# Interactions lepton-nucléon UHE en QCD

Gavin Salam
LPTHE

Cosmologie et Astroparticules à Paris 6

29 mars 2002

With thanks to Anna Stasto (INFN Florence) for pointers and references.

# Introduction

Une compréhension des interactions lepton-nucléon UHE est essentielle pour connaître

✗ la probabilité d'interaction de neutrinos dans les détecteurs

✗ l'opacité de la terre aux neutrinos de différents saveurs et énergies

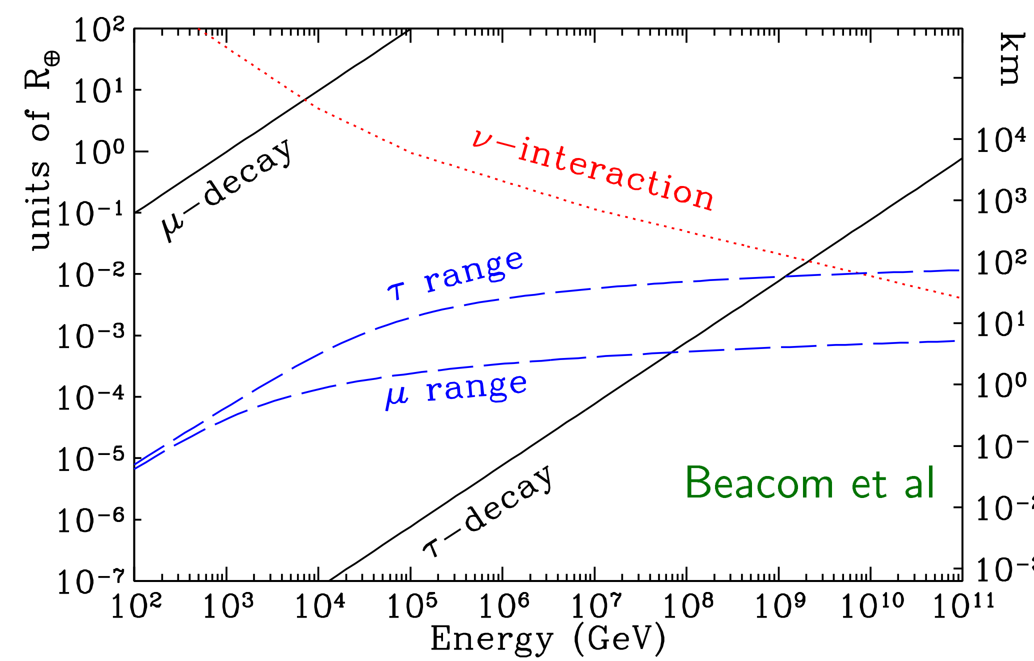
☛ aussi régénération de neutrinos dans la terre

✗ la dynamique de l'interaction $\nu N$ (inélasticité)

☛ Reconstruction de l'énergie originale d'un $\nu_\tau$ si on observe seulement le $\tau$

✗ applications plus 'exotiques' telles

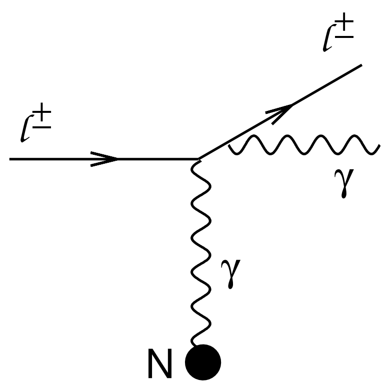
☛ Tomographie de la terre avec les neutrinos



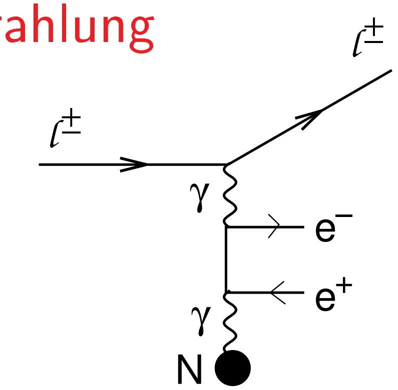

Cette intervention a pour but d'illustrer l'état des connaissances théoriques et expérimentales ayant rapport au problème.

# Exemples de mode d'interaction lepton-nucléon

Modes purement QED
(proton cohérent — reste intact)



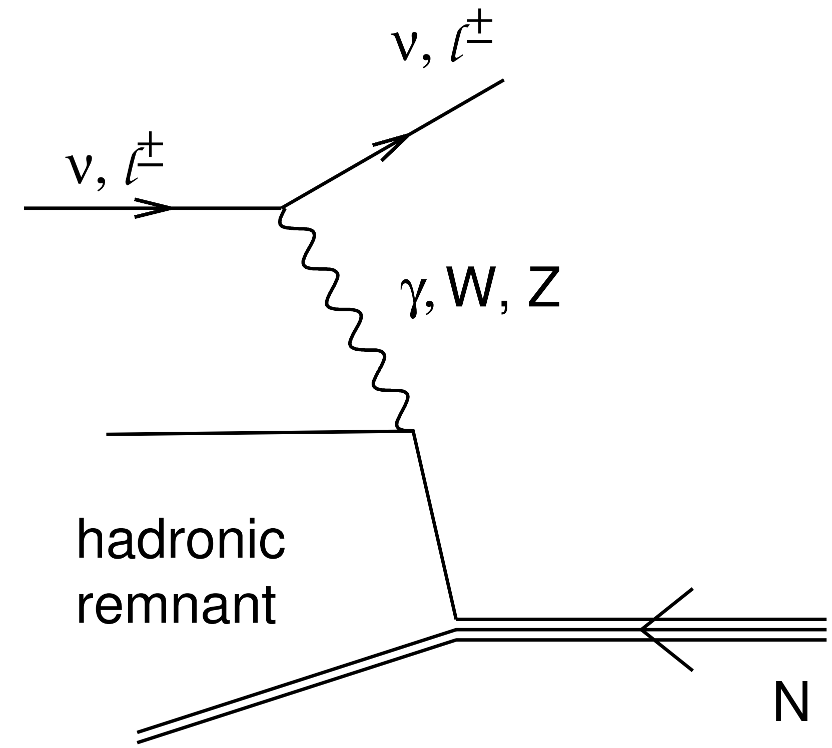

Bremsstrahlung




Production de $e^+e^-$

Problèmes parfois compliqués, mais bien à la portée de nos outils théoriques.

Modes profondément inélastiques (QCD)
(sensible à la structure interne du proton)




Deep Inelastic Scattering (DIS),
Photoproduction

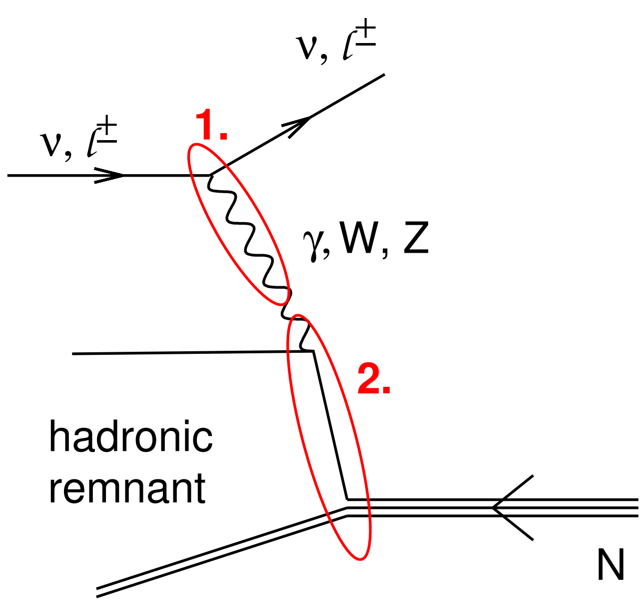
Problème toujours compliqué, les outils théoriques 'ab initio' sont souvent très limités.

