R&D pour la TPC à lecture MICROMEGAS des futurs collisionneurs linéaires e^+- e^-

Marie LEGENDRE, Gilles MAURIN et Guillaume MICHEL
Responsables : Paul COLAS et Vincent LEPELTIER

5 novembre 2001

Résumé

La construction d'un prototype de TPC avec lecture MICROMEGAS extrapolable à la taille réelle implique l'étude des différents paramètres physiques de ce détecteur. Le LAL et le SPP de Saclay étudient la possibilité de construire un tel prototype afin d'en caractériser les performances.

1 Introduction

Un des principaux enjeux de la physique des particules actuellement, est la découverte du boson de Higgs et des particules supersymétriques. Les collisionneurs $p-p$ et $p-\bar{p}$ développés actuellement (TEVATRON et LHC qui est en cours de construction) ont pour ambition de découvrir ces particules. Cependant, les collisioneurs e^+- e^- sont mieux adaptés pour les mesures de précision. En effet, les protons sont constitué de trois quarks et ne sont donc pas des particules élémentaires. Ceci donne lieu à une plus grande incertitude sur l'état initial de la réaction et donc dégrade la résolution des mesures. Avec un collisionneur e^+- e^-, l'état initial est complètement connu : énergie-impulsion et nombres quantiques. Pour obtenir des énergies dans le domaine du Higgs (100 à 800 GeV dans le centre de masse) par un collisionneur e^+- e^-, il est nécessaire de construire un collisionneur linéaire afin de s'affranchir du rayonnement synchrotron. C'est dans cette optique que la communauté scientifique internationale développe le projet TESLA (TeV Energy Superconducting Linear Accelarator). Le détecteur TESLA aura l'apparence d'un détecteur classique et comportera des mesureurs de traces (dont une TPC), des calorimètres et des chambres à muons à géométrie cylindrique autour du point de collision.

Le LAL et le SPP du CEA Saclay ont formé une collaboration de R&D afin de développer une TPC avec un nouveau système de lecture : MICROMEGAS. Leur objectif final est de participer à la construction de la TPC du projet TESLA. Actuellement, ils envisagent la construction d'un prototype de taille réduite extrapolable à la taille finale.

2 TPC (Time Projection Chamber)

La TPC est un détecteur à gaz qui permet de déterminer la trajectoire des particules chargées ainsi que leur impulsion transverse.

Une particule chargée traversant la TPC ionise le gaz le long de sa trajectoire. Les électrons arrachés dérivent sous l'action d'un champ électrique longitudinal à la TPC. A l'extrémité de la TPC un système de lecture permet de mesurer les coordonnées (r,φ) et le temps de dérive des électrons dont on déduit la coordonnée z. En effet lors de cette dérive les électrons subissent de nombreuses collisions avec les atomes du gaz ; la vitesse de dérive est alors constante ($\sim$8 cm/μs ce qui est lent par rapport à la vitesse de la particule ionisante et permet d'effectuer la mesure). Un champ magnétique intense (4T pour le détecteur TESLA) permet de courber la trajectoire des particules chargées produites par les collision e^+- e^- dans les détecteurs de traces et le calorimètre électromagnétique ce qui permet de déterminer l'impulsion transverse mais aussi le signe de la charge. Pour la TPC, il réduit considérablement la diffusion transverse des électrons dans leur dérive (d'un facteur 15 à 20) ce qui améliore la précision en r-φ. C'est donc un détecteur 3D, avec l'avantage inhérent de supporter un bruit de fond important.

