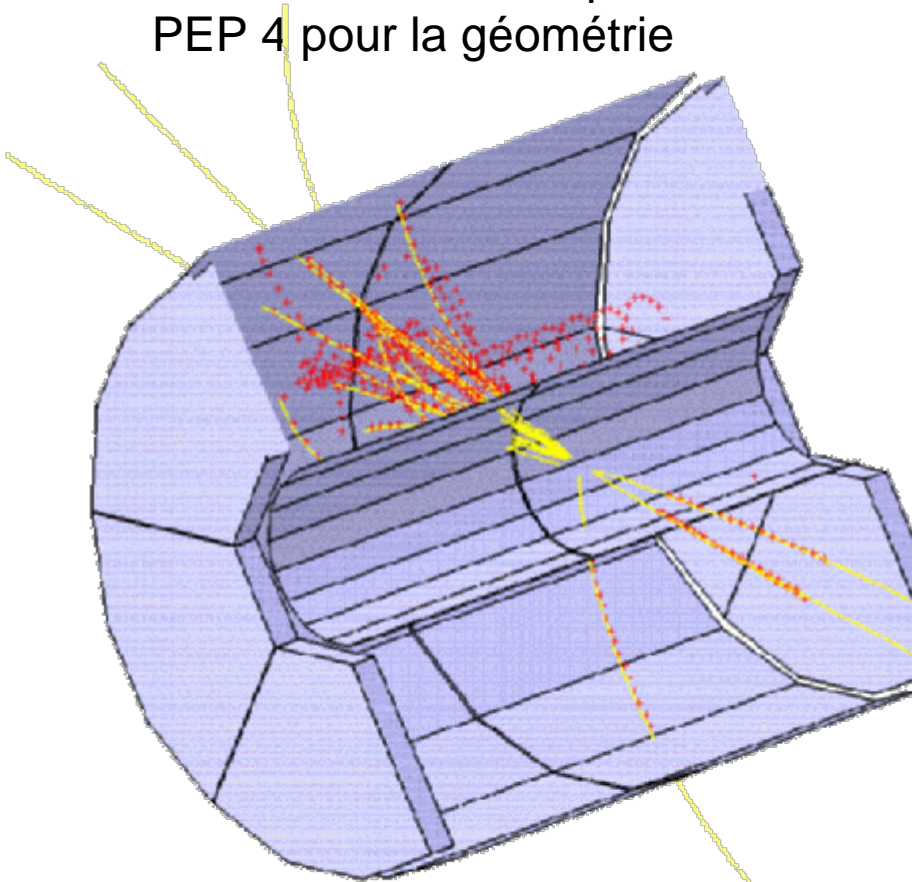
The ALEPH Detector

- Vertex Detector
- Inner Tracking Chamber
- Time Projection Chamber
- Electromagnetic Calorimeter
- Superconducting Magnet Coil
- Hadron Calorimeter
- Muon Chambers
- Luminosity Monitors



TPC Delphi

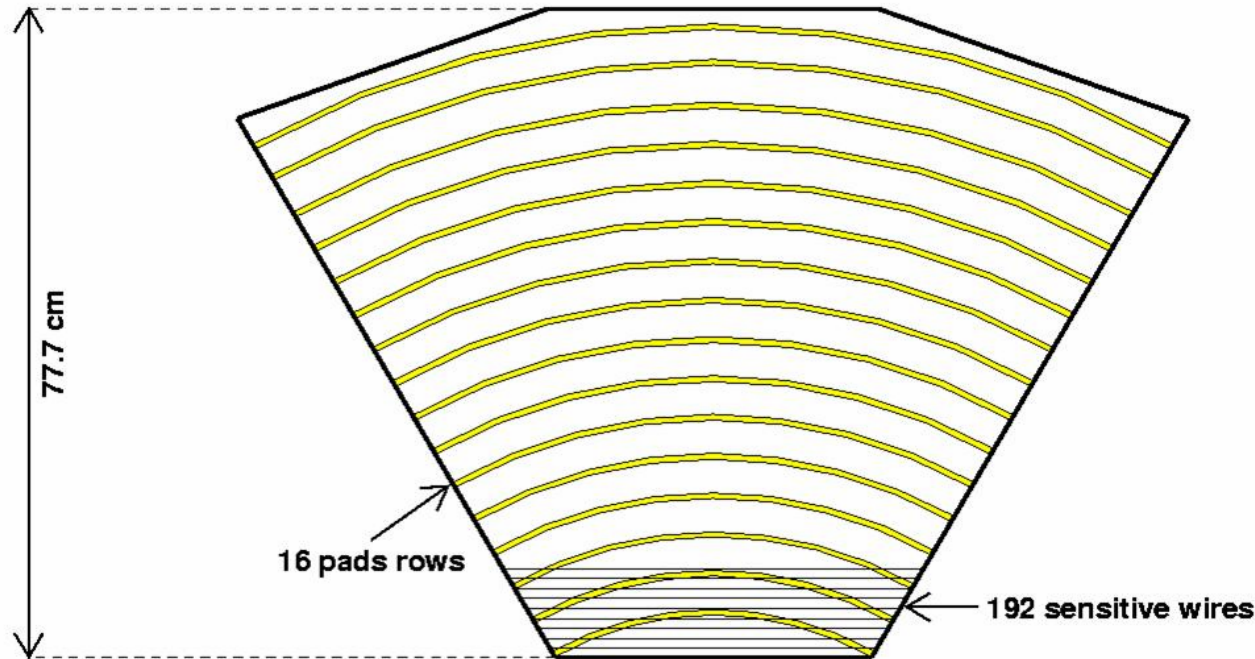
Très directement inspirée de PEP 4 pour la géométrie



TPC Delphi: caractéristiques

$P = 1$ atm Ar-CH₄ 80/20
2 x 1.34 m, r 0.325-1.16m
2 x 12 sectors

Résolutions:
R- ϕ = 180-280 μm
Z \sim 0.9 mm
Sep. 2 traces = 1.5 cm



12 x 1680 pads, 12 x 192 fils \rightarrow 22464 canaux

TPC Delphi:secteurs et cage HT



Cage externe

Plaque HT

Secteur(pads)