## Comment traiter les collisions lepton-nucléon UHE en QCD?

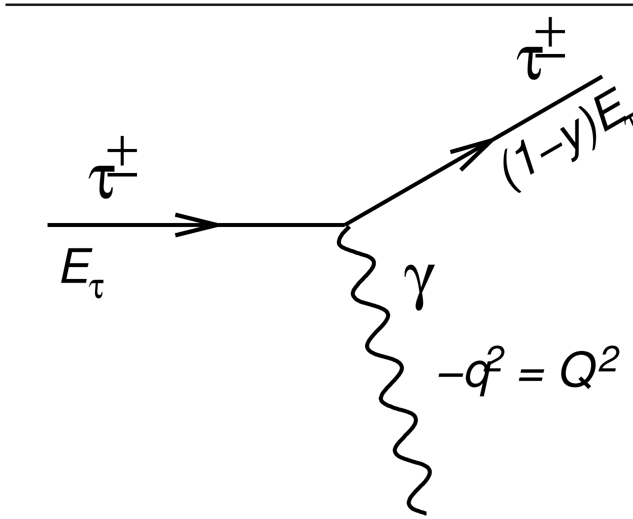
Le problème se sépare en deux parties:

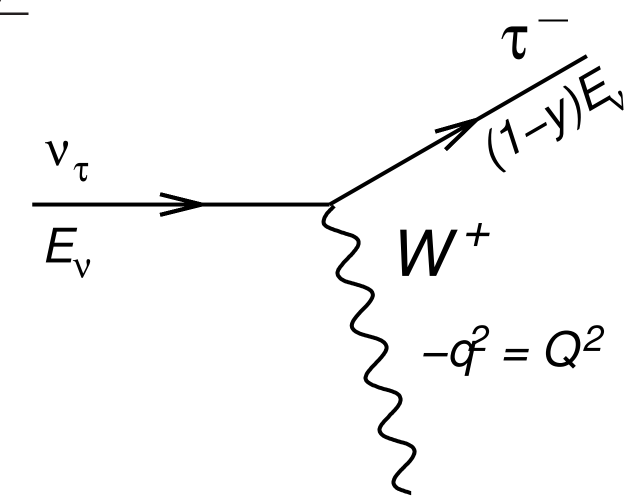
**1.** La production et propagation du photon (ou $Z, W^{\pm}$): physique électrofaible

**2.** L'interaction photon-nucléon: physique électrofaible et QCD




*1.* Production du boson de jauge



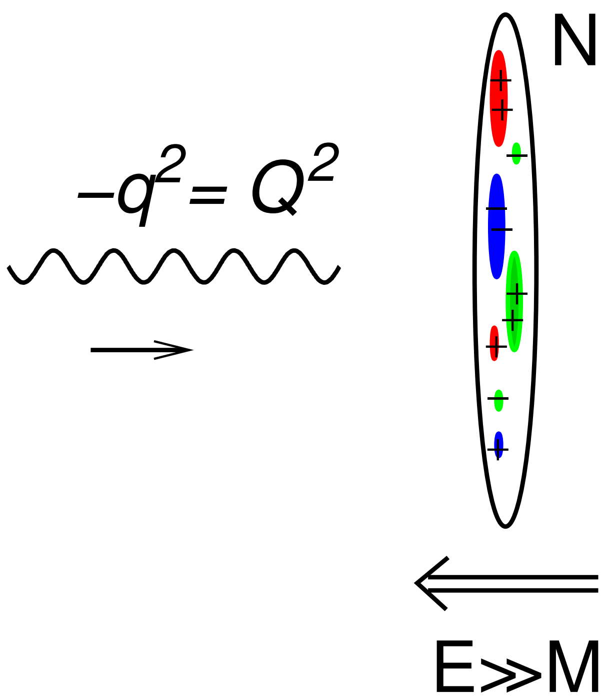

$$\frac{4\pi\alpha^2}{Q^4} \qquad\qquad \frac{G_F^2}{\pi}\left(\frac{M_W^2}{M_W^2+Q^2}\right)^2$$

*fraction d'énergie perdu par le lepton* $= y$

*virtualité du boson* $= Q^2$

# 2. Partie hadronique

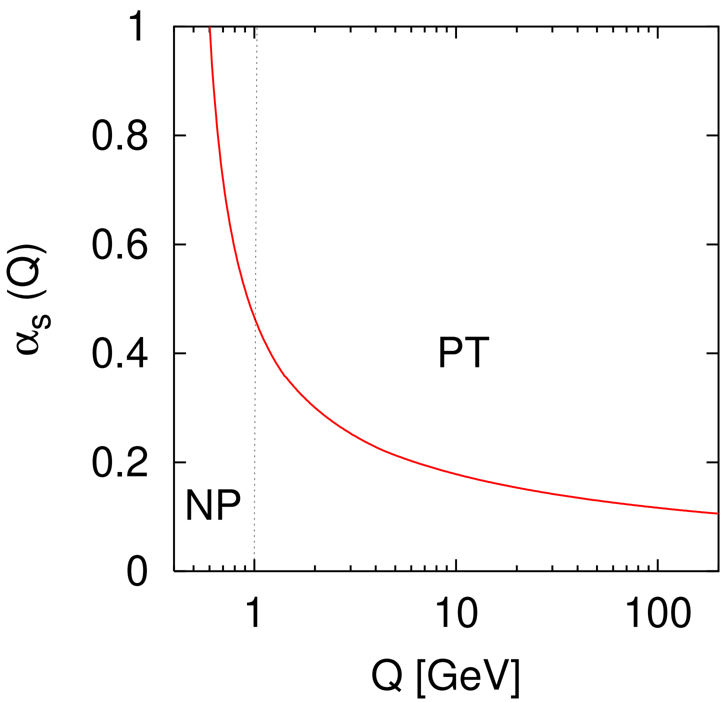
## Que voit le photon (ou $Z$ ou $W^{\pm}$)?




- ✗ Nucléon avec vitesse $\simeq c$
- ✗ $\Rightarrow$ contracté relativistiquement (une ‘crêpe’)
- ✗ Le temps du nucléon est dilaté (configuration congelée de champs de ‘quarks’ — *inhomogénéité de charge électrique*)
- ✗ Ce que voit le photon dépend
  - ☛ de sa puissance de résolution transverse *(déterminé par sa virtualité $Q^2$)*
  - ☛ de l’énergie du nucléon

LE PHOTON VOIT LA STRUCTURE INTERNE DU PROTON
A L’ECHELLE $Q^2$

# Détermination de la structure du proton par QCD?




Le couplage de la QCD dépend de l'échelle:

