

# Recherche d'une interaction microscopique pour les noyaux moyens et lourds

V. Rotival   J.-F. Berger   T. Duguet

Commissariat à l'Énergie Atomique - Direction des Applications Militaires

National Superconducting Cyclotron Laboratory - Michigan State University

Espace de Structure Nucléaire Théorique - CEA Saclay

JRJC 2007, 12/14/2007



# Structure nucléaire à basse énergie

- Description des propriétés statiques et dynamiques des noyaux

## Ground state

Mass, deformation



## Heavy elements

Fission, superheavy



## Spectroscopy

Excited states



## Symmetry restoration

$J$  Projection, PNP



## Collective modes

RPA, QRPA, GCM



## Exoticity

Drip-lines, halos



## Astrophysics

r-process, SN



# Structure nucléaire à basse énergie

- Description des propriétés statiques et dynamiques des noyaux

Ground state

Mass, deformation



Heavy elements

Fission, superheavy



Spectroscopy



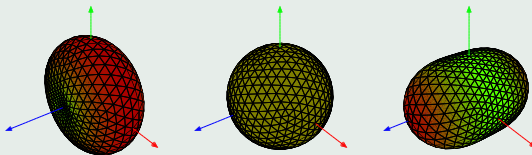
Excited states

Symmetry restoration



/ Projection, PNP

## Déformation de l'état fondamental



# Structure nucléaire à basse énergie

- Description des propriétés statiques et dynamiques des noyaux

Ground state

Mass, deformation



Heavy elements

Fission, superheavy



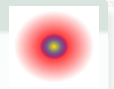
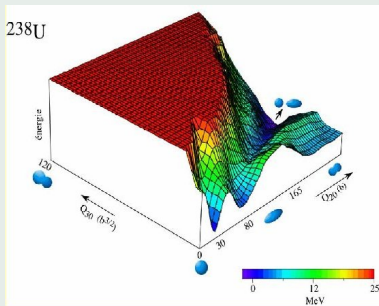
Spectroscopy