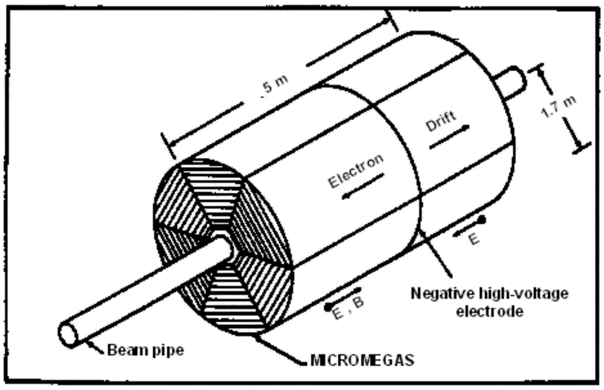

FIG. 1 – Structure de la TPC du détecteur TESLA

Il est prévu, pour le projet TESLA, une TPC cylindrique de 5 m de long et de 1,70 m de rayon (fig. 1), avec une grande couverture angulaire. L'ionisation libérée par la particule chargée est utilisée pour déterminer sa nature. En effet comme toute la chaine (multiplication + électronique) est linéaire, le signal mesuré est proportionnel au nombre d'électrons qui sont arrivés dans la région du détecteur. Comme des particules de nature différente (mais de même impulsion) produisent une quantité d'ionisation différente, la mesure de l'amplitude renseigne sur la nature de la particule ionisante. On veut ainsi mesurer cette amplitude avec la meilleure résolution possible : soit une résolution de 4% sur le pouvoir d'arrêt $\frac{dE}{dx}$.

La TPC doit être également construite de façon à optimiser la détection des phénomènes physiques que l'on veut étudier, par exemple des événements du type $e^+e^- \longrightarrow Z + H(invisible)$, avec une précision de l'ordre de 200 MeV sur la masse du Higgs. Le futur collisionneur linéaire impose de nouvelles contraintes sur la TPC en particulier en ce qui concerne le système de lecture. Par rapport aux anciennes TPC, on a besoin d'une meilleure résolution 3D et surtout d'une meilleure séparation des traces des particules, qui sont souvent très proches les unes des autres dans les jets collimés (à hautes énergies). Si on utilisait une chambre à fils il faudrait un espacement de l'ordre de 1 mm entre les fils, au lieu de 4 mm actuellement, ce qui serait très difficile à réaliser techniquement. Il faut également s'affranchir au maximum des effets $\vec{E} \times \vec{B}$ (dans le cas des fils espacés de 4mm, les électrons parcourent jusqu'à 2mm avec E et B non parallèles ce qui provoque une forte déviation et perturbe ainsi la mesure). C'est dans cette optique qu'a été développé le système de lecture par Micromegas [1]. Le principal intêret de cette technique est que les régions où E et B sont non parallèles ne présentent qu'un espace de 25 ou 50 μm. Ce système a également l'avantage de limiter considérablement la remontée des ions dans l'espace de dérive.

3 Micromegas

Les électrons primaires produits par ionisation du gaz de la TPC ($\simeq$100e^-/cm pour une particule chargée relativiste), dérivent suivant la direction du champ électrique vers les plaques d'extrémité où est placé le système de lecture. Lors de cette dérive, les électrons subissent de nombreuses collisions avec les atomes du gaz. Ces collisions sont responsables de la diffusion des électrons (diffusion gaussienne de l'ordre de σ=500μm par cm de dérive soit 3.5mm pour le prototype de 50cm). Cette diffusion est cependant limitée par la présence du champ magnétique (diminution d'un rapport $\frac{E}{B*v}$ soit de 15-20 donnant un σ=150μm pour le prototype).

