

L'expérience DØ

Y. Arnoud, S. Crépé-Renaudin, A.-M. Magnan, G. Sajot, J. Stark.

The DØ experiment is with CDF installed at the Tevatron (proton-antiproton collider with a center of mass energy of 1960 GeV) located at Fermi National Accelerator Laboratory near Chicago (US). The DØ Grenoble group is involved in software tasks (electron reconstruction and identification, b-tagging, L3 trigger studies) and in data analysis (search for supersymmetric particles in the frame of R-parity violation and recently, top cross section). Since March 2001, DØ has collected around 250 pb⁻¹ of data, twice the Run I statistic.



Figure 1 : Vue latérale du détecteur DØ lors de sa mise en place dans le hall expérimental. Le détecteur mesure environ 10 m de hauteur.

DØ est avec CDF, l'une des deux expériences installées auprès du collisionneur proton-antiproton, le Tevatron, du FNAL (Fermi National Accelerator Laboratory) situé près de Chicago aux États-Unis. De 1995 à 2000, le Tevatron et les deux détecteurs CDF et DØ (Figure 1) ont bénéficié de profondes améliorations. L'énergie du Tevatron a été portée à 1960 GeV et la luminosité instantanée augmentée (actuellement d'un facteur 3). DØ a complètement changé ses détecteurs de trace, s'est doté d'un solénoïde supraconducteur, a amélioré ses détecteurs de muons, le système de déclenchement et changé une grande partie de son électronique. Les logiciels de reconstruction et de simulation ont été totalement remplacés par de nouveaux codes écrits en C++. Les premières collisions de la nouvelle période de données, appelée Run II, ont été enregistrées début avril 2001.

Depuis cette date DØ a collecté une luminosité intégrée d'environ 250 pb⁻¹, doublant ainsi celle accumulée au cours du Run I (1992-1995).

La Collaboration DØ regroupe actuellement 650 physiciens venant de plus de 80 Instituts répartis dans le monde. Le groupe DØ Grenoble est impliqué dans le développement de logiciels essentiellement orientés vers la reconstruction et l'identification des électrons et à leur utilisation dans les analyses de physique. Le groupe a également contribué à l'adaptation à l'environnement informatique de DØ du générateur SUSYGEN. Celui-ci est utilisé dans la recherche de particules supersymétriques effectuée par le groupe. La reconstruction d'électrons non isolés permet au groupe de contribuer à l'étude de la section efficace de production de paires du quark top.

Contributions aux logiciels de reconstruction de l'électron

Depuis son arrivée dans la Collaboration DØ, le groupe a contribué au développement des programmes de reconstruction de l'électron. Il a actuellement la responsabilité de la maintenance de cet ensemble de programmes (« emreco ») : intégration des différentes améliorations et des corrections. Un des membres du groupe est co-responsable du groupe « CALGO electron-id » et participe à la « Calorimeter Algorithms Task Force » qui est chargée d'optimiser les algorithmes de reconstruction des données du calorimètre pour les futures mesures de précision. Dans ce cadre de la « Task Force », des développements et des tests de nouveaux algorithmes de suppression de bruit de

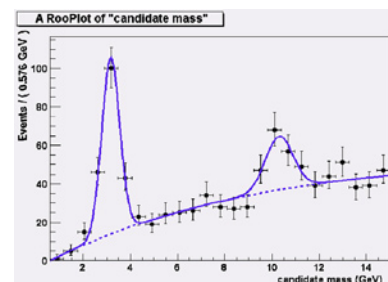


Figure 2 : Spectre de masse invariante de paires e⁺ e⁻ de bas p_T identifiées par la méthode de la « route ».

fond dans le calorimètre sont effectués. Ils contribuent à l'amélioration de la précision de la reconstruction de l'énergie des objets électromagnétiques et des jets.