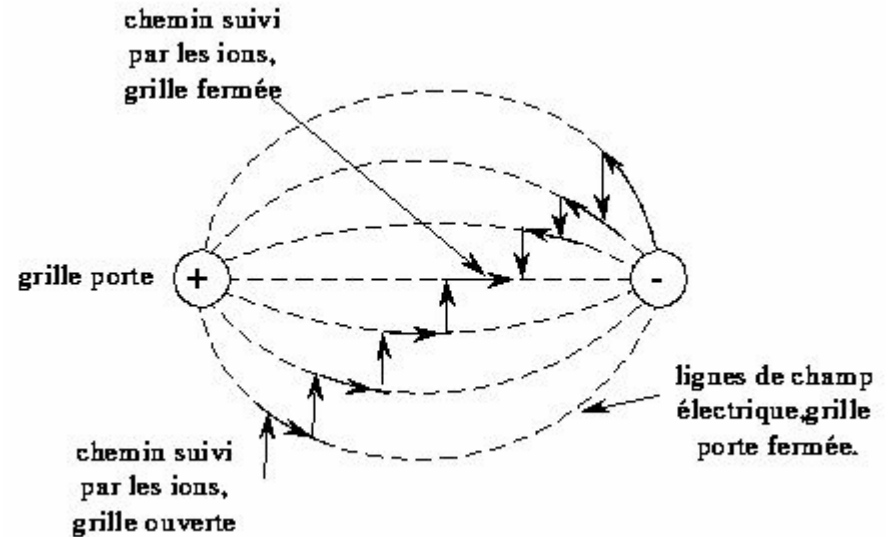
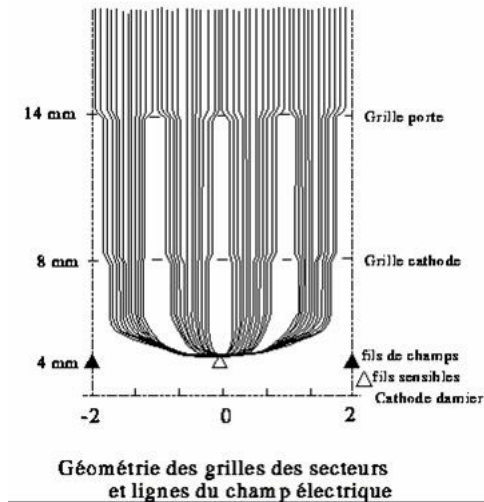
Resistances HT

Cage interne



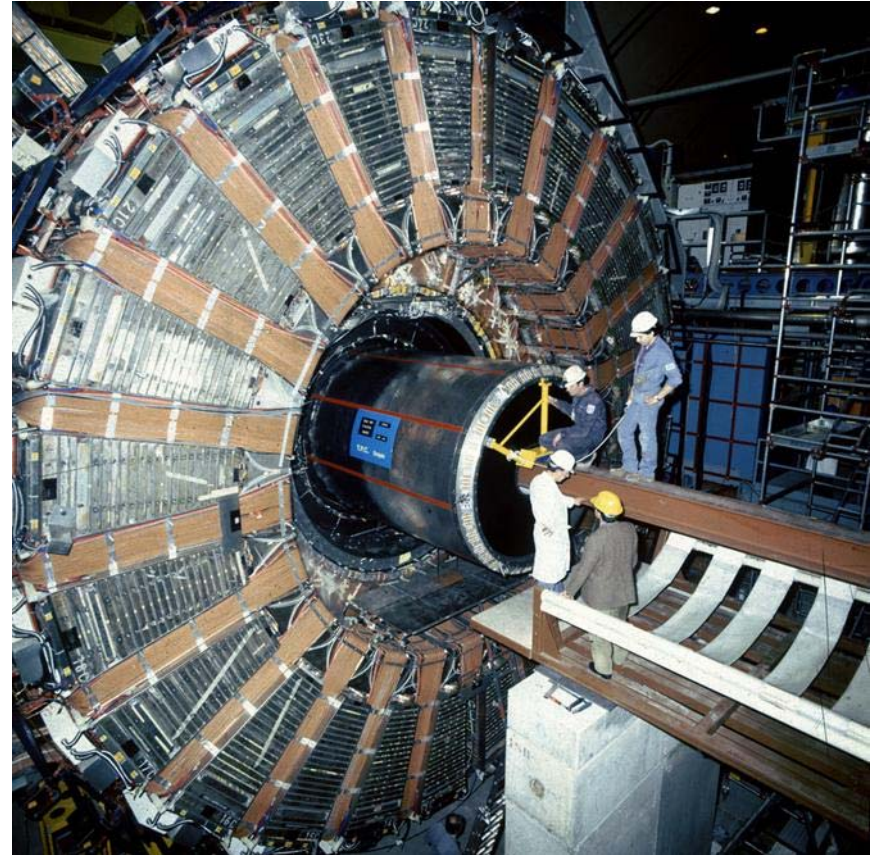
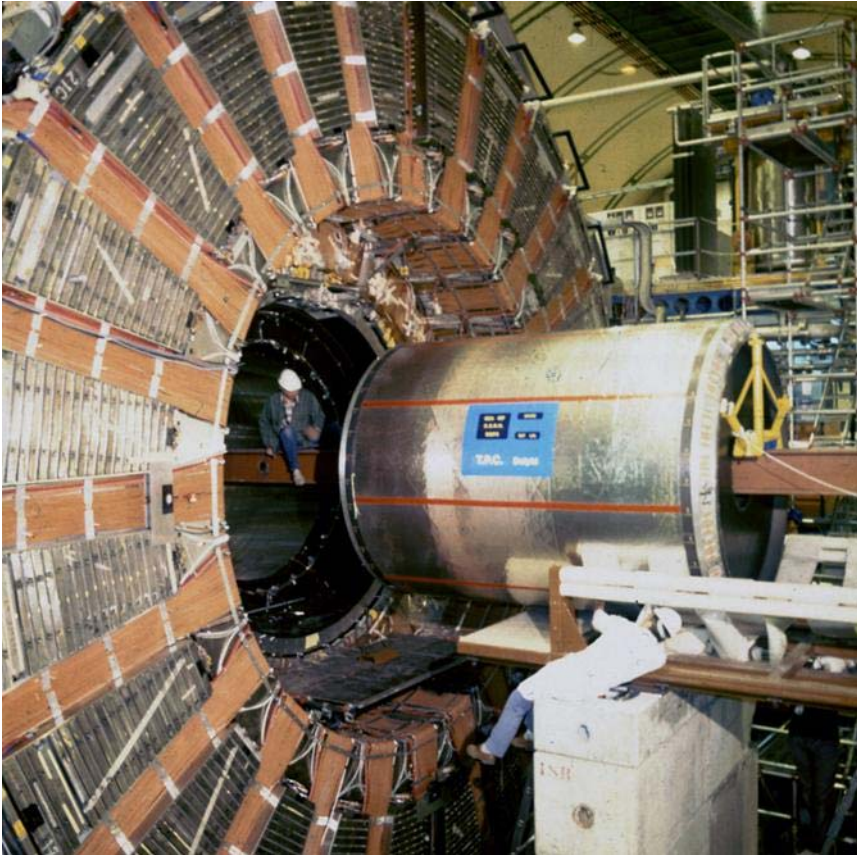
TPC Delphi: champs électriques et grilles

