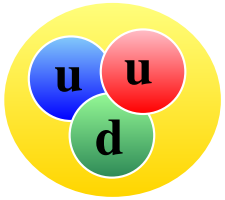
Mesure des facteurs de forme étranges du nucléon par l'expérience de violation de parité au Jefferson Laboratory (USA)

Maud Baylac
CEA DAPNIA/SPhN

Structure du nucléon

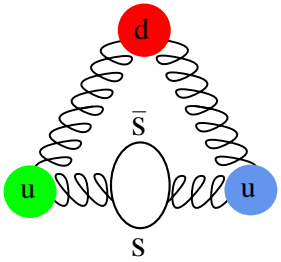
Etrangeté dans le nucléon ?

Quarks constituants



Pas de contribution "s" de valence

QCD



Contribution de la mer ($q\bar{q}$,g)

... Que dit l'expérience ?

Manifestations étranges

Diffusion profondément inélastique :

$\Delta s = -10 \pm 2\ \%$ $\Rightarrow$ $\langle N|\bar{s}\gamma_\mu\gamma_5 s|N\rangle \neq 0$

Diffusion π - N

Contribution à la masse du nucléon ~ 30% $\Rightarrow$ $\langle N|\bar{s}s|N\rangle \neq 0$

Secteur vectoriel :

Non mesuré !!

$\langle N|\bar{s}\gamma_\mu s|N\rangle = ?$

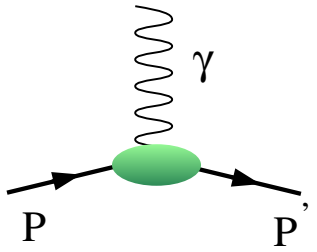
HAPPEX $\Rightarrow$

Contribution du quark étrange à la densité de charge et d'aimantation du nucléon

Facteurs de forme électromagnétiques

Courant électromagnétique :

$$\langle \mathrm{P}' | J_\mu^\gamma | \mathrm{P} \rangle = \overline{\mathrm{U}} \left\{ F_1(Q^2)\gamma_\mu + \mathrm{i}\,\frac{\sigma_{\mu\nu}q^\nu}{2M_N} F_2(Q^2) \right\} \mathrm{U}$$



$$\begin{cases} G_E^\gamma = F_1^\gamma - \tau F_2^\gamma \\ G_M^\gamma = F_1^\gamma + F_2^\gamma \end{cases} \qquad \text{avec} \quad \tau = \frac{Q^2}{4M^2}$$

Décomposition sur les courants de quarks :

$$J_\mu^\gamma = \sum_i \mathrm{Q}_i\, \bar{q}_i \gamma_\mu q_i$$

$$\langle \mathrm{P}' | J_\mu^\gamma | \mathrm{P} \rangle = \sum_i \mathrm{Q}_i \langle \mathrm{P}' | \bar{q}_i \gamma_\mu q_i | \mathrm{P} \rangle$$

Facteurs de forme des quarks

Courant vectoriel de quark:

$$\langle \mathrm{P}' | \bar{q}\gamma_\mu q | \mathrm{P} \rangle = \overline{\mathrm{U}} \left\{ F_1^{(q)}(Q^2)\gamma_\mu + i\frac{\sigma_{\mu\nu}q^\nu}{2M_N} F_2^{(q)}(Q^2) \right\} \mathrm{U}$$

$$\begin{cases} \langle \mathrm{P}' | J_\mu^\gamma | \mathrm{P} \rangle = \frac{2}{3}\langle \mathrm{P}' | \bar{u}\gamma_\mu u | \mathrm{P} \rangle - \frac{1}{3}\langle \mathrm{P}' | \bar{d}\gamma_\mu d | \mathrm{P} \rangle - \frac{1}{3}\langle \mathrm{P}' | \bar{s}\gamma_\mu s | \mathrm{P} \rangle \\ \langle \mathrm{P}' | J_\mu^\gamma | \mathrm{P} \rangle = \overline{\mathrm{U}} \left\{ F_1(Q^2)\gamma_\mu + \mathrm{i}\frac{\sigma_{\mu\nu}q^\nu}{2M_N} F_2(Q^2) \right\} \mathrm{U} \end{cases}$$

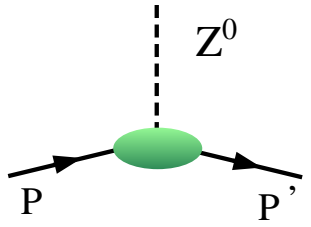
$$F_{1,2}^{\gamma}(p) = \frac{2}{3}F_{1,2}^{u} - \frac{1}{3}F_{1,2}^{d} - \frac{1}{3}F_{1,2}^{s}$$

Symétrie d'isospin :

$$F_{1,2}^{\gamma}(n) = \frac{2}{3}F_{1,2}^{d} - \frac{1}{3}F_{1,2}^{u} - \frac{1}{3}F_{1,2}^{s}$$

Expérience HAPPEX

Facteurs de forme faibles



Courant faible neutre du proton:

$$\langle P' | J_\mu^Z | P \rangle = \overline{U} \left\{ F_1^Z(Q^2)\gamma_\mu + i\frac{\sigma_{\mu\nu}q^\nu}{2M_N}F_2^Z(Q^2) + \gamma_\mu\gamma_5 G_1^Z(Q2) + \frac{q_\mu}{M_N}\gamma_5 G_P^Z(Q^2) \right\} U$$

Décomposition sur les courants de quarks:

$$J_\mu^Z = \sum_i Q_V^i \bar{q}_i\gamma_\mu q_i + Q_A^i \bar{q}_i\gamma_\mu\gamma^5 q_i$$

$$\begin{cases} Q_V^i = -\frac{1}{2}T_3^i - Q_i \sin^2\theta_W \\ Q_A^i = -\frac{1}{2}T_3^i \end{cases}$$

$$\langle P' | \bar{q}\gamma_\mu q | P \rangle = \overline{U} \left\{ F_1^{(q)}(Q^2)\gamma_\mu + i\frac{\sigma_{\mu\nu}q^\nu}{2M_N}F_2^{(q)}(Q^2) \right\} U$$

$$\langle P' | \bar{q}\gamma_\mu\gamma^5 q | P \rangle = \overline{U} \left\{ \gamma_\mu\gamma_5 G_1^{(q)}(Q2) + \frac{q_\mu}{M_N}\gamma_5 G_P^{(q)}(Q^2) \right\} U$$

axial — pseudo-scalaire induit

Expérience HAPPEX

ENFIN!