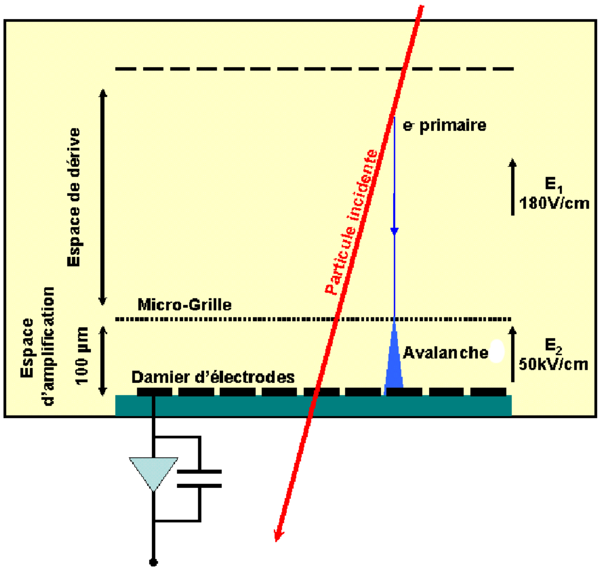

FIG. 2 – Chambre à dérive et système de mesure Micromégas

Dans une TPC conventionnelle, le signal est amplifié par avalanche au niveau des fils de détection. Dans un système de lecture de type MICROMEGAS (MICRO-MEsh-GASeous detector), l'espace de dérive et l'espace d'amplification sont séparés par une micro-grille métallique (au pas de 25μm ou 50μm et de 3μm d'épaisseur). Un champ électrique uniforme et élevé (50kV/cm) est produit entre cette grille et un damier d'électrodes indépendantes de 5x2mm^2 (fig. 2). Les électrons primaires suivent (à la diffusion près) les lignes de champ imposées par le système (fig. 3) et passent la grille. Ils sont ensuite multipliés par avalanches entre la grille et le damier. L'amplification se fait de façon proportionnelle (gain de $10^3 - 10^4$ par électron primaire) ce qui permet de connaître l'énergie perdue par la particule incidente (dE/dx) en mesurant l'amplitude du signal sur les différentes électrodes.

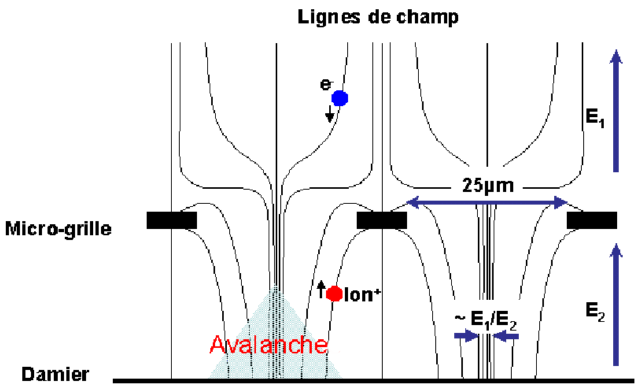

FIG. 3 – Lignes de champ au niveau de la grille Micromegas

Lors des différentes avalanches les électrons sont diffusés transversalement sur 10 à 20 micromètres. La plupart des ions ainsi créés remontent les lignes de champ vers la micro-grille (pourcentage d'ions remontant égal au rapport $\frac{E_1}{E_2} < 1\%$).

La mesure de la coordonnée z (qui correspond à la direction des champs électrique et magnétique) se fait à partir du temps de dérive. La particule incidente traverse un détecteur de micro-vertex au silicium (trigger), avant d'entrer dans la TPC. Le déplacement de la particule incidente dans la TPC et l'ionisation étant considérés comme instantanés, le temps de dérive des électrons se calcule alors comme la différence de temps entre le signal de référence et le signal mesuré au niveau des électrodes du damier. La connaisance de la vitesse de dérive permet ainsi d'obtenir la coordonnée z de l'ionisation et donc du passage de la particule. La diffusion longitudinale détermine la résolution en temps et donc en z ($\simeq$100ns pour le prototype). Elle est parallèlement améliorée par le nombre d'électrons récoltés. En effet la résolution est alors divisée par la racine carrée du nombre d'électrons contribuant au signal (Ex. pour 25 électrons σ=100/$\sqrt{25}$=20ns). Cependant la séparation en z reste faible ($\sim$1cm).

Les coordonnées (r, φ) sont directement données par la position du pad ayant récolté le signal électronique. 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 carré du nombre d'électrons récoltés (ex. pour 25 électrons σ=150/$\sqrt{25}$=30μm). Encore faut-il que la largeur du damier soit du même ordre de grandeur (mais cela conduit à un nombre de canaux beaucoup trop élevé). En effet, si l'étalement des électrons est inférieure à la largeur d'un pad du damier, le signal peut alors être totalement récolté par un seul pad, ce qui diminue fortement la résolution (pour un damier de 2mm de largeur, la résolution est de 2mm/$\sqrt{12}$ $\simeq$550μm, quel que soit le nombre d'électrons mesuré). Pour remèdier à cela, il est nécessaire d'augmenter la diffusion entre la micro-grille et le damier d'électrodes. Différentes méthodes sont actuellement étudiées comme l'utilisation d'une grille de pré-diffusion, d'un verre résistif ou en modifiant la forme des damiers afin que le signal soit toujours mesuré par au moins deux électrodes. La position (r,φ) est alors calculée de façon barycentrique (résolution pouvant atteindre 70μm).