✗ $Q > 1$ GeV: domaine *perturbatif* $\alpha_s \ll 1$

☛ en principe nous savons faire les calculs

✗ $Q \lesssim 1$ GeV: domaine *non-perturbatif* $\alpha_s \simeq 1$

☛ méthodes de calcul très limités

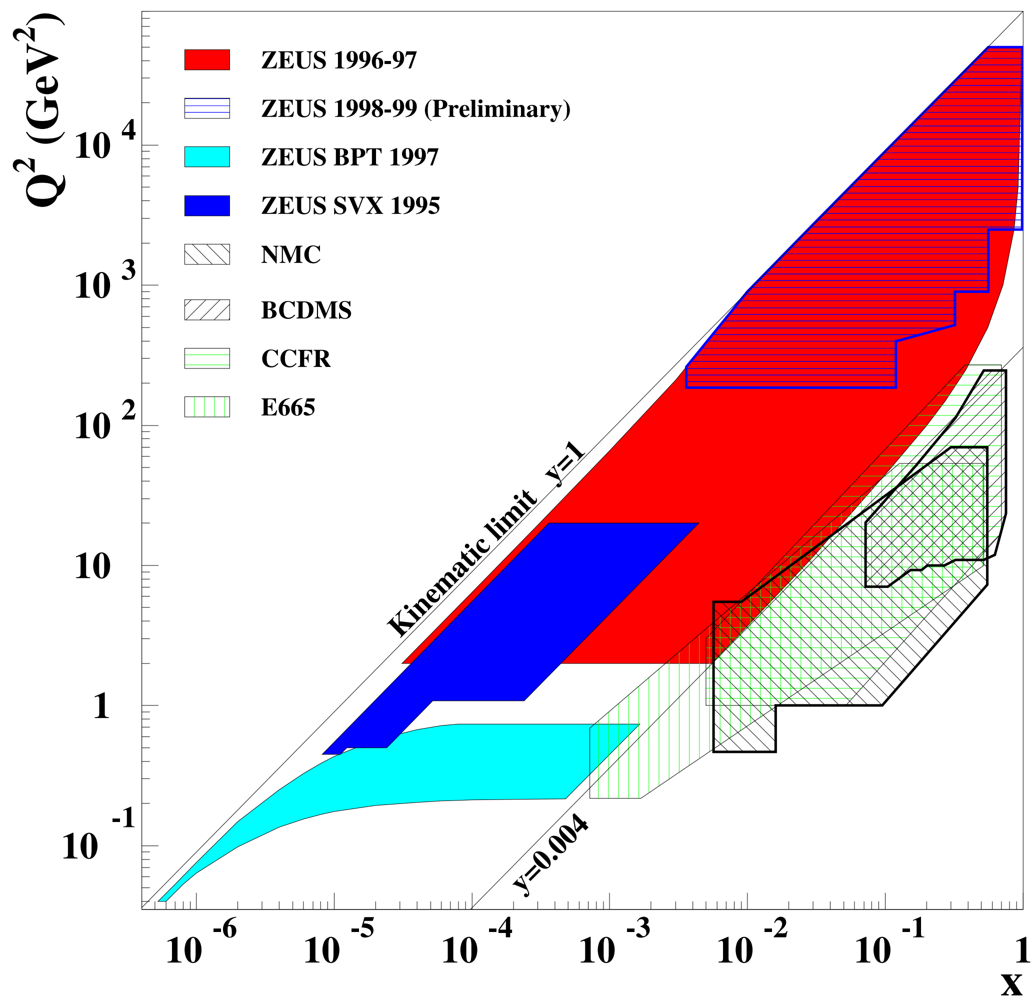
Pour $Q^2 > 1$ GeV on peut parler de distributions de *quarks* en fonction de $x$ (fraction de l'énergie du proton portée par le quark), à une échelle $Q^2$:

⇒ section efficace $\propto$ densité de quarks.

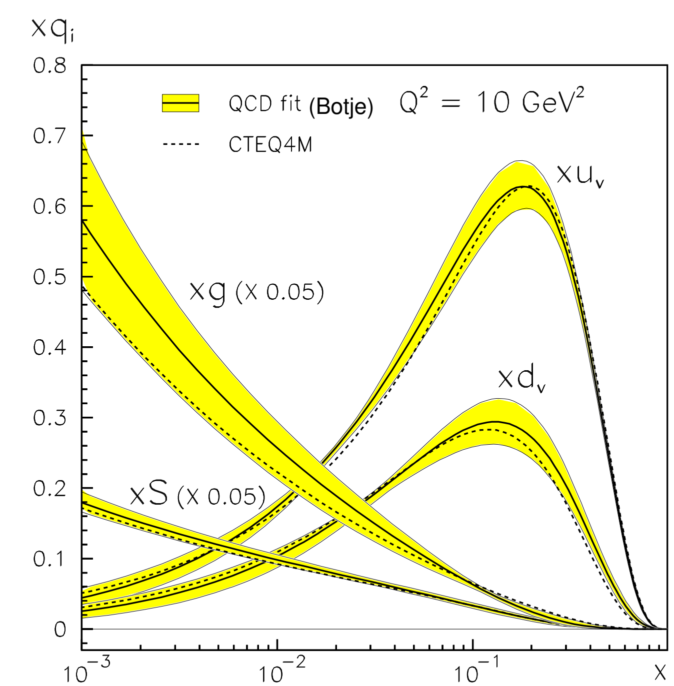
*PROBLÈME:* la masse du proton $M_p \simeq 1$ GeV
⇒ la distribution de quarks est déterminée par la physique non-perturbative.

SEULE SOURCE D'INFORMATIONS: MESURES EXPÉRIMENTALES

# Mesure expérimentale de la distribution des quarks




- ✗ Énormément de données ont été obtenus par de nombreuses expériences.



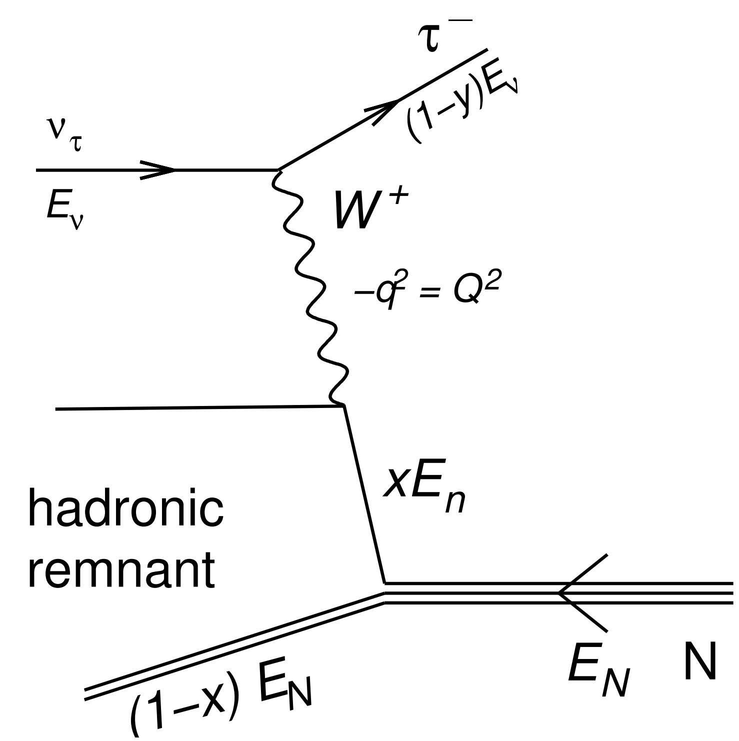

- ✗ Mais la couverture du plan $x, Q^2$ est limitée.
- ✗ Qu'est-ce qui sert pour les rayons cosmiques UHE?

# Domaine en $x, Q^2$ des RC UHE: exemple des neutrinos

Relation cinématique:

$$Q^2 = xys$$

| | |
|---|---|
| $\sqrt{s}$ | énergie centre de masse $\nu N$ |
| $Q$ | virtualité du boson |
| $y(< 1)$ | inélasticité du neutrino |
| $x(< 1)$ | fraction d'énergie du N portée par le quark |




Pour un neutrino UHE:

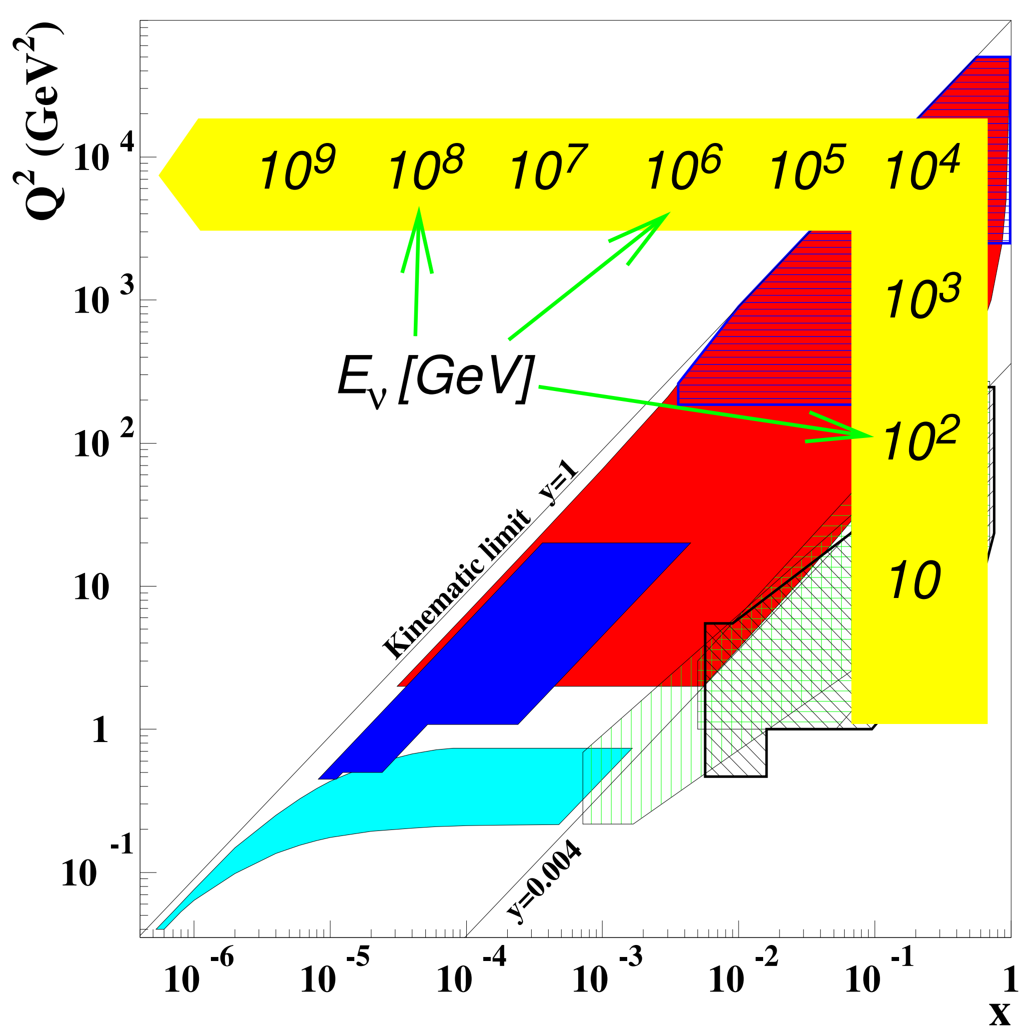
$$\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} = \frac{G_F^2}{\pi}\left(\frac{M_W^2}{Q^2+M_W^2}\right)^2 \cdot$$
$$\cdot \left[q(x,Q^2) + (1-y)^2 \bar{q}(x,Q^2)\right]$$

Deux cas:

✗ $s < M_W^2 \Rightarrow Q^2 \lesssim s,\ x \lesssim 1$

✗ $s > M_W^2 \Rightarrow Q^2 \sim M_W^2$
$x \sim M_W^2/s$

# Domaine en $x, Q^2$ (neutrinos)




$$s = m_N E_\nu$$

$$(m_N \simeq 1 \text{ GeV}, \; M_W \simeq 81 \text{ GeV})$$

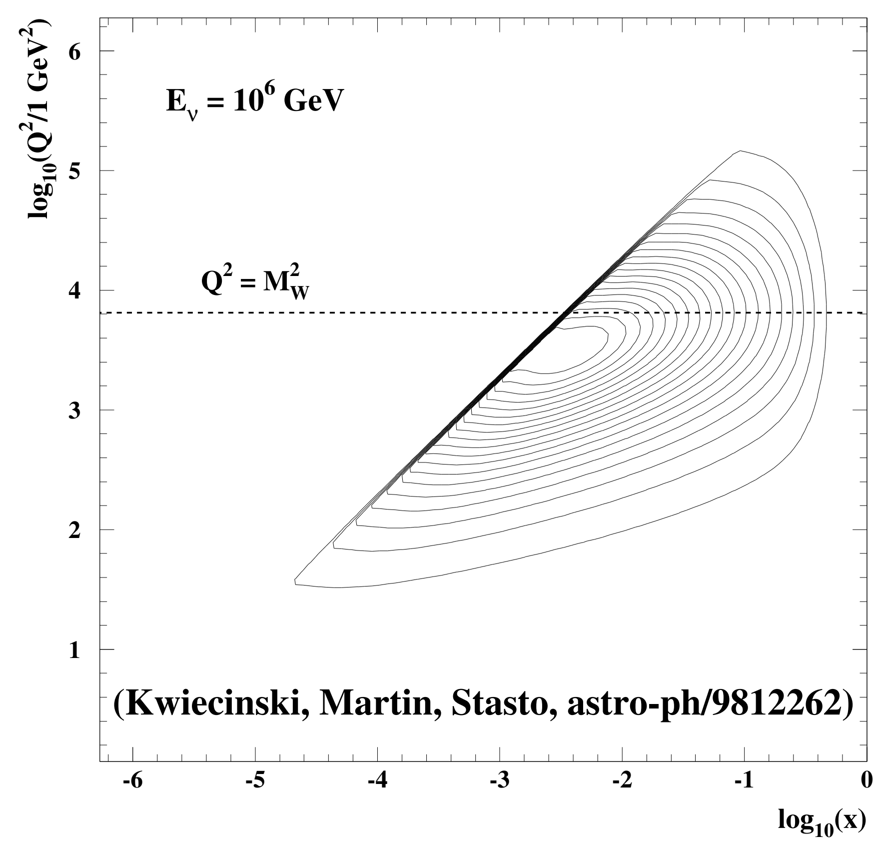
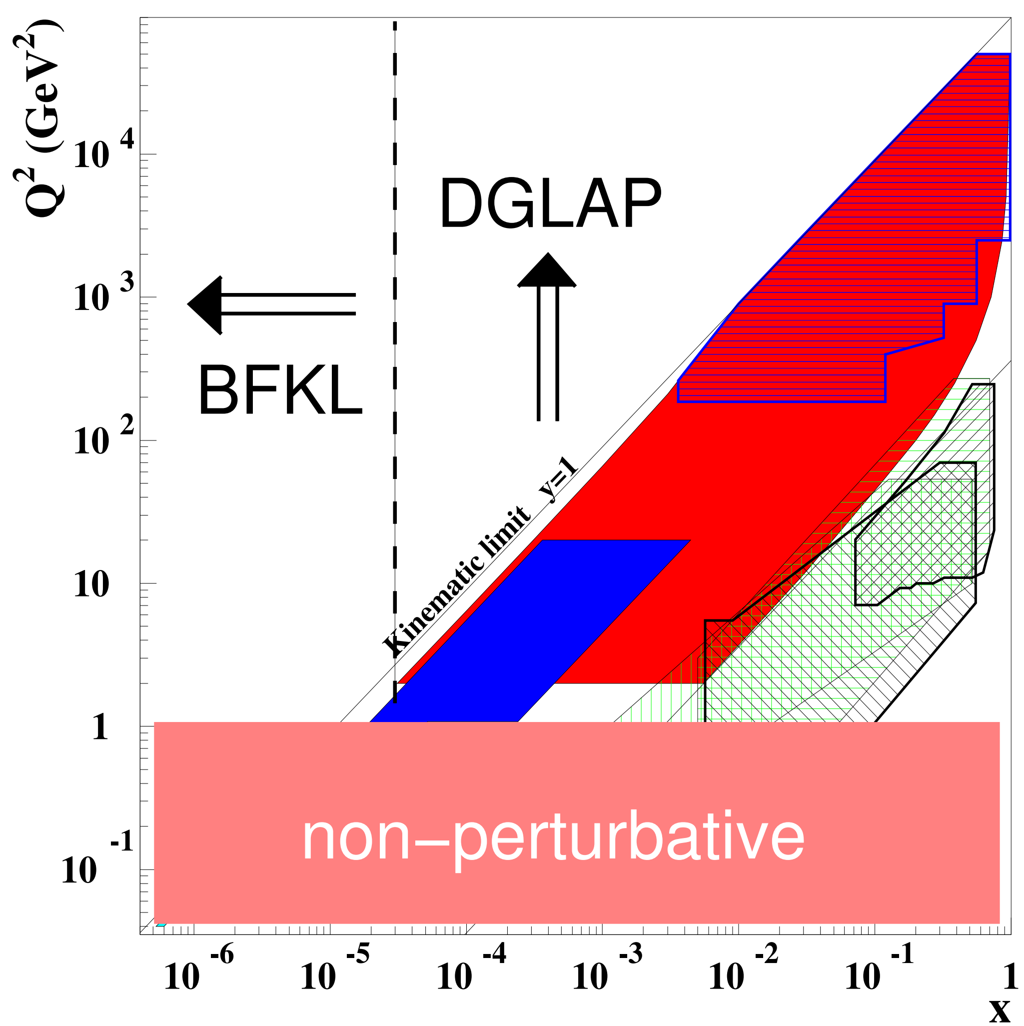
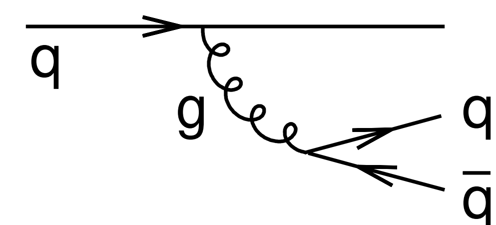