$E = 150 \text{ V/cm}$, $HT \sim 20 \text{ KV}$



Gate pulsée ou statique

TPC Delphi



TPC Delphi: chaîne électronique

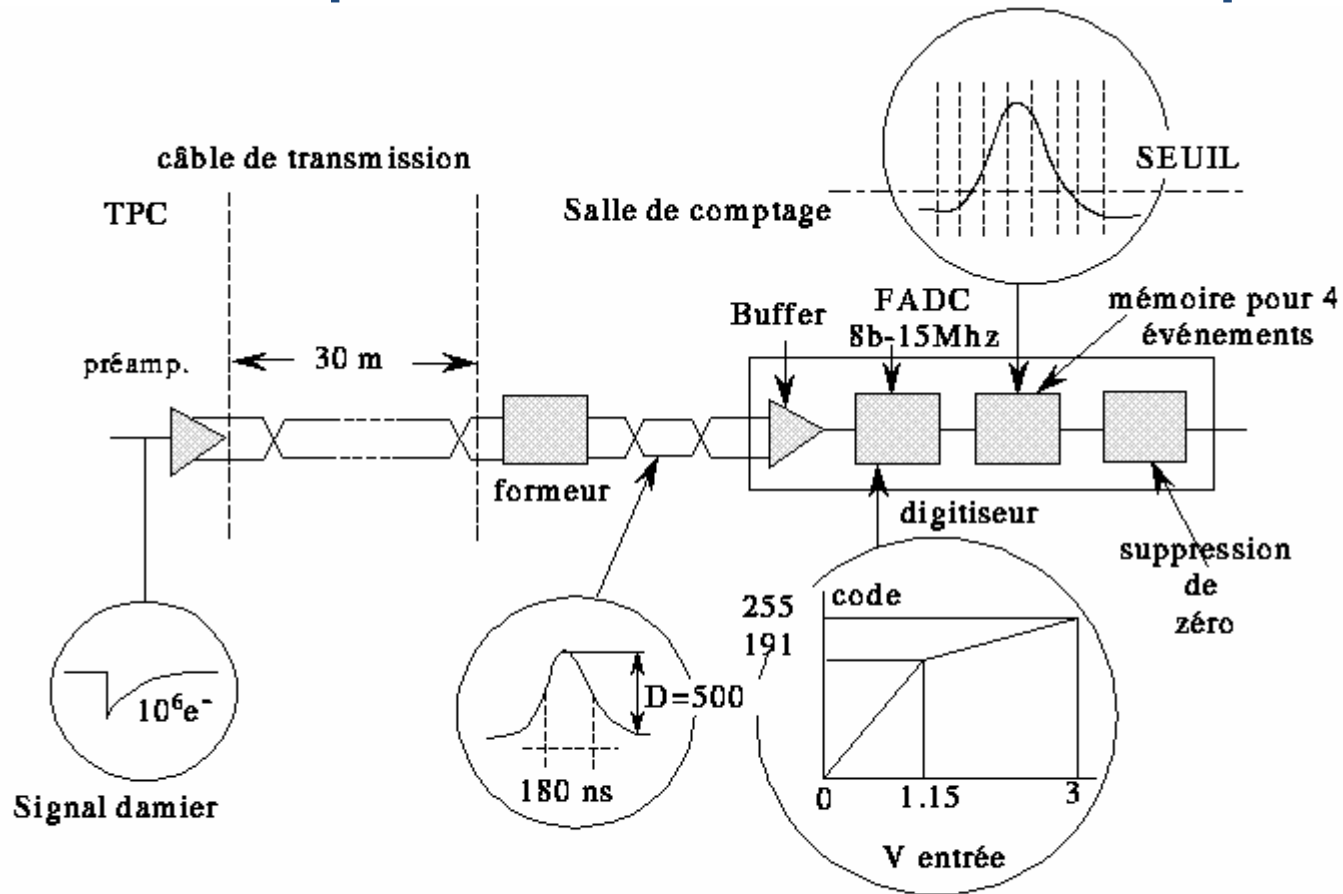


Schéma de la chaîne électronique

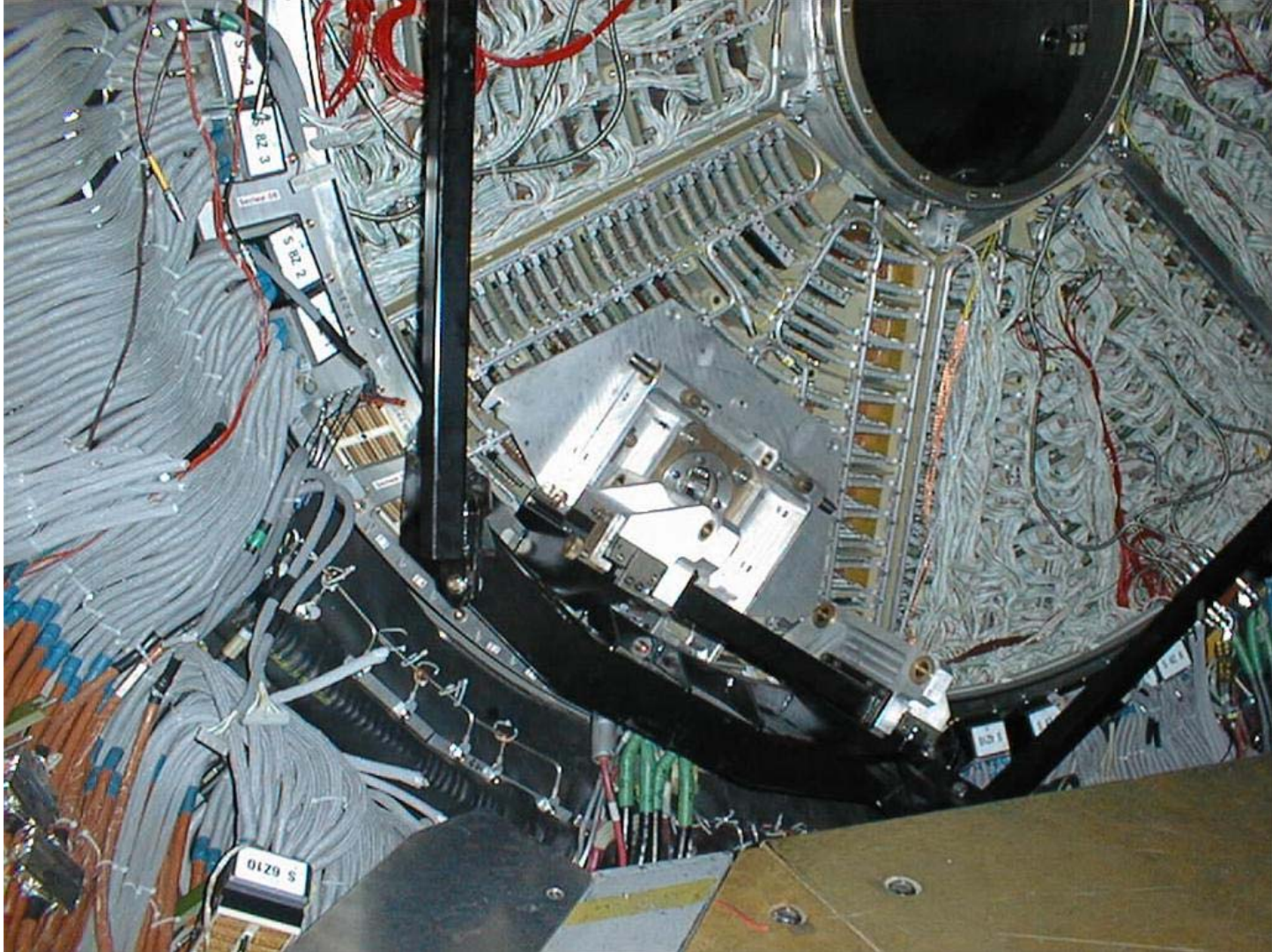
TPC Delphi