4 Activités à court terme du laboratoire d'accueil

Afin de tester et de valider les futurs éléments de la TPC du projet TESLA, diverses expériences ont été faite et certaines restent à venir. Une première TPC de 15 cm de long avec lecture MICROMEGAS et 30 damiers de lectures de 5$\times$2mm^2 a été réalisée et utilisée avec une source de rayon X. Les résultats sont encourageant et ce malgré l'absence de champ magnétique pour limiter la diffusion transverse des électrons. Cependant, afin de pouvoir extrapoler les résultats à la TPC finale, il est nécessaire de construire un nouveau prototype plus grand avec champ magnétique longitudinal.

4.1 Prototype de la TPC

L'objectif de la collaboration est de construire dans les prochains mois une TPC cylindrique de 50 cm de long et 30 à 40 cm de diamètre. Ces dimensions sont principalement imposées par la taille de l'aimant supraconducteur que la collaboration pourra se procurer. Actuellement deux bobines supraconductrices seraient accessibles :

- une bobine de 2 T à Orsay,
- une bobine de 3 T à Saclay ayant servie à faire de la RMN médicale.

Ce prototype est prévu pour être étudié avec des rayonnements cosmiques sans exclure la possibilité de l'installer sur un faisceau. Ceci permet de réduire encore le coût de l'expérience. Les enjeux principaux sont de valider la lecture MICROMEGAS, d'étudier le gain, le gaz, la résolution en énergie, la séparation des traces et la remontée des ions.

Le tableau 1 montre les principales caractéristiques mécaniques du prototype :

Longueur	50 cm	
Diamètre	30-40 cm	
Champ magnétique	2-3 T	
voix d'électroniques	1000 (Berkeley)	
MICROMEGAS	nb de damiers	1000
	taille des pas	25 ou 50 μm
	écarts grilles	100 μm
	Champs électriques	E_1=200V/cm E_2=50kV/cm
Gaz	Ar + 4% CF_4	
E/p	0,25 kV.cm^{-1}.atm^{-1}	
pression	$\geq$ 1 atm	

TAB. 1 – Caractéristiques du prototype de la TPC de 50 cm de long

4.2 Bancs de test

En parallèle, des bancs de test ont été installé à Saclay pour déterminer et tester les caractéristiques des différents constituants de la TPC. Notamment, le laboratoire de Saclay a mis au point une technique permettant de mesurer la vitesse de dérive des électrons dans un gaz dans une large gamme de valeurs du champ électrique [2]. L'originalité de cette méthode réside dans l'utilisation d'une chambre MICROMEGAS en mode double photo-détections, représentée dans la figure 4.

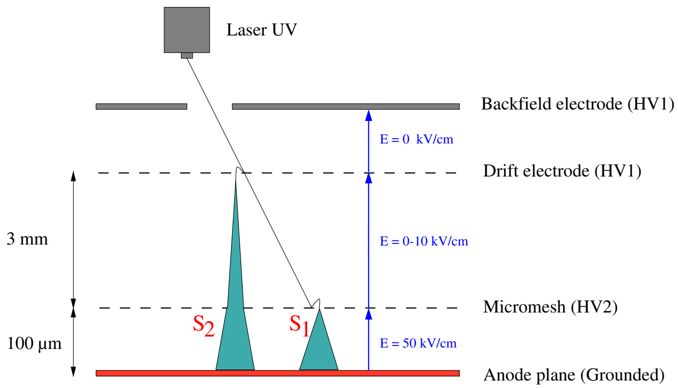

FIG. 4 – Schéma du dispositif expérimental de mesure de la vitesse de dérive des électrons dans un gaz à l'aide d'un dispositif de lecture MICROMEGAS

Le dispositif est constitué de deux micro grilles séparées par 3 mm entre lesquelles est appliqué un champ électrique réglable de 0 à 10 kV.cm^{-1}. Un plan de lecture (anode) est disposé à 100 μm de la grille HV2 afin de pouvoir collecter les électrons de dérive en fonction de leur position. Le champ de 50 kV.cm^{-1} permet de multiplier les électrons entre HV2 et le plan de lecture. Un laser à pulse UV de 337 nm (N_2) focalisé, arrache des électrons sur chacune des micro-grilles par effet photoélectrique créant ainsi des électrons de dérive. Les deux signaux électriques induits sont amplifiés par un pré-amplificateur rapide (1 GHz). La différence de temps d'arrivée des deux signaux (mesurée avec une précision de 1 à 2nsec) nous donne la vitesse de dérive connaissant la distance entre les grilles.

