# Une étrange sonde du nucléon

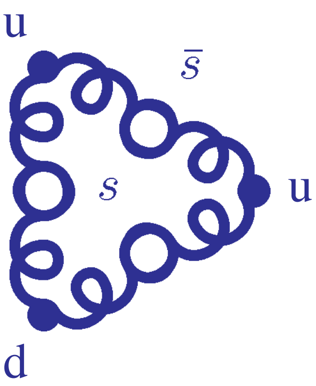
# Violation de P en diffusion $\vec{e}p \to ep$

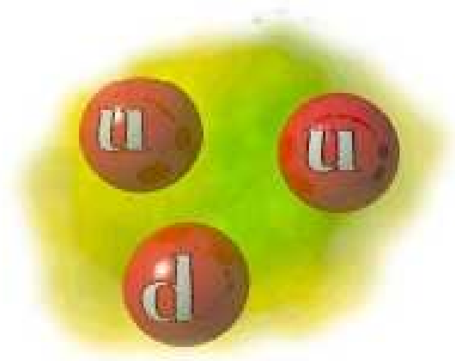
## Motivation

Détermination de $< N|\bar{s}\gamma_\mu s|N >$

Quark étrange et nucléon

# Pourquoi ?




- $P = uud + q\bar{q} + g + \ldots$
- QCD non perturbatif
- Confinement, réseaux

- Quarks constituants
- $P = UUD$
- assez prédictif : $g_a$, $\mu_B$

Violation de Parité

# Intuition versus Expérience

Quarks constituants = Quarks QCD

$$\boxed{< N|\bar{s}\Gamma_\mu s|N> = 0}$$

Expérience DIS

$$\boxed{s^\mu < N|\bar{s}\gamma_\mu\gamma_5 s|N> = -10\% \pm 2\%}$$

Violation de Parité

# Le Plan

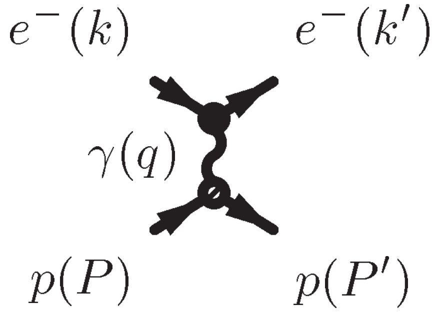
1. Promenade historique
2. Structure $N$ et facteurs de forme électromagnétiques
3. Structure $N$ et facteurs de forme faibles
4. Mesure des facteurs de forme faibles en violation de $P$
5. L'expérience idéale
6. Éléments de détection
7. Situation expérimentale
8. L'avenir

# Interaction faible et violation de parité

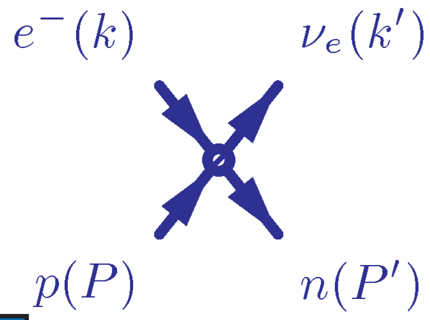
## 1932-33 : désintégration $\beta$ des noyaux

- Pauli et la naissance du $\nu$, $X_Z^A \rightarrow e^- + Y_{Z+1}^A + \bar{\nu}_e$.
- Fermi et la "théorie" de l'interaction faible (copie de QED)

$$\mathcal{M}_{EM}^{ep\rightarrow ep} = \frac{e^2}{q^2} \left(\bar{u}_p \gamma^\mu u_p\right) \left(\bar{u}_e \gamma_\mu u_e\right)$$




$$\mathcal{M}_{FN}^{ep\rightarrow ep} = G \left(\bar{u}_p \gamma^\mu u_n\right) \left(\bar{u}_\nu \gamma_\mu u_e\right)$$



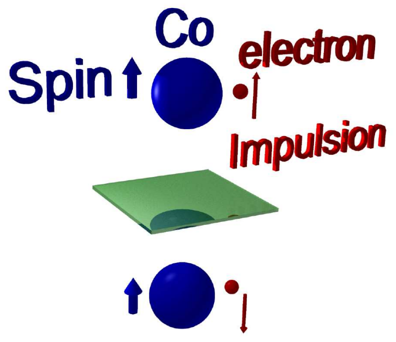

$$G \simeq 10^{-5} GeV^{-2}$$

Violation de Parité

# Interaction faible et violation de parité

## 1956 : Découverte de la violation de parité

- Lee et Yang, "*Question of P conservation in Weak Interaction*".
- C. S. Wu, désintégration $\beta$ du $^{60}Co$ polarisé. $^{60}Co \rightarrow ^{60}Ni + e^- + \nu$

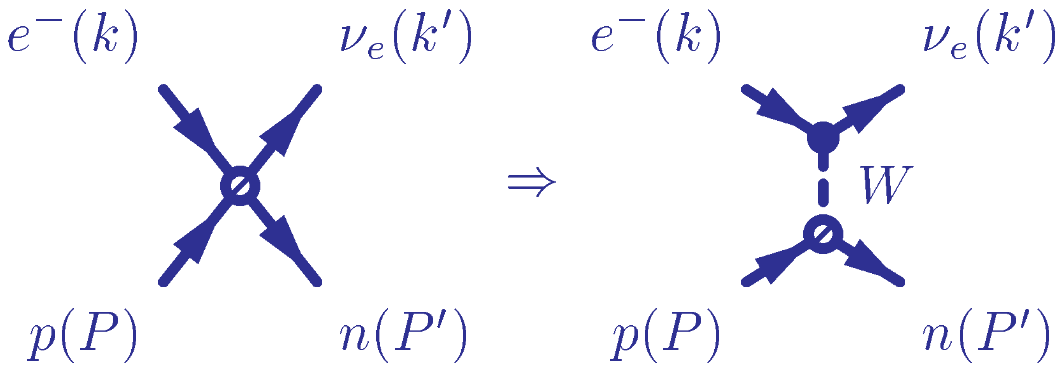



$$\mathcal{M}_{FN}^{ep\rightarrow ep} = G\left(\bar{u}_p \gamma^\mu \left(c_V + c_A \gamma_5\right) u_n\right)\left(\bar{u}_\nu \gamma_\mu \left(1 - \gamma_5\right) u_e\right)$$

# Interaction faible et violation de parité

**1964 : Unification electro-faible**

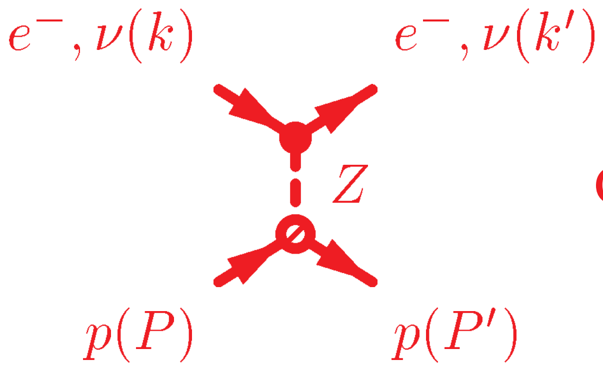
- Glashow, Salam, Weinberg : $B_\mu \otimes W^1_\mu, W^2_\mu, W^2_\mu \Rightarrow A_\mu, W^+_\mu, W^-_\mu, Z^0$




Courants Chargés

$G_F \propto \frac{1}{M_W^2}$

Mais aussi



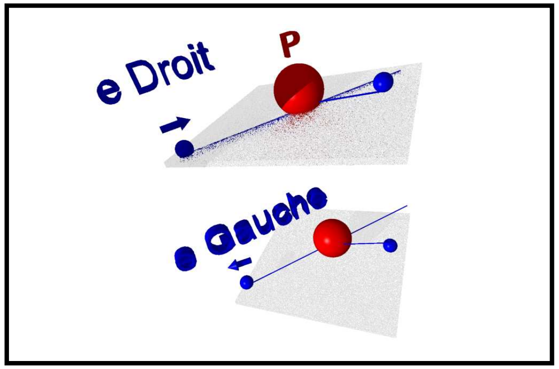

Courants Neutres

**Violation de Parité**

# Interaction faible et violation de parité

**1971-78 : Mise en évidence des courants neutres**

- 1971 : Gargamelle CERN : $\nu_\mu e \rightarrow \nu_\mu e$
- 1978 : Prescott SLAC violation de parité : $\vec{e}D \rightarrow eX$




$Q^2 \simeq 2GeV^2$, "EM" $\gg$ "FN"

"EM" conserve P

"FN" viole P

Asymétrie de violation de parité

$A_{PV} \simeq \frac{"FN"}{"EM"} \simeq 10^{-4}$

**Base de la méthode expérimentale**

Violation de Parité

# Interaction faible et violation de parité

**1983-1998 : Étude de l'interaction faible**

- 1983 : UA1  SPS CERN : $\bar{p}p \to Z X$
- 1990 : LEP/SLC  CERN/SLAC : $e^+e^- \to Z^0$

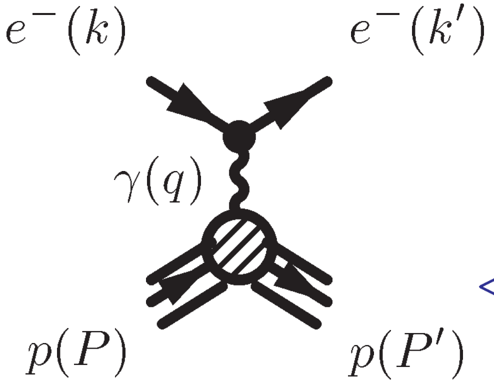
Interaction faible connue

$Z^0$ sonde du nucléon

La Violation de P est un moyen

# Facteurs de forme électromagnétiques du proton

$$-i\mathcal{M}_\gamma = (ie)^2 < p(P')|\hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{EM,\mu}(0)|p(P) > \frac{-ig^{\mu\nu}}{q^2} < e(k')|\hat{\mathcal{J}}^{(e)}_{EM,\nu}(0)|e(k) >$$




$$< e(k')|\hat{\mathcal{J}}^{(e)}_{EM,\nu}(x)|e(k) > = \bar{u}(k')\gamma_\mu u(k) e^{i(k'-k).x}$$

$$< p(P')|\hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{EM,\mu}(x)|p(P) > \neq \bar{\mathcal{U}}(P')\gamma_\nu \mathcal{U}(P) e^{i(P'-P).x}$$

$$< P'|\hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{EM,\mu}(0)|P > = \bar{\mathcal{U}}(P') \left[\gamma_\mu F_1^{(\gamma,p)}(q^2) + \frac{i\sigma_{\mu\nu}q^\nu}{2M_N} F_2^{(\gamma,p)}(q^2)\right] \mathcal{U}(P)$$

$F_1^{(\gamma,p)}$, $F_2^{(\gamma,p)}$ *facteurs de forme électromagnétiques du proton*

Violation de Parité

# Facteurs de forme électromagnétiques du proton

$$F_1^{(\gamma,p)},\ F_2^{(\gamma,p)} \text{réels},\ F_{1,2}^{(\gamma,p)}(Q^2 = -q^2 \geq 0)$$