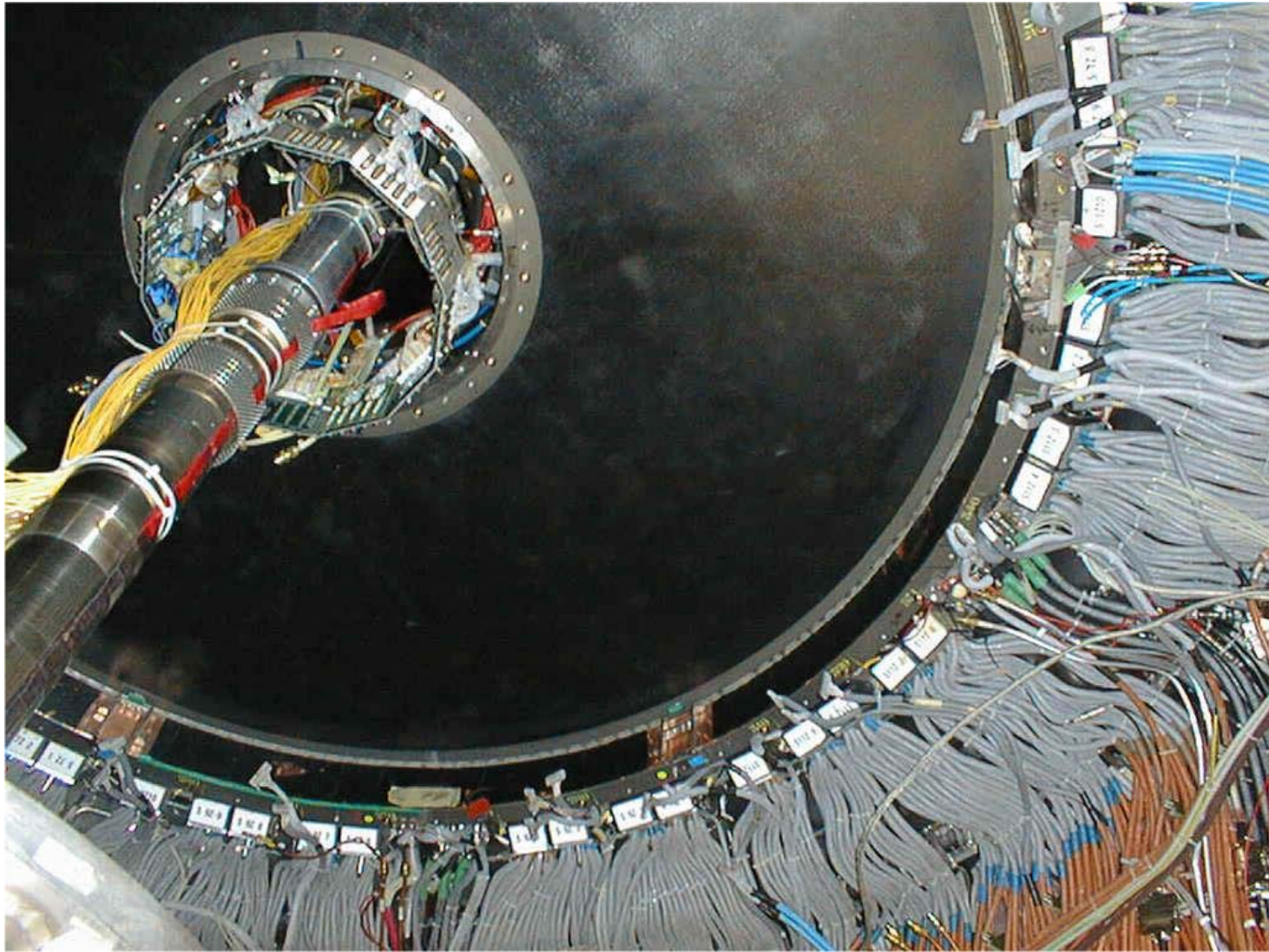
TPC Delphi



TPC Delphi



TPC Delphi



TPC Delphi:préamplis et amplis

Préampli: BF 992 MOS-FET

Hybride: pole zéro + émetteur de ligne

Dissipation 42 mW

16 hybrides/carte (alu + refroid. tuyau eau)

