

Mesure de la luminosité dans ATLAS



Patrick PUZO

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire - Orsay



$$L = \frac{\dot{N}}{\sigma A \epsilon}$$

Mesure absolue de luminosité \Leftrightarrow calcul de σ ou utilisation d'une valeur de σ connue pour un processus déterminé

But : 2-3% sur la luminosité absolue à haute luminosité

Il n'existe pas dans ATLAS de détecteur donnant L de manière absolue à 2-3% à haute luminosité

Plan

- I. Méthodes auxquelles on aurait pu penser
- II. Mesure relative de luminosité
- III. Mesure absolue de luminosité



Paramètres machine

$$L = \frac{f_{rev}}{4\pi} \sum_i F_{ci} \frac{N_i^1 N_i^2}{\sigma_{x,i}^* \sigma_{y,i}^*} \quad \text{avec} \quad F_{ci} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\theta_c \sigma_z / (2 \sigma_{y,i}^*) \right)^2}}$$

Limitations

- Mesure des courants individuels N_{ij}
- Extrapolation au IP des mesures de dimensions effectuées ailleurs dans l'anneau (effet faisceau-faisceau)
- Connaissance de l'angle de croisement θ_c

⇒ $\Delta L/L$ de l'ordre de 20%

Avec des conditions particulières (peu de paquets, faisceau plus gros, pas d'angle de croisement), on peut peut-être espérer $\Delta L/L = 5-10\%$



Production de W et Z

- Section efficace élevée
- L'incertitude actuelle sur les PDF atteint 8-10% $\Rightarrow \Delta L/L$ de l'ordre de 10%

L'erreur sur les PDF diminuera sans doute avec les données du LHC

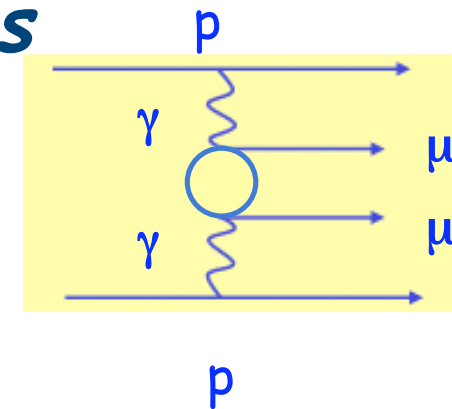
$\Rightarrow \Delta L/L$ de l'ordre de 3-5% après un certain (!) temps

Production de paires de muons

- Section efficace connue à environ 1%
- Section efficace faible (1 pb pour des muons dans le barrel avec $p_T > 3 \text{ GeV}/c$)

$\Rightarrow \approx 40$ événements par fill à $10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

\Rightarrow En supposant qu'on contrôle les efficacités du trigger et du détecteur à 1-2%, peut donner $\Delta L/L = 2-3\%$ avec 10 fb^{-1} . Pas utilisable avant la haute luminosité





Stratégie pour déterminer la luminosité absolue dans ATLAS

Luminosité absolue : ALFA (Absolute Luminosity For Atlas)

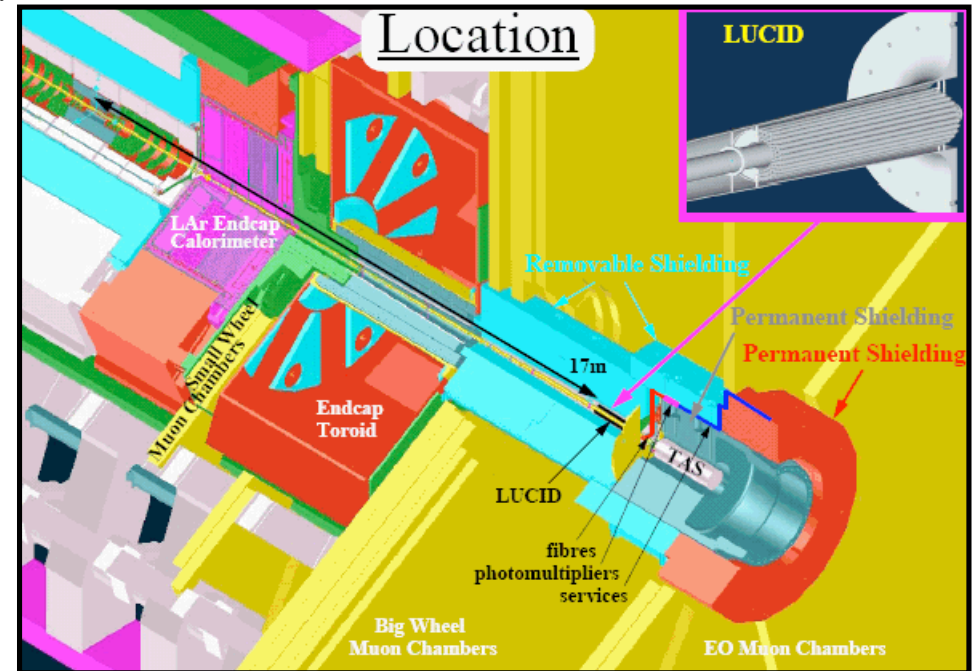
Luminosité relative : LUCID (Luminosity Using Cerenkov Integrated Detector)

1. Mesurer la luminosité absolue avec ALFA dans des conditions optimales
2. Calibrer LUCID en même temps
3. Utiliser la linéarité de LUCID pour obtenir la luminosité absolue aux autres points de fonctionnement, en particulier à haute luminosité

