



# Physique nucléaire sur réseau

Feliciano de Soto Borrero

Autrans, 07/06/2005

# Index

- ▣➤ La physique nucléaire “ab initio”
- ▣➤ Intérêt d’une approche QFT
- ▣➤ L’état actuel du projet
- ▣➤ Perspectives possibles

# La physique nucléaire “ab initio”

Les calculs “ab initio” en physique nucléaire se ramènent à la résolution d’une équation intégrale du type Lipmann-Schwinger:

$$\begin{aligned} T &= V + VG_0T \\ &= V + VG_0V + VG_0VG_0V + \dots \end{aligned}$$

sous la forme:

Schrodinger (Fadeev)	$(E - H_0) \psi\rangle = V \psi\rangle$
Bethe-Salpeter	$\Phi = G_0V\Phi$
Light Front	$(M^2 - P_0^2) \psi\rangle = V \psi\rangle$

Que met-on dans l’interaction  $V$  ?

# La physique nucléaire “ab initio”

L'interaction  $V$  est obtenue

- **ex-nihilo**

En répertoriant tous les termes possibles

$$V_{i,j} = V_c(r) + V_{ss}(r)\vec{\sigma}_i \cdot \vec{\sigma}_j + V_{so}(r)\vec{L} \cdot \vec{S} + V_T(r)S_{i,j} + \dots$$

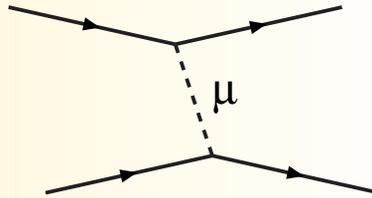
avec  $V(r)$  fixés par l'expérience

- **d'une théorie quantique des champs**

- **QCD**: bien qu'on soit convaincu que c'est la théorie fondamentale derrière l'interaction nucléaire, décrire des noyaux au delà du deuterium dans ce cadre semble difficile.
- **Modèles *One Boson Exchange (OBE)***: Depuis Yukawa, ils sont à la base des calculs “ab initio”, et ils permettent d'obtenir le potentiel  $V_{i,j}$  précédent.

# La physique nucléaire “ab initio”

Dans les modèles OBE, les nucléons interagissent par échange de mésons massifs ( $\pi$ ,  $\sigma$ ,  $\rho$ , etc)



avec des lagrangiens d'interaction:

$$\mathcal{L}_s = g_s \bar{\psi} \phi \psi ; \quad \mathcal{L}_{ps} = g_{ps} \bar{\psi} \gamma_5 \phi \psi ; \quad \mathcal{L}_V = \bar{\psi} g_V \gamma_\mu A_\mu \psi$$

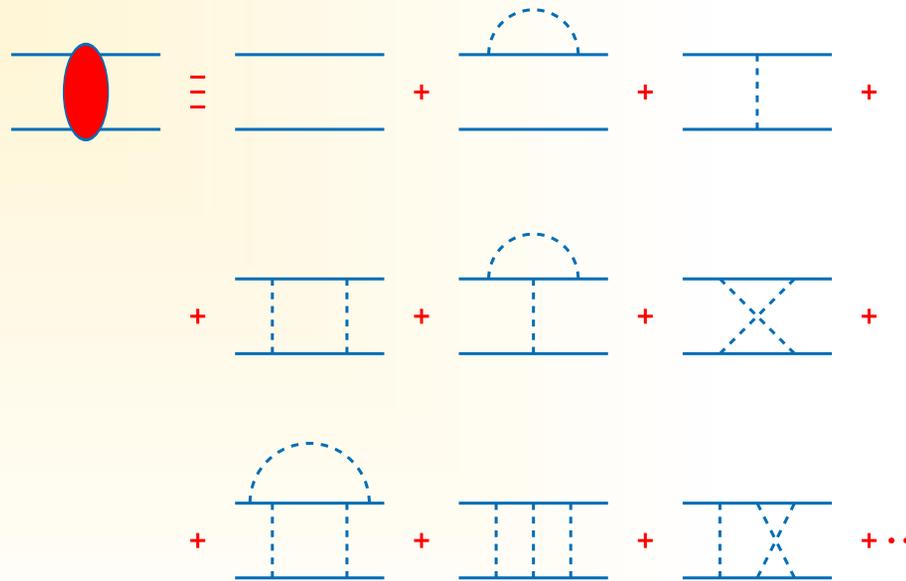
mais le lien entre  $\mathcal{L}$  et  $V$  n'est pas (du tout) direct!