Ampli-Shaper: 2 sections ampli-filtre actif

Shaping 170 ns FWHM

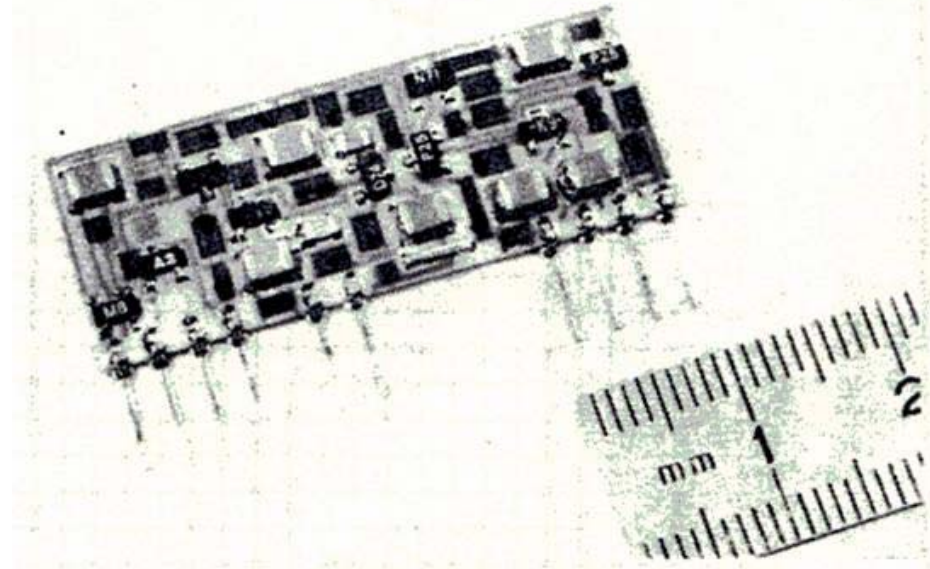
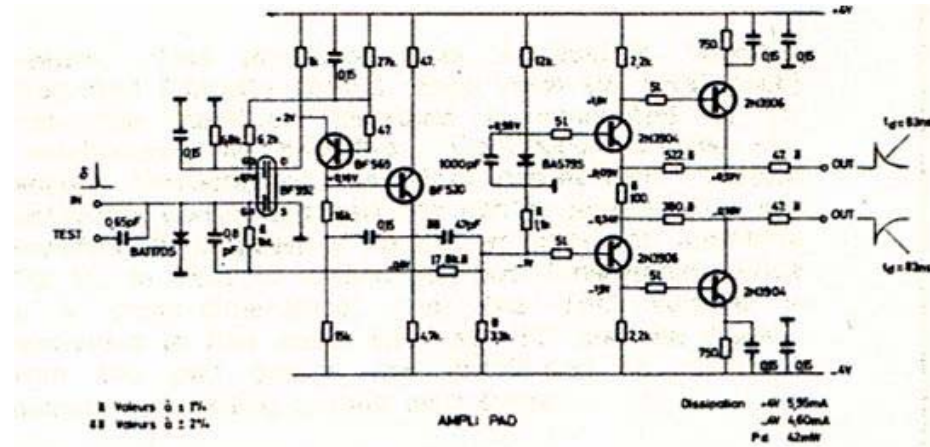
Receveur de ligne sym. 2 x 60 W

Controle de gain (sw) steps < 1%

32 hybrides/carte FB

Discris pour trigger (fils)

Bruit pads 500 e- sur 5 pF, fils ~1000 e-
à 20 pF



TPC Delphi:digitiseurs

Buffer d'entrée dif. Thomson LM318

8-bit FADC Thomson EF 8308 15 MHz

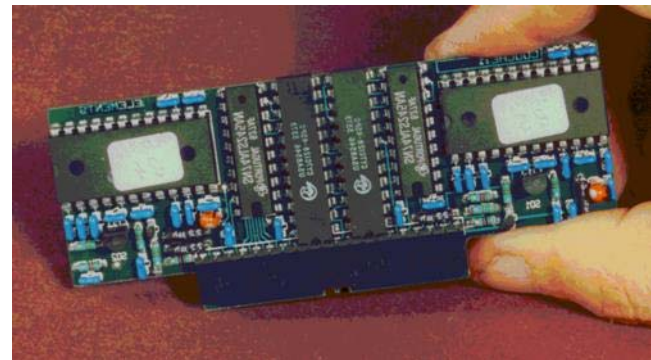
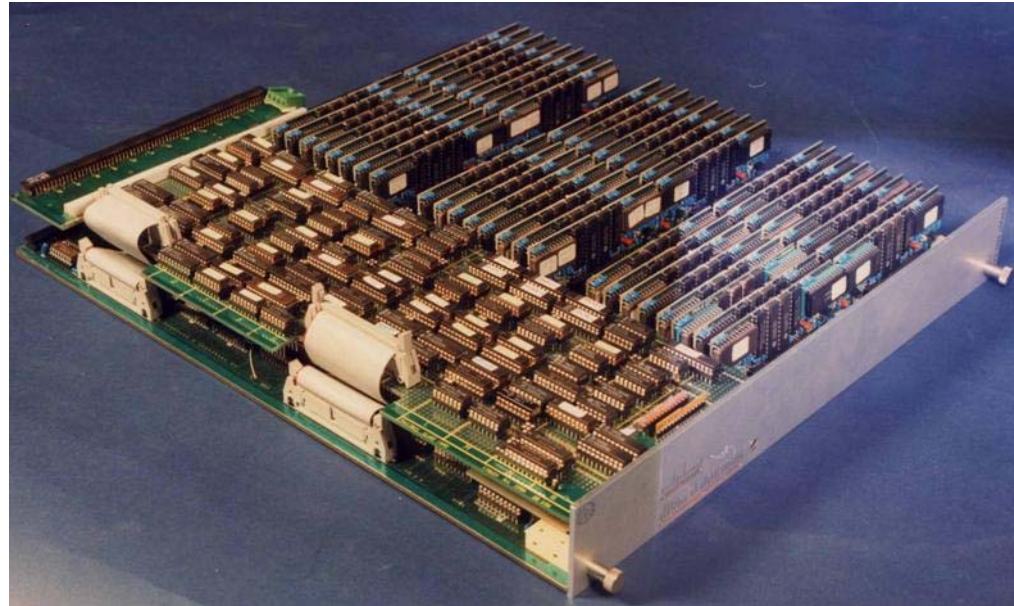
Caract. Bilinéaire, pas de 6.0 mV de 0 à 191 et 29.7 mV de 192 à 255.

Input max 3V, dynamique 500.

+/- 1 LSB intégrale et 0.7 LSB dif.

Mémoire en 4 pages de 512 bytes pour 4 événements de 511 tranches de temps (70 ns)

48 x 2 canaux par 3 U FB + carte ZS



TPC Delphi: digitisation & relecture

Digitisation: le FADC tourne en permanence. A chaque BCO (50KHz) le résultat est écrit dans une page mémoire au moins durant $2\mu\text{s}$ (attente trigger niveau I), puis soit l'événement est rejeté la plupart du temps et le pointeur mémoire est remis à 0, soit est gardé (1 KHz max) et l'écriture se poursuit pendant toute la durée de la dérive, 511 tranches de temps = $35\mu\text{s}$ pour une horloge à 14.67MHz. Ecriture en // dans toutes les 96 voies d'un digitiseur.