Plusieurs mesures ont été faites sur des gaz bien connus comme un mélange d'hélium et 20% de iC_4H_{10}, le P10 (90% Argon, 10% CH_4), le méthane pur et différents mélanges de Néon et de iC_4H_{10}. Les résultats montrent un très bon accord avec d'autre expériences mais aussi avec des simulations de type Monte-Carlo.

Dans la TPC, nous cherchons un gaz ayant une vitesse de dérive des électrons la plus grande possible avec le champ électrique le plus faible possible pour éviter les claquages mais aussi pour diminuer la diffusion transverse. Il est aussi nécessaire que cette vitesse soit peu sensible aux fluctuations de la pression et du champ électrique et que ce gaz contienne le moins d'hydrogène possible pour éviter les collisions neutron-proton qui noirciraient pendant longtemps une région de lecture et donc empêcheraient toute détection pendant cette période. La figure 5 montre les résultats des mesures faites sur différents mélanges d'Argon et de CF_4 :

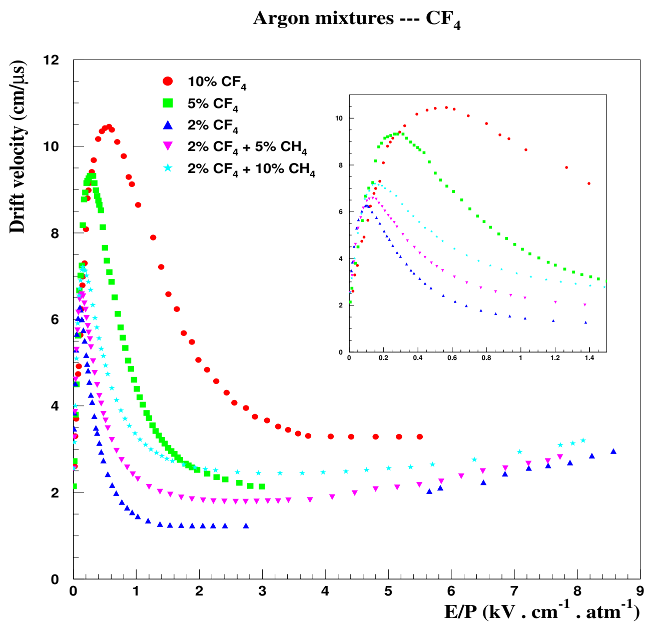

FIG. 5 – Vitesse de dérive des életrons dans un mélange d'Argon et de CF_4 entre 0 et 9 kV.cm^{-1}.atm^{-1}

Pour toutes ces raisons, le laboratoire pense utiliser un mélange Ar + 5% CF_4 qui est un bon compromis aussi bien physiquement qu'en terme de budget ou encore de sécurité.

5 Conclusion

La collaboration entre le LAL et le SPP de Saclay a montré qu'il était possible de construire une TPC à lecture MICROMEGAS de 15 cm de long sans champ magnétique. Cependant pour pouvoir être plus proche de la réalité il est nécessaire de construire une TPC plus grande et avec champ magnétique. Ce nouveau projet a suscité des études auxiliaires afin de déterminer différents constituants de cette future TPC dont par exemple le choix du gaz et des valeurs des champs électriques de la grille de lecture MICROMEGAS. Certaines inovations dans la façon de faire la lecture MICROMEGAS sont actuellement en cours de discusion afin d'optimiser la résolution en position des points de mesure de la trace. Cela nécessitera de trouver un moyen efficace d'étaler la diffusion des électrons après la grille MICROMEGAS afin de pouvoir faire un barycentre sur plusieurs damiers de lecture.

Références

[1] J.P. ROBERT Y. GIOMATARIS, Ph. REBOUGEARD and G. CHARPAK. Micromegas. *Nucl. Instr. Meth A376*, 1996.

[2] I. GIOMATARIS F. JEANNEAU V. LEPELTIER I. PAPADOPOULOS Ph. REBOURGEARD P. COLAS, J. DERRÉ. Electron drift velocity measurements at high electric fields. *Elsevier Science*, March 2001.