Faible

$$G_{1,P}^{Z}(p) = -\frac{1}{4}\,G_{1,P}^{u} + \frac{1}{4}\,G_{1,P}^{d} + \frac{1}{4}\,G_{1,P}^{s} = -\frac{1}{2}\,G_A + \frac{1}{4}\,G_1^{s}$$

$$F_{1,2}^{Z}(p) = \left(\frac{1}{4} - \frac{2}{3}\sin^2\theta_W\right) F_{1,2}^{u} + \left(-\frac{1}{4} + \frac{1}{3}\sin^2\theta_W\right) F_{1,2}^{d} + \left(-\frac{1}{4} + \frac{1}{3}\sin^2\theta_W\right) F_{1,2}^{s} \quad *$$

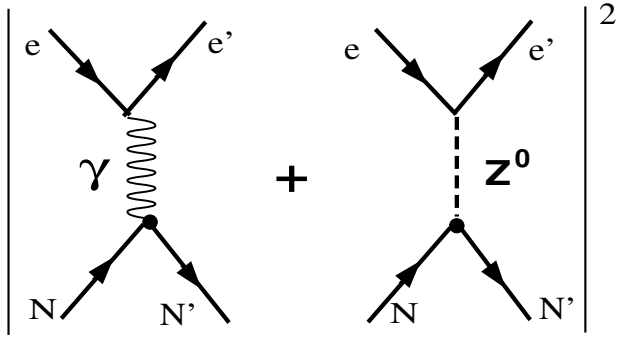
EM

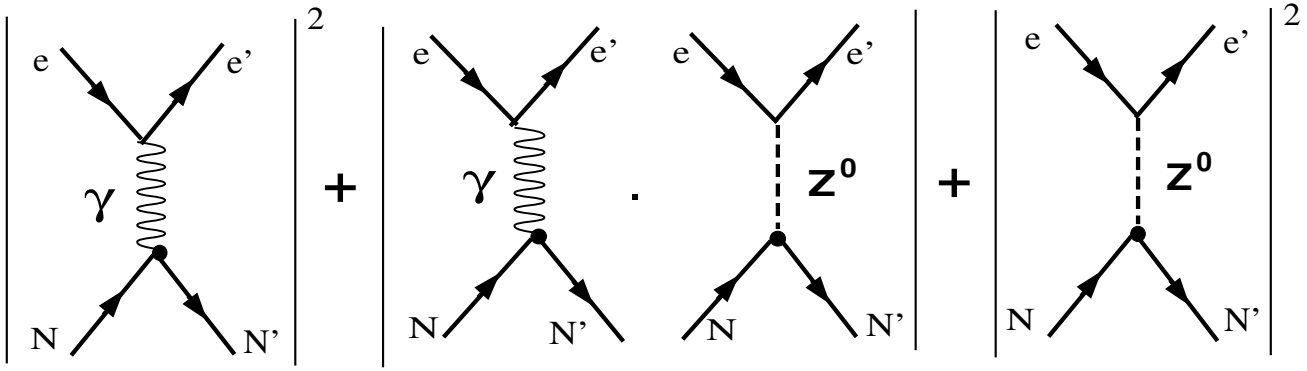
$$F_{1,2}^{\gamma}(p) = \frac{2}{3}F_{1,2}^{u} - \frac{1}{3}F_{1,2}^{d} - \frac{1}{3}F_{1,2}^{s} \quad *$$

$$F_{1,2}^{\gamma}(n) = \frac{2}{3}F_{1,2}^{d} - \frac{1}{3}F_{1,2}^{u} - \frac{1}{3}F_{1,2}^{s} \quad *$$

$$F_{1,2}^{Z}(\mathrm{p}) = \frac{1}{4}\left[\left(1 - 4\sin^2\theta_W\right) F_{1,2}^{\gamma}(\mathrm{p}) - F_{1,2}^{\gamma}(\mathrm{n}) - F_{1,2}^{s}\right]$$

Section efficace ep →ep

$\sigma =$ 

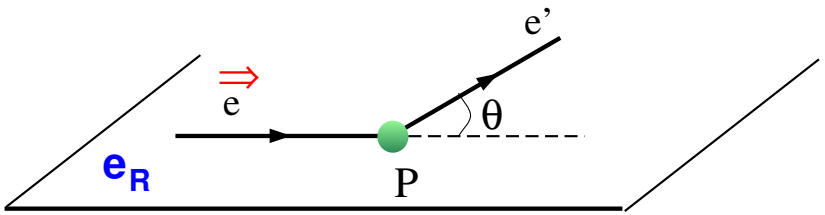
$\sigma =$ 

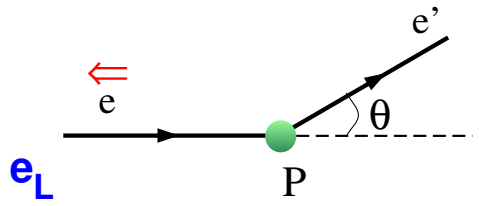
Pour $Q^2 \sim 1\ \mathrm{GeV}^2$:

$|\mathcal{M}_\gamma|^2 \sim 1$ $\qquad \Re\left(\mathcal{M}_\gamma^* \mathcal{M}_{Z^0}\right) \sim 10^{-4}$ $\qquad |\mathcal{M}_{Z^0}|^2 \sim 10^{-8}$

Expérience HAPPEX

Violation de parité dans ep $\overrightarrow{\ }$ $\rightarrow$ep





$$\sigma_R \sim |\mathcal{M}_\gamma|^2_R + 2\,\Re\left(\mathcal{M}^*_\gamma \mathcal{M}_{Z^0}\right)_R$$

Parité

$$\sigma_L \sim |\mathcal{M}_\gamma|^2_L + 2\,\Re\left(\mathcal{M}^*_\gamma \mathcal{M}_{Z^0}\right)_L$$

$$\sim |\mathcal{M}_\gamma|^2_R - 2\,\Re\left(\mathcal{M}^*_\gamma \mathcal{M}_{Z^0}\right)_R$$

$$A_{PV} = \frac{\sigma_R - \sigma_L}{\sigma_R + \sigma_L} \approx \frac{2\,\Re\left(\mathcal{M}^*_\gamma \mathcal{M}_{Z^0}\right)}{|\mathcal{M}_\gamma|^2}$$

~ **300 ppm** pour $Q^2 \sim 1$ GeV ^{2}

Expérience HAPPEX

Asymétrie de violation de parité

$$A_{PV} = \frac{\mathcal{G}_F Q^2}{\sqrt{2}\pi\alpha} \frac{\epsilon\, G_E^{\gamma}(\mathrm{p})\, G_E^{Z}(\mathrm{p}) + \tau G_M^{\gamma}(\mathrm{p})\, G_M^{Z}(\mathrm{p}) - \delta\, G_M^{\gamma}(\mathrm{p})\, G_1^{Z}(\mathrm{p})}{\epsilon\, G_E^{\gamma}(\mathrm{p})^2 + \tau\, G_M^{\gamma}(\mathrm{p})^2}$$

Facteurs cinématiques :

$$\tau = \frac{Q^2}{4M^2}\,, \qquad \epsilon = \frac{1}{1 + 2(1+\tau)\tan^2\frac{\theta}{2}}$$

$$\delta = \frac{1}{2}\left(1 - 4\sin^2\theta_W\right)\sqrt{1-\epsilon^2}\sqrt{\tau(1+\tau)}$$

