

RESEARCH AND DEVELOPMENT FOR THE USE OF A MICROMEAS TPC AS A TRACKER FOR THE FUTURE LINEAR COLLIDER

Sylvestre Baudrand

Nicolas Kerschen

DEA Champs, Particules, Matière 2002-2003

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay - 15, rue Georges Clemenceau - 91406 Orsay, France.

Stage encadré par P.Colas (DAPNIA/SPP) et V.Lepeltier (LAL Orsay)

Abstract

Different end-plates of a time projection chamber (TPC) are being tested to determine the best possible configuration for the tracker of the detection part of an electron-positron linear collider. The labs we visited are working on the research and development for a TPC with a Micromegas end-plate. In the following we will begin with the description of this TPC and its advantages, then we will explain the Physics of such a detector and finally the different tests that have been done and the ones that are planned, like a cosmic test in a high magnetic field. We will insist on the ion feedback, which is a very important issue in view of the high beam-background rate at the Linear Collider.

Les développements technologiques permettent aujourd'hui la construction d'accélérateurs linéaires atteignant les énergies requises dans la recherche actuelle en physique des hautes énergies. Plusieurs projets pour la construction de collisionneurs linéaires sont ainsi élaborés. Les enjeux de ces collisionneurs sont: l'étude de la brisure de la symétrie électrofaible, l'étude détaillée du boson de Higgs, la recherche de particules supersymétriques, la recherche de phénomènes au-delà du modèle standard... En concurrence avec les projets américains (NLC) et japonais (JLC), le projet TESLA (Tera Electronvolt Superconducting Linear Accelerator) est un projet européen, piloté par DESY (Deutsches Elektronen SYchrotron), ayant pour but la réalisation d'un collisionneur électron-positon, d'une longueur de 33 km et d'une énergie pouvant atteindre 800 GeV. Autour de la zone d'interaction e^+e^- il y aura principalement quatre types de détecteurs dans un champ magnétique de 4 teslas: détecteurs de vertex, trajectographe, calorimètre électromagnétique, calorimètre hadronique. Le groupe de travail ECFA-DESY chargé de l'étude de la physique et des détecteurs pour un collisionneur linéaire électron-positon, envisage d'utiliser une TPC comme trajectographe. Une collaboration est chargée de la recherche de la meilleure configuration possible pour la TPC incluant le choix des détecteurs aux extrémités (end-plates). En effet, les possibilités sont l'utilisation du détecteur GEM, de détecteurs Micromegas, des deux en association, ou de chambres à fils standard (voir plus bas pour le fonctionnement de Micromegas). Une collaboration regroupant des laboratoires de Saclay (DAPNIA), Orsay (LAL et IPN) et de Berkeley (LBL) est chargée de l'étude de la TPC à lecture Micromegas. Le Program Review Committee (PRC) de DESY encourage en particulier les tests des différentes TPC dans un haut champ magnétique. Ainsi la collaboration a effectué cet été un test d'une petite TPC Micromegas dans un champ magnétique de 2 teslas, et prépare un test avec des cosmiques dans ce même champ magnétique.

La chambre à projection temporelle

La chambre à projection temporelle (TPC) est un détecteur gazeux permettant de reconstruire la trace d'une

particule chargée la traversant. C'est un cylindre rempli de gaz (le choix du gaz sera discuté plus tard) dans lequel règne un champ électrique axial (axe z) (voir figure (1)) entre les extrémités du cylindre et une plaque haute tension se trouvant au milieu et étant portée à un potentiel négatif. Lorsqu'une particule chargée traverse le détecteur, elle ionise le gaz et les électrons dérivent, sous l'action du champ électrique, vers un système de lecture permettant de déterminer la position de la particule et donc de reconstruire sa trace point par point. Les dimensions transverses x et y sont données par le système de lecture et z est donné par le temps de dérive (pour plus de détails voir le paragraphe sur Micromegas et la partie phénomènes physiques). Le détecteur de lecture étudié est un détecteur Micromegas.