Fig.7a

Il faut connaître la distribution des quarks en dehors du domaine où elle a été mesurée.

# Extension du domaine $x, Q^2$ par QCD

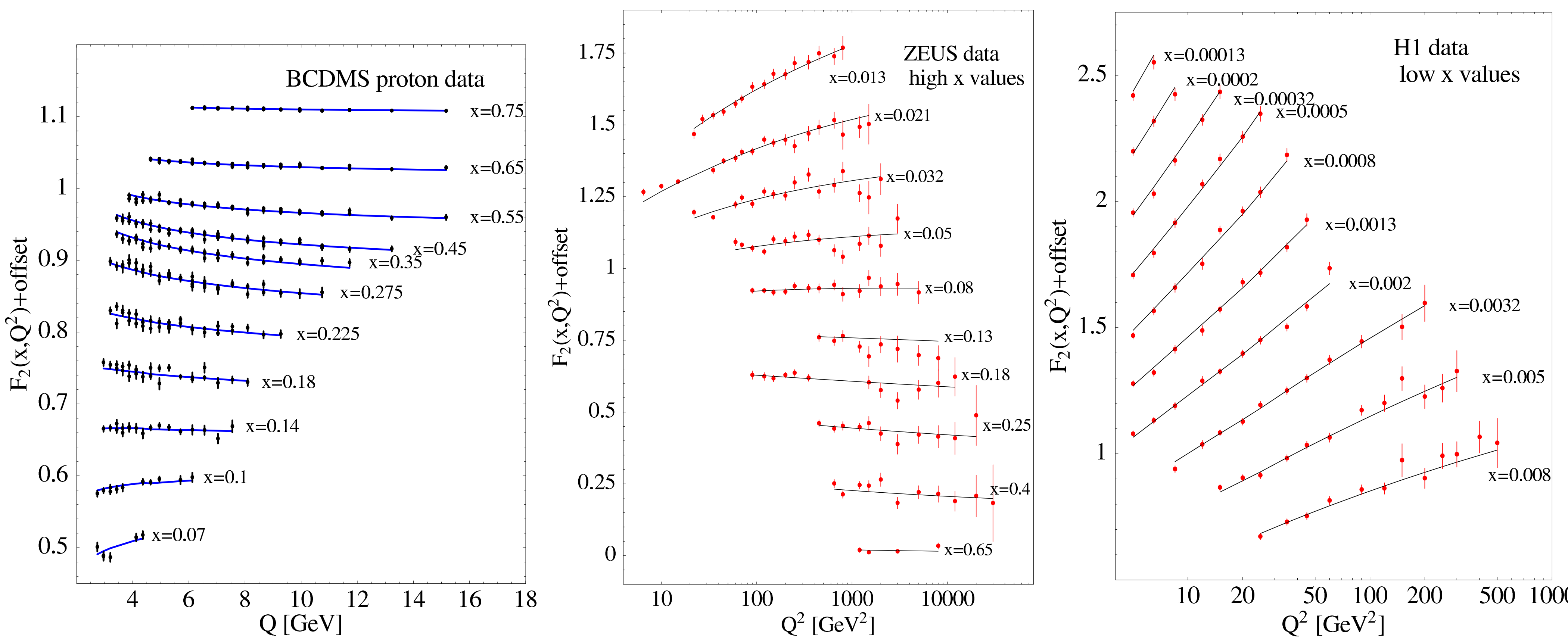



La QCD permet d'évoluer les distributions de quarks et gluons

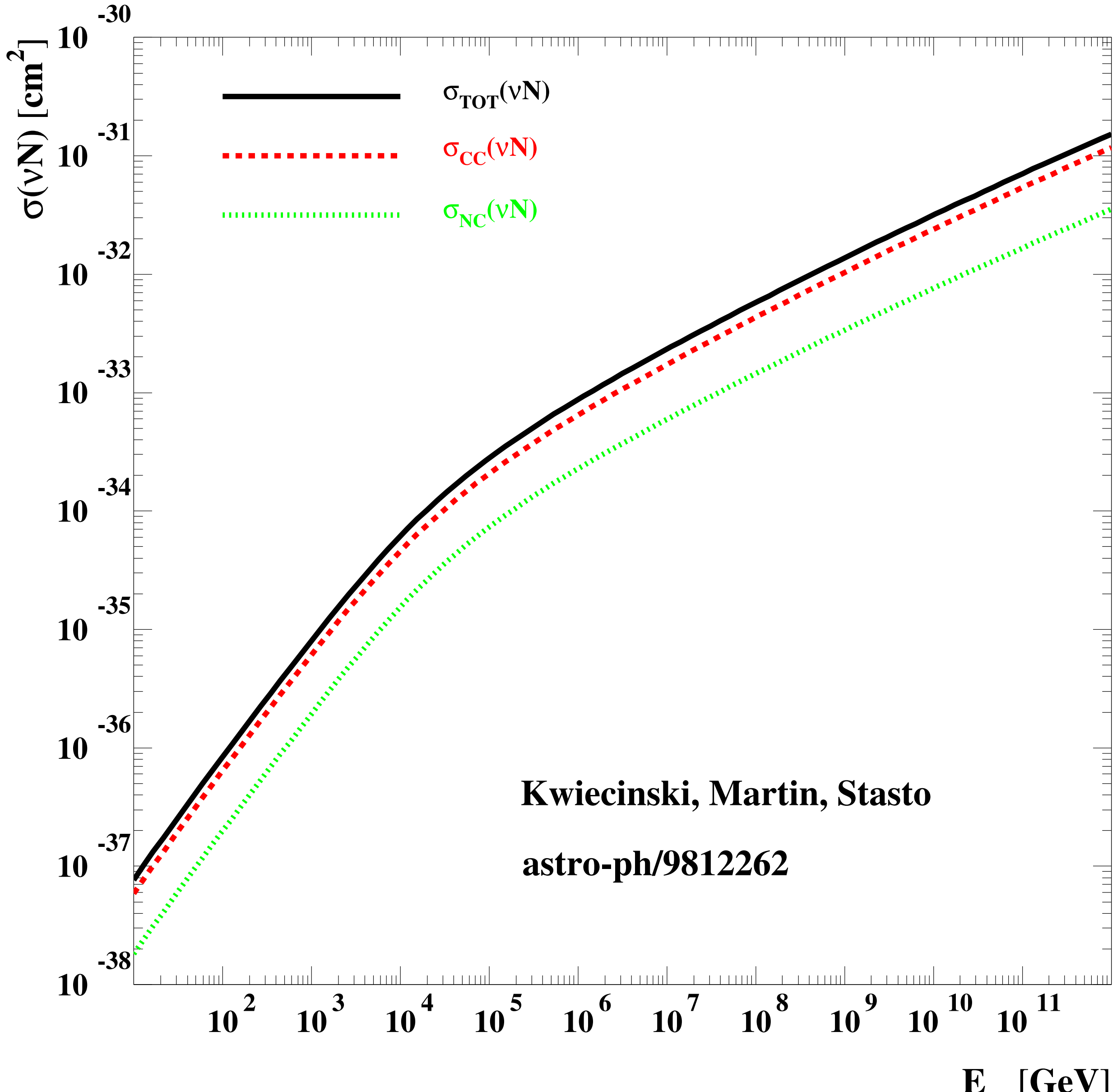
- ✗ Évolution *DGLAP,* en $Q^2$ (RG):
  - La théorie est stable
  - Bien testé expérimentalement
- ✗ Évolution *BFKL,* en $x$:
  - La théorie est moins stable
  - Tests expérimentaux ambigus
  - *Résultat principal:* croissance du nombre de quarks et gluons à petit-$x$.