- Facteurs de forme de Sachs

$$G_E^{(\gamma,p)} = F_1^{(\gamma,p)} - \tau F_2^{(\gamma,p)},\ \ G_M^{(\gamma,p)} = F_1^{(\gamma,p)} + F_2^{(\gamma,p)},\ \ \tau = \frac{Q^2}{4M_N^2}.$$

TF densité de charge et d'aimantation

- Normalisations

$$G_E^{(\gamma,p)}(0) = 1, \qquad G_M^{(\gamma,p)}(0) = \mu_p = 1 + \kappa_p = 2.79.$$

$$F_1^{(P)}(0) = 1, \qquad F_2^{(p)}(0) = \kappa_p = 1.79.$$

# Mesures des facteurs de forme électromagnétiques

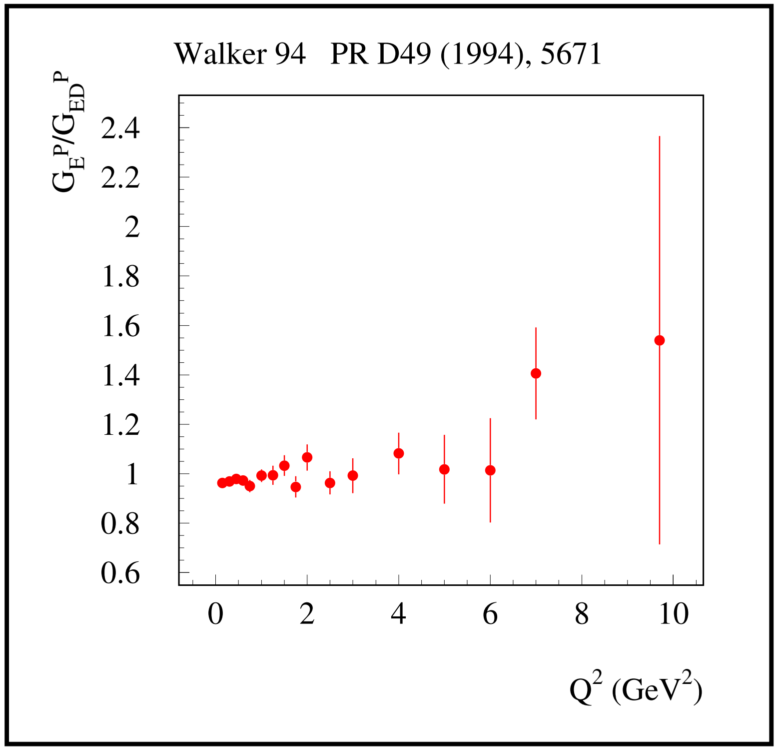
Diffusion élastique $eN \to eN$

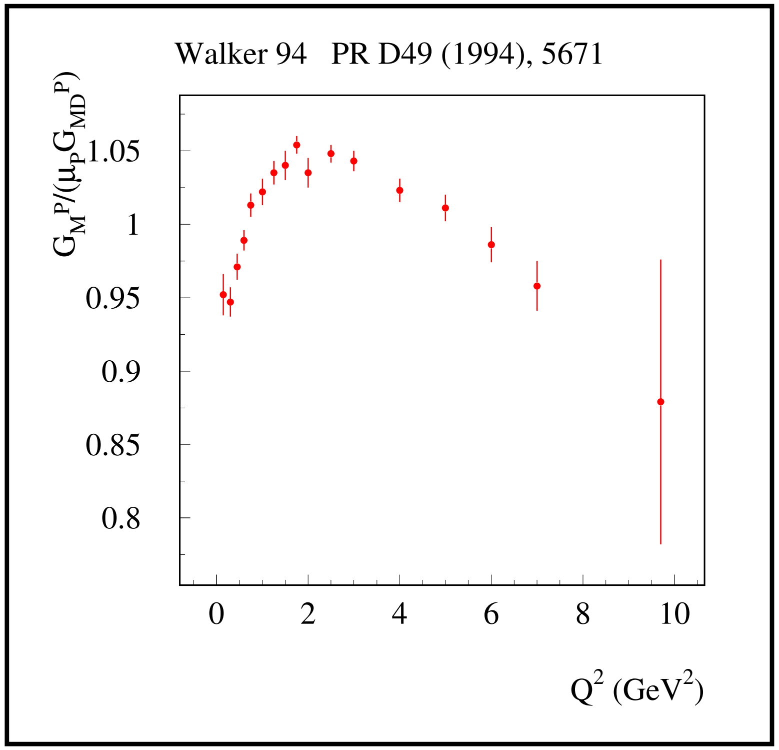
Séparation de Rosenbluth

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_M \frac{E'}{E} \left[ \left( \frac{G_E^{(\gamma,p)\,2} + \tau G_M^{(\gamma,p)\,2}}{1+\tau} \right) + 2\tau G_M^{(\gamma,p)\,2} \tan^2 \frac{\theta}{2} \right].$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_M = \frac{\alpha^2 \cos^2 \frac{\theta}{2}}{4E^2 \sin^4 \frac{\theta}{2}}, \quad \frac{E'}{E} = \frac{1}{1 + 2\frac{E}{M} \sin^2 \frac{\theta}{2}}, \quad Q^2 = 4E^2 \frac{\sin^2 \frac{\theta}{2}}{1 + 2\frac{E}{M} \sin^2 \frac{\theta}{2}}.$$

# Facteurs de forme du proton



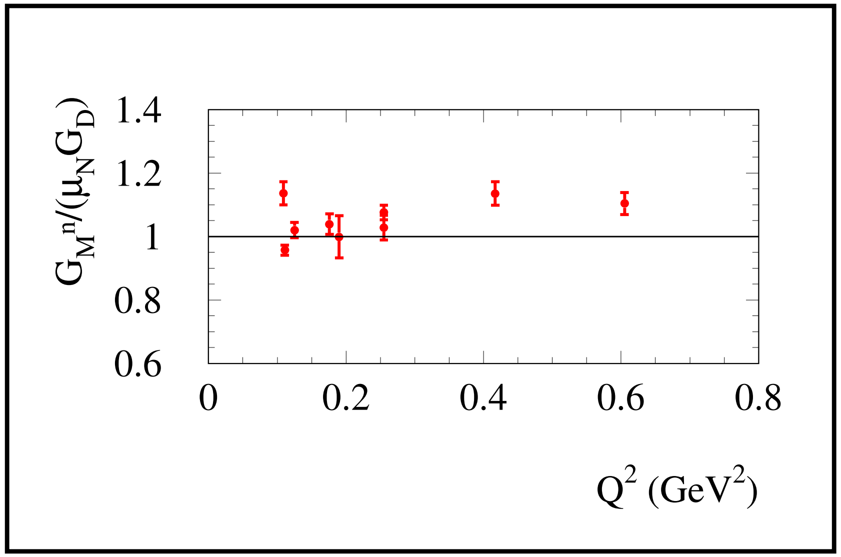

$$G_E^{(\gamma,p)} = \frac{1}{\left(1+\frac{Q^2}{{M_V}^2}\right)^2}, \quad G_M^{(\gamma,p)} = \mu_P G_E^{(\gamma,p)}, \quad M_V = 0.843 GeV.$$

Violation de Parité

# Facteurs de forme du neutron

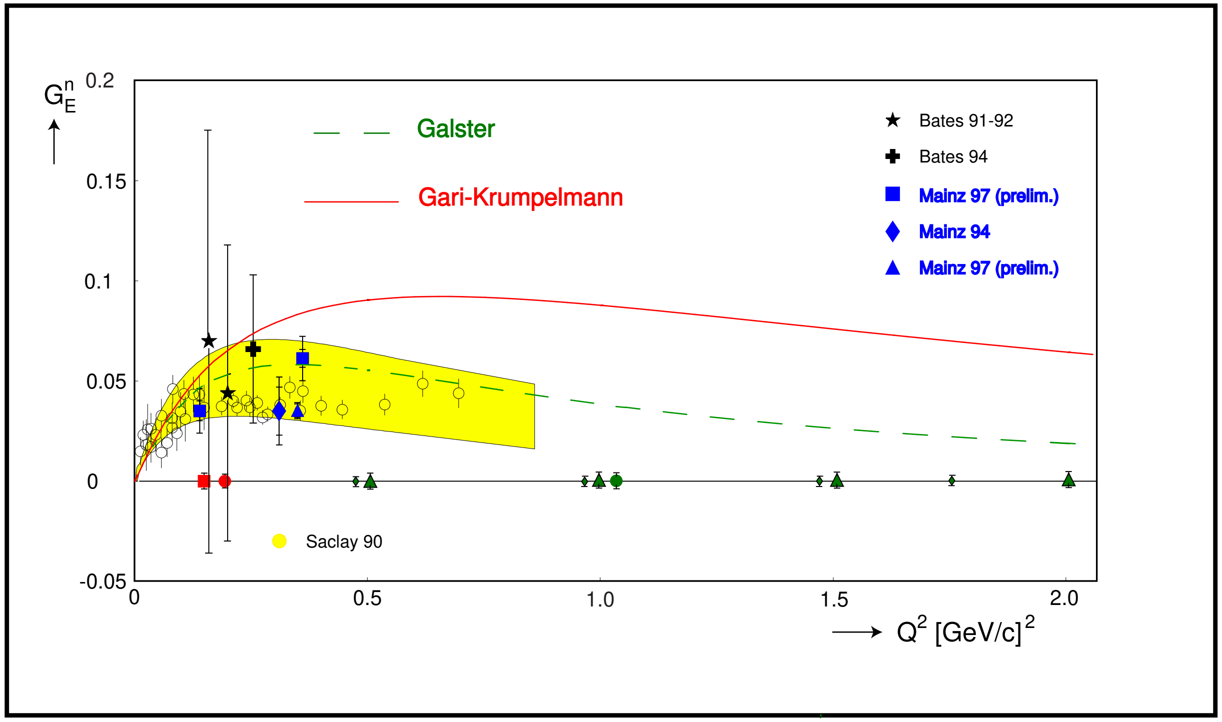
Pas de cible de ”n” $\Rightarrow$ d, $^3He$.