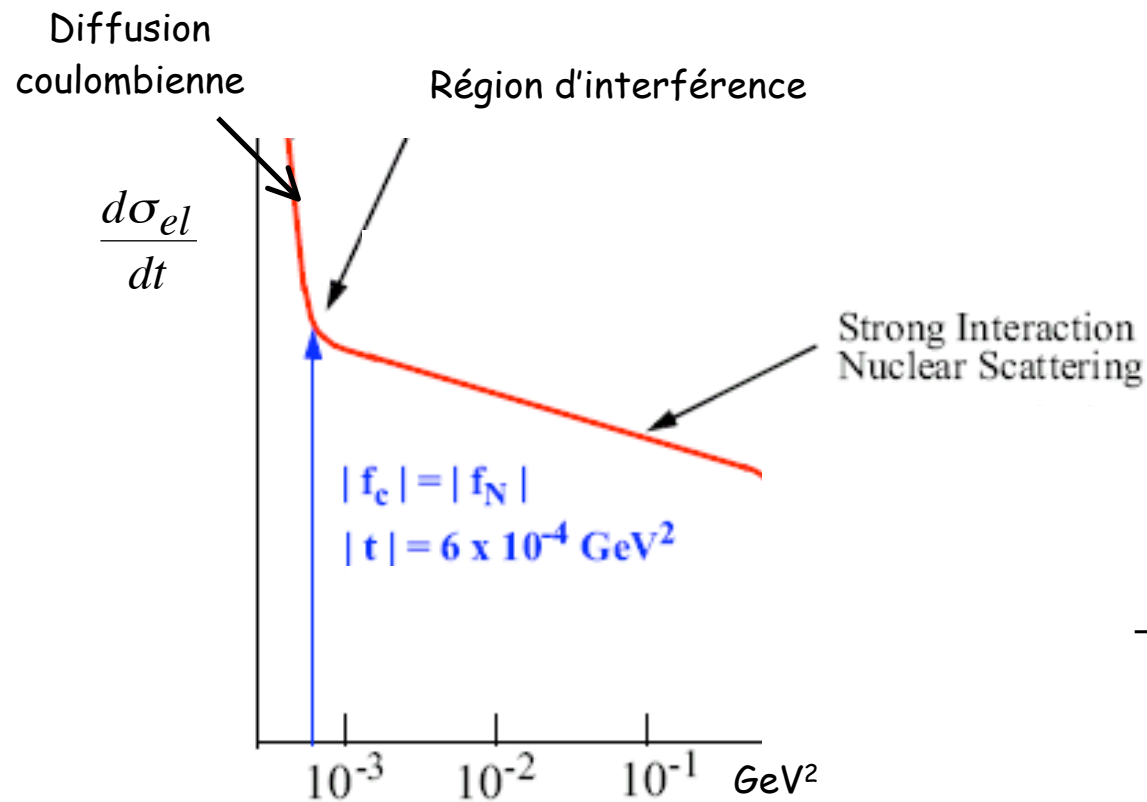


LUCID = LUminosity measurement using Cerenkov Integrating Detector

- Evenements inélastiques ($5.5 < |\eta| < 6.1$)
- 168 tubes en Al ($\varnothing = 1.5\text{cm}$), remplis de C_4F_{10} , pointant vers le FP
- Rayonnement Cherenkov
- Signal lu par rad hard PMT
- Basé sur le *Cherenkov Luminosity Counter* de CDF



- Insensible à la plupart du bruit de basse énergie (seuil Cherenkov à 2.8 GeV pour les pions et 10 MeV pour les électrons)
- **L'idée de base est d'utiliser le nombre de particules traversant LUCID comme une mesure de la luminosité**
- Simulations montrent une **parfaite linéarité** entre le nombre de particules détectées dans LUCID et la luminosité



$$-t = (p \theta)^2$$

Principe d'ALFA : Diffusion à des t si petits que la section efficace devient sensible à la diffusion Coulombienne
 ⇒ Mesure absolue de luminosité



$$\frac{dN}{dt} = L\pi |F_c + F_n|^2 = L\pi \left| \frac{-2\alpha}{|t|} + \frac{\sigma_{tot}}{4\pi} (i + \rho) e^{-B|t|/2} \right|^2$$

$t = -(p\theta)^2$

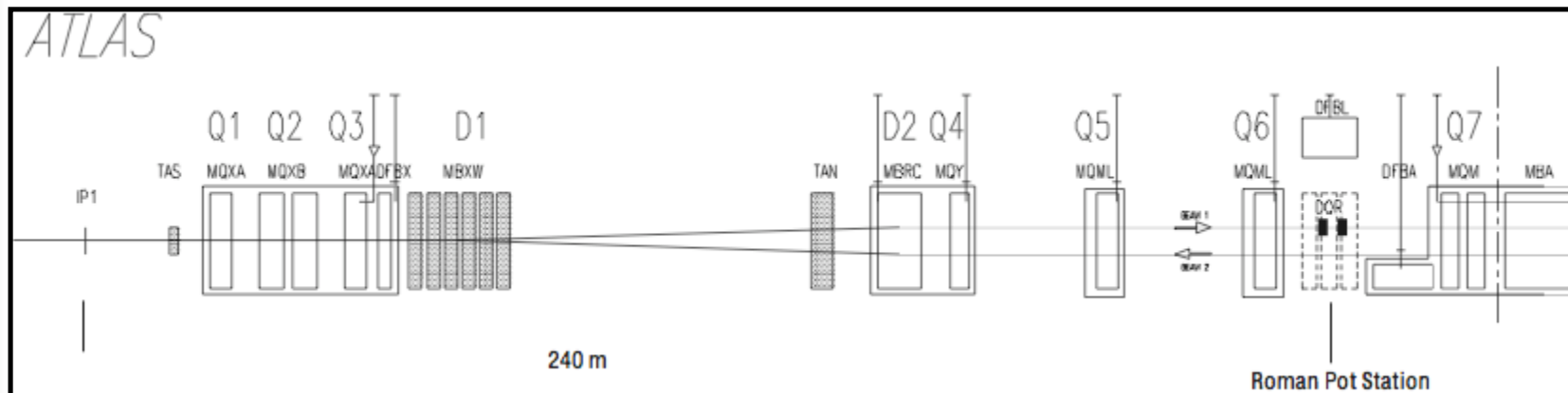
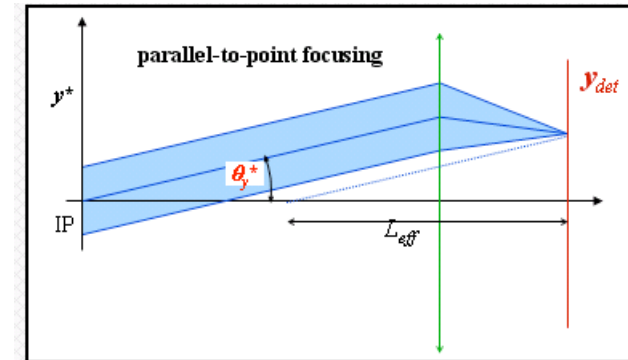
Luminosité → Section efficace totale pp → Pente nucléaire
Rapport entre les parties réelles et imaginaires de l'amplitude de diffusion élastique

Contraintes sur le faisceau

- Très faible angle de diffusion
 - ✓ Coulomb amplitude \equiv strong amplitude pour $-t \approx 6.5 \cdot 10^{-4} \text{ GeV}^2$
 - ✓ Ceci correspond à un angle de diffusion $\theta \approx 3.5 \text{ } \mu\text{rad}$ (120 μrad pour UA4)
 - Très basse emittance : $\varepsilon_N = 1 \mu\text{m rad}$
 - Pas d'angle de croisement
 - Faible divergence
- ⇒ Basse luminosité ($10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)



- Optique « Parallel to point focusing » :
 - ✓ Transforme un angle de diffusion au IP en une position verticale sur le détecteur
- Il existe une optique qui permet ceci sans nouveau hardware
 - ✓ Détecteur entre Q6 et Q7
 - ✓ Q4 en polarité inverse
- $\beta^* = 2625$ m
- Compatible avec TOTEM ($\beta^* = 1540$ m)
 - ✓ TOTEM et ALFA tourneront/doivent tourner ensemble



Où placer le détecteur ?



- Simulation basée sur :
- La diffusion élastique pp (PYTHIA 6.4 modifié)
 - Transport des protons (MADX)
 - Simulation du détecteur

Pour une optique « parallel to point », t_{\min} varie comme :