Asymétrie de violation de parité

Séparation électrique, magnétique et axiale:

$$A_{PV} = \epsilon\, A^{E}_{PV} + \tau\, A^{M}_{PV} - \delta\, A^{A}_{PV}$$

$$A^{E}_{PV} = -\frac{\mathcal{G}_F Q^2}{\sqrt{2}\pi\alpha} \frac{G_E^{\gamma}(p)\; G_E^{Z}(p)}{\epsilon\, G_E^{\gamma}(p)^2 + \tau\, G_M^{\gamma}(p)^2}$$

$$A^{M}_{PV} = -\frac{\mathcal{G}_F Q^2}{\sqrt{2}\pi\alpha} \frac{G_M^{\gamma}(p)\; G_M^{Z}(p)}{\epsilon\, G_E^{\gamma}(p)^2 + \tau\, G_M^{\gamma}(p)^2}$$

$$A^{A}_{PV} = -\frac{\mathcal{G}_F Q^2}{\sqrt{2}\pi\alpha} \frac{G_M^{\gamma}(p)\; G_I^{Z}(p)}{\epsilon\, G_E^{\gamma}(p)^2 + \tau\, G_M^{\gamma}(p)^2}$$

Asymétrie de violation de parité

Séparation du quark étrange:

$$A_{PV} = A^{0}_{PV} (1 - \Delta A_s)$$

$$A^{0}_{PV} = \epsilon\, A^{E,0}_{PV} + \tau\, A^{M,0}_{PV} - \delta\, A^{A,0}_{PV}$$

$$A^{E,0}_{PV} = - \frac{\mathcal{G}_F Q^2}{\sqrt{2}\pi\alpha} \frac{G_E^{\gamma}(p)\left[(1 - 4\sin^2\theta_W)\, G_E^{\gamma}(p) - G_E^{\gamma}(n)\right]}{4\left(\epsilon\, G_E^{\gamma}(p)^2 + \tau G_M^{\gamma}(p)^2\right)}$$

$$A^{M,0}_{PV} = - \frac{\mathcal{G}_F Q^2}{\sqrt{2}\pi\alpha} \frac{G_M^{\gamma}(p)\left[(1 - 4\sin^2\theta_W)\, G_M^{\gamma}(p) - G_M^{\gamma}(n)\right]}{4\left(\epsilon\, G_E^{\gamma}(p)^2 + \tau G_M^{\gamma}(p)^2\right)}$$

$$A^{A,0}_{PV} = - \frac{\mathcal{G}_F Q^2}{\sqrt{2}\pi\alpha} \frac{2\, G_M^{\gamma}(p)\, G_A}{4\left(\epsilon\ G_E^{\gamma}(p)^2 + \tau G_M^{\gamma}(p)^2\right)}$$

Tous les facteurs de forme sont connus

Expérience HAPPEX

Asymétrie étrange

$$\Delta A^s = \frac{1}{4} \; \frac{G_E^s + \frac{\tau G_M^\gamma(p)}{\epsilon G_E^\gamma(p)} G_M^s + \frac{\delta G_M^\gamma(p)}{\epsilon G_E^\gamma(p)} G_1^s}{G_E^{Z,s=0}(p) + \frac{\tau G_M^\gamma(p)}{\epsilon G_E^\gamma(p)} G_M^{Z,s=0}(p) + \frac{\delta G_M^\gamma(p)}{\epsilon G_E^\gamma(p)} G_1^{Z,s=0}}$$

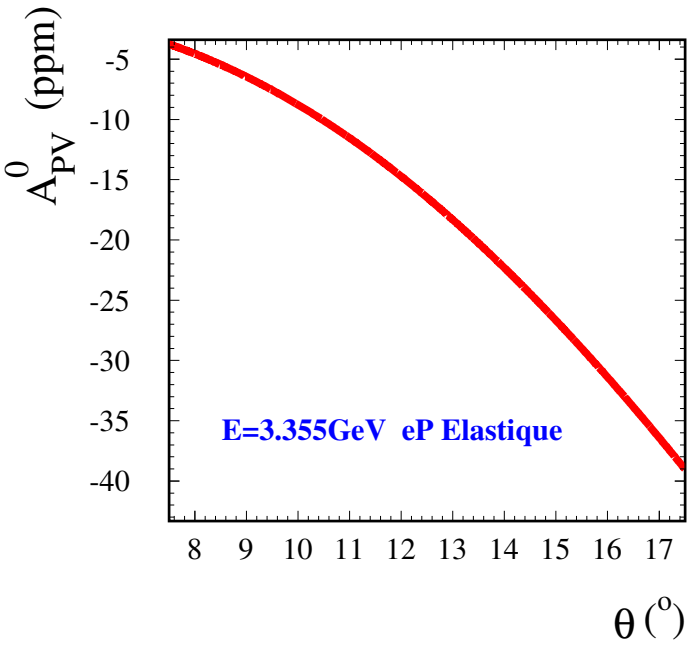
avec $G_{E,M}^{Z,s=0}(p) = \frac{1}{4}\left[(1 - 4\sin^2\theta_W) G_{E,M}^\gamma(p) - G_{E,M}^\gamma(n)\right]$ et $G_1^{Z,s=0} = -\frac{1}{2} G_A$

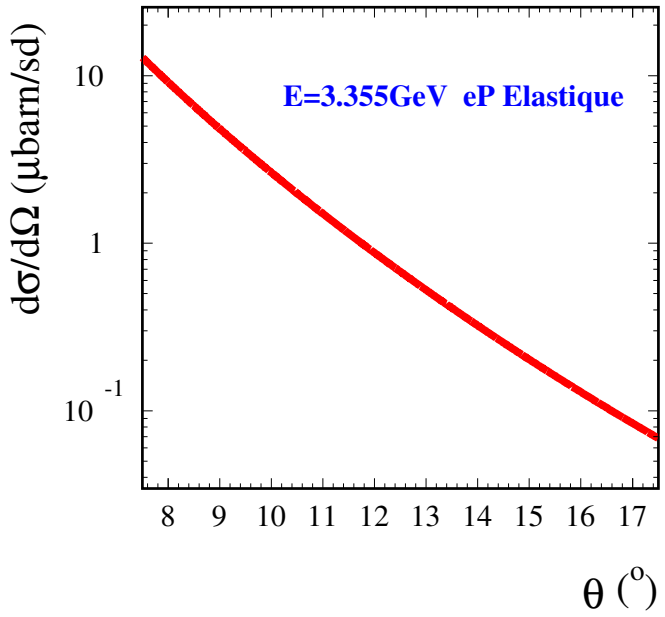
Mesure de:

$$G_E^s + \frac{\tau G_M^\gamma(p)}{\epsilon G_E^\gamma(p)} G_M^s + \frac{\delta G_M^\gamma(p)}{\epsilon G_E^\gamma(p)} G_1^s$$