# Tests de l'évolution DGLAP



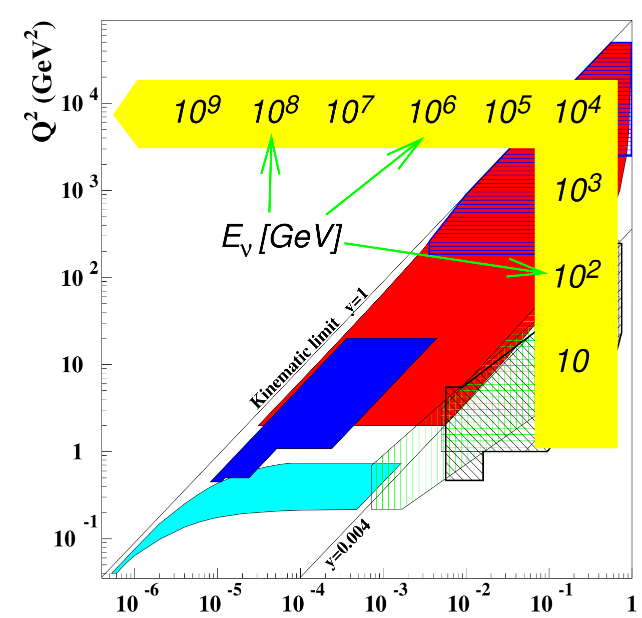

CTEQ6, hep-ph/0201195

# Quels sont les résultats?

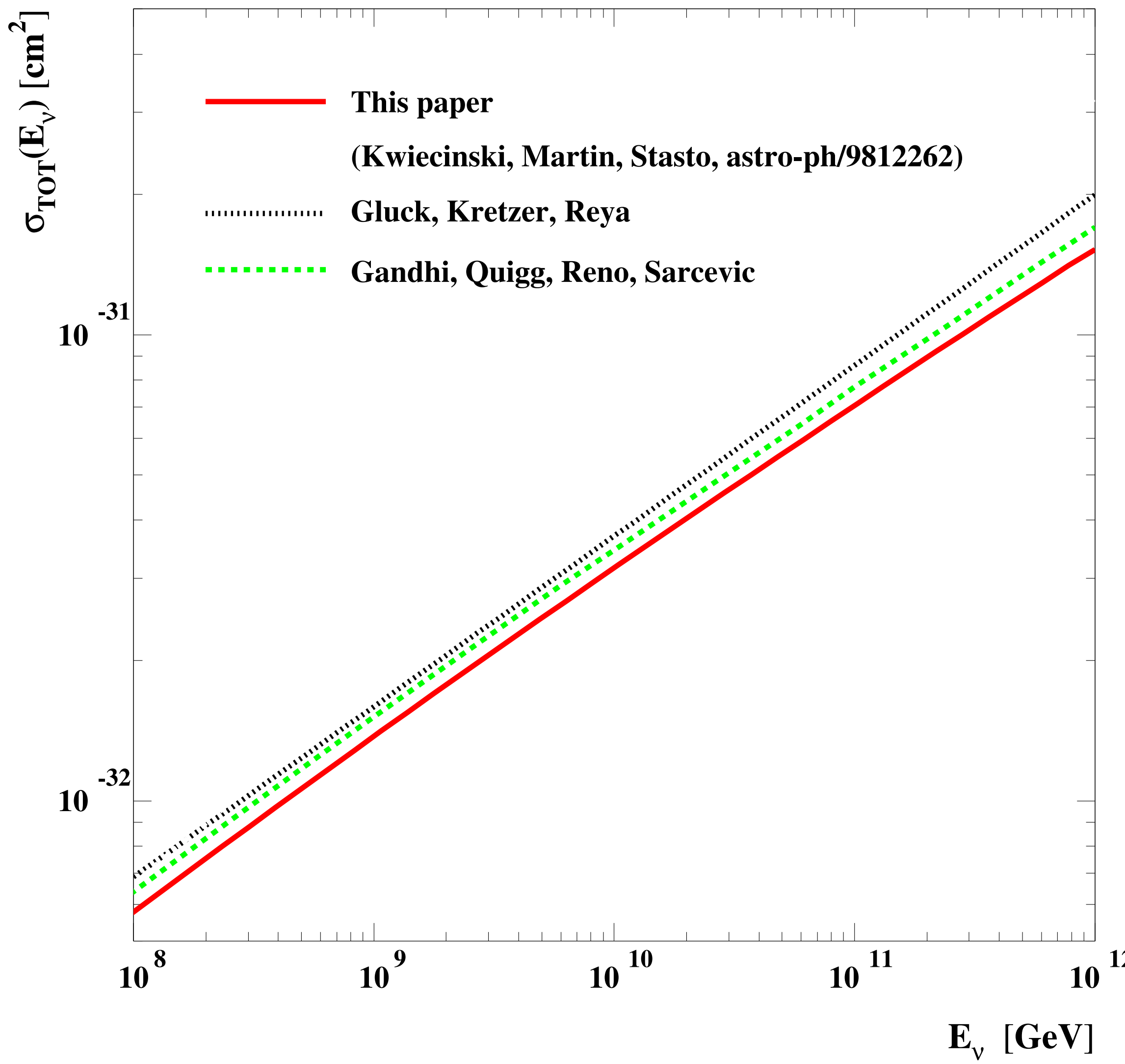



Deux dépendances en $E_\nu$ sont clairement visibles:

- ✗ $m_N E_\nu \lesssim M_W^2$: $\sigma \sim E_\nu$ (intégration en $Q^2 < m_N E_\nu$)
- ✗ $m_N E_\nu \gtrsim M_W^2$: $\sigma \sim E_\nu^{0.4}$ (croissance de la distribution des quarks à petit $x$)



# Incertitudes




Pour $E_\nu > 10^8$ GeV, $\sigma$ dépend des distributions de partons à $x < 10^{-4}$: non-déterminées expérimentalement.

✗ GKR et GQRS:

☛ DGLAP + extrapolation à petit $x$

✗ KMS:

☛ DGLAP + BFKL

Est-ce que les différences sont vraiment une mesure des incertitudes?