$$G_E^{(\gamma,n)}(0) = 0, \quad G_M^{(\gamma,p)}(0) = \mu_n = \kappa_n = -1.91.$$




$$G_M^{(\gamma,n)} = \mu_n \frac{1}{\left(1 + \frac{Q^2}{{M_V}^2}\right)^2}.$$

# Facteur de forme électrique du neutron



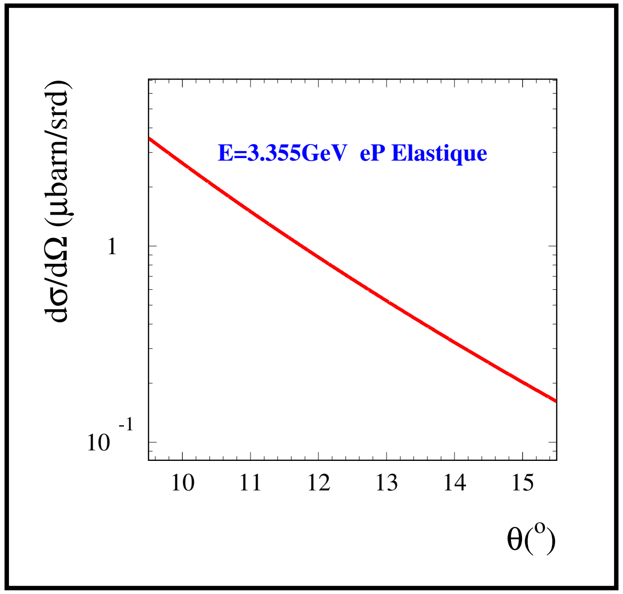

$$G_E^{(n)} = -\mu_n \tau \frac{1}{1+\alpha_n \tau} G_E^{(p)}, \alpha_n = 5.6.$$

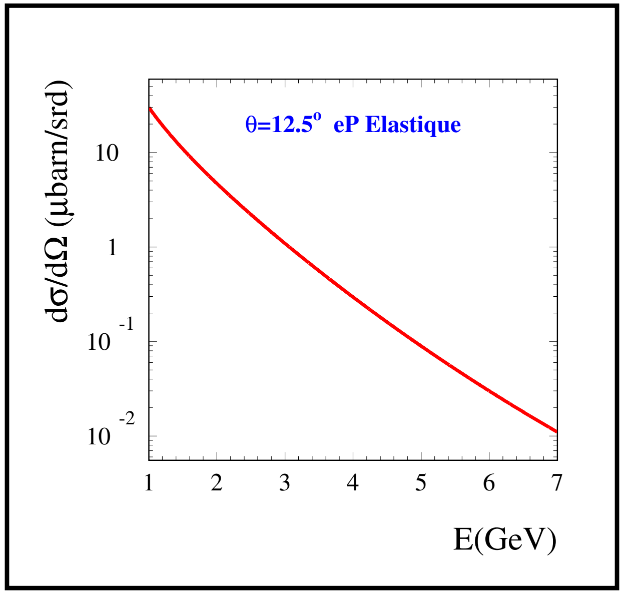
Violation de Parité

# Facteurs de forme du nucléon

## Les facteurs de forme électromagnétiques sont mesurés

Ordre de grandeur de la section efficace élastique *ep*



# Facteurs de forme de quarks

$$\hat{j}^{(i)}_{E,\mu} = \bar{q}_i \gamma_\mu \mathcal{Q}_i \; q_i, \quad i = u, d, s, c, b, t$$

$$\hat{\mathcal{J}}_{E,\mu} = \sum_i \hat{j}^{(i)}_{E,\mu} = \sum_i \bar{q}_i \gamma_\mu \mathcal{Q}_i \; q_i.$$

$$< p(P')|\hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{EM,\mu}(0)|p(P) > = \sum_i \mathcal{Q}_i < p(P')|\bar{q}_i \gamma_\mu q_i|p(P) >.$$

$$< p(P')|\bar{q}_i \gamma_\mu q_i|p(P) > = \bar{\mathcal{U}}(P') \left[ \gamma_\mu F_1^{(i,p)} + i \frac{\sigma^{\mu\nu} q_\nu}{2M_N} F_2^{(i,p)} \right] \mathcal{U}(P)$$

$$\boxed{F^{(\gamma,p)}_{1,2} = \sum_i \mathcal{Q}_i \; F^{(i,p)}_{1,2} = \frac{2}{3} F^{(u,p)}_{1,2} - \frac{1}{3} F^{(d,p)}_{1,2} - \frac{1}{3} F^{(s,p)}_{1,2}.}$$

$$G^{(\gamma,p)}_{E,M} = \sum_i \mathcal{Q}_i \; G^{(i,p)}_{E,M} = \frac{2}{3} G^{(u,p)}_{E,M} - \frac{1}{3} G^{(d,p)}_{E,M} - \frac{1}{3} G^{(s,p)}_{E,M}.$$

# Masse des Quarks

| $MeV$ | $GeV$ |
|---|---|
| $2 \leq m_u \leq 8$ | $1 \leq m_c \leq 1.6$ |
| $5 \leq m_d \leq 15$ | $4 \leq m_b \leq 4.5$ |
| $100 \leq m_s \leq 300$ | $168 \leq m_t \leq 192$ |

# Proton et Neutron

## Symétrie Isopsin

$$F_{1,2}^{(u,p)} = F_{1,2}^{(d,n)}; \quad F_{1,2}^{(d,p)} = F_{1,2}^{(u,n)}; \quad F_{1,2}^{(s,p)} = F_{1,2}^{(s,n)}.$$

$$\begin{aligned} F_{1,2}^{(\gamma,p)} &= \frac{2}{3} F_{1,2}^{(u)} - \frac{1}{3} F_{1,2}^{(d)} - \frac{1}{3} F_{1,2}^{(s)}, \\ F_{1,2}^{(\gamma,n)} &= \frac{2}{3} F_{1,2}^{(d)} - \frac{1}{3} F_{1,2}^{(u)} - \frac{1}{3} F_{1,2}^{(s)}. \end{aligned}$$

## Générateurs SU(3)

$$\begin{aligned} F_{1,2}^{(0)} &= \frac{1}{3}\left(F_{1,2}^{(u)} + F_{1,2}^{(d)} + F_{1,2}^{(s)}\right), \\ F_{1,2}^{(3)} &= \frac{1}{2}\left(F_{1,2}^{(u)} - F_{1,2}^{(d)}\right), \\ F_{1,2}^{(8)} &= \frac{1}{2\sqrt{3}}\left(F_{1,2}^{(u)} + F_{1,2}^{(d)} - 2F_{1,2}^{(s)}\right). \end{aligned}$$

# Proton et Neutron

$$F_{1,2}^{(\gamma,p)} + F_{1,2}^{(\gamma,n)} = \frac{2}{\sqrt{3}} F_{1,2}^{(8)} = \frac{1}{3}\left(F_{1,2}^{(u)} + F_{1,2}^{(d)} - 2F_{1,2}^{(s)}\right),$$

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

Normalisations ($Q^2 = 0$)

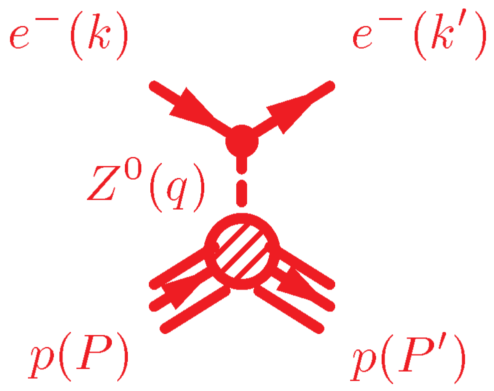
$$F_1^{(3)}(0) = \frac{1}{2}, \qquad F_1^{(8)}(0) = \frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$F_2^{(3)}(0) = \frac{1}{2}(\kappa_p - \kappa_n), \quad F_2^{(8)}(0) = \frac{\sqrt{3}}{2}(\kappa_p + \kappa_n),$$

$F_1^{(0)}(0) = 1$, Nombre Baryonique, $\quad F_2^{(0)} = ??$ ou $F_2^{(s)}(0) = ??$

Violation de Parité

# Facteurs de forme faibles neutres du proton




$g$ couplage $W_\mu^{(1,2,3)}$,
$g'/2$ couplage $B_\mu$ (hypercharge),
$\theta_W$ l'angle de Weinberg.

$$-i\mathcal{M}_{Z^0} = \left(-i\frac{g}{\cos\theta_W}\right)^2 < p(P')|\hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{F,\mu}(0)|p(P) > \frac{-i\left(g^{\mu\nu} - \frac{q^\mu q^\nu}{M_z^2}\right)}{q^2 - M_Z^2} < e(k')|\hat{\mathcal{J}}^{(e)}_{F,\nu}(0)|e(k) >$$

$$< e(k')|\hat{\mathcal{J}}^{(e)}_{F,\nu}|e(k) > = \bar{u}(k')\left(\frac{1}{4}\left[\left(-1+4\sin^2\theta_W\right)\gamma_\nu + \gamma_\nu\gamma_5\right]\right)u(k).$$

$$< P'|\hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{F,\mu}|P > = ??$$

# Facteurs de forme faibles neutres du proton

$$< P'|\hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{F,\mu}|P> =$$

$$\bar{\mathcal{U}}'\left[\gamma_\mu F_1^{(Z)} + \frac{i\sigma_{\mu\nu}q^\nu}{2M_N}F_2^{(Z)} + \gamma_\mu\gamma_5 G_1^{(Z)} + \frac{q_\mu}{M_N}\gamma_5 G_P^{(Z)}\right]\mathcal{U}.$$

$F_{1,2}^{(Z)}$ *facteurs de forme vectoriels faibles* de Pauli-Dirac du proton.

$G_1^{(Z)}$ ,$G_P^{(Z)}$ *facteurs de forme axial et pseudoscalaire induit.*

Facteurs de forme vectoriels faible de Sachs

$$G_E^{(Z)} = F_1^{(Z)} - \tau F_2^{(Z)}, \quad G_M^{(Z)} = F_1^{(Z)} + F_2^{(Z)}.$$

# Courants faibles de quarks

Couplage quark-$Z^0$

$$\hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{F,\mu} = \sum_i \left[ \bar{q}_i \gamma_\mu q_i \left( \frac{1}{2} T^{(3)}_i - \mathcal{Q}_i \sin^2\theta_W \right) - \frac{1}{2} T^{(3)}_i \bar{q}_i \gamma_\mu \gamma^5 q_i \right].$$

$$\hat{\jmath}^{(i)}_{V,\mu} = \bar{q}_i \gamma_\mu q_i, \quad \hat{\jmath}^{(i)}_{A,\mu} = \bar{q}_i \gamma_\mu \gamma^5 q_i.$$

$$< P' | \hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{F,\mu} | P > = \sum_i \left[ c^{(i)}_V < P' | \hat{\jmath}^{(i)}_{V,\mu} | P > + c^{(i)}_A < P' | \hat{\jmath}^{(i)}_{A,\mu} | P > \right],$$

$$c^{(i)}_V = \left( \frac{1}{2} T^{(3)}_i - \mathcal{Q}_i \sin^2\theta_W \right), \quad c^{(i)}_A = -\frac{1}{2} T^{(3)}_i.$$

# Isopsin faible et charge des quarks

| | $Q_i$ | $T^{(3)}_{i,L}$ |
|---|---|---|
| u | $+\frac{2}{3}$ | $+\frac{1}{2}$ |
| d | $-\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{2}$ |

| | $Q_i$ | $T^{(3)}_{i,L}$ |
|---|---|---|
| c | $+\frac{2}{3}$ | $+\frac{1}{2}$ |
| s | $-\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{2}$ |

| | $Q_i$ | $T^{(3)}_{i,L}$ |
|---|---|---|
| t | $+\frac{2}{3}$ | $+\frac{1}{2}$ |
| b | $-\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{2}$ |