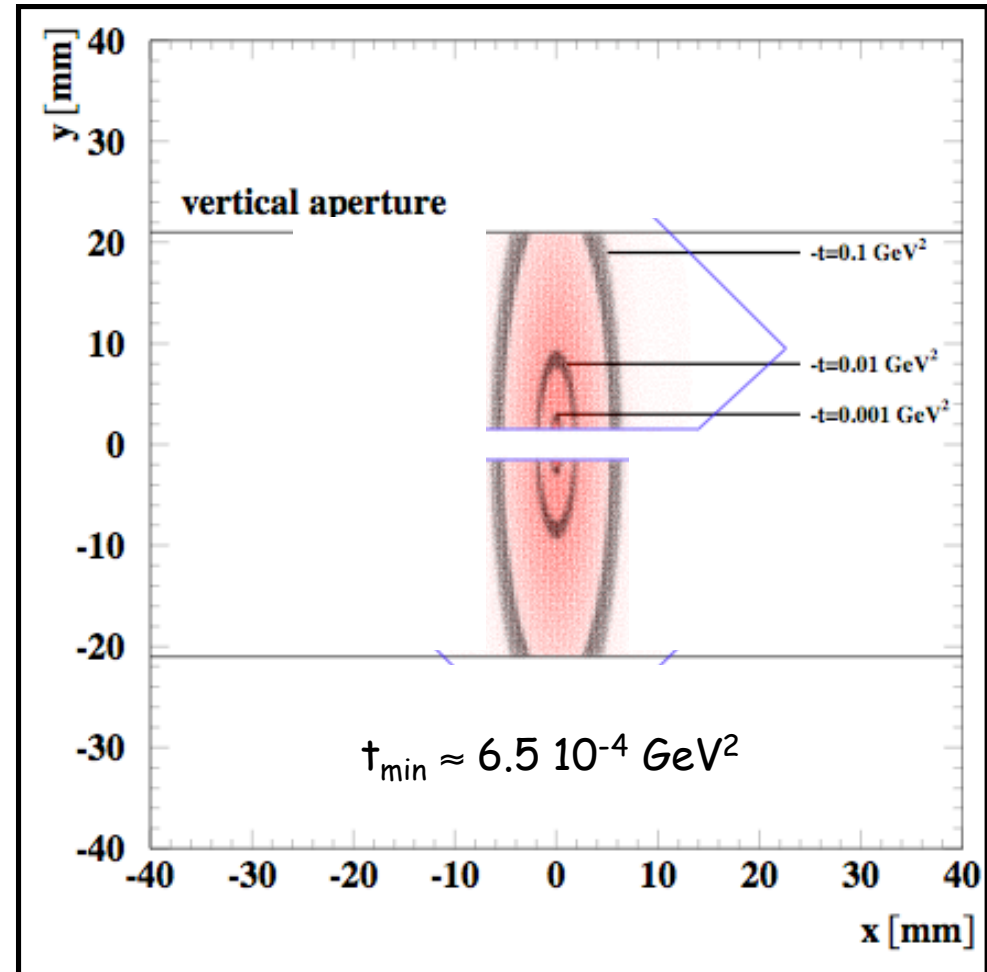
$$t_{\min} = \frac{p^2}{\gamma} n_d^2 \varepsilon_N / \beta^*$$

↑
↑

Distance minimale d'approche du faisceau (en unité de dimension du faisceau)

Emittance normalisée

n_d et ε_N doivent être optimisés pour obtenir $t_{\min} = 6.5 \cdot 10^{-4} \text{ GeV}^2$



Impacts sur ALFA d'événements ($5 \cdot 10^{-5} < -t < 0.2 \text{ GeV}^2$). Les bandes correspondent à $\pm 20\%$



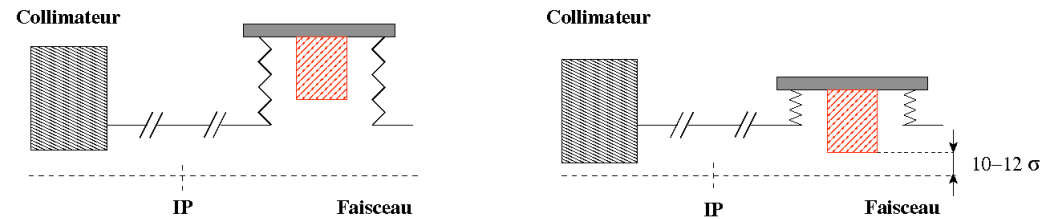
Emittance

Déjà obtenu dans le SPS

- 0.9 $\mu\text{m rad}$ en H et 1.1 $\mu\text{m rad}$ en V pour $7 \cdot 10^{10}$ protons par paquet
- 0.6-0.7 $\mu\text{m rad}$ en H et V pour $0.5 \cdot 10^{10}$ protons par paquet
- Emittance normalisée de 1.0 $\mu\text{m rad}$ pour quelques 10^{10} protons par paquet est probablement OK dans le SPS. Peut-on la transmettre au LHC ?
- Dans le LHC, l'amortissement dû au rayonnement synchrotron aidera à diminuer l'emittance

Collimation

• Avant d'approcher le détecteur, il faut fermer les collimateurs



• Une trop faible ouverture des collimateurs provoque une augmentation de l'emittance

• La limite de l'instabilité varie comme :

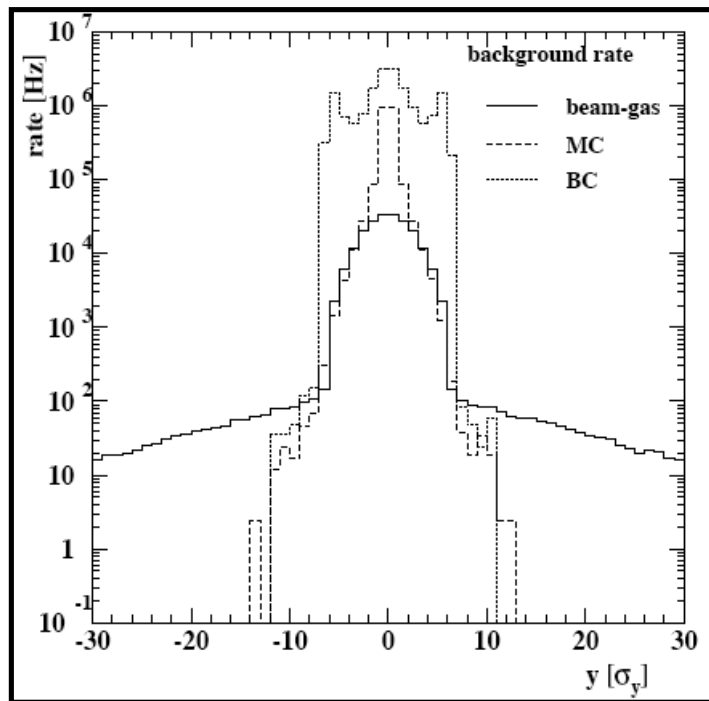
$$\frac{N_p}{n_g^3 \epsilon_N^{5/2}}$$

⇒ Très difficile de prévoir a priori les paramètres N_p , n_d , n_g et ϵ_N



Halo du faisceau

- Inefficacité du « betatron cleaning system »
- Inefficacité du « momentum cleaning system »
- Interaction avec le gaz résiduel



Taux de bruit de fond estimés
sur le détecteur (43 paquets
de 10^{10} p chacun)

⇒ Seule l'interaction avec le
gaz résiduel à un effet au delà
de 10σ



Structure du faisceau pour ALFA

- On doit collecter 10^6 événements pour être limité par les systématiques
- Une semaine de prise de données à $10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- Pour réduire la luminosité de $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ at $10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$:
 - ✓ Facteur 1000 de la valeur de β
 - ✓ Facteur 100 en opérant avec 43 paquets au lieu de 2800 (pas d'angle de croisement et d'offset vertical)
 - ✓ Facteur 10 avec des paquets de 10^{10} protons au lieu de 10^{11} protons

⇒ Le point de fonctionnement de l'accélérateur sera assez éloigné du point de fonctionnement nominal. On espère que cela ne sera pas trop problématique pour l'instrumentation