Depuis octobre 2002, le groupe est responsable de l'amélioration d'un nouvel algorithme de reconstruction des électrons de basse quantité de mouvement transverse (p_T) près des jets. Cet algorithme associe à une trace une « route » dans le calorimètre et collecte l'énergie déposée dans ce domaine. Des critères sur la répartition de cette énergie permettent de séparer hadrons et électrons. Cet algorithme a été intégré au niveau 3 du déclenchement de $D0$. De nouveaux critères de déclenchement sur les électrons de bas p_T sont étudiés en collaboration avec le groupe travaillant sur le « Central Track Trigger » (déclenchement de niveau 1). A titre d'illustration, la figure 2 présente la masse invariante de paires $e^+ e^-$ de bas p_T obtenue sur une petite fraction des données de $D0$.

► Corrections « géométriques » de l'énergie des électrons

Les calorimètres de $D0$ sont à échantillonnage avec de l'argon liquide pour milieu actif. L'absorbeur est soit de l'uranium pour la partie électromagnétique (et la partie dite « fine hadronic ») ou du cuivre et de l'acier pour la partie dite « coarse hadronic ». Ils sont constitués d'un calorimètre central couvrant le domaine de pseudo rapidité $|\eta| < 1$ et d'une paire de calorimètres avant qui étendent le domaine d'acceptance jusqu'à $|\eta| < 4$ ainsi que le solénoïde supraconducteur. De plus dans la région centrale le calorimètre est segmenté en 32 modules dans le plan transverse. Il y a donc deux raisons pour lesquelles l'énergie d'un électron n'est pas totalement reconstruite dans les calorimètres :

1. avant d'atteindre la région du calorimètre, il doit traverser les matériaux dont sont constitués les trajectomètres, le solénoïde et les cryostats ;
2. l'électron atteint une région où le calorimètre est moins précis : les limites de leur domaine en η (en particulier entre les calorimètres central et avant) ou entre deux des 32 modules dans le plan transverse du calorimètre central.

Des corrections dites « géométriques » sont déterminées par simulation du détecteur pour corriger les données de ces effets. Elles sont définies pour des énergies de l'électron supérieures à 5 GeV. À l'heure actuelle ces corrections sont paramétrées par un polynôme de degré deux en η dont les coefficients sont eux-mêmes paramétrés en fonction de l'énergie. Des tests sont faits sur le Z se désintégrant en 2 électrons pour vérifier et estimer l'effet de ces corrections.

► Étude de la résolution du calorimètre électromagnétique

Les profondes modifications au sein du détecteur $D0$ se sont traduites par une augmentation de la quantité de matière en amont du calorimètre électromagnétique. Le passage du temps de croisement des paquets de protons et d'antiprotons à 396 ns a nécessité la mise en place d'une nouvelle électronique de lecture. Ces changements modifient la résolution du calorimètre électromagnétique qu'il n'a pas été possible de mesurer en faisceau test.

Afin de déterminer les nouvelles valeurs des coefficients qui caractérisent la résolution électromagnétique (bruit électronique, terme d'échantillonnage et terme constant), une méthode originale basée sur l'étude des largeurs des résonances J/ψ , Upsilon et Z est en cours de développement. Il s'agit de déterminer par simulation la contribution du calorimètre à la largeur expérimentale de ces trois résonances, reconstruites dans le mode e^+e^- .

La masse invariante de la paire e^+e^- est calculée dans les données réelles à partir des informations du trajectomètre (angle entre les leptons) et du calorimètre (énergie). La largeur expérimentale de la distribution des trois pics de masse invariante dépend ainsi de trois contributions : la largeur naturelle de la résonance (environ 2,5 GeV pour le Z , négligeable pour les deux autres), la résolution du trajectomètre et la résolution du calorimètre que l'on cherche à déterminer.

La première étape consiste à générer des paires de leptons produites par la désintégration des trois résonances à l'aide du générateur Pythia, en incluant les effets des ISR (Initial State Radiation) et des FSR (Final State Radiation).

La contribution du trajectomètre est ensuite paramétrée en effectuant une dégradation des données générées afin de reproduire les largeurs expérimentales du J/ψ (ee) et de l'upsilon $1S$ (ee), mesurées uniquement à partir des informations du trajectomètre. Celui-ci est en effet performant pour des électrons de quantité de mouvement inférieure à une quinzaine de GeV/c .