Dans le cas scalaire on obtient le potentiel de Yukawa,  $\frac{e^{-\mu r}}{r}$ , mais en posant  $\bar{u}u = 1$  et  $q^2 = -\vec{q}^2$  (limite NR)

# La physique nucléaire “ab initio”

En général, on résout les modèles OBE:

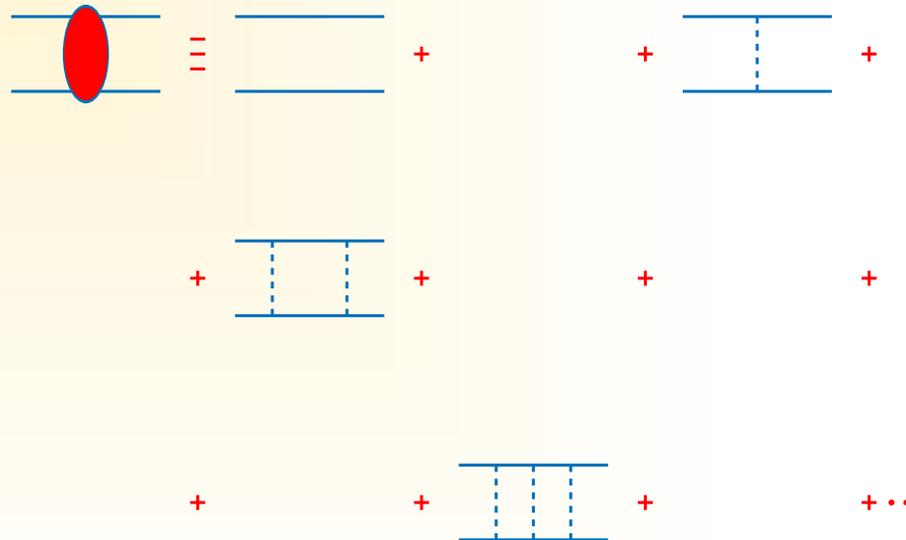
- A l'approximation d'échelle:



# La physique nucléaire “ab initio”

En général, on résout les modèles OBE:

- A l'approximation d'échelle:



# La physique nucléaire “ab initio”

En général, on résout les modèles OBE:

- A l'approximation d'échelle:
- Non relativiste  $\bar{u}u \rightarrow 1$
- Potentiel local  $q_0^2 \rightarrow 0$

Même dans ce cas simplifié il y a quelques 40 paramètres à déterminer...

# La physique nucléaire “ab initio”

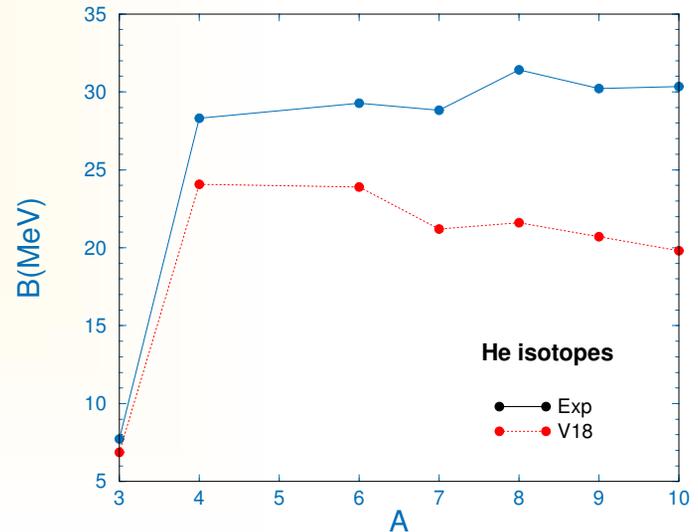
En général, on résout les modèles OBE:

- A l'approximation d'échelle:
- Non relativiste  $\bar{u}u \rightarrow 1$
- Potentiel local  $q_0^2 \rightarrow 0$

Même dans ce cas simplifié il y a quelques 40 paramètres à déterminer...

## Forces à deux corps

Avec les paramètres déterminés pour  $A=2$  on ne peut pas décrire les systèmes  $A=3,4,\dots$ , il manque de la liaison!