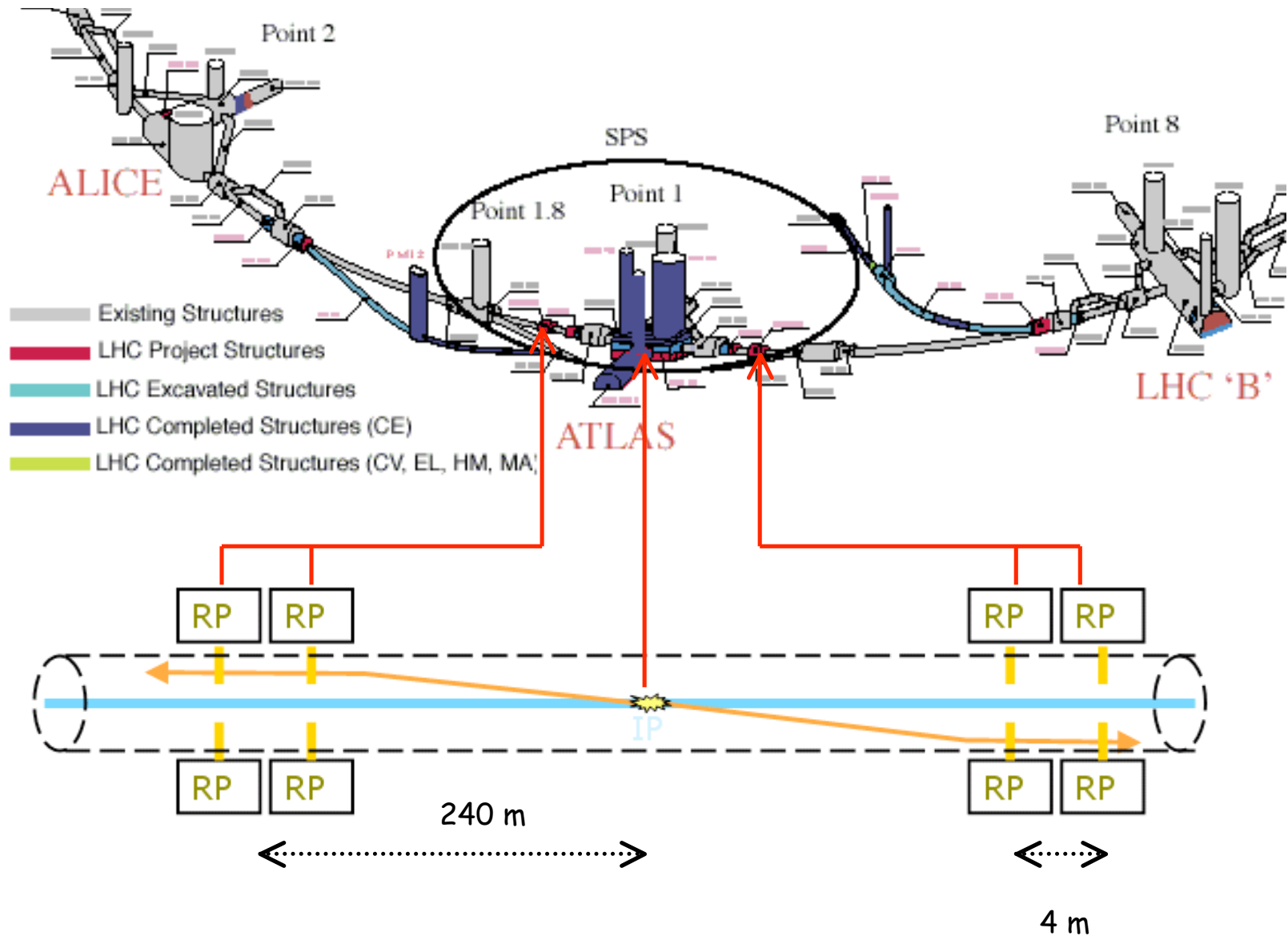


Précision sur les paramètres du faisceau

On doit connaître dans la section droite autour d'ATLAS :

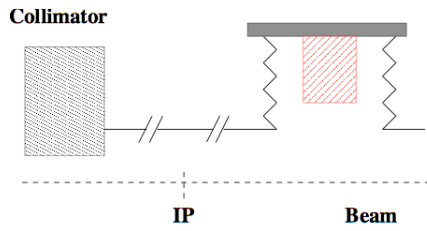
- β^* à $\pm 1\%$
- β au niveau des détecteurs à $\pm 2\%$
- L'avance de phase entre le FP et le détecteur à ± 0.5 degree
- La divergence au IP à $\pm 10\%$
- L'angle de croisement doit être fixé à $0 \pm 0.2 \mu\text{rad}$

Ceci est extrêmement « challenging » (MD time). Du hardware est probablement nécessaire pour la mesure de l'angle de croisement

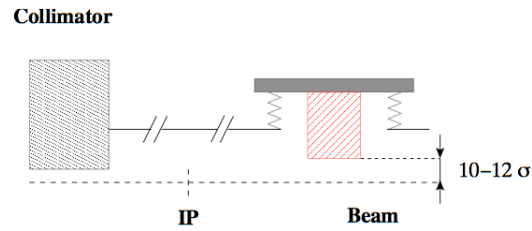




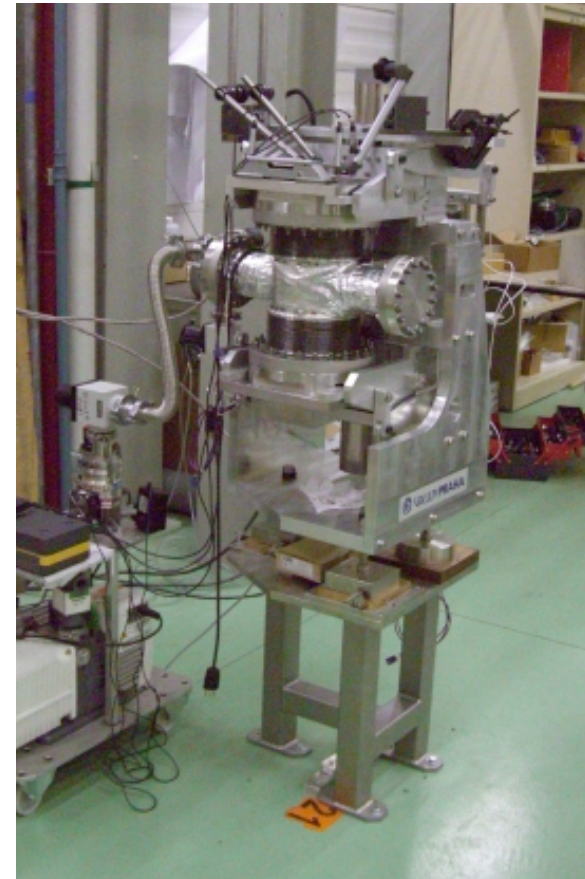
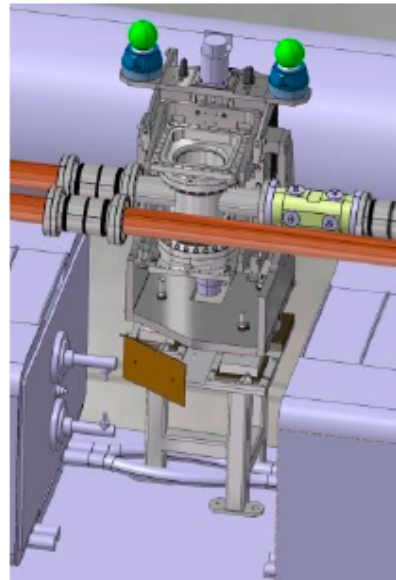
Roman Pot
concept