Zéro suppression et formatage: c'est le processus concurrent permis si le FADC n'écrit pas dans sa mémoire. Relecture de la mémoire, « clustering » en temps (tranches de temps adjacentes qui dépassent un seuil), fabrication d'une table de pointeurs (fixe) et formatage des clusters. Relecture en série des 96 voies, 1 seul ZS (automate HW) pour 96 voies de digitiseur. Info ZS dans mémoire de 2Kbyte/digitiseur.

Les digitiseurs de plusieurs châssis FB (FB clusters) sont lus par des processeurs de châssis (Fastbus Intersegment Processor FIP, MC68020). Taches principales: démarrage ZS si place mémoire, relecture mémoire de ZS et formatage, monitoring, calibration, clusterisation pour trigger niveau III (soft).

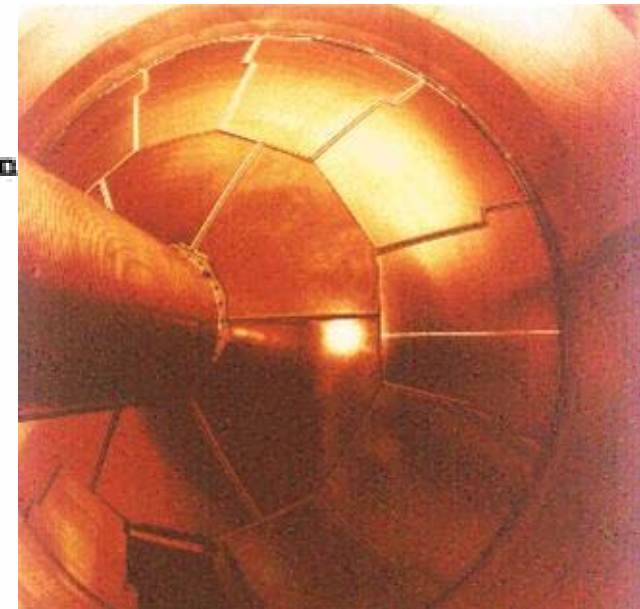
TPC Aleph

1 The Time Projection Chamber (TPC)

Description: Cylindrical drift volume with central electrode and planar wire chambers at the two ends. Electrons from ionization drift to the endplates along the electric field of 11 kV/m. Their charge is recorded by a system of proportional wires which are capacitively coupled to cathode readout pads. Each endcap has 6 inner sectors (type K) and 12 outer sectors (types M and W). Sectors have concentric rows of pads for 3 dimensional coordinate measurement ($r\phi$ from pad position, z from drift time). Wires across the sectors are used for dE/dx measurements. Each sector is equipped with special trigger padrows.

Gas: $ArCH_4$ (91 % : 9%) at atmospheric pressure.

Dimension:	Radius:	$R_{outer} = 1.8 \text{ m}$	$R_{inner} = 0.31 \text{ m}$
	Overall length	4.7 m	
	Drift length	2 x 2.2 m	
	Weight	3.6 t (with cables)	
	Gas volume	$43m^3$	
	Radiation length:	inner fieldcage	$0.023 X_0$
		outer fieldcage	$0.048 X_0$
		endplate	$0.35 X_0$



TPC Aleph

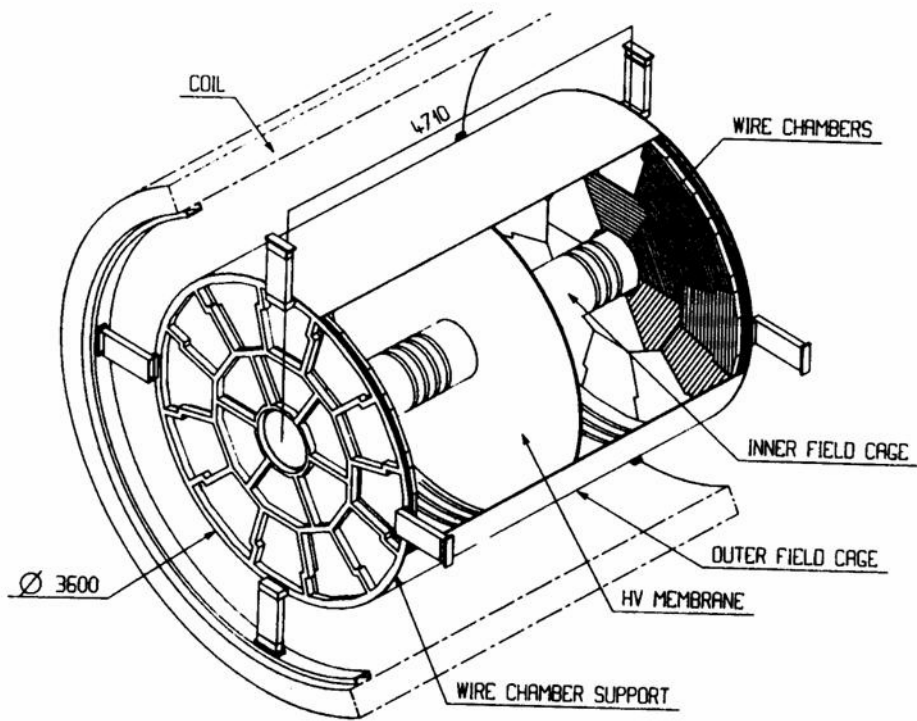


Fig. V.1 TPC overall view.

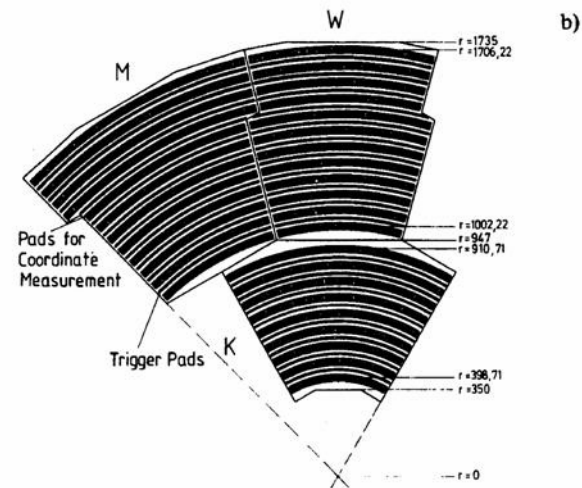
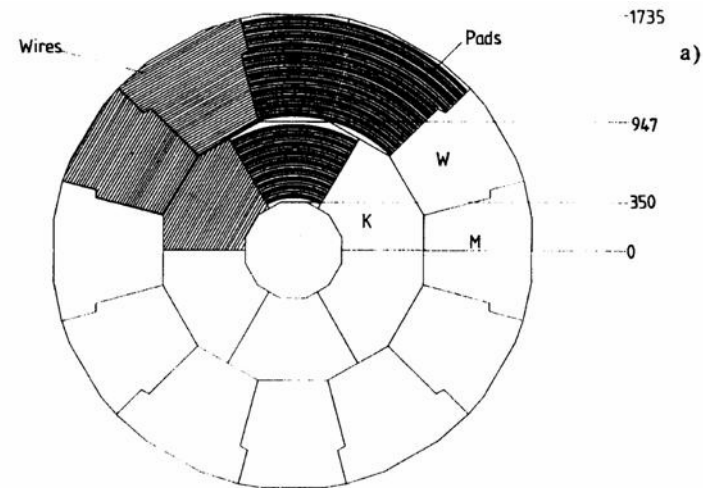