La contribution du calorimètre est ensuite ajoutée en effectuant une deuxième dégradation des données générées, afin de reproduire la largeur totale mesurée dans les données réelles. Cette contribution dépend cependant de façon ambiguë de chacun des trois termes, chacun pouvant contribuer à l'élargissement des pics de masse.

Une étude de la résolution de l'électronique du calorimètre a été effectuée par R. Zitoun, conduisant à la détermination du terme de bruit électronique. Les deux autres termes (échantillonnage et terme constant) seront obtenus en comparant les domaines de validité conduisant aux largeurs totales observées. En utilisant les trois résonances, on trouve un recouvrement à 2,5 sigmas, qui indique une dégradation du terme d'échantillonnage qui passe de 15 % à plus de 20 %.

La précision de la mesure est pour le moment limitée par la mauvaise compréhension des performances du trajectomètre dans la reconstruction de l'upsilon $1S$, mais devrait fournir dans un proche avenir des valeurs précises pour le terme d'échantillonnage et le terme constant.

► Interfaçage de SUSYGEN avec les codes de simulation

SUSYGEN a d'abord été un générateur pour les collisionneurs e^+e^- et a été largement utilisé au LEP. Il est exclusivement dédié à la supersymétrie et aux dimensions supplémentaires. Récemment E. Perez du DAPNIA Saclay l'a développé pour les collisionneurs hadroniques. SUSYGEN intègre tous les éléments nécessaires à l'étude des processus R-parité violée (production résonante, désintégration directe et indirecte des particules supersymétriques et rapports de branchement). Il est interfacé avec le programme SUSPECT (développé par le groupe théorie de Montpellier) qui calcule les R.G.E (Renormalisation Group Equation). Le groupe a adapté les codes de masse des particules au nouveau standard StdHep, a rendu SUSYGEN compatible avec PYTHIA 6.00, a contribué aux tests de ce générateur et a effectué des comparaisons systématiques avec d'autres générateurs.

► Recherche de particules SUSY avec R-parité violée

La supersymétrie est une théorie dans laquelle on définit une symétrie entre les bosons (particules de spin entier : par exemple le photon) et les fermions (particules de spin demi-entier : par exemple l'électron). Cette théorie englobe celle du modèle standard de la physique des particules, et a été introduite afin de pallier certains défauts de ce dernier. Dans cette théorie, trois des quatre forces fondamentales (interaction électromagnétique, interaction faible, et interaction forte) sont unifiées à grande énergie (environ 10^{16} GeV).

Chaque fermion (boson) du modèle standard aura donc un partenaire boson (fermion) supersymétrique. On peut ainsi définir un nombre quantique multiplicatif, que l'on appellera la R-parité, et qui permet de distinguer les particules du modèle standard ($R_p = +1$) des particules supersymétriques ($R_p = -1$). On considère généralement que ce nombre est conservé : à partir de particules du modèle standard, on ne peut donc produire que des paires de particules supersymétriques. La particule supersymétrique la plus légère (ou LSP : Lightest Supersymmetric Particle) sera stable, ce qui en fait un bon candidat pour la matière noire de l'univers, d'où l'intérêt de conserver cette nouvelle symétrie.

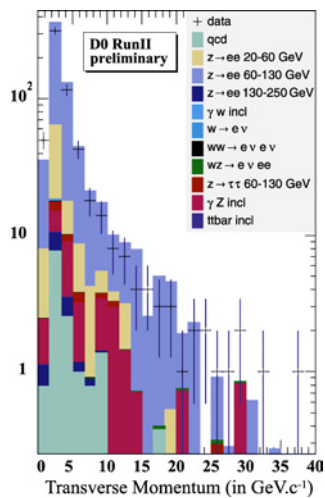
Cependant, dans la théorie sous sa forme actuelle, rien ne justifie cette hypothèse de conservation. On peut donc envisager de violer la R-parité, ce qui conduira à la désintégration de la LSP en particules du modèle standard. On définit trois couplages différents (λ , λ' et λ'') entre les particules supersymétriques et les particules du modèle standard.