# Autres effets

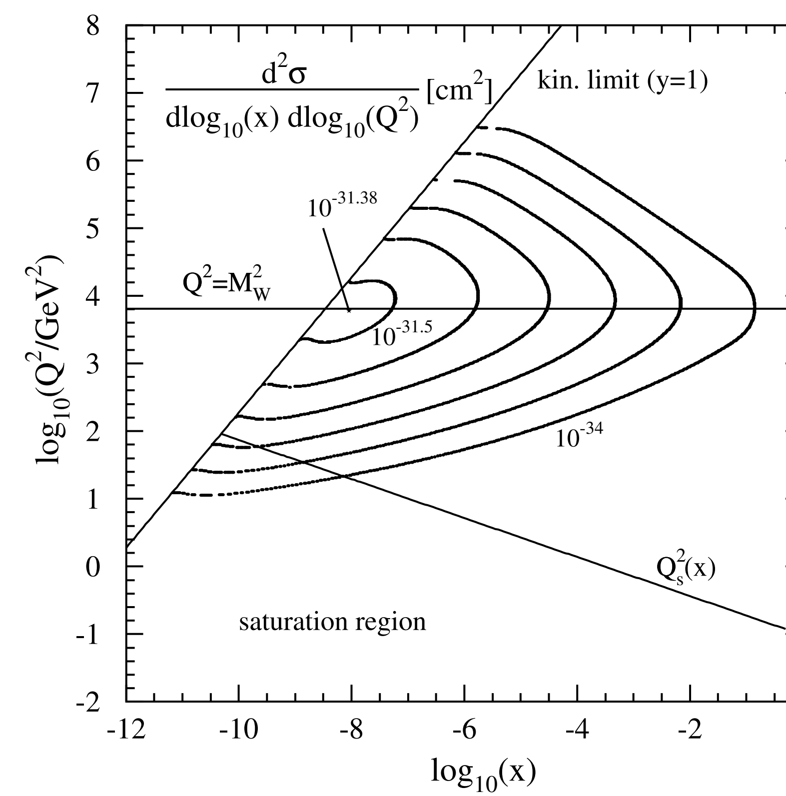
Possibilité de *saturation:*

✗ haute densité de gluons

✗ $gg \to g$, qui limite le nombre de gluons

✗ $\Rightarrow$ saturation du nombre de quarks à $x \ll 1$.

La saturation est un effet assez mal compris — mais les calculs qui ont été faits suggèrent un effet négligeable.




$E_\nu = 10^{12}$ GeV Reno *et al*, hep-ph/0110235

*Opinion personnelle:* il reste encore des problèmes à résoudre, mais au niveau d'un facteur de $2$ les résultats devraient être fiables.

# Et les interactions des $e^\pm$, $\mu^\pm$ et $\tau^\pm$?

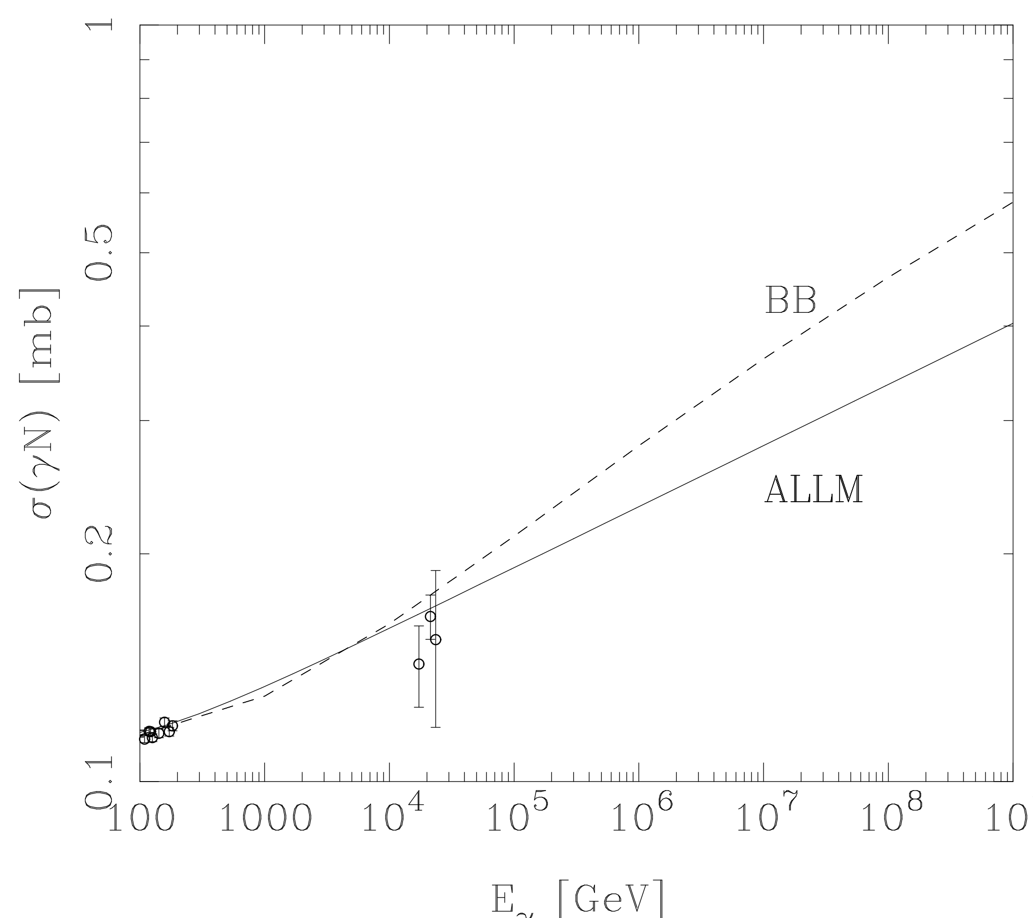
- ✗ Interaction par échange d'un photon:

$$\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} \sim \frac{\alpha_s^2}{Q^4}$$

Le photon tend vers $Q = 0$ (photon réel) — hors du domaine de la QCD perturbative.

- ✗ Les parametrisations pour $\sigma(\gamma N)$ ne sont que des modèles, sans bases théoriques fortes.

- ✗ Mais pour la plupart des énergies d'autres modes d'interaction (Bremsstrahlung, production $e^+e^-$) contribuent aussi: *l'incertitude sur la partie photo-nucléaire est diluée.*