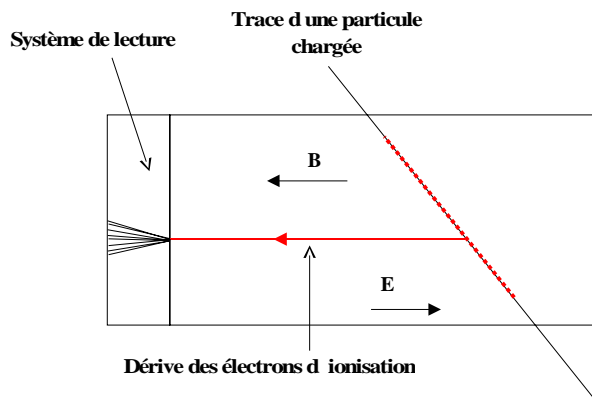


Figure 1: Principe de fonctionnement d'une TPC

En plus du champ électrique, un champ magnétique de même direction a principalement trois effets. Il permet de courber les trajectoires des particules incidentes. Il réduit la diffusion des électrons pendant la dérive, ce qui améliore la résolution spatiale du détecteur. Il permet de couper le bruit de fond (les effets du champ magnétique ainsi que la dérive seront discutés plus en détails dans la partie sur les phénomènes physiques). L'avantage de la TPC par rapport aux trajectographes en silicium est principalement le fait qu'on peut avoir un grand volume de détection et un grand nombre de points de mesure tout en limitant la quantité

de matière avant le calorimètre au strict minimum.

Le détecteur Micromegas

Micromegas (MICRO MESH Gaseous Structure) est un détecteur gazeux basé sur la création et la dérive de paires électron-ion dans un espace de conversion et l'amplification par avalanche des électrons dans un espace d'amplification (voir figure (2)). La lecture du signal se fera à l'aide de damiers (pads) en cuivre, collectant les électrons issus de l'amplification et d'une électronique permettant l'amplification de ce signal ainsi que sa mise en forme. La dérive des électrons et des ions est assurée par un champ entre la cathode (première grille) et les pads. L'espace de conversion et l'espace d'amplification sont délimités par la microgrille (deuxième grille). Le champ d'amplification est créé entre les pads et la microgrille en polarisant négativement celle-ci à une tension de plusieurs centaines de volts. Les champs dans les deux espaces sont uniformes avec un champ faible d'environ 100-200 V/cm pour l'espace de conversion et un champ fort d'environ 50 kV/cm pour l'espace d'amplification.