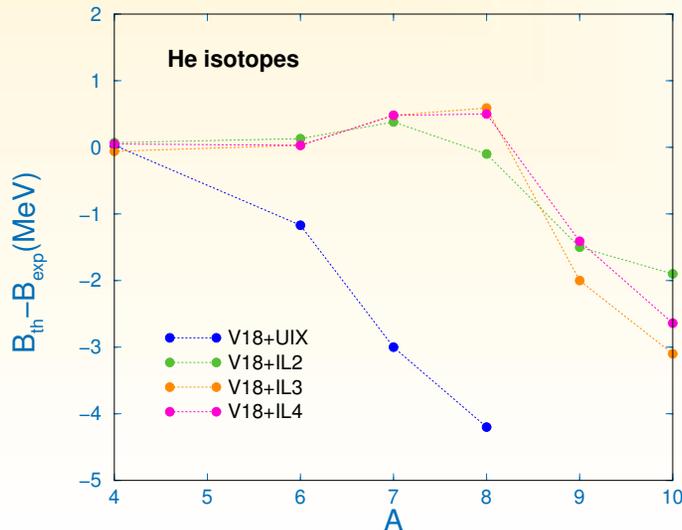


# La physique nucléaire “ab initio”

En général, on résout les modèles OBE:

- A l'approximation d'échelle:
- Non relativiste  $\bar{u}u \rightarrow 1$
- Potentiel local  $q_0^2 \rightarrow 0$

Même dans ce cas simplifié il y a quelques 40 paramètres à déterminer...

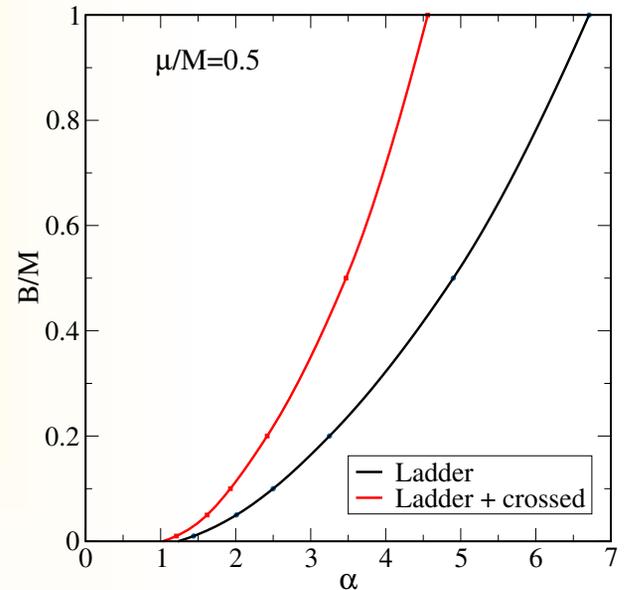


Et même avec  $V_{ijk} \neq 0$ ...

# La physique nucléaire “ab initio”

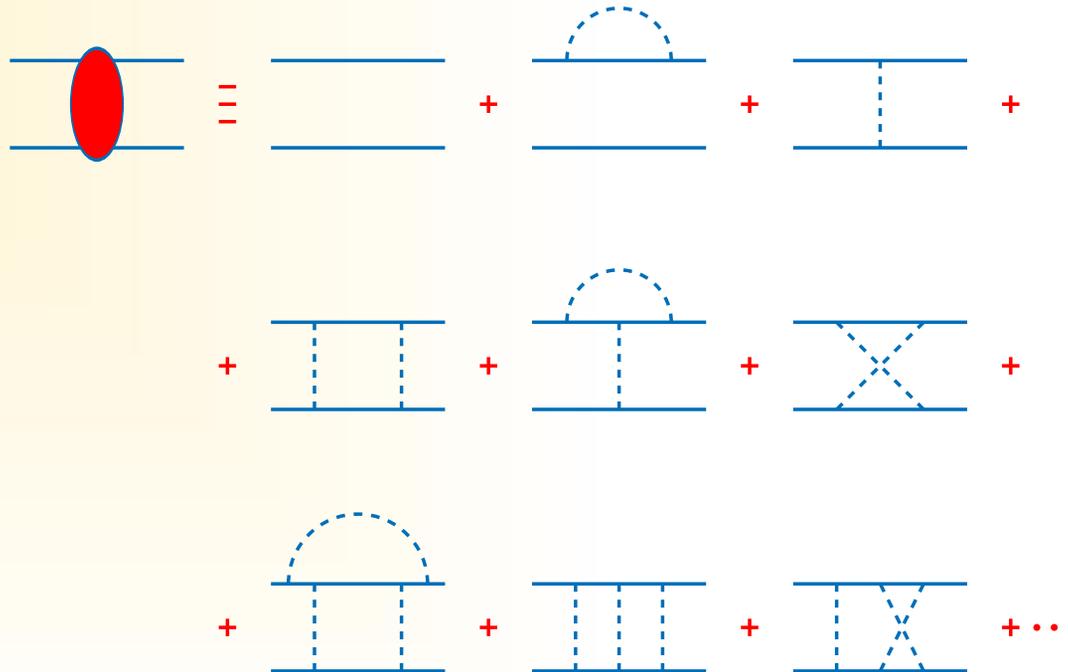
Aller au delà de l'approximation d'échelle ou aux calculs relativistes est très difficile (impossible pour plus de trois particules)