# Facteurs de forme de quarks

$$< p(P')|\bar{q}_i\gamma_\mu q_i|p(P) > = \bar{\mathcal{U}}(P')\left[\gamma_\mu F_1^{(i)} + i\frac{\sigma^{\mu\nu}q_\nu}{2M_N}F_2^{(i)}\right]\mathcal{U}(P).$$

$$< p(P')|\bar{q}_i\gamma_\mu\gamma_5 q_i|P(p) > = \bar{\mathcal{U}}(p')\left[\gamma_\mu\gamma_5 G_1^{(i)} + \frac{q_\nu}{M_N}\gamma_5 G_P^{(i)}\right]\mathcal{U}(p).$$

$$F_{1,2}^{(Z)} = \sum_i \left(\frac{1}{2}T_i^{(3)} - \mathcal{Q}_i \sin^2\theta_W\right) F_{1,2}^{(i)}.$$

$$G_{1,P}^{(Z)} = \sum_i \left(-\frac{1}{2}T_i^{(3)}\right) G_{1,P}^{(i)}.$$

# Facteurs de forme de quarks

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

$$\begin{aligned} F_{1,2}^{(\gamma,p)} &= \frac{2}{3}F_{1,2}^{(u)} - \frac{1}{3}F_{1,2}^{(d)} - \frac{1}{3}F_{1,2}^{(s)}. \\ F_{1,2}^{(\gamma,n)} &= \frac{2}{3}F_{1,2}^{(d)} - \frac{1}{3}F_{1,2}^{(u)} - \frac{1}{3}F_{1,2}^{(s)}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{1,2}^{(Z,p)} &= \frac{1}{4}\left[\left(2 - 4\sin^2\theta_W\right) F_{1,2}^{(\gamma,p)} - F_{1,2}^{(0)}\right] \\ F_{1,2}^{(Z,p)} &= \frac{1}{4}\left[\left(1 - 4\sin^2\theta_W\right) F_{1,2}^{(\gamma,p)} - F_{1,2}^{(\gamma,n)} - F_{1,2}^{(s)}\right]. \end{aligned}$$

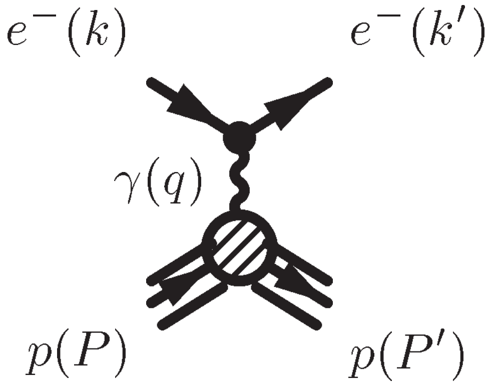
Mesures de $F_{1,2}^{(Z)} \Rightarrow F_{1,2}^{(s)}$

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

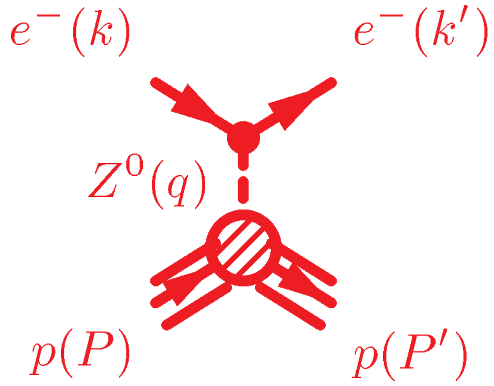
Violation de Parité

# Mesure des facteurs de forme faibles

Diffusion élastique $ep \to ep$




+




$$\mathcal{M} = \mathcal{M}_\gamma + \mathcal{M}_{Z^0}, \quad \sigma_{ep\to ep} \propto |\mathcal{M}_\gamma + \mathcal{M}_{Z^0}|^2.$$

Diffusion élastique $\Rightarrow Q^2 \simeq 1 GeV^2 \ll M_Z^2$

$$\frac{-i\left(g^{\mu\nu} - \frac{q_\mu q_\nu}{M_z^2}\right)}{q^2 - M_Z^2} \simeq \frac{i g^{\mu\nu}}{M_Z^2}, \quad G_F = \frac{\sqrt{2} g^2}{8\cos^2\theta_W M_Z^2}.$$

Violation de Parité

# Mesure des facteurs de forme faibles

$$-i\mathcal{M}_{Z^0} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} < P'|\hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{F,\mu}|P > \bar{u}(k')\left(\left[\left(-1+4\sin^2\theta_W\right)\gamma_\mu + \gamma_\mu\gamma_5\right]\right)u(k).$$

$$|\mathcal{M}_\gamma| \propto \frac{\alpha}{Q^2}, \quad |\mathcal{M}_{Z^0}| \propto G_F,$$

$$\sigma_{ep\rightarrow ep} = |\mathcal{M}_\gamma|^2 + 2\mathcal{R}e\left(\mathcal{M}_\gamma \mathcal{M}_{Z^0}{}^*\right) + |\mathcal{M}_{Z^0}|^2$$

$$\sigma_{ep\rightarrow ep} = (\ldots)\frac{\alpha^2}{Q^4} + (\ldots)\,G_F\frac{\alpha}{Q^2} + (\ldots)\,G_F^2.$$

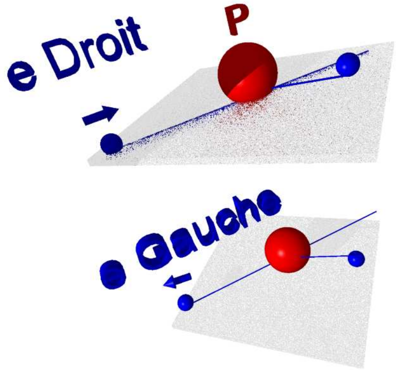
$$|\mathcal{M}_\gamma|^2 \gg \mathcal{R}e\left(\mathcal{M}_\gamma \mathcal{M}_{Z^0}{}^*\right) \gg |\mathcal{M}_{Z^0}|^2, \text{ à } Q^2 = 1GeV^2.$$

$$\frac{\mathcal{R}e\left(\mathcal{M}_\gamma \mathcal{M}_{Z^0}{}^*\right)}{|\mathcal{M}_\gamma|^2} \propto \frac{G_F}{\sqrt{2}\pi\alpha}Q^2 \simeq 300ppm \text{ à } Q^2 = 1GeV^2.$$

Violation de Parité

# Mesure des facteurs de forme faibles

Violation de parité $\vec{e}p \to ep$




$$A_{PV}(\theta) = \frac{\frac{d\sigma^D_{ep}}{d\Omega}(\theta) - \frac{d\sigma^G_{ep}}{d\Omega}(\theta)}{\frac{d\sigma^D_{ep}}{d\Omega}(\theta) + \frac{d\sigma^G_{ep}}{d\Omega}(\theta)}$$

$$\overline{|\mathcal{M}^D_\gamma|^2} = \frac{1}{2}\sum_S \sum_{S'} \sum_{s'} |\mathcal{M}^D_\gamma|^2, \quad \overline{\mathcal{M}^{*D}_\gamma \mathcal{M}^D_{Z^0}} = -\overline{\mathcal{M}^{*L}_\gamma \mathcal{M}^L_{Z^0}}.$$

$$A_{PV}(\theta) \simeq \frac{\mathcal{R}e\left(\overline{\mathcal{M}^{*D}_\gamma \mathcal{M}^D_{Z^0}}\right)}{\overline{|\mathcal{M}^D_\gamma|^2}} \propto \frac{G_F}{\sqrt{2}\pi\alpha} Q^2 \simeq 300ppm \text{ à } Q^2 = 1GeV^2.$$

Violation de Parité

# Mesure des facteurs de forme faibles

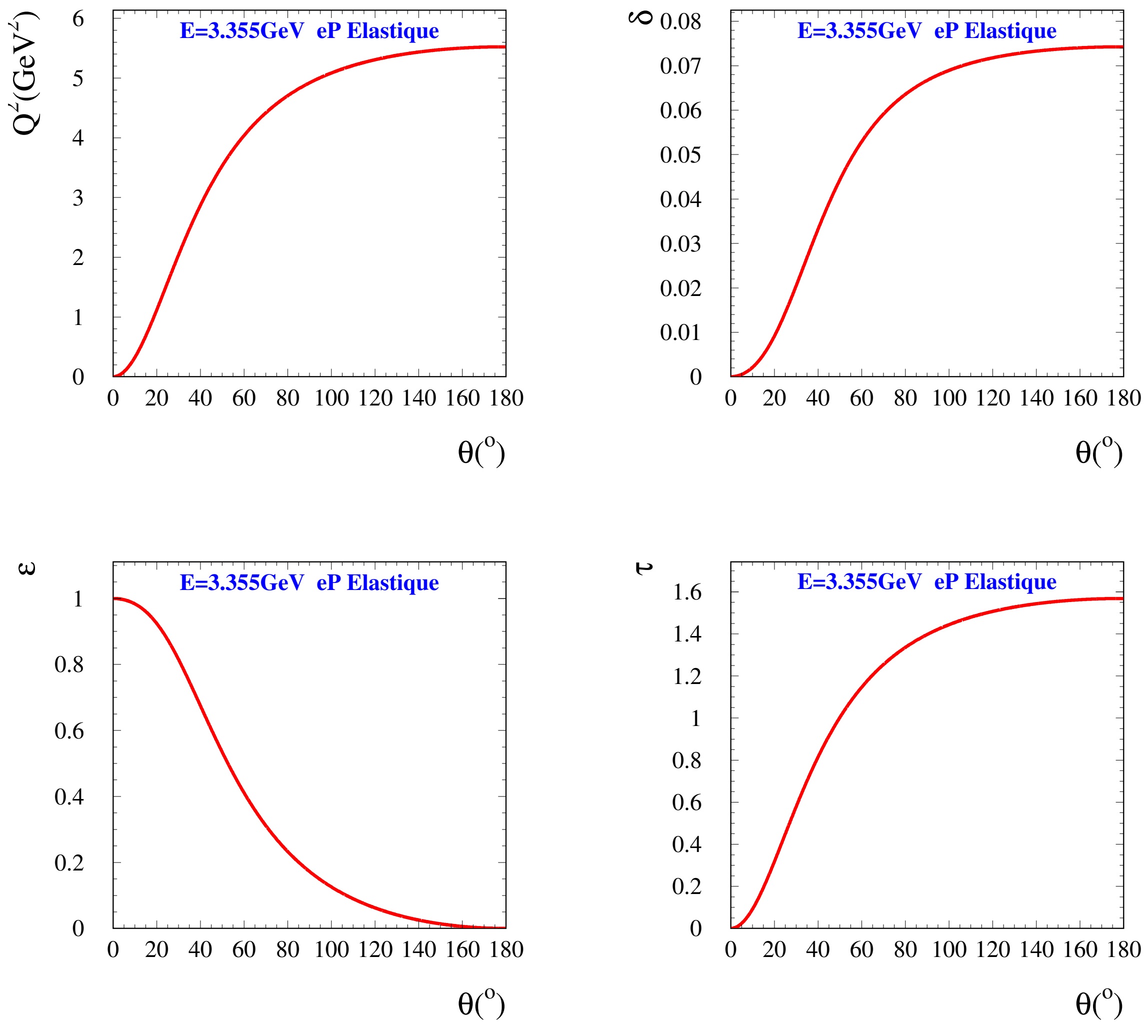
*"straightforward calculation ..."*

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

Facteurs cinématiques

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

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




Violation de Parité

# Mesure des facteurs de forme faibles

Séparation électrique, magnétique et axiale

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

$$A_{PV}^{E} = -\frac{G_F Q^2}{\sqrt{2}\pi\alpha} \frac{G_E^{(\gamma,p)} G_E^{(Z,p)}}{\epsilon G_E^{(\gamma,p)\,2} + \tau G_M^{(\gamma,p)\,2}},$$

$$A_{PV}^{M} = -\frac{G_F Q^2}{\sqrt{2}\pi\alpha} \frac{G_M^{(\gamma,p)} G_M^{(Z,p)}}{\epsilon G_E^{(\gamma,p)\,2} + \tau G_M^{(\gamma,p)\,2}},$$

$$A_{PV}^{A} = -\frac{G_F Q^2}{\sqrt{2}\pi\alpha} \frac{G_M^{(\gamma,p)} G_1^{(Z,p)}}{\epsilon G_E^{(\gamma,p)\,2} + \tau G_M^{(\gamma,p)\,2}}.$$