Garage position



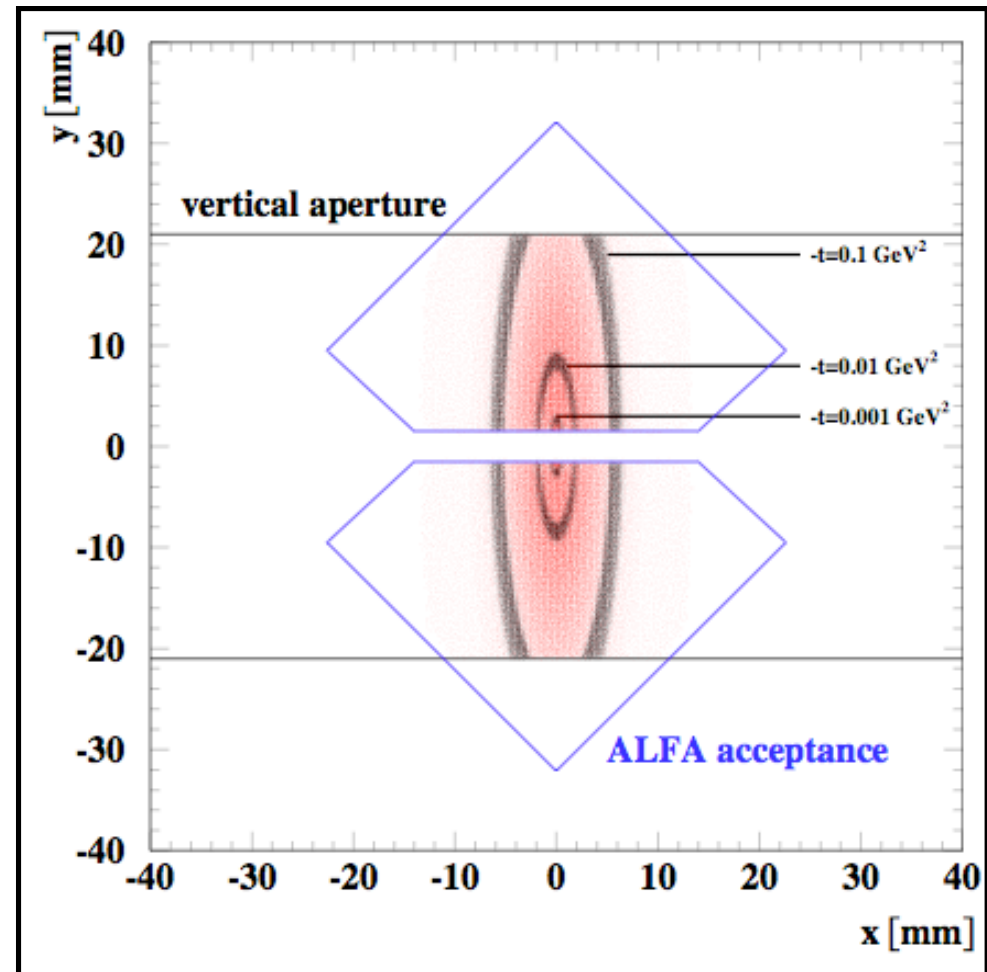
Data taking position



Contraintes sur le détecteur



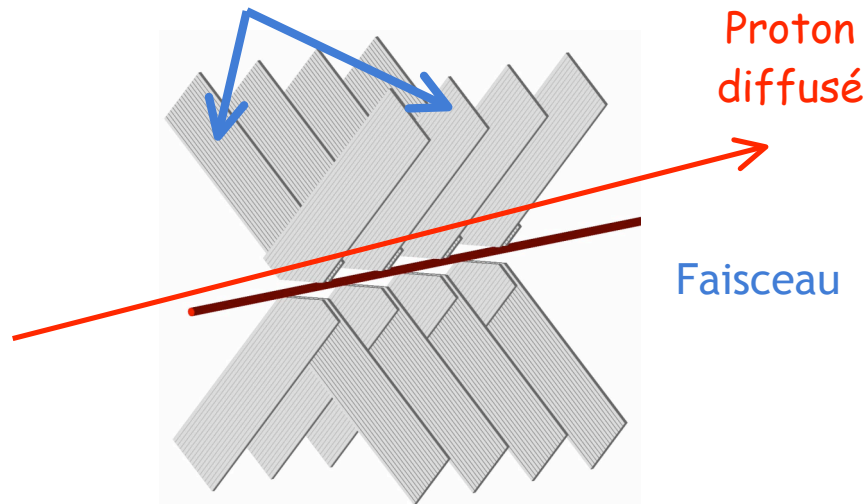
- Zone morte proche du faisceau < 100 μm . Efficacité uniforme plus loin
- Sensibilité au bruit électromagnétique généré par le faisceau
- Résolution en position de l'ordre de 30 μm
- Positionnement relatif à 10 μm entre les deux détecteurs d'un même Pôt
- Faible tenue aux radiations suffisante : 100 Gy/an (de 10^5 à 10^6 Gy/an à haute luminosité)



Impacts sur ALFA d'événements ($5 \cdot 10^{-5} < -t < 0.2 \text{ GeV}^2$). Les bandes correspondent à $\pm 20\%$



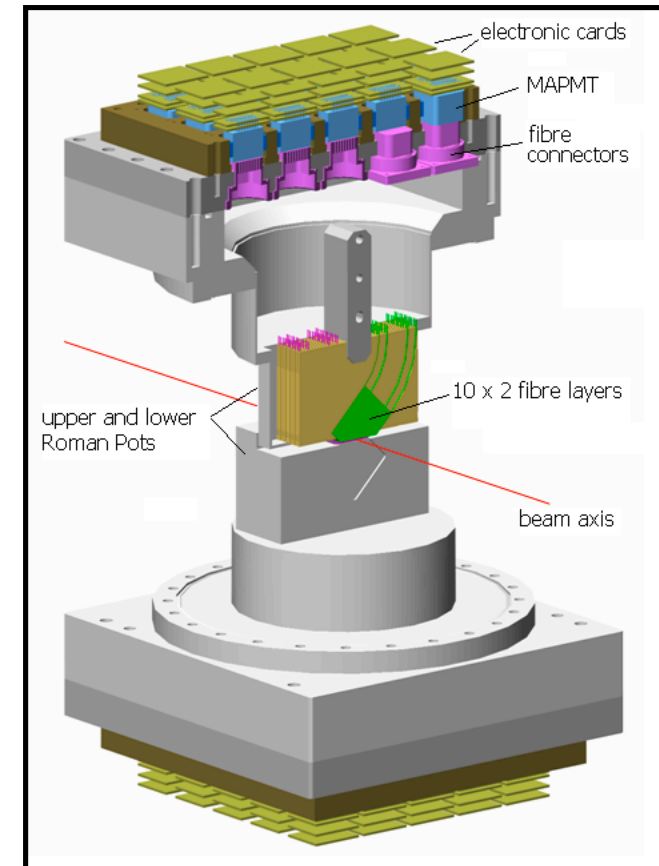
Fibres scintillantes en géométrie UV



Résultats de faisceau test :