Fig. V.14 a) Overall geometry of the TPC end-plate.
b) A more detailed view of M, W, and K sectors.

TPC Aleph

Sectors:	R_{min}	R_{max}	No. padrows	No. trig. padrows	No. wires
Type K	38 cm	91cm	9	8	148
Type W,M	100 cm	170cm	12	11	196

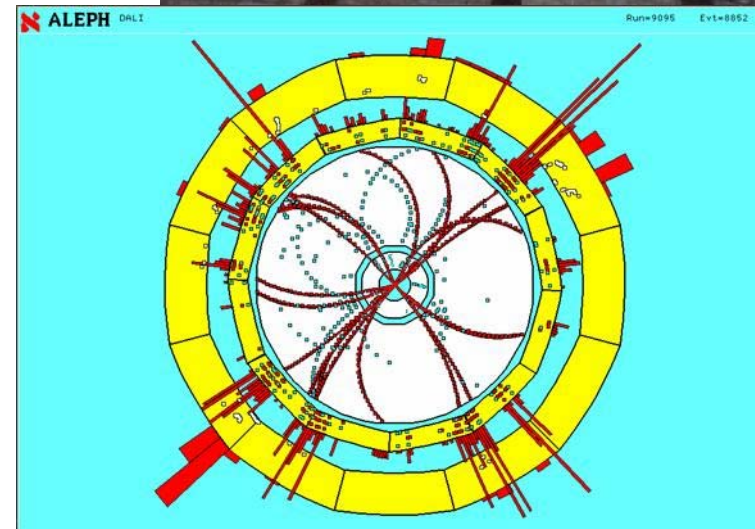
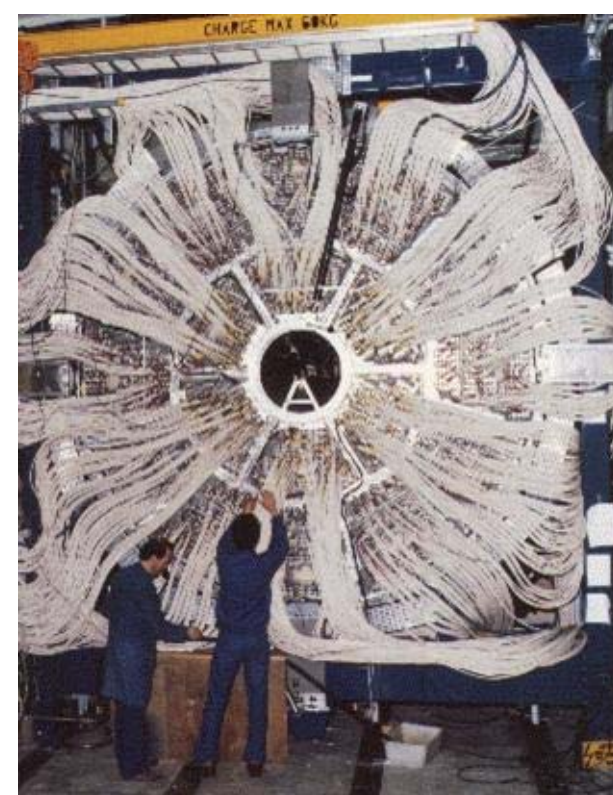
Pad size	$6.2 \times 30 \text{ mm}^2$
Pitch in r- ϕ	6.7 mm
Triggerpad size	$6.8 \text{ mm} \times 15^\circ$
Sense wire spacing	4 mm
Sense wire diameter	20 μm
Field wire diameter	127 μm
Diameter of other wires	76 μm
Central electrode thickness	25 μm

Gas Properties:	Drift velocity	5.2cm/ μs
	Longitudinal diffusion	4mm/ $\sqrt{\text{m}}$ per single electron.
	Transverse diffusion (B=15kG)	0.8mm/ $\sqrt{\text{m}}$ per single electron.
	Specific ionization for min. i. p. (incau)	90 electrons/cm

Readout:

	pads	wires	total
Channels	2 x 20502	2 x 3168	47340
TPDs	660	108	768
TPI's	36	36	72

Performance:	r ϕ spatial resolution	180 μm at 0° pad crossing angle
	z spatial resolution	1.2 mm (wires) with "small" z dependence 0.8 mm (pads) at $\theta = 90^\circ$
	Momentum resolution	$\Delta p/p^2 =$ TPC only: $1.2 \times 10^{-3} (\text{GeV}/c)^{-1}$ at 45 GeV ITC + TPC: $0.8 \times 10^{-3} (\text{GeV}/c)^{-1}$ at 45 GeV
	dE/dx resolution	4.5% for Bhabha electrons



TPC Aleph: électronique

Préampli intégration de charge

25 e- primaires = 1 MIP \rightarrow 15 mV

= $\frac{1}{4}$ du range dynamique FADC

Bruit 600 e-. 50 000 preamp

Shaper: receveur diff + pole zero

+ 2 filtres 1 MIP \rightarrow 0.5 V peak sortie

shaper

Largeur pulse 230 ns FWHM

Ampli & shapers hybrides

FADC: Thomson 8 bit

(comme Delphi)

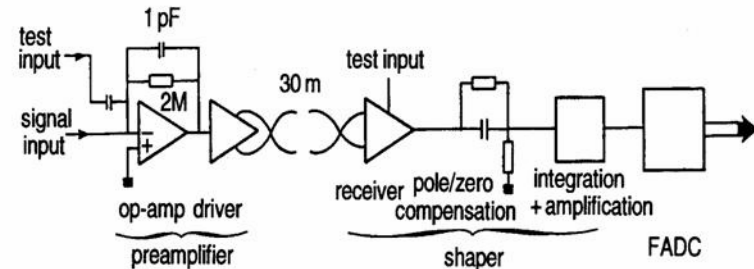


Fig. V.22 Functional diagram of the analog electronics chain.