Expérience HAPPEX

Asymétrie non étrange

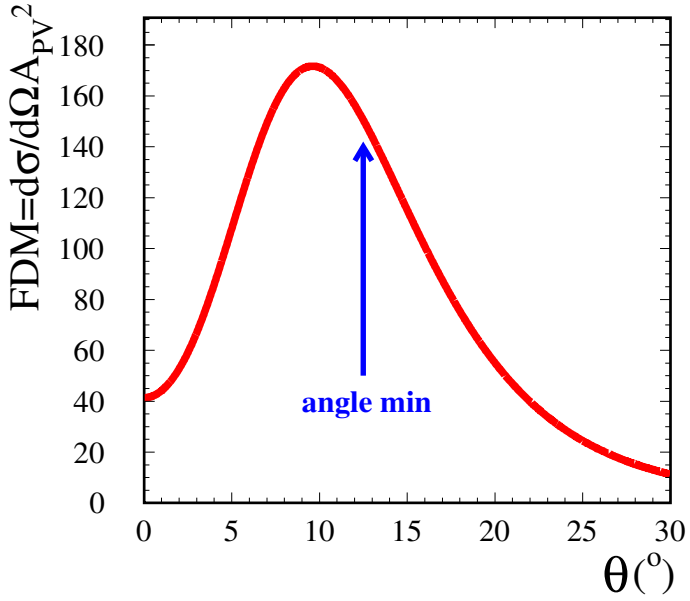




Expérience HAPPEX

Figure de mérite

$$\frac{\sigma(A_{PV})}{A_{PV}} = \frac{1}{P_e}\frac{1}{A_{PV}}\frac{1}{\sqrt{N}} \quad \Rightarrow \quad FDM = A_{PV}^2 \int \frac{d\sigma}{d\Omega}\Delta\Omega$$

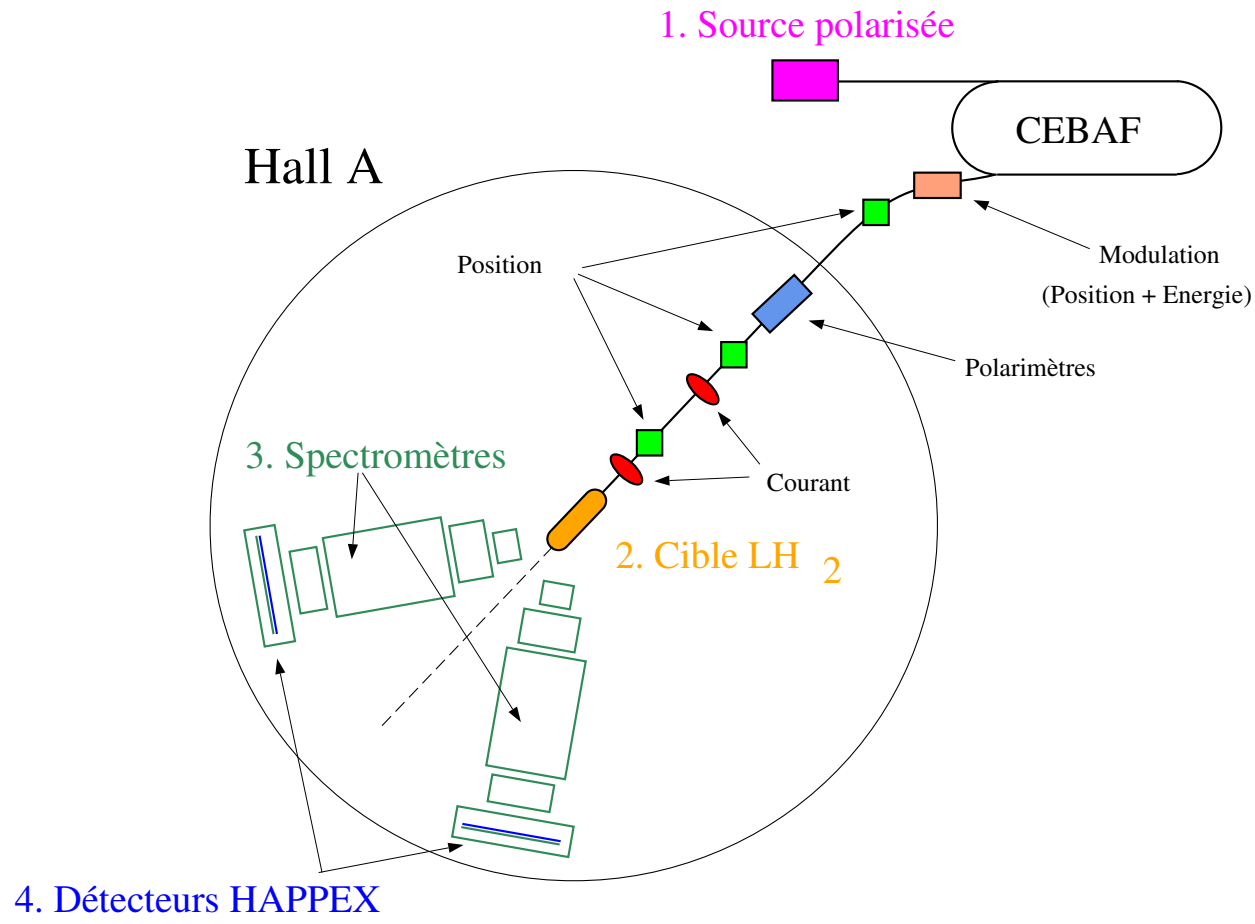


E = 3.355 GeV
θ = 12.54 °
} **Q^2 = 0.47 GeV ^{2}**

$$A_{PV}^0 \approx -16.5 \text{ ppm}$$

$$\frac{\sigma(A_{PV})}{A_{PV}} \approx 10\% \text{ et } P_e \approx 40\% \quad \Rightarrow \quad N \approx 4.10^{12} \text{ evts}$$

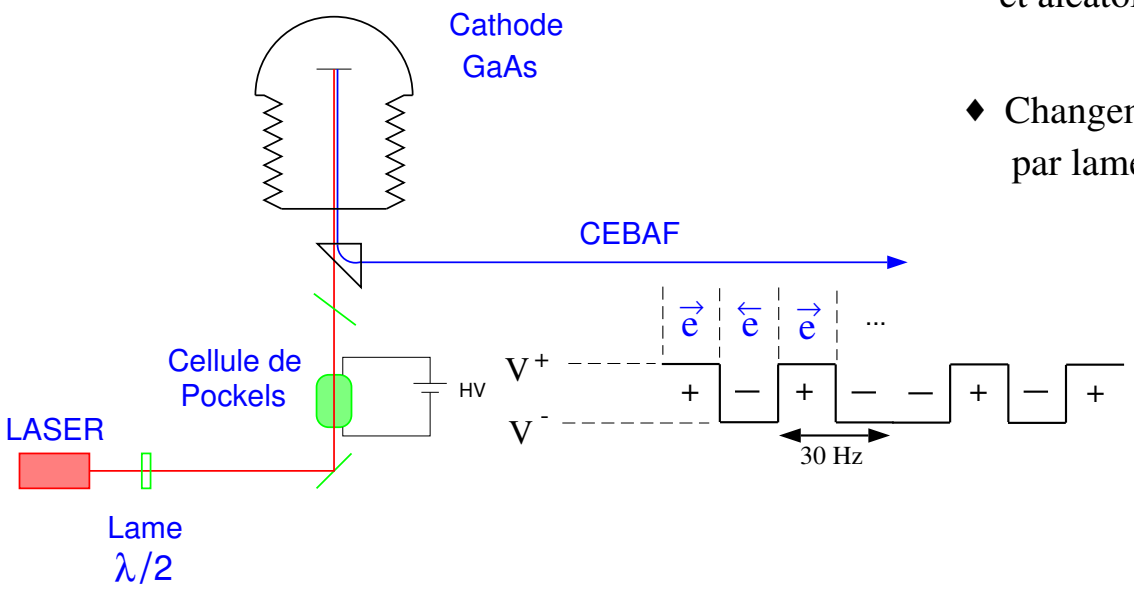
L'expérience HAPPEX : éléments "classiques"