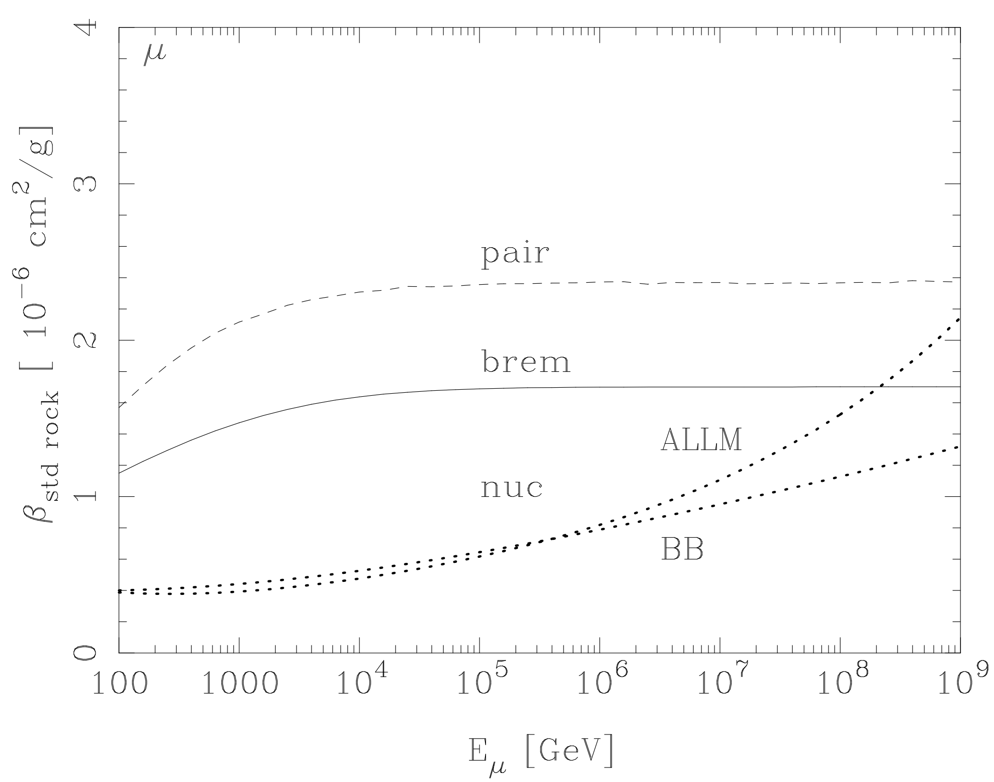


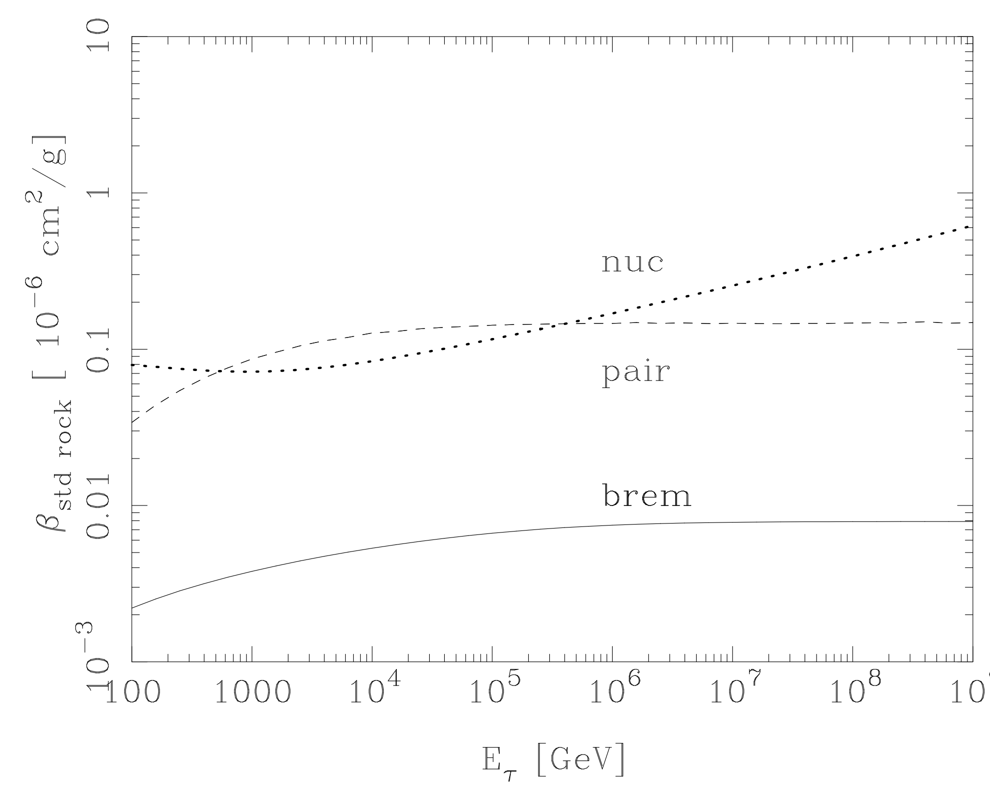

Iyer Dutta, Reno, Sarcevic & Seckel
hep-ph/0012350

# Contribution des mécanismes de perte d'énergie de $\mu^\pm$ et $\tau^\pm$

$$\left\langle \frac{dE}{dX} \right\rangle = -\alpha - \beta E \qquad \begin{array}{|ll} \alpha \rightarrow & \text{ionisation (pierre: } 2.4\,\mathrm{MeV}/(\mathrm{g\ cm^{-2}})) \\ \beta \rightarrow & \text{autres mécanismes} \end{array}$$

Le mécanisme dominant dépend de la masse du lepton, et de son énergie.




Iyer Dutta *et al*

# Dégradation d'énergie des $\nu_\tau$

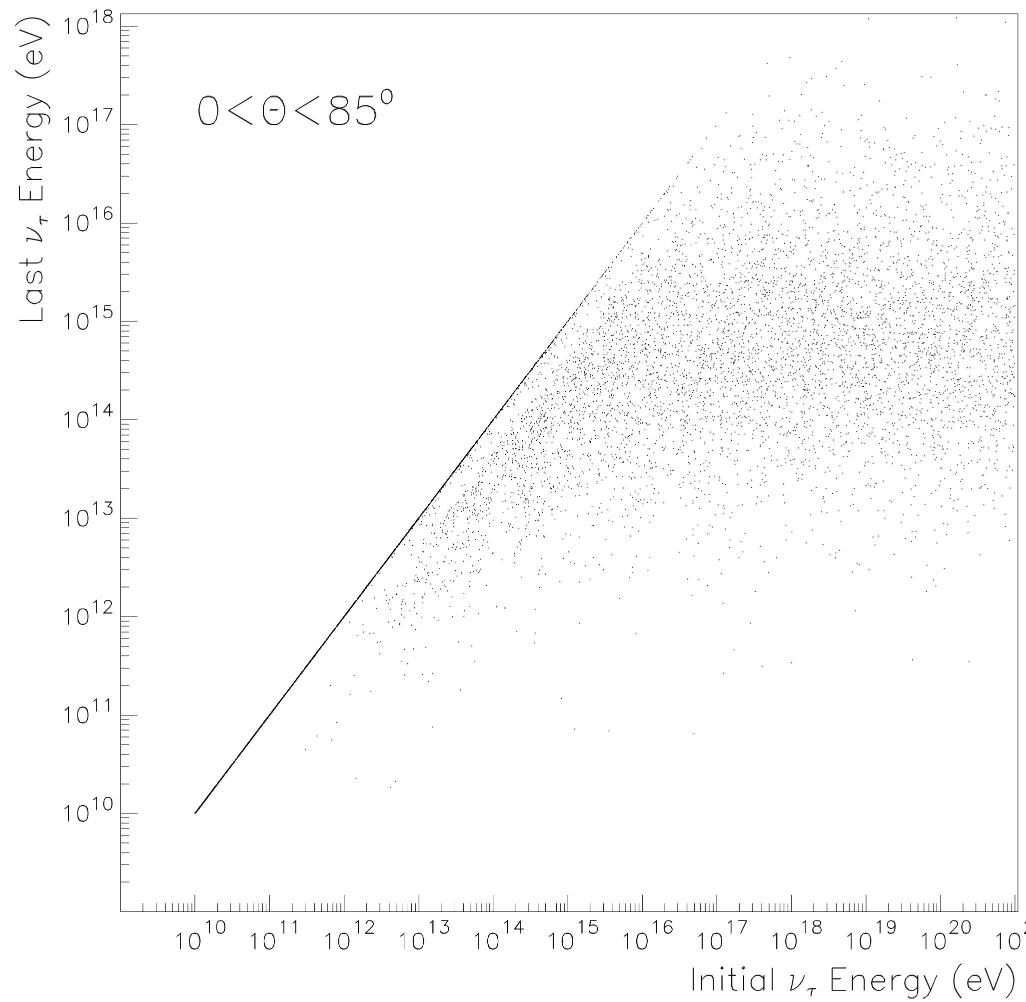
Pour savoir ce qu'on va voir réellement, il faut considérer la régénération des neutrinos

$$\nu_\tau \to \tau + X \to \nu_\tau + X' \to \ldots$$

$\tau \to \nu_\tau$ peut avenir par interaction CC, ou par désintégration

*Il faut mettre ensemble les résultats sur les interactions des $\nu_\tau$ et des $\tau^\pm$*

Halzen & Salzberg, hep-ph/9804354



# Conclusions

- ✗ Interactions $\nu N$:
  - ☞ La QCD n'est pas actuellement capable de donner des réponses *ab initio*
  - ☞ Mais pour $E_\nu \lesssim 10^8\ \mathrm{GeV}$ les données expérimentales des collisionneurs peuvent-être *évoluées* (en $Q^2$), pour donner des prédictions stables.
  - ☞ Au delà il faut *extrapoler* ou utiliser une évolution en $x$ (partiellement comprise)
- ✗ Interactions $\ell^\pm N$:
  - ☞ un jeu de plusieurs effets
  - ☞ la partie 'QCD' est mal comprise, mais quand même suffisamment bien déterminée (expérimentalement) pour la plupart des applications
- ✗ Pour la propagation des $\nu_\tau$, il faut prendre un compte toute une chaîne d'interactions.