L'analyse en cours porte sur le couplage λ , ce qui implique une désintégration de la particule supersymétrique la plus légère en deux leptons chargés et un neutrino. On se place dans l'hypothèse d'une production de particules supersymétriques conservant la R-parité et d'une désintégration, après cascade, de la LSP en particules standard. Dans le cas du couplage λ , l'état final sera composé d'au moins quatre leptons chargés et de deux neutrinos qui se manifesteront par de l'énergie manquante. Dans le modèle standard, peu de processus conduisent à la formation de trois leptons chargés de grand p_T . La perte d'un lepton dans le détecteur est donc acceptée, et on recherchera finalement au moins trois leptons chargés dans l'état final.

Pour des raisons d'antisymétrie, il existe seulement neuf couplages λ , notés λ_{ijk} . Les indices i, j et k valent entre 1 et 3 et se rapportent aux leptons du modèle standard : 1 pour l'électron, 2 pour le muon, et 3 pour le tau.

Dans un premier temps, seul le couplage λ_{121} , conduisant à une désintégration avec au moins deux électrons a été considéré par le groupe. Les simulations sont réalisées avec SUSYGEN dans le cadre du modèle mSUGRA. Dans ce modèle, on définit cinq paramètres indépendants : m_0 est la masse commune des sfermions (partenaires supersymétriques des fermions) à l'échelle de grande unification, $m_{1/2}$ est la masse commune des jauginos également à cette même l'échelle, $\tan \beta$ est le rapport des valeurs moyennes dans le vide des 2 doublets de Higgs, $\text{signe}(\mu)$ est le signe du paramètre de mélange des Higgsinos (partenaires supersymétriques des bosons de Higgs), et enfin A_0 est le couplage tri-linéaire commun aux trois forces fondamentales (hors gravité) à l'échelle de grande unification.

Figure 3 : Analyse Supersymétrique R-parité violée sur les données DØ prises entre septembre 2002 et mi-juin 2003 (environ 120 pb^{-1}) : spectre en p_T du 3^e candidat électron dans la sélection di-électron. Les données sont figurées par des croix et les fonds provenant du modèle standard par des histogrammes.



Les données accumulées entre septembre 2002 et juin 2003 correspondent à une luminosité intégrée de 117 pb^{-1} . Avec cette luminosité, les données sont en accord avec les prédictions du modèle standard (Figure 3). En effet, après application des critères de sélection des événements, 3 événements « données réelles » sont retenus pour $3,0 \pm 1,5$ événements du modèle standard attendus (principalement $Z\gamma \rightarrow ee\gamma$ et $Z \rightarrow ee$). Cette étude préliminaire, menée dans le cadre du modèle mSUGRA, a permis de mettre des limites supérieures sur les sections efficaces de production de paires de jauginos (partenaires supersymétriques des bosons de jauge) : $\sigma > 1,3 \text{ pb}$ pour $\mu < 0$ et $\sigma > 1,4 \text{ pb}$ pour $\mu > 0$ (pour $A_0 = 0$, $\tan \beta = 5$, $m_{1/2} = 150$ et $m_0 > 500$). Compte tenu de la statistique disponible, ces limites sont encore moins contraignantes que celles obtenues par DØ au Run I, mais devraient les dépasser par analyse des données complètes de 2002-2003 actuellement en cours. Les analyses précédentes du groupe, qui ont donné lieu à deux thèses, portaient sur un échantillon de données beaucoup plus réduit et concernaient les couplages λ_{121} et λ'_{122} . Elles ont jeté les bases de l'analyse actuelle.

Au début du printemps 2004, la Collaboration DØ aura accumulé plus de 250 pb^{-1} de données. Actuellement nous explorons déjà un plus grand domaine de l'espace des paramètres m_0 et $m_{1/2}$, et considérons tous les couplages λ_{ijk} possibles conduisant à des topologies d'événements eee et ee μ . Cette étude est réalisée en partenariat avec le groupe DØ d'Aix-la-Chapelle qui étudie les événements avec au moins deux muons. Nous pourrions donc probablement mettre rapidement une limite supérieure à celle définie par le LEP, ou faire peut-être une découverte !