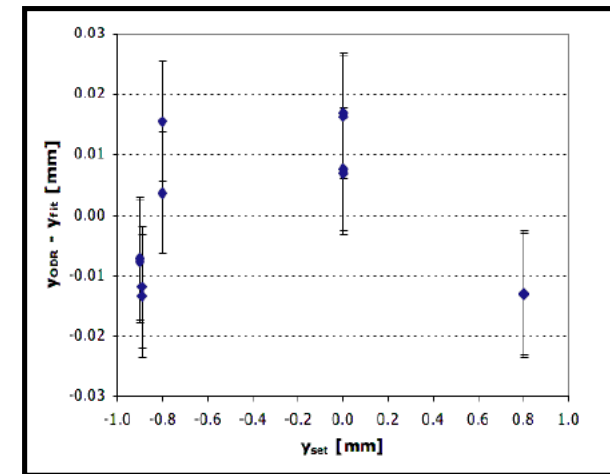
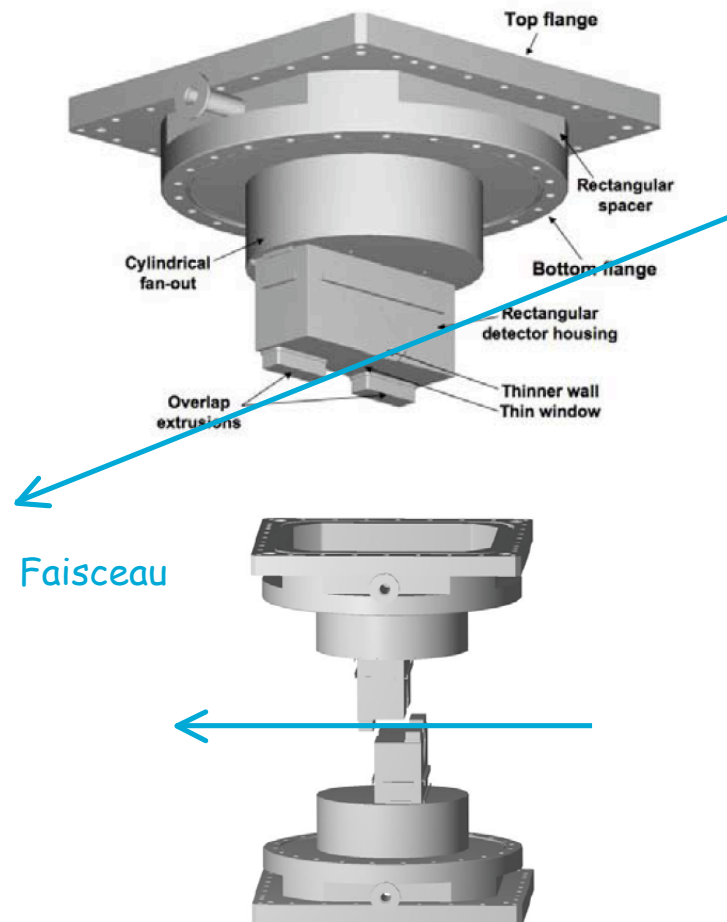
- ≈ 5 photoélectrons par fibre à 950 V
- Résolution spatiale $36 \mu\text{m}$ in H and V
- Efficacité par plan de 92% (seuil à 0.9 photoélectron)
- Zone inactive $\ll 100 \mu\text{m}$

Intégration d'un détecteur



Détecteur de recouvrement

Un détecteur de recouvrement permet de reconstruire la trace des particules du halo à la fois dans les détecteurs H et V (3 plans de fibres par détecteur)



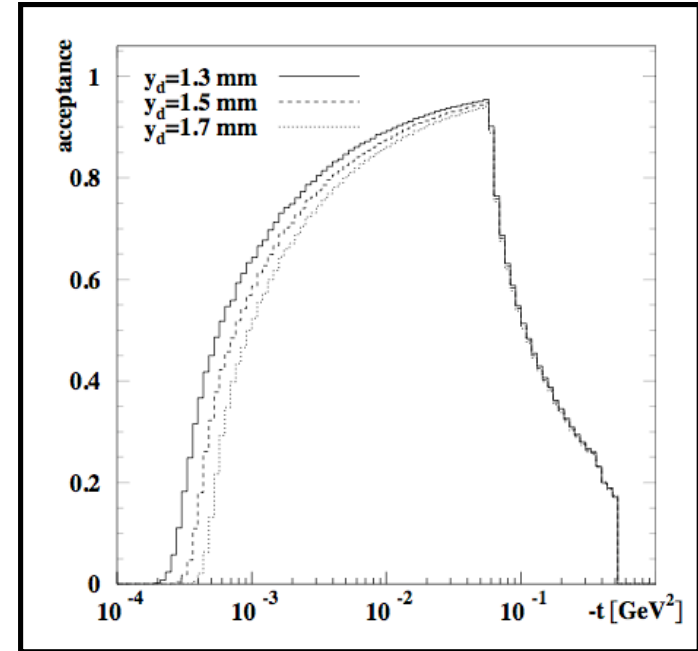
Résidu d'un fit linéaire
entre la position vraie et
la position reconstruite

⇒ La distance entre les détecteurs
haut et bas d'un même Pôt est
contrôlée au niveau de $10 \mu m$!

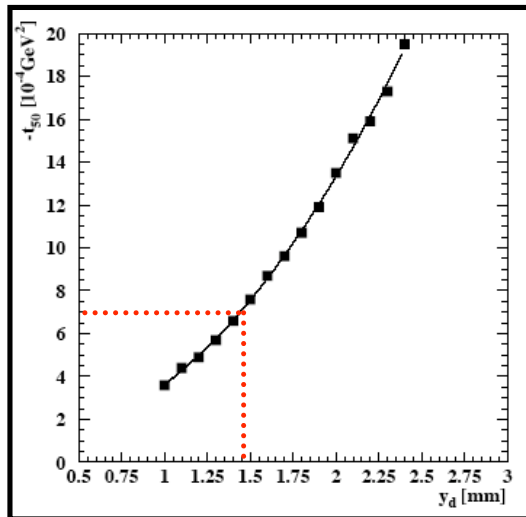


Acceptance

- Dépend de la distance au faisceau
- Les événements acceptés doivent satisfaire la coïncidence gauche-droite
- En intégrant sur t , on reçoit 67% des événements (pour $y_d = 1.5$ mm)
- Pour l'analyse, on demande au moins 50% d'acceptance dans chaque bin en t pour maintenir les corrections et les systématiques à un niveau raisonnable



Acceptance géométrique



t_{\min} pour une acceptance > 50%

$\Rightarrow t_{\min} = 6.5 \cdot 10^{-4} \text{ GeV}^2 \Rightarrow y_d = 1.5 \text{ mm}$