# Mesure des facteurs de forme faibles

## Séparation quark étrange

$$A_{PV} = A_{PV}^{(0)} \left(1 - \Delta A^{(s)}\right) .$$

$$A_{PV}^{(0)} = \left(\epsilon A_{PV}^{(E,0)} + \tau A_{PV}^{(M,0)} - \delta A_{PV}^{(A,0)}\right) ,$$

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

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

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

# Mesure des facteurs de forme faibles

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

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

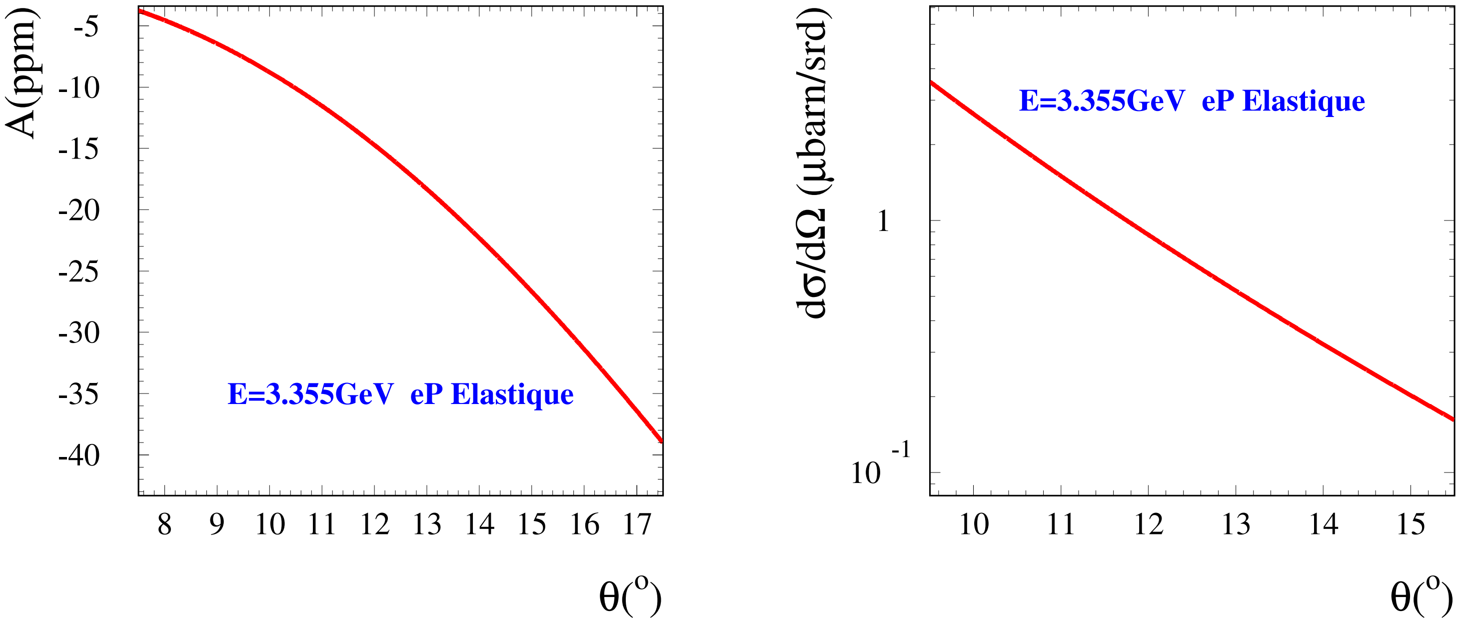
$$G_1^{(s=0)} = -\frac{1}{4}\left(G_1^{(u)} - G_1^{(d)}\right) = -\frac{1}{2} g_A$$

Une expérience de violation de parité mesure

$$G_E^{(s)} + \left[\frac{\tau G_M^{(\gamma,p)}}{\epsilon G_E^{(\gamma,p)}}\right] G_M^{(s)} + \left[\frac{\delta G_M^{(\gamma,p)}}{\epsilon G_E^{(\gamma,p)}}\right] G_1^{(s)}.$$

Violation de Parité

# Asymétrie "modèle standard"




Violation de Parité

# L'expérience idéale

- Polarisation $P_e^+ = \frac{N_e^D - N_e^G}{N_e^D + N_e^G} > 0$

$$N_{ep}^+ = \mathcal{L}^+ \frac{d\sigma_0}{d\Omega} \left(1 + P_e^+ A_{PV}\right) \Delta\Omega^+ T^+ .$$

$$\mathcal{L}^+ = \frac{I_e^+}{e} \frac{(\rho L)^+}{A} \mathcal{N}_A , \quad \frac{d\sigma_0}{d\Omega} = \frac{1}{2} \left( \frac{d\sigma_{ep}^D}{d\Omega} + \frac{d\sigma_{ep}^G}{d\Omega} \right) .$$

- Polarisation $-P_e^- < 0$

$$N_{ep}^- = \mathcal{L}^- \frac{d\sigma_0}{d\Omega} \left(1 - P_e^- A_{PV}\right) \Delta\Omega^- T^- .$$

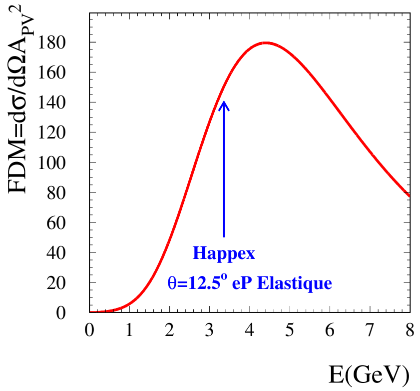
$$A_{exp} = \frac{N_{ep}^+ - N_{ep}^-}{N_{ep}^+ + N_{ep}^-} \simeq P_e A_{PV} , \quad P_e = \frac{P_e^+ + P_e^-}{2} .$$

Violation de Parité

# Figure de Mérite

$$\frac{\sigma\left(A_{PV}\right)}{A_{PV}} \simeq \frac{1}{\sqrt{N_T}}\frac{1}{P_e A_{PV}}$$

$$\frac{\sigma\left(A_{PV}\right)}{A_{PV}} = \frac{1}{\sqrt{\mathcal{L}T\frac{d\sigma_0}{d\Omega}\Delta\Omega}}\frac{1}{P_e A_{PV}}$$




$$FDM = A_{PV}^2\frac{d\sigma_0}{d\Omega}, \quad T = \frac{1}{FDM}\frac{1}{P_e^2}\frac{1}{\left(\frac{\sigma(A_{PV})}{A_{PV}}\right)^2}\frac{1}{\Delta\Omega}\frac{1}{\mathcal{L}}.$$

$$A_{PV} = 10ppm, \quad \frac{\sigma\left(A_{PV}\right)}{A_{PV}} = 10\%, \quad P_e = 50\% \Rightarrow N_T = 4\ 10^{12}$$

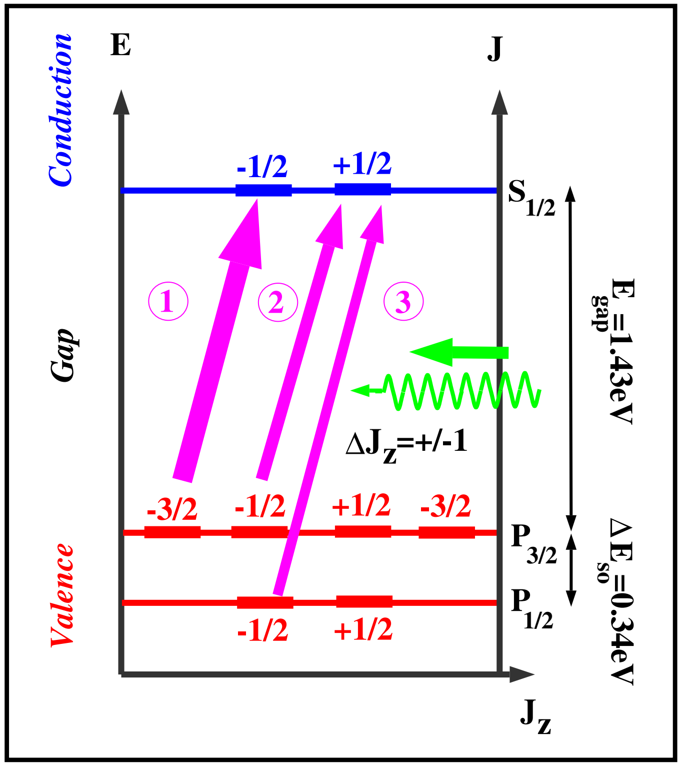
$$\frac{dN}{dt} = 260 Hz L(cm) I(\mu A)\frac{d\sigma}{d\Omega}(\mu b/sr)\Omega(msr)$$

# La "shopping list"


- $\vec{e}$: $I_e P_e^2 \gg 1$, renversements $P_e$ fréquents.
- $LH_2$: dense, longue et refroidie.
- Détecteur $e^-$, $p$ diffusés: taux de comptage élevés, identification diffusion élastique, grand angle solide.
- Monitorage faisceau et détecteurs : minimiser les fausses asymétries.
- Polarimètre .