Source polarisée

- $P_e \approx 40\%$ $I_e = 100$ µA
- Renversement rapide (30 Hz) et aléatoire de la polar.
- Changement de signe de A_{exp} par lame $\lambda/2$

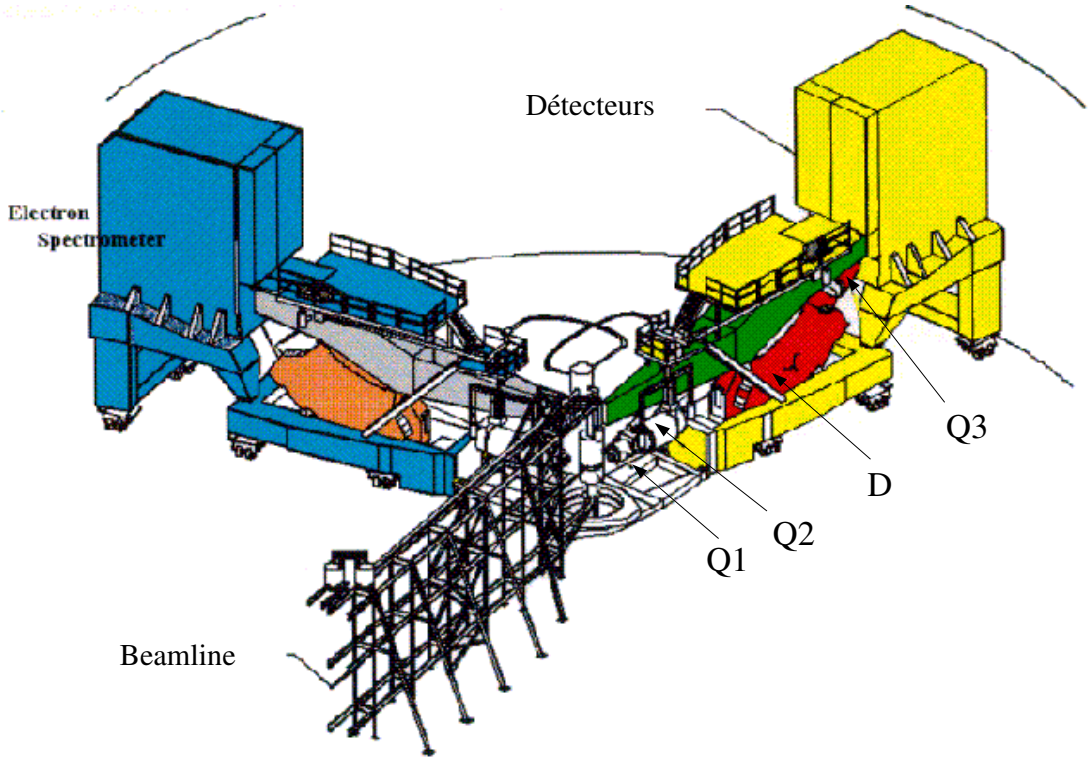
Pompage optique:



Cible de protons

- LH_2 $\rho = 0.0708 g/cm^3$ $\Rightarrow$ $\rho L \sim 1 g/cm^2$
- Fonctionnement à 19K, 1 atm (ébullition à 20K, 1 atm)
- $P_{faisceau} = 400$ W à 100 μA
- Refroidissement: He
- "Raster" ~ 1mm

Détection



Acceptance

$0.5 < E < 3.2$ GeV

$\Delta\Omega = 12$ msrd

Haute résolution

$\Delta p/p = 10^{-4}$

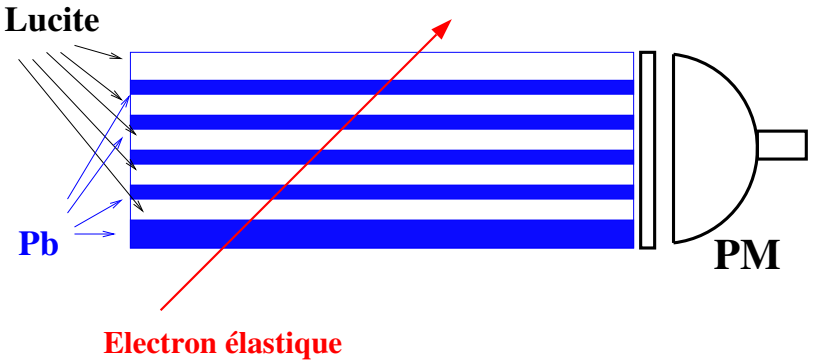
Séparation

12.54 cm/%

2 spectromètres identiques à angles symétriques ⇒ **Double la stat.**

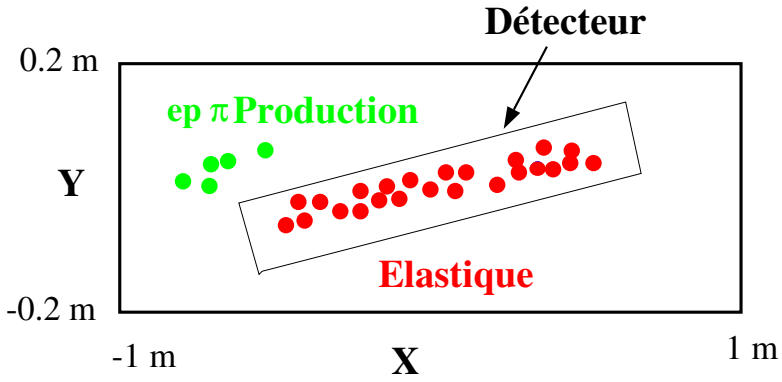
Expérience HAPPEX

Détection



Calorimètre HAPPEX :

- τ = 2MHz
- Signal intégré $\Rightarrow N^{+}, N^{-}$ (ADC 16 bit)
- Pas de temps mort
- Pas de réjection du bruit



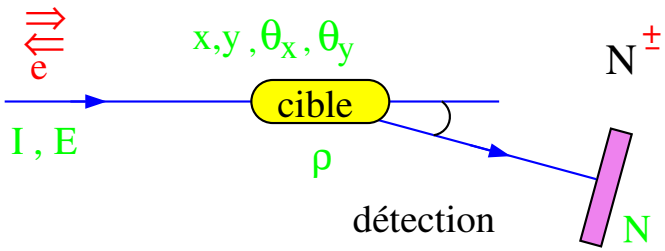
Plan focal :

- Détecteur sur le pic élastique
- Séparation des inélastiques (20 cm)

Spécificités expérimentales

$$A_{exp} = P_e A_{PV} = \frac{N^+ - N^-}{N^+ + N^-} \approx \textbf{- 6 ppm}$$

⇒ Maîtrise nécessaire de toutes les sources d'asymétrie au niveau du ppm !