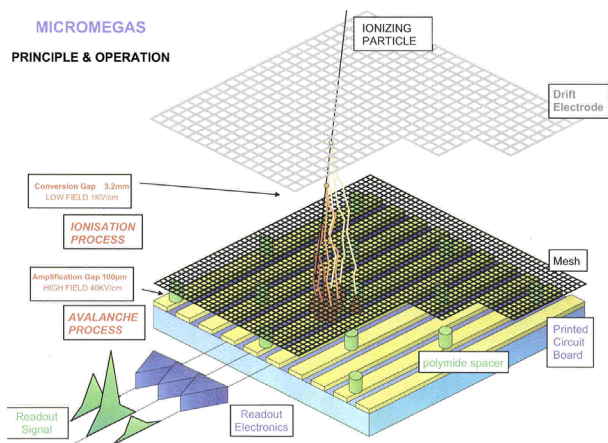


Figure 2: Principe de fonctionnement du détecteur Micromegas

C'est la différence importante entre ces deux champs qui crée un effet d'entonnoir au niveau de la microgrille (voir figure (4)). Les lignes de champ sont telles que les électrons qui dérivent vers la microgrille passent sans perte à travers les trous vers l'espace d'amplification. La largeur de l'espace d'amplification (amplification gap) est généralement de 50 à 100 microns. Quand des électrons passent dans l'espace d'amplification, ils acquièrent assez d'énergie pour ioniser les molécules du gaz, créant ainsi des paires électron-ion dont les électrons pourront à nouveau ioniser le gaz et ainsi de suite, multipliant les électrons par un processus d'avalanche. Les ions positifs ainsi créés dérivent vers la cathode en suivant les lignes de champ. La plupart des ions sont collectés par la microgrille grâce aux phénomènes d'entonnoir et de diffusion de l'avalanche, mais une faible fraction des ions suivent les lignes de champ remontant vers l'espace de dérive. Ce phénomène de retour des ions vers l'espace de dérive (ion feedback) sera décrit

en détails dans la suite. C'est un phénomène de très grande importance pour ce genre de détecteur car le passage des ions dans l'espace de dérive entraînerait la formation d'une charge d'espace qui modifierait le champ électrique, ce qui est bien sûr un effet non désiré.

La résolution sur les positions dans le plan xy de la particule incidente dépend de la diffusion transverse des électrons dans l'espace de dérive. Si après avalanche les électrons sont collectés par un seul pad, l'incertitude sur la position de l'amas d'électrons à l'origine de l'avalanche est la largeur du pad divisée par $\sqrt{12}$, tandis que si plusieurs pads sont touchés on pourra augmenter la précision sur la position en prenant le barycentre des charges collectées provenant d'un même signal. On essayera donc de diminuer la diffusion transverse dans l'espace de dérive.

La résolution en z dépend de la diffusion longitudinale des électrons dans l'espace de dérive. La position en z est déterminée en connaissant la vitesse de dérive des électrons et en déterminant le maximum de la distribution en temps du signal.

En associant une TPC et un détecteur Micromegas, la TPC jouera le rôle de l'espace de conversion et de dérive pour le détecteur Micromegas.

Résumons les avantages de Micromegas: L'uniformité du champ électrique dans l'espace d'amplification assure une bonne résolution sur la perte d'énergie. De plus, le faible gap permet une collection rapide du signal. La microgrille permet le passage de la totalité des électrons vers l'espace d'amplification et la collection rapide et efficace des ions qui remontent vers l'espace de dérive. Micromegas permet d'avoir une bonne résolution spatiale et temporelle et en plus la construction d'une TPC Micromegas est facile et peu coûteuse.

Phénomènes physiques

Lorsqu'une particule chargée traverse le détecteur, celle-ci va interagir de différentes manières avec le gaz. Cette interaction se caractérise par un dépôt d'énergie de la particule dans le milieu ainsi que par la déviation de cette particule. Ces effets sont le résultat principalement de deux processus: les collisions inélastiques avec les électrons atomiques du milieu, et la diffusion élastique par les noyaux. En réalité d'autres processus sont également à l'œuvre mais de manière beaucoup moins fréquente. Parmi ceux-ci on distingue l'excitation des molécules, l'émission de lumière Cerenkov, les réactions nucléaires ou encore le bremsstrahlung. Lorsque les particules qui interagissent avec le détecteur sont relativement lourdes ce sont les collisions inélastiques qui jouent un rôle largement prépondérant. L'énergie ainsi transférée lors de la collision peut provoquer une ionisation ou une excitation des atomes. Ce n'est que l'ionisation qui donne systématiquement lieu à la création d'un ion et d'un électron libre. Il est toutefois possible que la molécule ou l'atome excité participe à d'autres réactions qui entraînent une ionisation. On retiendra comme ordre de grandeur 30 pour le nombre de paires créées par centimètre et 20 eV pour l'énergie nécessaire à la création d'une paire comme c'est le cas dans l'argon à pression atmosphérique.