Violation de Parité

# Source $\vec{e^-}$ : Pompage Optique AsGa ($P_{\frac{3}{2}} \to S_{\frac{1}{2}}$)




- $\frac{\mathcal{P}(T_1)}{\mathcal{P}(T_2)} = 3, \; \frac{\mathcal{P}(T_3)}{\mathcal{P}(T_2)} = 2.$
- $E_{gap} < h\nu < E_{gap} + \Delta E_{SO},$ $P_e = \frac{3-1}{3+1} = 50\%.$
- diffusion vers la surface
- émission dans le vide ($Cs$, $AE = 1.4eV \to -0.4eV$)
- $AsGa_{72\%}P_{28\%}$ ($P_e \simeq 100\%$)

Violation de Parité

# Source $\vec{e}^-$ : renversement de la polarisation

renversement polarisation des photons

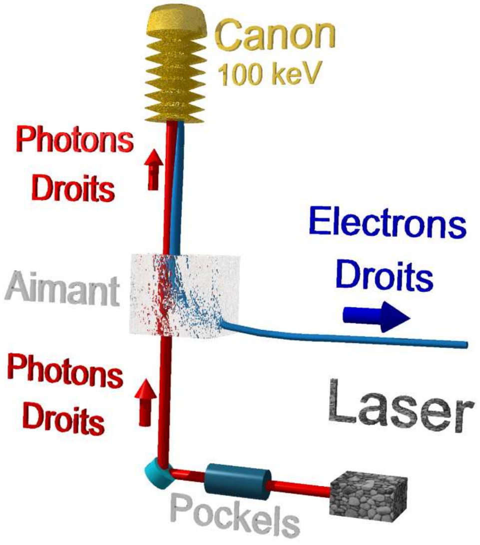
cellule de Pockels ($100\mu s$)

Electro-optique

$V_\pm \to \pm\frac{\lambda}{4}$

Linéaire $\to$ circulaire D/G

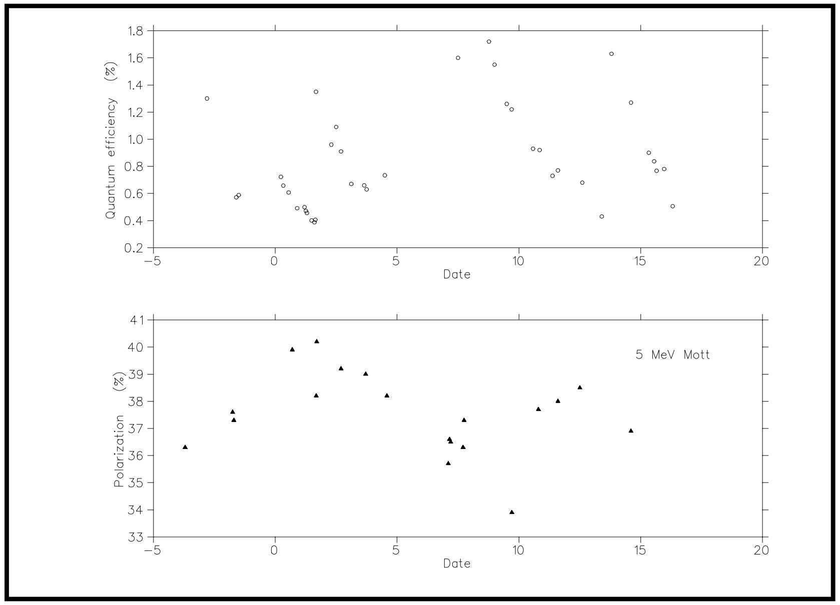
$\to$ électrons droits/gauches




Violation de Parité

# Source $\vec{e}^-$

$$QE = \frac{\frac{dn_e}{dt}}{\frac{dn_\gamma}{dt}}, \quad I_e = QE\frac{P(W)}{h\nu(eV)}.$$

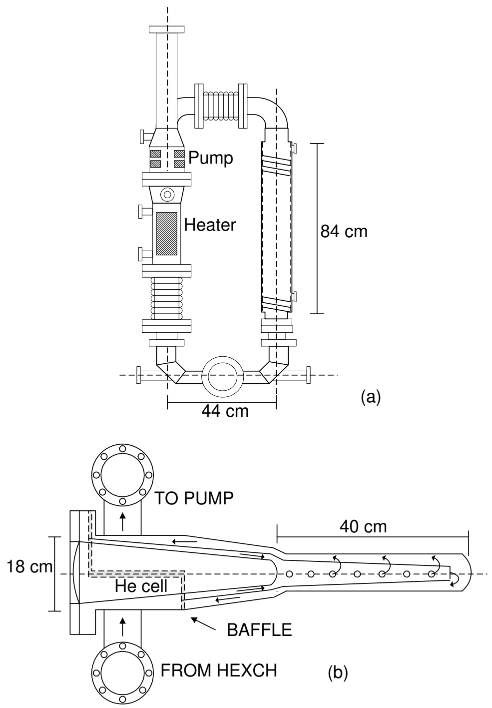



$$QE = 1\%, P = 25mW, h\nu = 1.59eV \Rightarrow I_e = 150\mu A$$

Violation de Parité

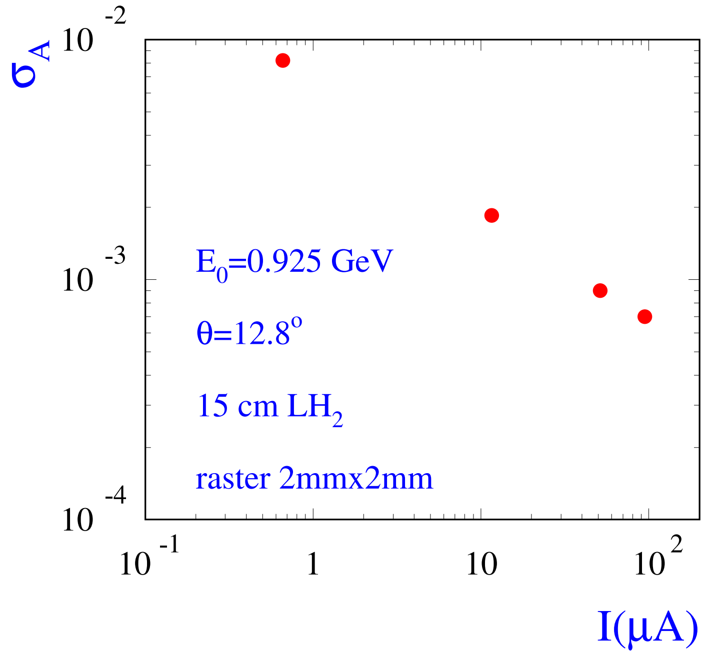
# La cible de protons

- $LH_2$, $\rho = 0.0708 g/cm^3$.
- ébullition $20K$ à $1atm$.
- $\frac{dE}{dx} = 4.045 MeV/(g/cm^2)$.
- $\mathcal{P} = I_e(\mu A)\frac{dE}{dx}(MeV)\rho L(g/cm^2)$.
- $\mathcal{P} = 0.29 W/\mu A/cm$.
- $400W$ à $100\mu A$, $15cm$.
- Refroidissment $N_2$, $He$.
- "raster" : $mm$ ($kHz$,$\sigma_e \leq 1mm$).



# La cible de protons

Mesure de l'ébullition




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

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

Erreur statistique $+7\%$

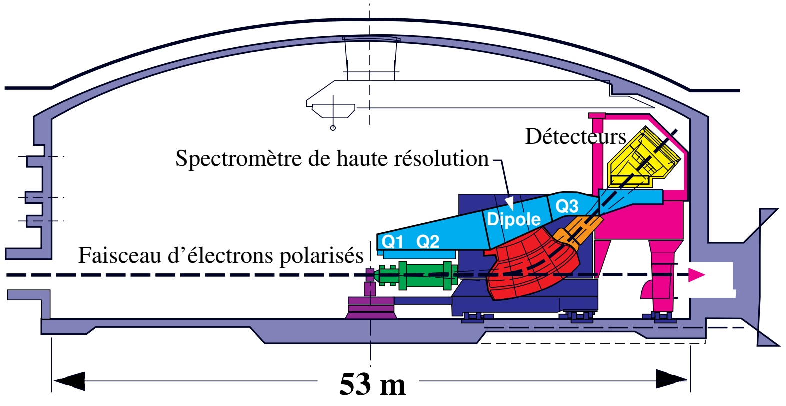
Violation de Parité

# Les expériences ...

| Expérience | Machine | $E$ $GeV$ | $\theta$ $(^o)$ | $Q^2$ $GeV^2$ | $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ $(\mu b/srd)$ | $\lvert A^0_{PV} \rvert$ $(ppm)$ | $I_e$ $\mu A$ | $P_e$ $\%$ | $\Delta\Omega$ $msr$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HAPPEX | Jlab (USA) | 3.355 | 12.5 | 0.5 | 0.68 | 16.5 | 80 | 40 | 12 |
| SAMPLE | Bates (USA) | 0.200 | 150 | 0.1 | 0.033 | 7 | 20 | 40 | 2140 |
| A4 | Mayence (All.) | 0.855 | 35 | 0.235 | 0.38 | 6 | ? | ? | 700 |

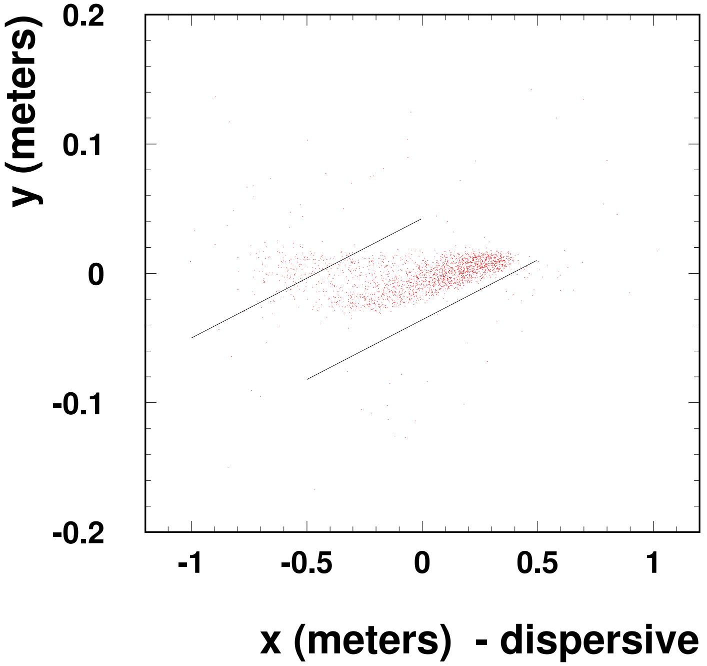
Violation de Parité

# La Détection HAPPEX



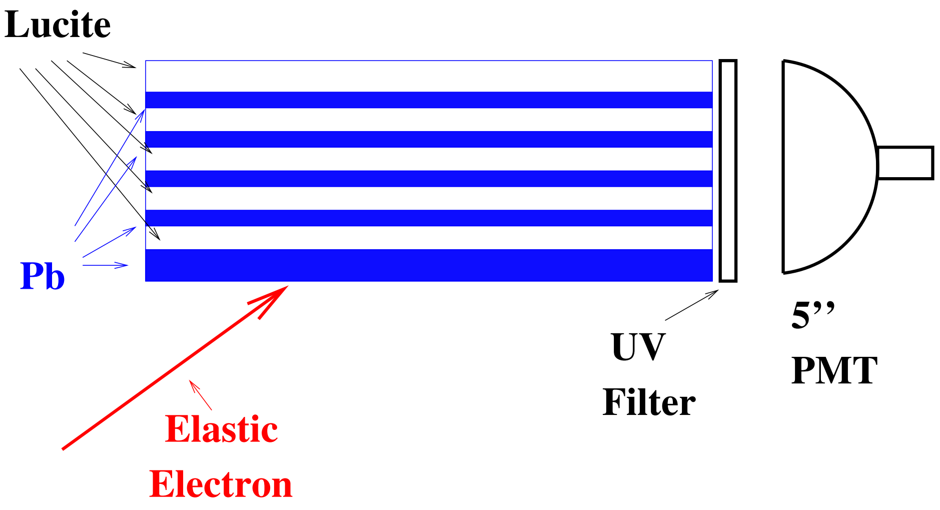

- 2 spectros $QQDQ$, $0.5 - 3.GeV$.
- $\Delta p/p = 10^{-4}$.
- $\Delta\theta_V = \pm 60 mrd$.
- $\Delta\theta_H = \pm 28 mrd$.
- Impulsion ($\pm 4.5\%$).
- Séparation $12cm/\%$.
- Production de $\pi$ à $20cm$ de l'élastique.
- $\Delta\Omega = 12msrd$.