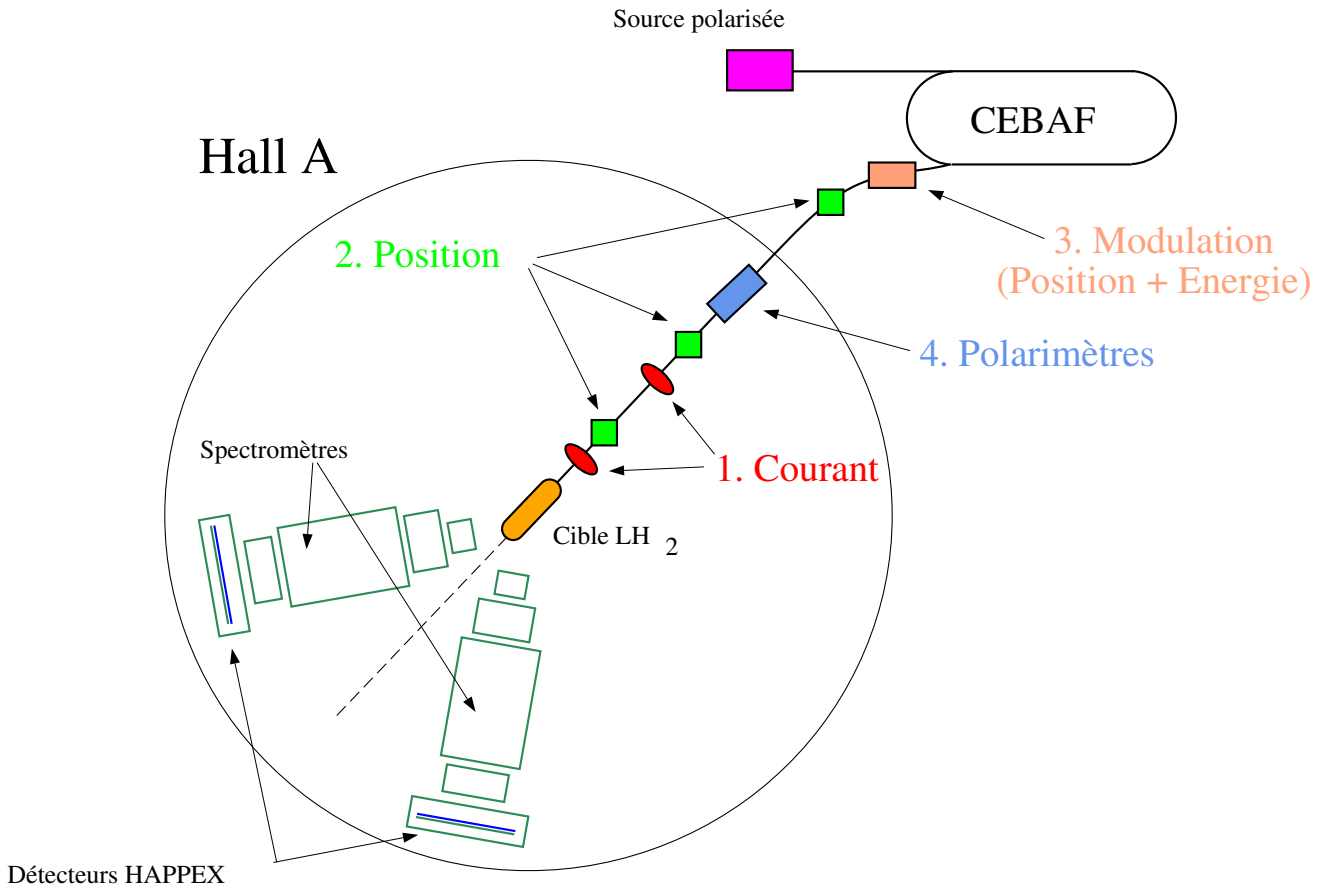


$$N^{\pm} \propto I^{\pm} \rho^{\pm} \int \frac{d\sigma^{\pm}(x,y,\theta_x,\theta_y,E)}{d\Omega} d\Omega^{\pm}(x,y,\theta,\varphi)$$

⇒ **Instrumentation:**

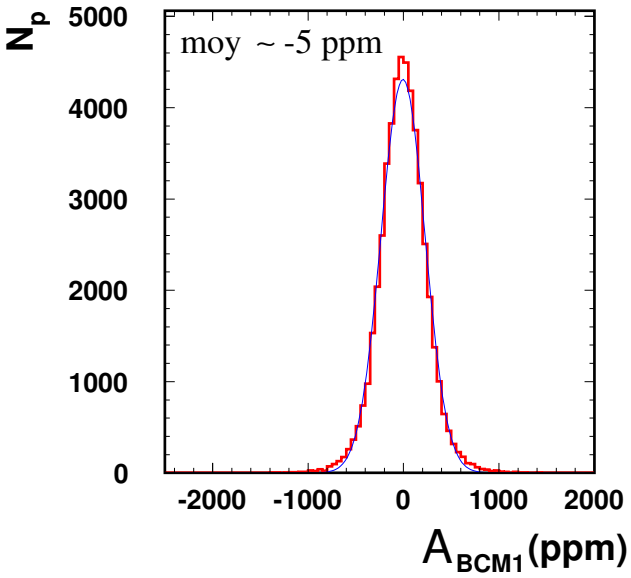
- ♦ Moniteurs de courant
- ♦ Moniteurs de position et d'énergie

L'expérience HAPPEX : éléments spécifiques



Asymétrie en intensité

Moniteurs : Cavités RF à 1.5 GHz, signal intégré sur un pulse de polarisation

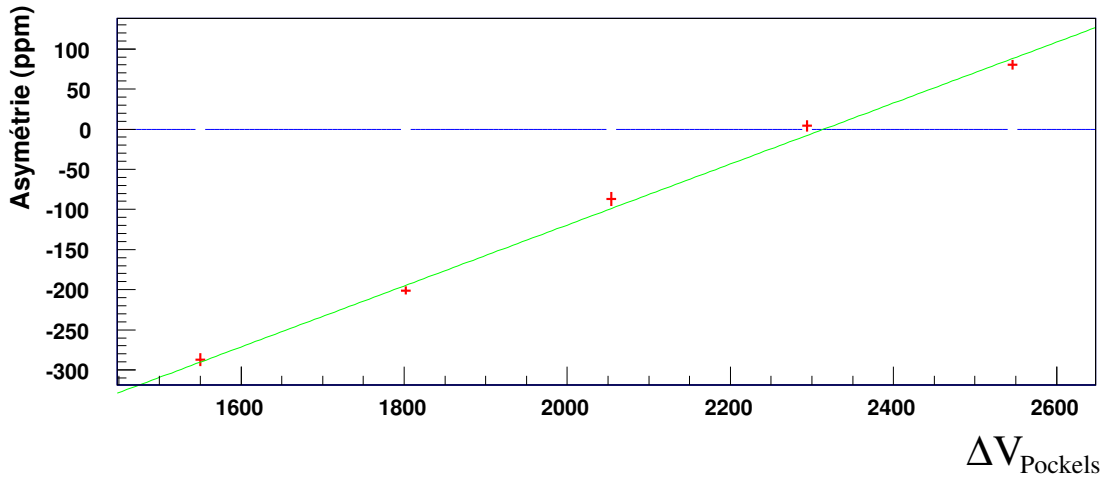


$$A_{exp} = \frac{N^+ - N^-}{N^+ + N^-} = P_e A_{PV} + A_{I_e} + \ldots$$

Restent non-linéarités, effet de densité ⇒ Minimiser A_{I_e}

Minimisation de l'asymétrie en intensité

Mesure en ligne et ajustement de $\Delta V_{Pockels}$ toutes les heures



$\Rightarrow$ < A $_I$> = 0.3 $\pm$ 0.45 ppm sur 1 mois !