Pour un modèle scalaire,  $\chi^2\phi$ , les termes croisés sont très importants



# Intérêt d'une approche QFT

- Approx. échelle



# Intérêt d'une approche QFT

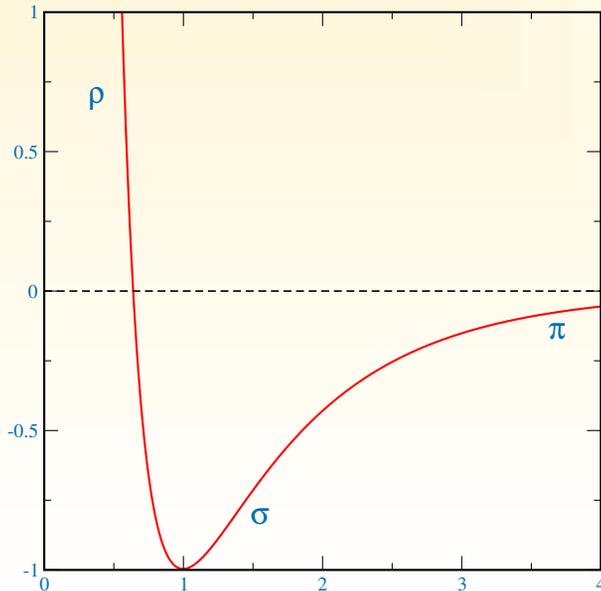
- Approx. échelle
- Paramètres (simplicité)

## Exemple, potentiel de Bonn

	$\mu/M$	$\frac{g^2}{4\pi} (f/g)$	$\Lambda (GeV)$	$n$
$\pi$	0.138	14.9	1.3	1
$\sigma$	0.550	7.8	2.0	1
$\rho$	0.770	0.95 (6.1)	1.3	1
$\omega$	...			
$\eta$	...			
$\delta$	...			
$\sigma'$	...			

# Intérêt d'une approche QFT

- Approx. échelle
- Paramètres (simplicité)
- Le  $\sigma$ , est-il nécessaire ?



Les parties de courte et moyenne portée de  $V_{NN}$  sont produites traditionnellement par les mésons  $\rho$  et  $\sigma$ ... mais peuvent être produites par des corrélations  $\pi\pi$ ...  
(?)

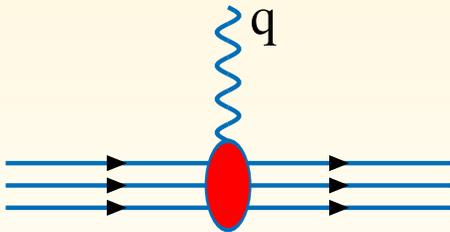
# Intérêt d'une approche QFT

- Approx. échelle
- Paramètres (simplicité)
- Le  $\sigma$ , est-il nécessaire ?
- Interactions à N-corps

Les interactions à 3-corps, 4-corps, etc. sont automatiquement incluses dans un formalisme QFT

# Intérêt d'une approche QFT

- Approx. échelle
- Paramètres (simplicité)
- Le  $\sigma$ , est-il nécessaire ?
- Interactions à N-corps
- Description relativiste de noyaux



La plupart de la physique nucléaire théorique est basée sur des calculs NR, mais à JLAB des noyaux sont sondés à des énergies  $q^2 \sim 10 \text{ GeV}^2$

Les calculs relativistes à l'approximation d'échelle donnent le signe contraire pour des corrections sur le  $J^\pi = 0^+$  du positronium...