# La Détection HAPPEX




- $10kHz$ (basse intensité)
- Trajectographie et identification des particules (Čerenkov à Gaz).
- $1MHz$ ($100\mu A$ intensité)
- Calorimètre (Čerenkov) sandwich Plomb Lucite.
- Flux intégrés

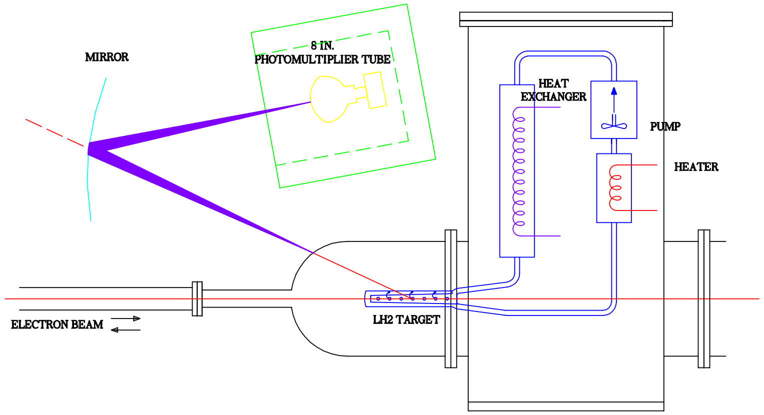
# La Détection HAPPEX




$$\left(\frac{\sigma(Q)}{Q}\right)^{Tot} = \frac{1}{\sqrt{N_P}}\sqrt{1+\left(\frac{\sigma(q_i)}{q_i}\right)^2}.$$

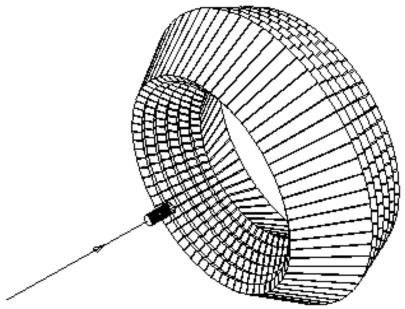
résolution 15% $\Rightarrow$ +1% Erreur Statistique

# La Détection SAMPLE : mesure de $G_M^{(Z,p)}$




- $< \theta >= 150^o$, $E = 200 MeV$
- Détection à grand angle solide
- $130^o < \theta < 170^o$
- $\Delta\Omega \simeq 2.14 srd$
- Détecteur Čerenkov
- 10 PM de 20$cm$ de diamètre.
- Flux intégrés
- Production de pion faible.

# La Détection A4



- Détection non magnétique, calorimètre $PbF_2$, 6 couronnes de 128 cristaux.
- $30^o < \theta < 40^o$, $\Delta\Omega \simeq 0.7 srd$.
- Événement par événement. $10 MHz$ signal et $100 MHz$ de bruit.
- Rapidité et résolution en énergie.
- Électronique parallélisée.
- Cluster de $3 \times 3$ cristaux, $L = 13X_0,\ \ X_0 = 0.9cm$,
  rayon $4/3 r_M,\ \ r_M = 2.2cm \Rightarrow 3.5\%/\sqrt{E}$.

# Les fausses asymétries

$$\frac{N_{ep}^{+}}{T^{+}} = \frac{I_e^{+}\,(\rho L)^{+}}{e\,A}\mathcal{N}_A\left(\left[\int_{\Delta\Omega+}\frac{d\sigma_0(E,\theta)}{d\Omega}d\Omega\right]^{+} + P_e^{+}\left[\int_{\Delta\Omega+}\frac{d\sigma_0(E,\theta)}{d\Omega}A_{PV}(E,\theta)d\Omega\right]^{+}\right).$$

$$\frac{N_{ep}^{-}}{T^{-}} = \frac{I_e^{-}\,(\rho L)^{-}}{e\,A}\mathcal{N}_A\left(\left[\int_{\Delta\Omega-}\frac{d\sigma_0(E,\theta)}{d\Omega}d\Omega\right]^{-} - P_e^{-}\left[\int_{\Delta\Omega-}\frac{d\sigma_0(E,\theta)}{d\Omega}A_{PV}(E,\theta)d\Omega\right]^{-}\right).$$

$$A_{exp}^{N} = \frac{\frac{N_{ep}^{+}}{I_e^{+}} - \frac{N_{ep}^{-}}{I_e^{-}}}{\frac{N_{ep}^{+}}{I_e^{+}} + \frac{N_{ep}^{-}}{I_e^{-}}} \simeq A_{exp} - A_I \simeq P_e A_{PV} + A_\rho + A_\sigma.$$

$$X^{\pm} = X_0\,(1 \pm A_X)\,,\quad X = I_e,\ \ (\rho L)\,,\ \ \left[\int_{\Delta\Omega}\frac{d\sigma_0}{d\Omega}d\Omega\right],\ \ P_e, A_{PV}.$$

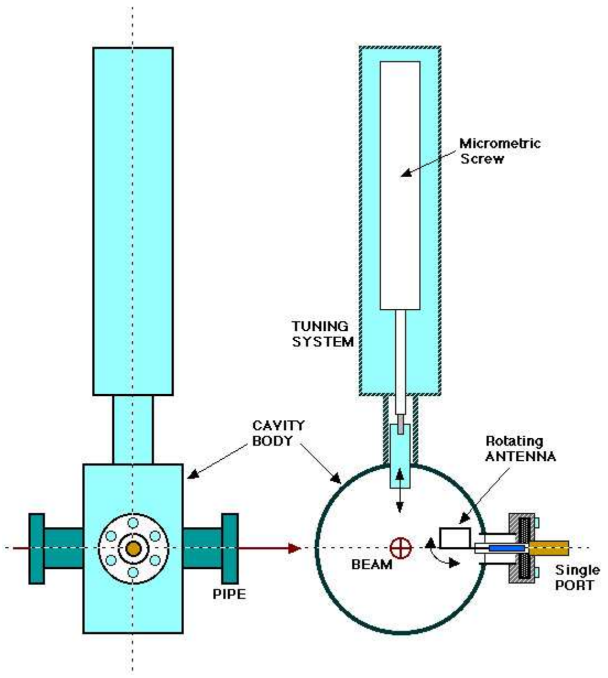
# Fausses asymétries $\Rightarrow$ Monitorer

- Intensité ($A_I$ et $A_\rho$)
- Énergie, $E^+ \neq E^- \Rightarrow \sigma(E^+) \neq \sigma(E^-)$, ($A_\sigma$)
- Position et incidence du faisceau, $X, Y, \theta_X, \theta_Y$, acceptance ($A_\sigma$).

Précision $\simeq \sigma(A_{exp})$

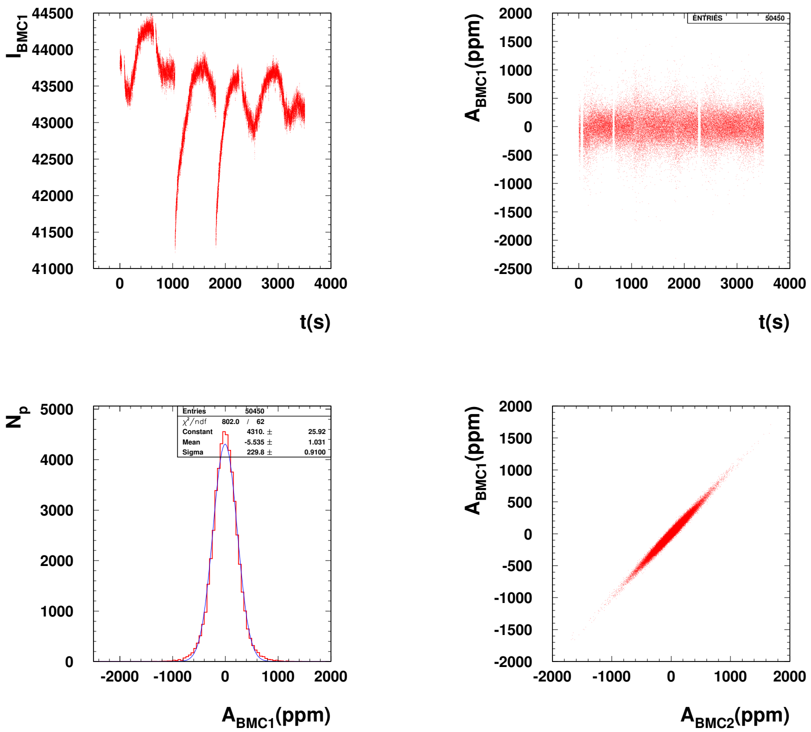
**Moniteurs de faisceau**

# Les moniteurs d'intensité de l'expérience HAPPEX




- 2 cavités RF cylindriques
- $\Phi = 15.5cm$, $L = 15.2cm$,
- $TEM_{010}$
- $e^- \Rightarrow B \Rightarrow$ induction bobine.
- Peu sensible à la position ($0.06\%/cm$)
- Linéaires $0.5\%$.
- Signal intégré