La distance intermoléculaire typique d'un gaz à pression atmosphérique est de l'ordre de 30 angström. Compte tenu de cette distribution, les porteurs de charges émis lors du passage de la particule diffusent dans ce milieu. Lors de ce processus ils entrent en collision avec les atomes du gaz et s'écartent de leur position d'origine. Dû à la présence des champs électrique on parle de diffusion longitudinale, le coefficient de diffusion longitudinale σ_l est l'écart type de la distribution des positions d'un électron après diffusion sur une longueur l . Il est donné par :

$$\sigma_l = D_l \sqrt{l}$$

avec l , la longueur de dérive et D_l le coefficient de diffusion longitudinale. Dans l'espace de dérive il s'agit typiquement d'une diffusion gaussienne de l'ordre de $\sigma = 500 \mu m$ par \sqrt{cm} . C'est cette diffusion qui détermine la résolution en temps et donc en z (de l'ordre de 100 ns). On souhaite également utiliser un champ magnétique, car dans un détecteur la mesure de la quantité de mouvement se fait à l'aide de la courbure des trajectoires. Ce champ limite sensiblement la diffusion dans le plan transverse à la trajectoire de dérive. Cette diminution est donnée par la relation

$$\sigma_t(B \neq 0) = \frac{\sigma_0}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}$$

où $\omega = \frac{eB}{m}$ est la pulsation due au champ magnétique. Cet effet est bénéfique car il permet une amélioration de la résolution spatiale (typiquement de l'ordre d'un rapport de 15 à 20 pour un champ de 4 teslas). En outre, la résolution potentielle sur le damier est améliorée par le nombre d'électrons contribuant au signal. En effet la résolution est alors divisée par la racine carrée du nombre d'électrons récoltés, ce qui conduit à des résolutions potentielles de quelques dizaines de microns par point.

Tests réalisés

Gain, dérive et gaz

Nous avons vu que la dérive des électrons se fait à vitesse constante. Cette vitesse dépend cependant de la composition du mélange gazeux, mais également du champ électrique de dérive et de la pression. Pour un mélange gazeux optimal on a une vitesse de dérive comprise entre 5 et 10 cm/ μs . On distingue deux composantes dans ce mélange: l'élément principal et le quencher. L'élément principal est le composant majoritaire, on choisit souvent un gaz rare car il est inerte chimiquement. D'autre part ces atomes étant très peu électronégatifs, la probabilité de capture d'un électron par un atome est très faible. Pour des raisons de coût l'argon est souvent utilisé. Les gaz rares présentent toutefois des inconvénients. Ils ne permettent pas d'atteindre des gains élevés car peuvent être facilement excités, et en se désexcitant émettre un photon (12 eV environ), ce photon se propage dans le gaz et peut atteindre une surface métallique où il produira un électron par effet photoélectrique, ce qui déclencherait une nouvelle avalanche. Cela limite très fortement le gain avant

claquage. On utilise donc des quenchers, des molécules polyatomiques qui possèdent de nombreux états excités non radiatifs et donc sont en mesure d'absorber les photons de désexcitation de l'argon.

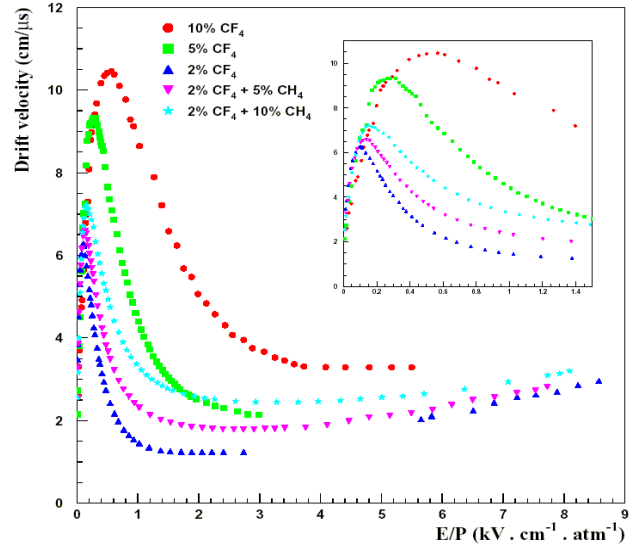


Figure 3: Vitesse de dérive des électrons dans un mélange d'argon et de CF_4 . (tiré de la ref. 8)