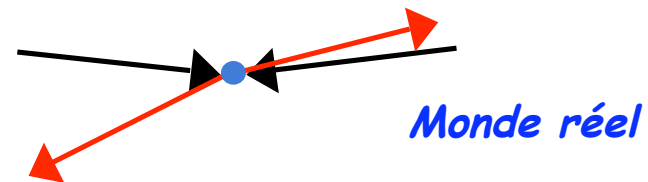
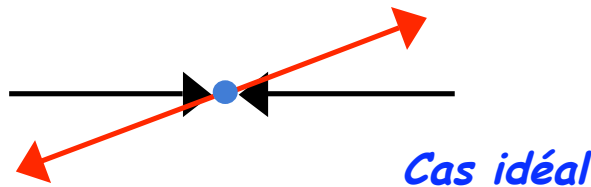
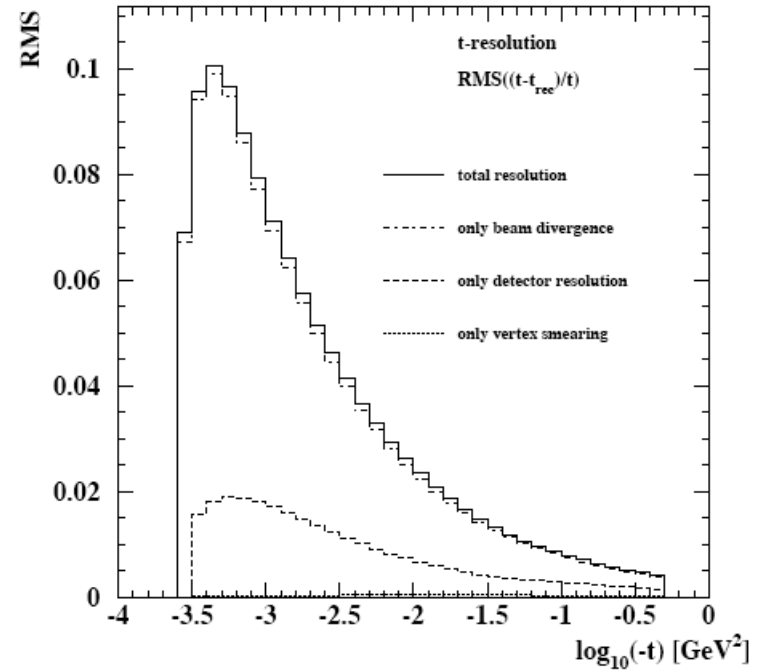
Résolution en t

Dépendance

- Divergence du faisceau
- Etalement du vertex
- Résolution du détecteur
- Alignement du détecteur
- Angle de croisement moyen non nul

$$\sigma' = \sqrt{\frac{\epsilon N}{\beta^*}}$$

La résolution est complètement dominée par la divergence du faisceau



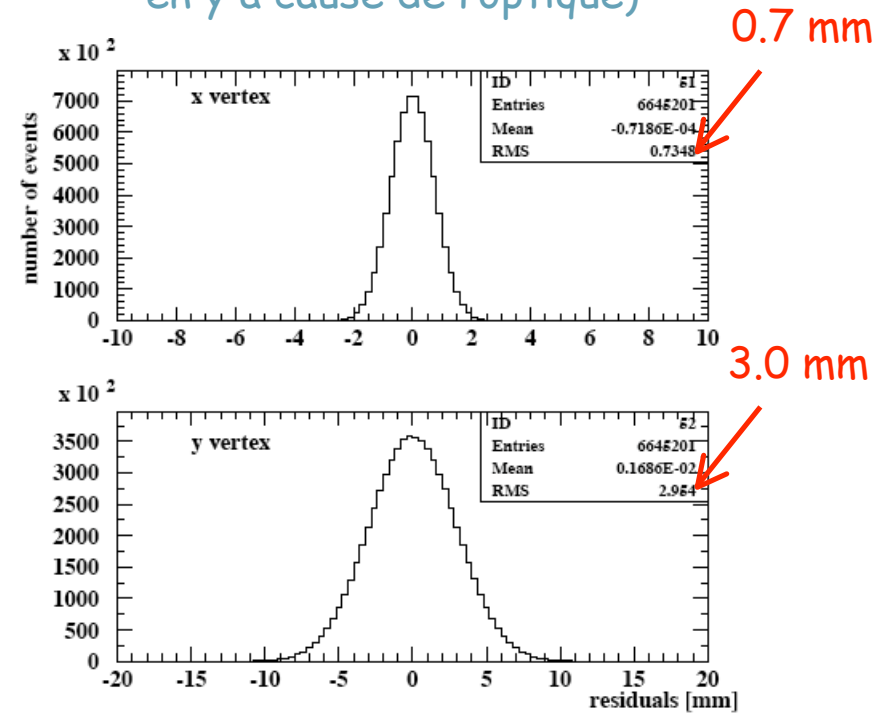
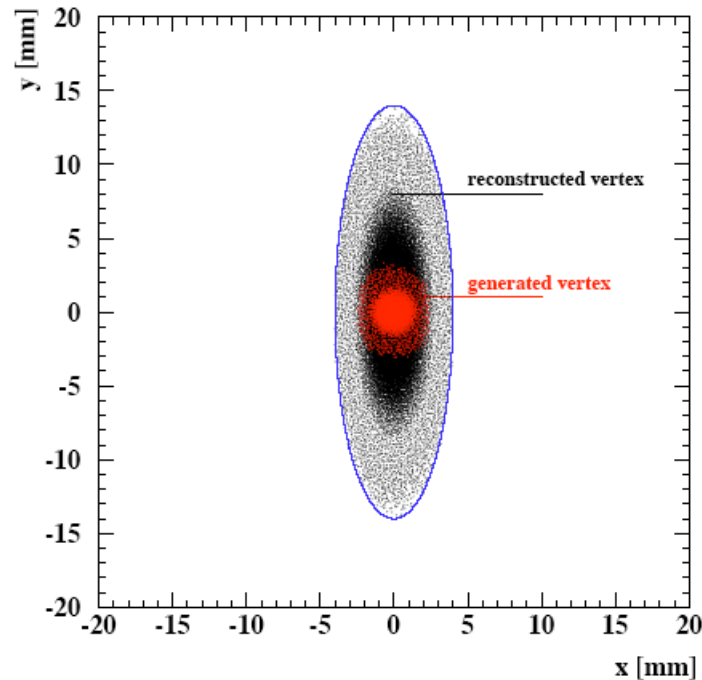
Reconstruction du vertex



Deux ensembles de détecteurs séparés de 4.14 m de chaque coté : on peut mesurer une pente locale et remonter à la position transverse du vertex au FP (en utilisant la résolution en position du détecteur)

Vertex reconstruit (bleu)
versus vertex généré (rouge)

Résolution (faible résolution
en y à cause de l'optique)

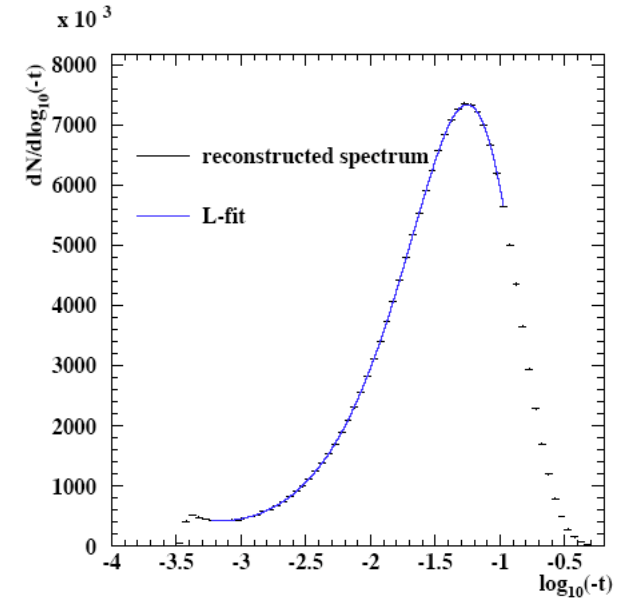
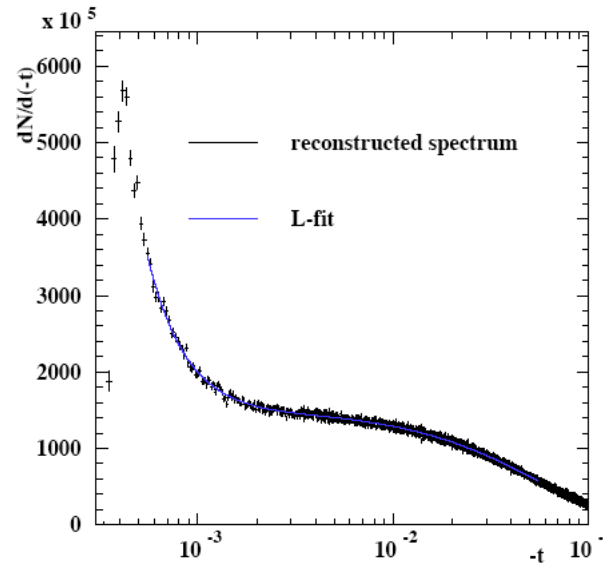