Non-linéarités, piedestaux

- Si $D^{\pm}_{mes} = D_{offset} + \alpha D^{\pm} + \beta D^{\pm 2}$

$$A_{D_{mes}} \approx A_D \left(1 + \frac{\beta}{\alpha} D - \frac{1}{\alpha} \frac{D_{offset}}{D}\right)$$

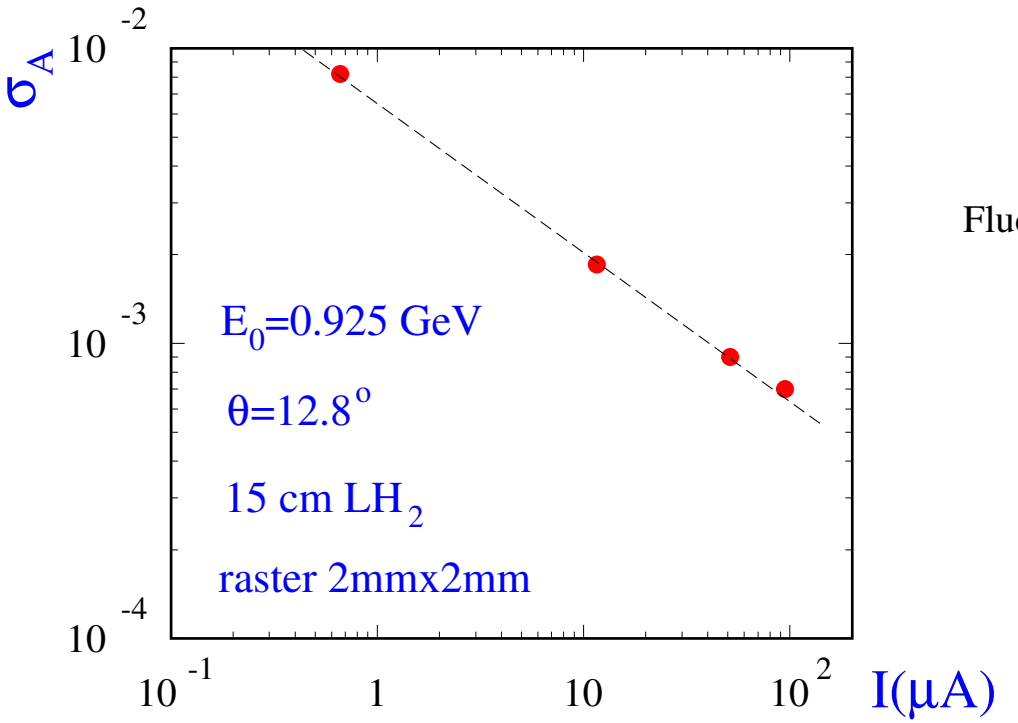
Mesure de $\frac{\beta}{\alpha} X$:

- ♦ Moniteurs de position: **négligeables**
- ♦ Moniteurs de courant: **0.5%**
- ♦ Calorimètres: **< 0.5%**

- Piedestaux : négligeables

⇒ **Contributions négligeables à** A_{exp}

La cible de protons



Test d'ébullition de la cible

$$\frac{\sigma(A_{exp})}{A_{exp}} \propto \frac{1}{\sqrt{I_e}} \frac{1}{\sqrt{\rho}}$$

Fluctuation de ρ pour I_e > 100 μA

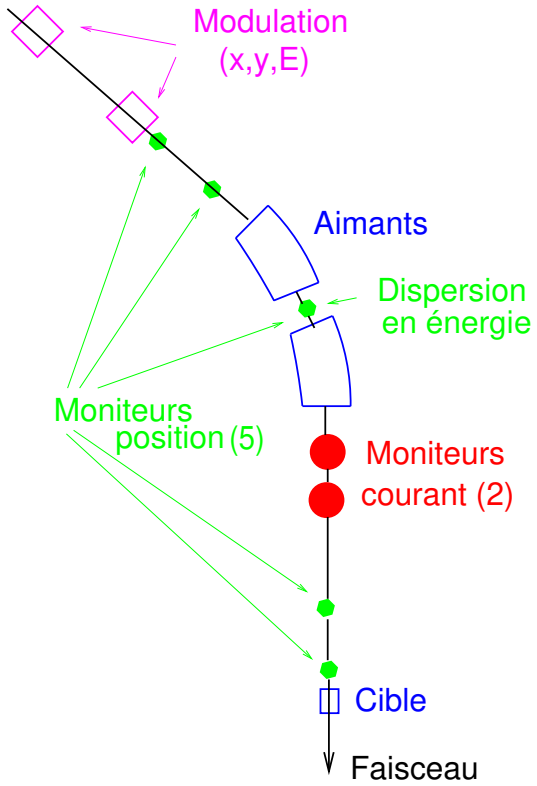
$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \approx -13\%$$

$$\Rightarrow \frac{\sigma(A_{exp})}{A_{exp}} + 7\%$$

Effets de densité :

A_ρ négligeable

Moniteurs de position, d'énergie



Sur un mois de prise de données:

$X_R - X_L < 15$ nm !!

$E_R - E_L < 10$ eV !!

Quel est l'effet sur A_{exp} ?

Influence des asymétries du faisceau

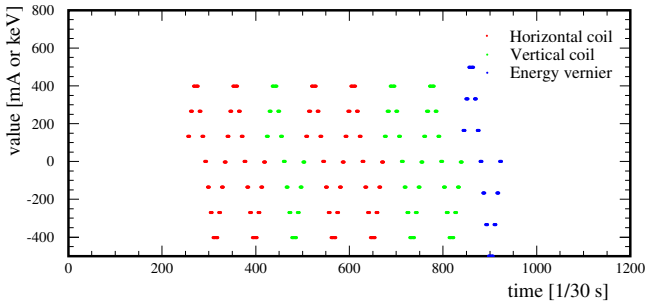
Modulation en position (<1mm)

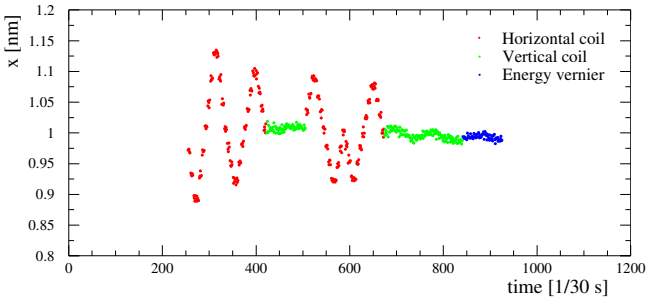
Modulation en énergie (≈ 100 keV)

$$A_x = \sum_{i=1}^{5} a_i \Delta X_i$$

$$a_i = \sum_{j=1}^{5} \frac{\partial A_{det}}{\partial M_j} \frac{\partial M_j}{\partial X_j}$$

où $\frac{\partial A_{det}}{\partial M_j}$ et $\frac{\partial M_j}{\partial X_j}$ sont mesurés