## Un projet en cours

$$Z = \int_{V,a} [d\phi][d\bar{\psi}][d\psi] \text{Exp} [-S_{KG} - \bar{\psi}Q\psi]$$

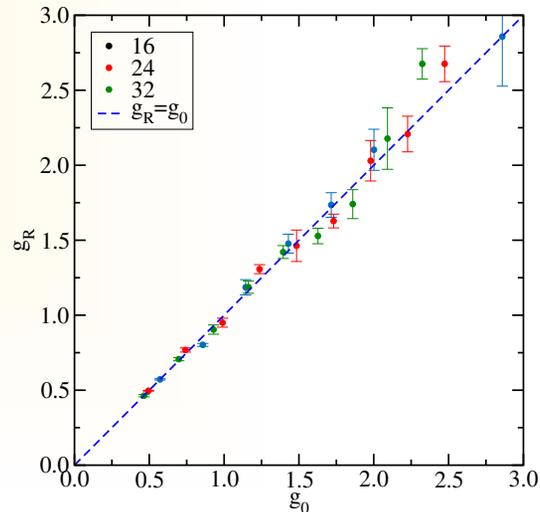
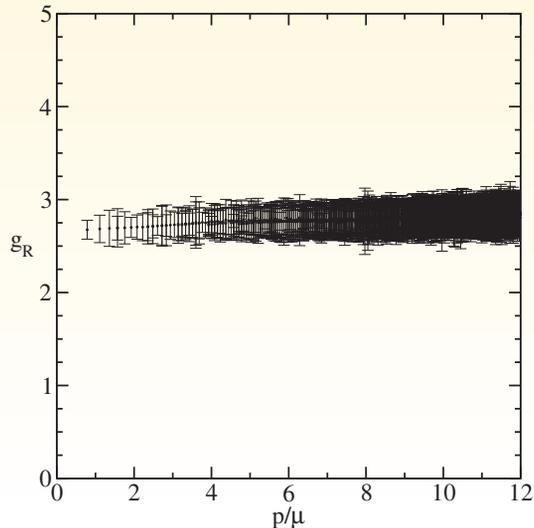
$$Q = 1 + g\phi + \kappa \sum_{\mu} (1 - \gamma_{\mu}) \delta_{x,y+\mu}; \quad \kappa = \frac{1}{8 + aM}$$

Erreurs statistiques:	Ordinateurs puissants, $\sim \frac{1}{\sqrt{N}}$
Erreurs systématiques:	Volume fini, $V \rightarrow \infty$ Limite du continu, $a \rightarrow 0$  Approximation “quenched”

# Un projet en cours

On étudie un modèle d'interaction nucléon-méson (couplages scalaires ou pseudoscalaires) dans l'approximation "quenched":

- Correspondance entre des paramètres nus ( $a$ ,  $\mu$ ,  $\kappa$ ,  $g$ ) et renormalisés ( $\mu$ ,  $M$ ,  $g_R$ )
- La constante de couplage renormalisée reste constante et égale à la constante nue



# Un projet en cours

On étudie un modèle d'interaction nucléon-méson (couplages scalaires ou pseudoscalaires) dans l'approximation "quenched":

- Correspondance entre des paramètres nus ( $a, \mu, \kappa, g$ ) et renormalisés ( $\mu, M, g_R$ )
- La constante de couplage renormalisée reste constante et égale à la constante nue

Pour des états à deux corps (sans isospin):

- On commence à étudier les états liés  $N - N$  et  $\bar{N} - N$  avec couplage scalaire
- ...

# Les problèmes en cours

- Valeur critique de  $g$

Les méthodes numériques échouent pour  $g \gtrsim 3$

- Calculs de très haute précision

Les énergies de liaison en P.N. sont  $\sim 10^{-3}$

# Perspectives possibles

- Physique Nucléaire
  - Calcul des énergies de liaison et f.f.
  - Tester les approximations des calculs “ab initio”
  - Faire P.N. avec des  $\pi$  seulement
- Laboratoire et atelier pour les calculs sur réseau
  - Etats de diffusion
  - Résonances
  - ...
- Étudier autres modèles effectifs
  - Modèles chiraux (Weinberg...)
  - Higgs, SUSY, etc.
- A comparer avec calculs Full-QCD sur réseau
  - Domain de validité des modèles OBE