99.7% de événements élastiques sont contenus dans l'ellipse (4 mm, 14 mm)

Fit global



Spectre en τ
reconstruit
(échelles linéaire
et log)



	Input	Linear fit	Error [%]	Log. fit	Error[%]
L [$10^{26} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	8.10	8.151	1.77	8.057	1.89
σ_{tot} [mb]	101.511	101.14	0.9	101.77	1.0
b [GeV^{-2}]	18	17.93	0.25	17.97	0.12
ρ	0.15	0.143	4.3	0.146	3.8
Fit range		0.00055 < $-\tau$ < 0.055		-3.2 < τ < -1.0	
Fit quality [χ^2/Ndof]		2845/2723		33.2/44	

Statistique
uniquement

Erreurs systématiques sur la luminosité



Systematic uncertainties [%]	Linear fit	Logarithmic fit
Nominal result for L	8.151	8.057
Statistical error	1.77	1.89
Beam divergence	0.31	0.30
Crossing angle	0.18	0.15
Optical functions	0.59	0.76
Phase advance	1.0	1.4
Detector alignment	1.3	0.9
Geometrical detector acceptance	0.52	0.43
Detector resolution	0.35	0.19
Background subtraction	1.10	1.51
Total experimental systematic uncertainty	2.20	2.57
Total uncertainty	2.82	3.19

On est dans la gamme des 2-3% !



Conclusion

- On construit un détecteur pour mesurer la section efficace totale et la luminosité absolue
- Prise de données en 2009-2010 ?
- On peut toujours calibrer a posteriori de manière absolue la luminosité, dès lors que LUCID fonctionne
- Le succès d'ALFA dépendra beaucoup de la qualité du faisceau
- Il reste encore énormément de choses à faire avant de fournir une mesure ...



CERN/LHCC/2007-xxx
LHCC I-xxx
27 February 2007

ATLAS Forward Detectors for Measurement of Elastic Scattering and Luminosity Determination

ATLAS Collaboration

Technical Design Report

Issue: 1
Revision: 0
Reference: ATLAS TDR.x, CERN/LHCC 07-xx
Created: 23 February 2007
Last modified: 23 February 2007
Prepared by: ATLAS Luminosity and Forward Physics Community

CERN/LHCC/2007-xxx
LHCC I-xxx
27 February 2007

Devrait paraître
pour la semaine
ATLAS d'Octobre
2007



Backup



The optical theorem relates the total cross section to the forward elastic rate

$$\sigma_{tot} = 4 \pi \operatorname{Im}[f_{el}(t=0)] \Rightarrow L = \frac{1+\rho^2}{16 \pi} \frac{N_{tot}}{dN_{el}/dt|_{t=0}}$$

This was used by UA4 in the SppbarS in the 80's

Requirements

- Total rate measurement
- Elastic cross section extrapolation to $t = 0$
- Assume ρ known with enough accuracy

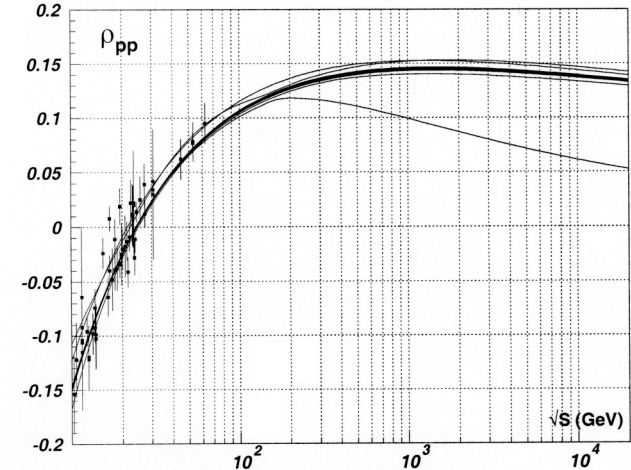
ρ : ratio of real to imaginary part of the elastic scattering amplitude

COMPETE Coll. $\rho_{LHC} \approx 0.1361 \pm 0.0015$

+0.0058
-0.0025

↗

Ambiguity in the TEVATRON data





Total rate measurement requires detector to cover full phase space (98% coverage requires $|\eta|$ up to 7-8)

Extrapolation of dN_{el}/dt to $t = 0$ requires small t values (down to $\approx 0.01 \text{ GeV}^2$) which in turn require:

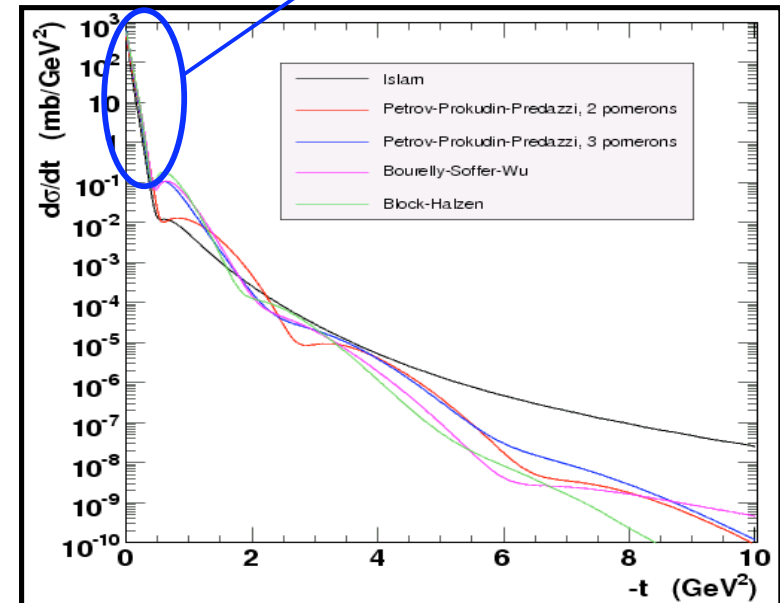
- Diffusion angle $\theta \approx 15 \mu\text{rad}$
- Nominal divergence $\equiv 32 \mu\text{rad} \Rightarrow$ beam with smaller divergence
- Divergence scales as $1 / \sqrt{\beta^*} \Rightarrow$ large β^* required
- Zero crossing angle: fewer bunches than the nominal case
 \Rightarrow Special runs at low luminosity

This is the baseline of the TOTEM experiment around CMS \longrightarrow

Error budget

- Contribution from extrapolation to $t=0 < 1 \%$ (theoretical and experimental)
- Contribution from total rate $\sim 0.8 \%$ $\rightarrow 1.6 \%$ in luminosity
- Error from $\rho \sim 0.5$

Exponential region



The absolute luminosity can be in the 2-3% range (TOTEM claims 1%)