La figure (3) présente l'évolution de la vitesse de dérive pour plusieurs mélanges gazeux. La connaissance de la vitesse de dérive permettant de d'obtenir la position de l'ionisation sur l'axe de dérive, il est important qu'elle soit stable. D'autre part pour l'étude d'événements à forte luminosité, il faut un court temps d'occupation de la chambre, il est donc préférable que la vitesse de dérive soit la plus grande possible. Le mélange Ar + 2% CF_4 semble un compromis intéressant tant pour les propriétés de dérive – on obtient un maximum de vitesse à bas champ –, que pour les propriétés d'amplification car ce mélange permet d'atteindre des gains suffisamment élevés (plusieurs milliers). Des tests ont permis de s'assurer qu'il n'y avait pas de détérioration du gain de ce mélange sur des temps longs.

Le retour des ions

Le nombre d'électrons produits dans l'espace d'ionisation étant insuffisant pour produire un signal mesurable, ces électrons sont multipliés dans l'espace d'amplification. C'est le processus d'avalanche qui est à l'origine de cette multiplication. Le champ présent dans l'espace d'amplification étant très intense (plusieurs dizaines de kV/cm), les électrons acquièrent assez d'énergie entre deux chocs pour ioniser à leur tour d'autres molécules de gaz. Le facteur de multiplication varie entre 10^2 et 10^6 suivant le mélange gazeux utilisé. La forte variation de champ électrique entre l'espace de dérive et l'espace d'amplification est à l'origine d'un phénomène "d'entonnoir".

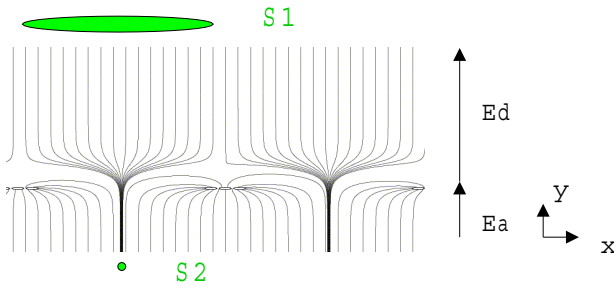


Figure 4: Lignes de champ au niveau de la microgrille

Sur la figure (4) on observe un resserrement des lignes de champ de l'espace de dérive dans l'espace d'amplification, le flux à travers S1 (espace de dérive) est identique à celui à travers S2 (espace d'amplification), d'où $S_1/S_2 = E_A/E_D$

Lors de l'avalanche, de nombreux ions positifs sont créés. Ces ions remonteraient tous dans l'espace de dérive (retour des ions), si les électrons ne subissaient pas une diffusion latérale (de l'ordre de 10 à 20 μm).

La majorité des ions suivent donc d'autres lignes de champ (sans subir, eux, de diffusion car ils sont trop lourds) qui les conduisent vers la microgrille. Concernant la création des ions, des calculs tenant compte de la structure périodique de la grille ainsi que de la diffusion gaussienne de l'avalanche confirment que lorsque la distribution de création des ions est suffisamment uniforme, le retour des ions est égal au rapport des champs dans le cas d'une microgrille à 1500 lignes par inch, et de 3.2 fois le rapport des champs pour 500 lpi. Lorsqu'elle n'est pas parfaitement uniforme, le retour des ions est supérieur au rapport des champs. Il faut donc pour limiter le retour des ions un rapport des champs E_D/E_A faible.

D'autre part le retour des ions a été mesuré expérimentalement, on utilise pour cela un détecteur Micromegas irradié à l'aide d'un canon à rayon X (voir figure 5).