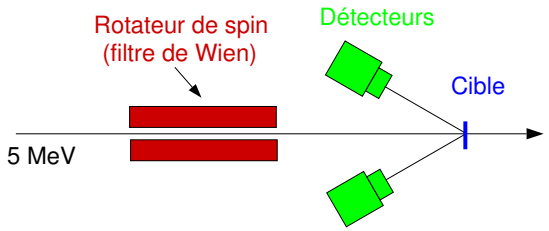
$\Rightarrow$ $A_x = 0.0 \pm 0.3$ ppm

Expérience HAPPEX

Polarimètres

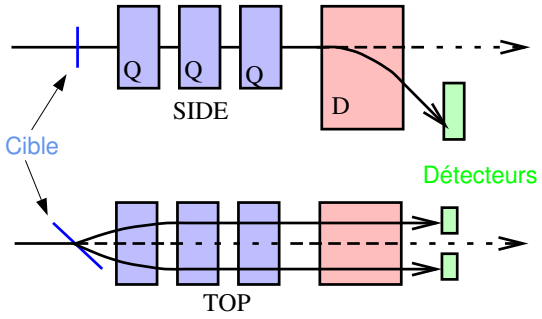
$$A_{exp} = P_e A_{PV} \qquad P_e^{\pm} = \pm \frac{N_D - N_G}{N_D + N_G}$$

Mott



$P_e = 0.40 \pm 0.03$

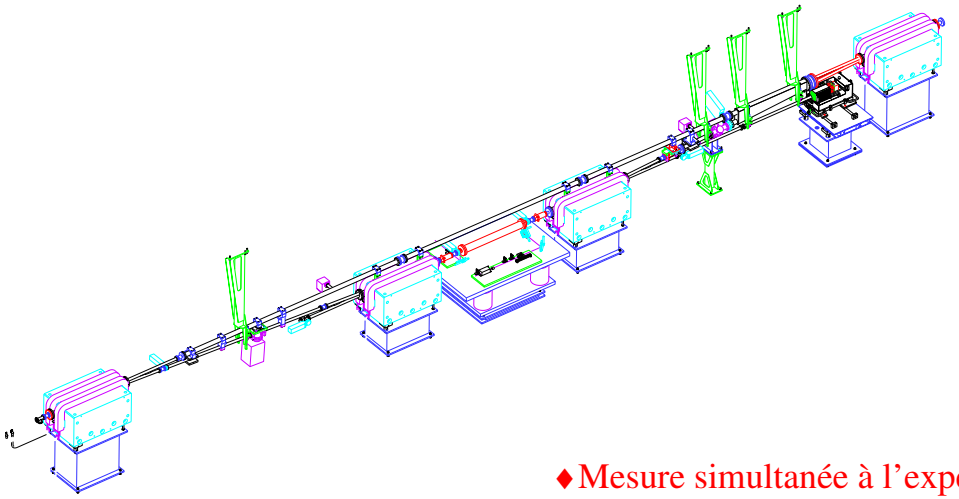
Møller



$P_e = 0.37 \pm 0.03$

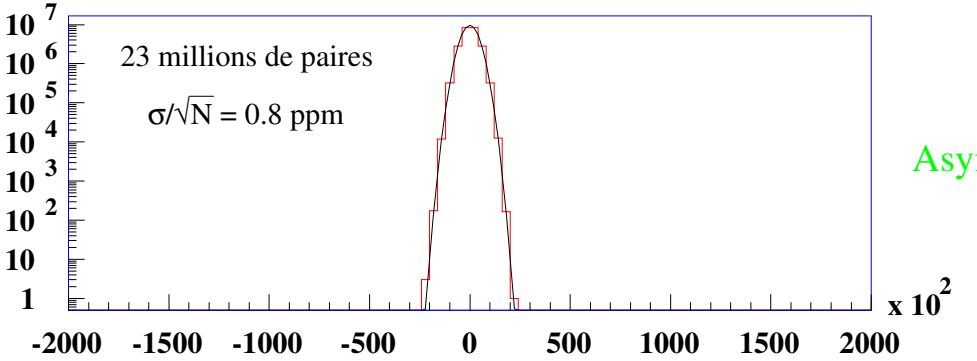
Expérience HAPPEX

Polarimètre Compton

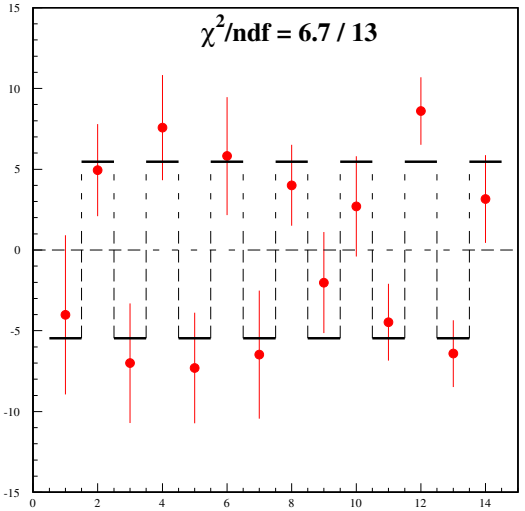


♦Mesure simultanée à l'expérience

Résultats



Asymétrie pulse à pulse (ppm)



Systématique

Renversement du signe de A_{pv} par lame $\lambda/2$

Résultats

Mesure : $A_{exp} = -5.64 \pm 0.75\ (stat) \pm 0.42\ (syst)$ ppm

$\Rightarrow A_{PV} = -14.5 \pm 2.0\ (stat.) \pm 1.1\ (syst.)$ ppm

$\Rightarrow \Delta A_s$

Prédiction : $\Rightarrow A^0_{PV} = -15.8 \pm 0.7 \pm 1.5$ ppm

G_E^n

autres FF

$$G_E^s + 0.4\ G_M^s = 0.023 \pm 0.034\ (stat) \pm 0.022\ (syst) \pm 0.026\ (G_E^n)$$

Expérience HAPPEX

Erreurs

Sources d'erreurs	$\Delta A/A$ (%)
Statistique	13.4
Polarisation faisceau	7.0
Détermination de Q^2	2.0
Bruit de fond	2.0
Corrections radiatives	1.4
G_E^n	9.6
Autres facteurs de forme	4.0

Conclusion

♦ Effet des quark étranges dans le secteur vectoriel :

HAPPEX $$\left.\frac{G_E^s + 0.4 G_M^s}{G_E^p + 0.4 G_M^p}\right|_{(Q^2=0.47 GeV^2)} = 2.1 \pm 6.3\ \%$$

SAMPLE $$\left.\frac{G_M^s}{G_M^p}\right|_{(Q^2=0.1 GeV^2)} = 8.4 \pm 13.5\ \%$$

♦ CEBAF bien adapté à la mesure de violation de parité

♦ Améliorations:

Statistique

Polarimétrie

Mesure plus précise de G_E^n

♦ Perspectives:

Autres points en Q^2

Séparation E-M (He, exp. G0, ...)