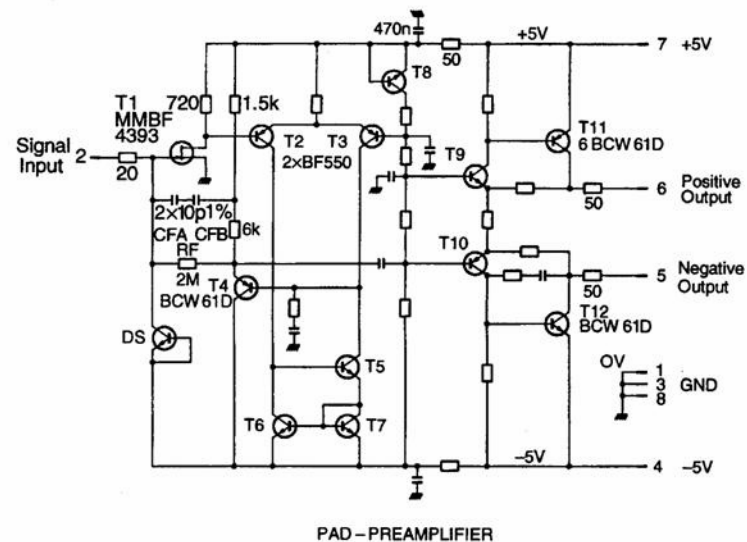


Fig. V.23 Circuit diagram of the pad amplifier.

TPC Aleph

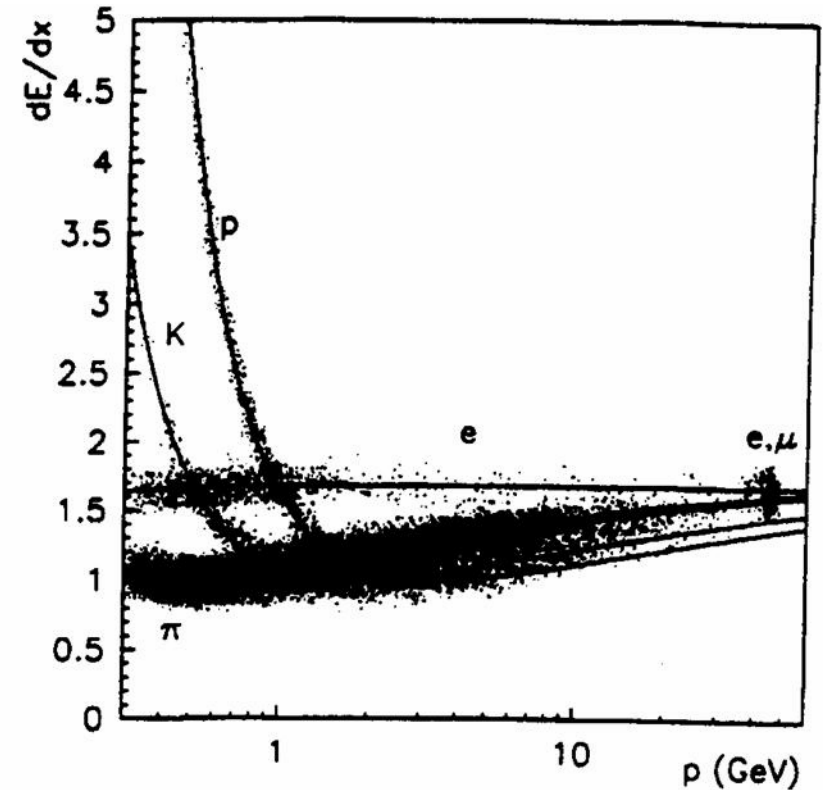
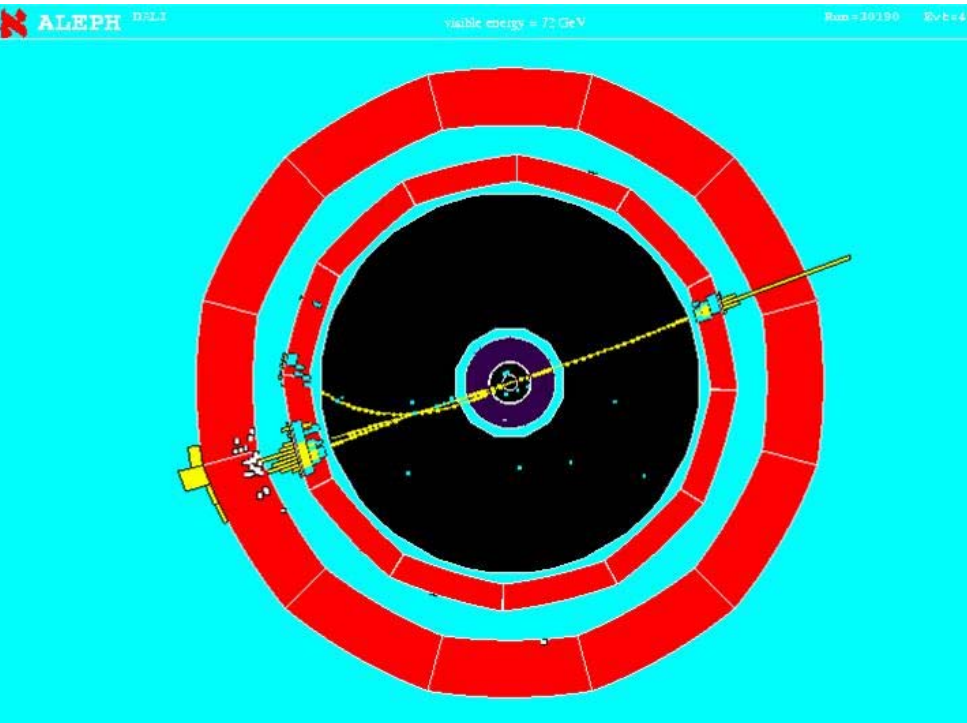


Fig. V.73 The measured dE/dx versus particle momentum for a sample of about 40,000 tracks. Each track was required to have at least 150 dE/dx measurements. The fitted parametrization is overplotted for electrons, muons, pions, kaons, and protons.

Les TPC à LEP: conclusion

Lep a été la machine idéale pour exploiter tout le potentiel des TPC:

- Utilisation optimale des “longues dérives”. BC @ 50KHz
- Peu de bruit de fond...
- Evénements physiques!
- Electronique/taille optimale
- Electronique « solide »
- Investissement rentabilisé (89→2000)

1 fil casse apres 10
ans...