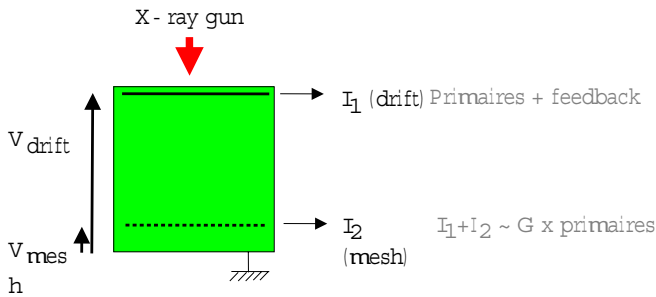


Figure 5: Mesure expérimentale du retour des ions

On applique deux tensions, V_{mesh} à la microgrille pour l'amplification, V_{drift} à la cathode pour la dérive. Pour évaluer le retour des ions on mesure les intensités à travers les alimentations de la cathode (I_1) et de la microgrille (I_2). Sachant que I_1 est due à l'ionisation primaire (création d'ions provenant de la particule incidente) et à la fraction

des ions non piégés par la microgrille et ayant dérivé vers la cathode, on peut conclure que: $I_1 = I_0(1 + fG)$, où f représente la fraction des ions non piégés, G est le gain d'amplification des électrons, et I_0 est le courant associé à une ionisation primaire avec $G=1$. De même en prenant en compte le courant correspondant aux ions formés dans l'espace d'amplification et les courants débités par les alimentations, on a: $I_1 + I_2 = I_0G$. De ces deux relations on tire la valeur de la fraction du retour des ions $f = \frac{I_1 - I_0}{I_1 + I_2}$. On trouve expérimentalement que pour une grille de 500 lignes par inch (un pas de 50 microns) cette fraction vaut 4 fois le rapport des champs contre 3.2 fois théoriquement. Ceci est un accord raisonnable compte tenu des incertitudes sur les paramètres de la simulation et sur l'épaisseur du gap. Des mesures de retour des ions ont également été effectuées en présence d'un champ magnétique dans un aimant supraconducteur pouvant atteindre 2 T. Elles ont révélé que la fraction du retour des ions définie plus haut est quasiment indépendante du champ magnétique. Cette expérience effectuée en juin 2002, a démontré le fonctionnement de Micromegas en champ magnétique.

Construction d'une TPC pour un test avec des rayons cosmiques

Cette expérience est en cours de réalisation. Elle comportera l'utilisation de l'aimant supraconducteur décrit plus haut. Elle a pour but de tester la TPC en association avec le détecteur Micromegas à une échelle plus réaliste et dans un champ magnétique. On pourra ainsi vérifier les nombreux aspects prometteurs de la TPC Micromegas. La figure 6 représente le détecteur. On peut y distinguer l'électronique front-end composée de 32 cartes. Chaque carte peut amplifier, mettre en forme et numériser les signaux échantillonnés à 20 MHz. Dans l'expérience le trigger est réalisé par une coïncidence entre deux scintillateurs placés au-dessus et en-dessous de l'aimant.

Conclusion

Nous avons vu que la technique Micromegas possède de nombreux avantages dans le cadre d'une utilisation en tant qu'étage d'amplification dans une chambre à projection temporelle. Le fonctionnement optimal du détecteur TPC Micromegas ne peut s'effectuer qu'avec le contrôle du mélange gazeux utilisé, on retiendra le compromis intéressant: Ar + 2% CF_4 . Il est également primordial de maîtriser le retour des ions, ce qui est le cas actuellement avec une remontée des ions de l'ordre de 0.3%. D'autre part des tests de vieillissement ont été effectués, ils attestent de la possibilité d'utiliser le détecteur sur une longue durée. Le comportement de la TPC Micromegas en présence d'un champ magnétique a fait l'objet de tests très concluants. Une TPC de 50 cm de longueur est en cours de construction et dans les prochains mois permettra l'acquisition et la reconstruction de traces de particules cosmiques en présence d'un champ magnétique. Cette étape est indispensable pour valider une TPC à lecture Micromegas pour le futur collisionneur linéaire.