# Les moniteurs d’intensité de l’expérience HAPPEX

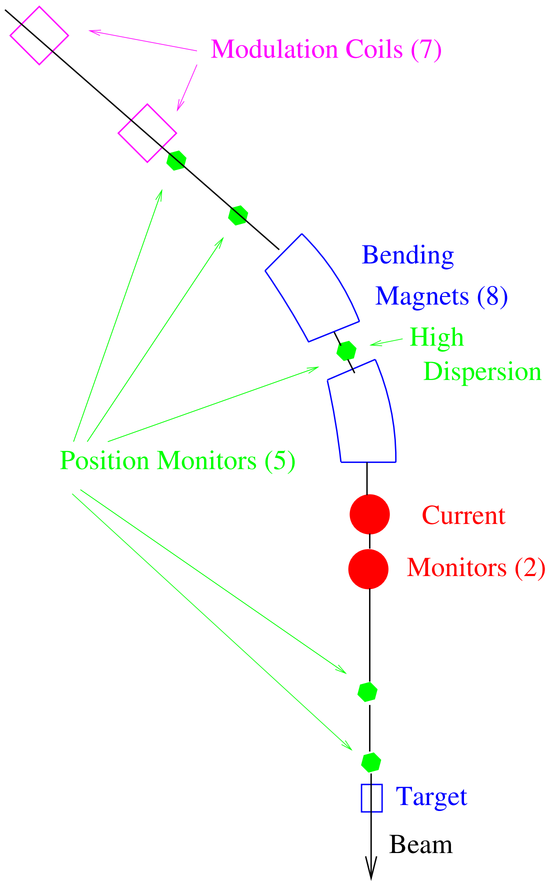



$$A_I \simeq 0.4ppm \pm 0.5ppm \text{ ! (1 mois)}$$

Violation de Parité

# Les moniteurs de positions de l'expérience HAPPEX

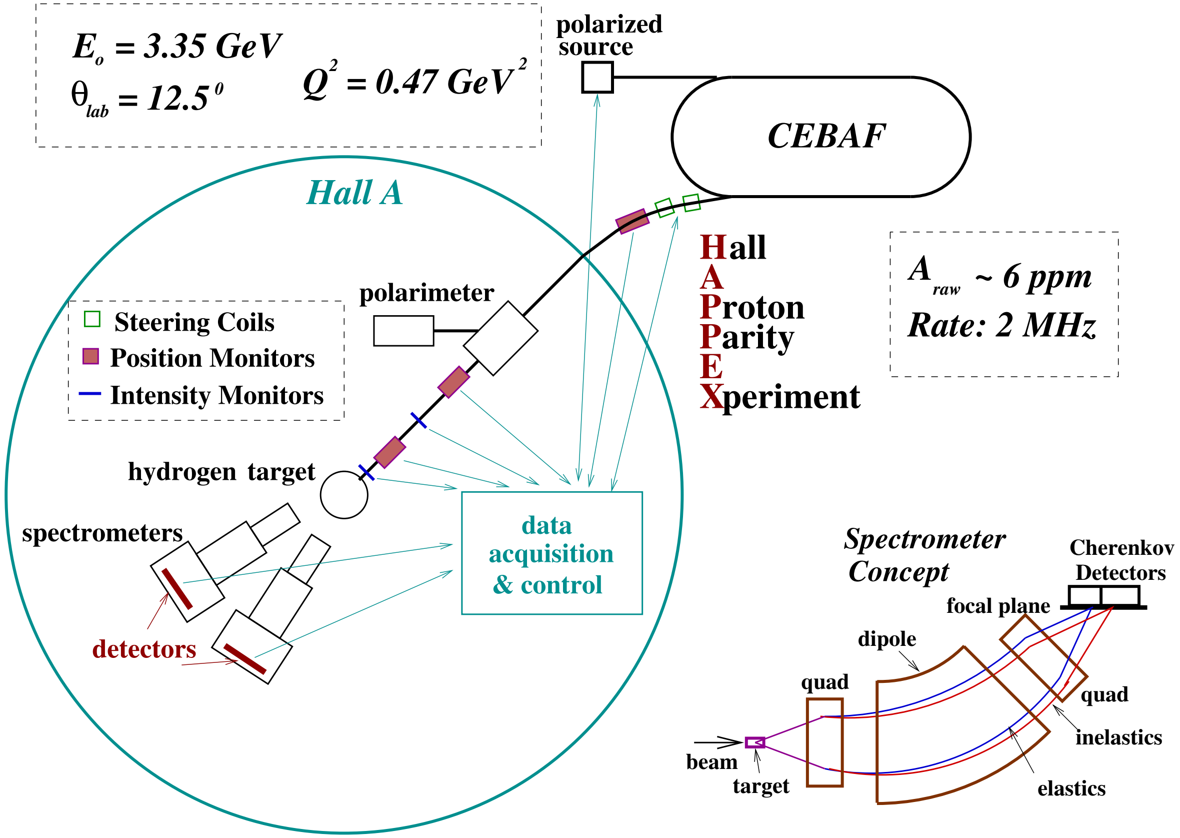
BEAMLINE INSTRUMENTATION




$A_X \leq 15nm$ sur un mois !

Quel est l'effet sur $A_\sigma$ ?

# HAPPEX at Jefferson Lab: An Overview




Violation de Parité

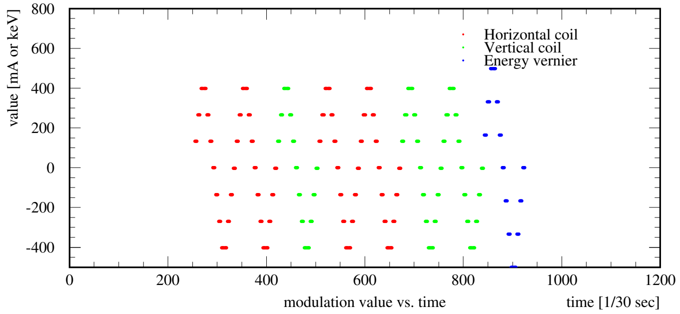
# Modulation en position et énergie

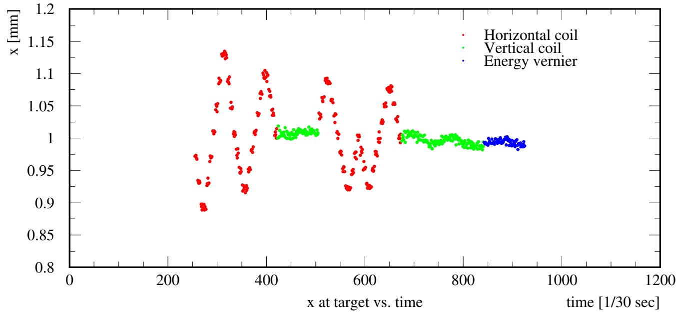
- modulation position ($< 1mm$), (4 aimants de guidage)
- modulation énergie ($\simeq 100KeV$), (1 cavité)

$A_\sigma = \sum_{i=1}^{10} a_i \Delta X_i.$

$$a_i = \sum_{j=1}^{5} \frac{\partial A_{det}}{\partial C_j} \frac{\partial C_j}{\partial X_i}$$

$\frac{\partial A_{det}}{\partial C_j}$ et $\frac{\partial X_i}{\partial C_j}$ mesurés




$$A_\sigma = 0.0ppm \pm 0.3ppm$$

Violation de Parité

# Non-linéarités et piedestaux

$$X_m = X_0 + \alpha X + \beta X^2.$$

$$A_{X_m} = A_X \left( \frac{1 + 2\frac{\beta}{\alpha} X}{1 + \frac{1}{\alpha}\frac{X_0}{X} + \frac{\beta}{\alpha} X \left(1 + A_X\right)} \right) \simeq A_X \left( 1 + \frac{\beta}{\alpha} X - \frac{1}{\alpha} \frac{X_0}{X} \right).$$

# Situation expérimentale actuelle

SAMPLE ($Q^2 = 0.1 GeV^2$)

$$G_M^s = +0.23 \pm 0.37(stat) \pm 0.15(syst) \pm 0.19(FF).$$

HAPPEX ($Q^2 = 0.5 GeV^2$)

$$G_E^s + 0.4 G_M^s = 0.015 \pm 0.033(stat) \pm 0.022(syst) \pm 0.024(G_E^n).$$

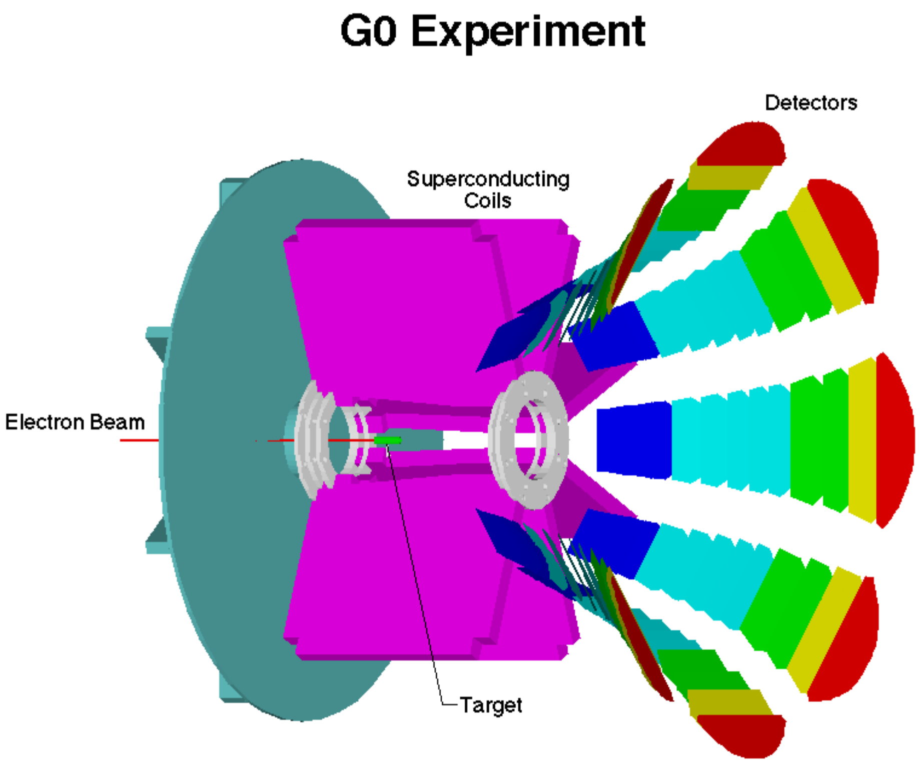
Compatible ”modèle standard”

Effet quarks étranges faible

# Le futur

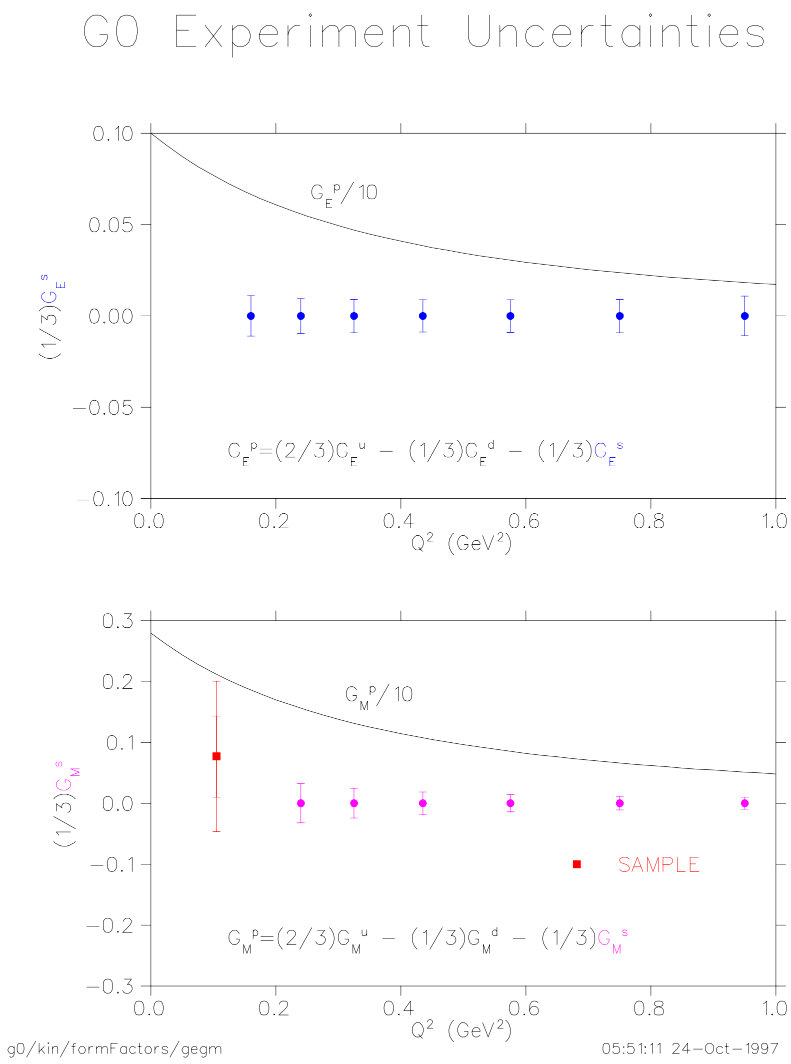
| | | | |
|---|---|---|---|
| SAMPLE | Prise de données | 1998 | Erreur Stat. / 2 |
| HAPPEX | Prise de données | 1999 | Erreur Stat. / 2 |
| A4 | Prise de données | 1999(?) | |

# L'avenir : G0 (2000?)




Violation de Parité

# L'avenir : G0 (2000?)




Violation de Parité