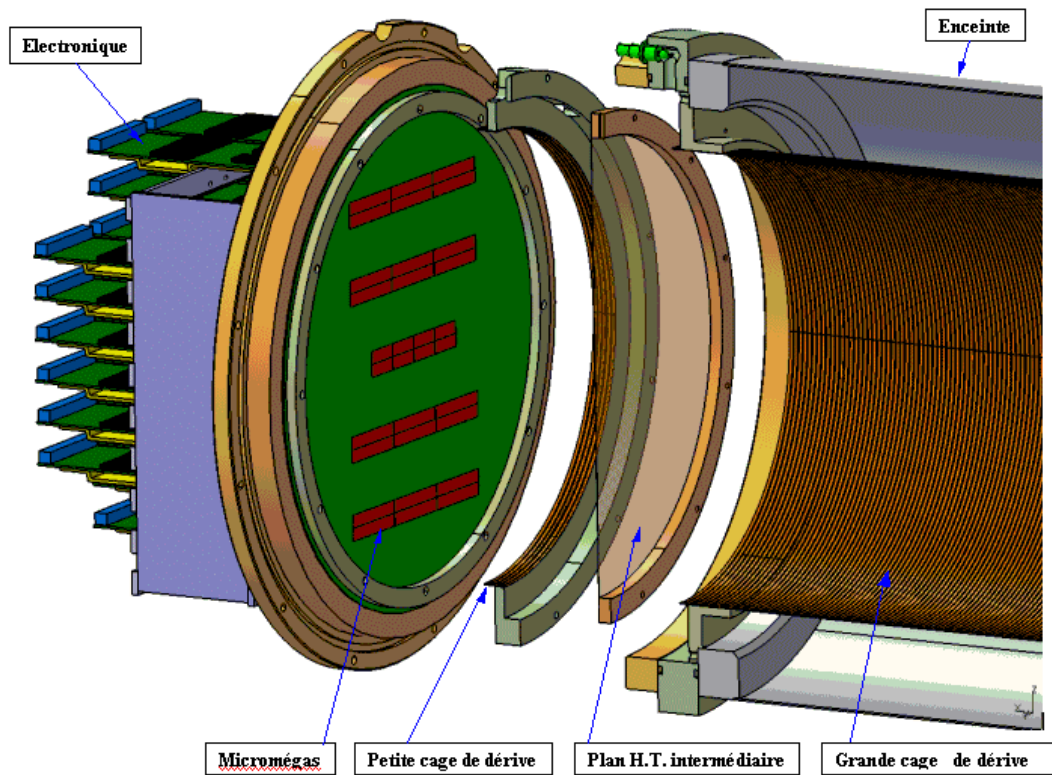


Figure 6: Schéma du détecteur pour les tests cosmiques

Remerciements

Nous tenons spécialement à remercier nos encadrants pour leur accueil et leur disponibilité.

Références

- [1] The European Physical Journal C: *Review of particle physics*, Vol. 15, No. 1-4 (2000).
- [2] J. Chauveau: *Détection et mesures en Physique corpusculaire*, Cours donné au DEA CPM, septembre 2002.
- [3] G. F. Knoll, J. Wiley: *Radiation Detection and Measurement*, 2nd edition, 1989.
- [4] J. Martin: *Etude d'une TPC Micromegas pour le futur collisionneur linéaire*, Septembre 2002.
- [5] P. Colas: *LC Workshop, Micromegas TPC RandD held in Jeju Island, Korea*, August 2002.
- [6] W. R. Leo: *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, 2nd edition, 1994.
- [7] P. Colas, Y. Giomataris, J. Martin, A. Olivier, J. Jeanjean, V. Lepeltier: *Séminaire Jérôme Martin*, Septembre 2002.
- [8] P. Colas et al: *Nucl. Instrum. Meth. A478 (2002) 215*.