Excited states

Collective modes

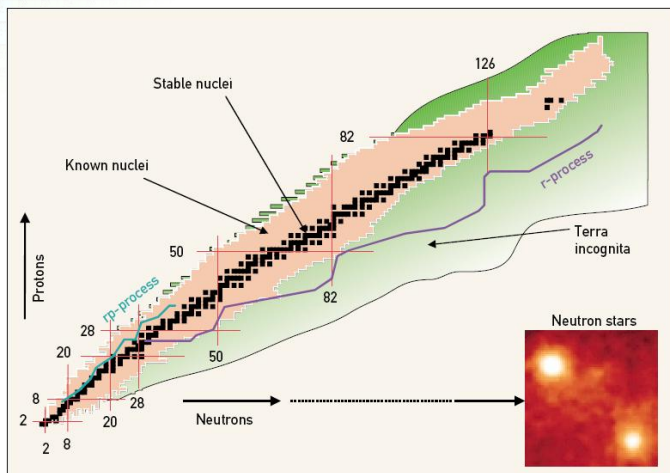
RPA, QRPA, GCM

## Barrières de fission



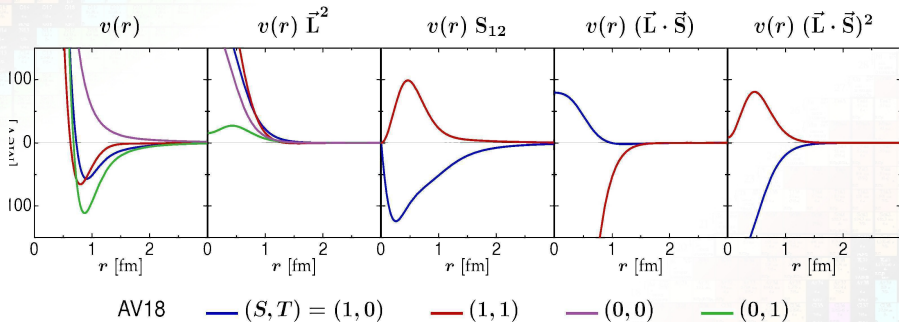
# Structure nucléaire à basse énergie

- Carte des noyaux



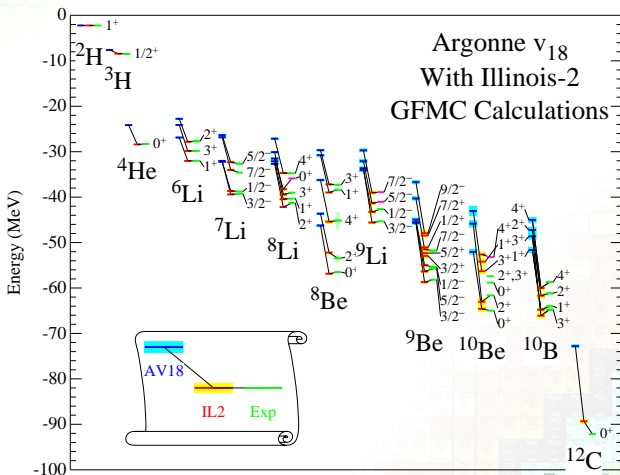
# Structure nucléaire à basse énergie : noyaux légers

- Potentiels de haute précision pour les forces NN (+NNN)
- $\chi^2/N_{datum} \approx 1$  pour 5000 données de diffusion NN expérimentales



# Structure nucléaire à basse énergie : noyaux légers

- Potentiels de haute précision pour les forces NN (+NNN)
- $\chi^2/N_{datum} \approx 1$  pour 5000 données de diffusion NN expérimentales
- Calculs possibles pour des systèmes  $A < 12$



# Structure nucléaire à basse énergie : noyaux moyens et lourds

- Calculs avec des potentiels réalistes pour  $A > 40$  : impossible

```
vrotival@vrotival-laptop: ~/Work/forces/fit_newint
File Edit View Terminal Tabs Help
> Computing theoretical uncertainties for phase shifts...
-> Importing 150 channel... Done
*** glibc detected *** ./fit_bdrs: free(): invalid next size (normal): 0x0b29b8d0 ***
===== Backtrace: =====
/lib/tls/i686/cmov/libc.so.6[0xb7660d65]
/lib/tls/i686/cmov/libc.so.6(cfree+0x90)[0xb7664800]
./fit_bdrs[0x810766c]
./fit_bdrs[0x806c5cd]
./fit_bdrs[0x804a96a]
./fit_bdrs[0x804a8e1]
/lib/tls/i686/cmov/libc.so.6(__libc_start_main+0xe0)[0xb760d050]
./fit_bdrs[0x804a841]
===== Memory map: =====
08048000-08194000 r-xp 00000000 08:03 2306235 /home/vrotival/Work/forces/fit_newint/fit_bdrs
08194000-081af000 rwxp 0014b000 08:03 2306235 /home/vrotival/Work/forces/fit_newint/fit_bdrs
081af000-0b2c6000 rwxp 081af000 08:00 0 [heap]
b7200000-b7221000 rwxp b7200000 08:00 0
b7221000-b7300000 ---p b7221000 08:00 0
b73dc000-b73dd000 ---p b73dc000 08:00 0
b73dd000-b75d5000 rwxp b73dd000 08:00 0
b75d5000-b75d6000 ---p b75d5000 08:00 0
b75d6000-b75e7000 rwxp b75d6000 08:00 0
b75e7000-b75e9000 r-xp 00000000 08:03 2452852 /lib/tls/i686/cmov/libdl-2.6.1.so
b75e9000-b75eb000 rwxp 00001000 08:03 2452852 /lib/tls/i686/cmov/libdl-2.6.1.so
b75eb000-b75ec000 rwxp b75eb000 08:00 0
b75ec000-b75f6000 r-xp 00000000 08:03 2452867 /lib/libgcc_s.so.1
b75f6000-b75f7000 rwxp 0000a000 08:03 2452867 /lib/libgcc_s.so.1
b75f7000-b773b000 r-xp 00000000 08:03 2452827 /lib/tls/i686/cmov/libc-2.6.1.so
b773b000-b773c000 r-xp 00143000 08:03 2452827 /lib/tls/i686/cmov/libc-2.6.1.so
b773c000-b773e000 rwxp 00144000 08:03 2452827 /lib/tls/i686/cmov/libc-2.6.1.so
b773e000-b7741000 rwxp b773e000 08:00 0
b7741000-b7742000 r-xp 00000000 08:03 2452827 /lib/tls/i686/cmov/libc-2.6.1.so
```



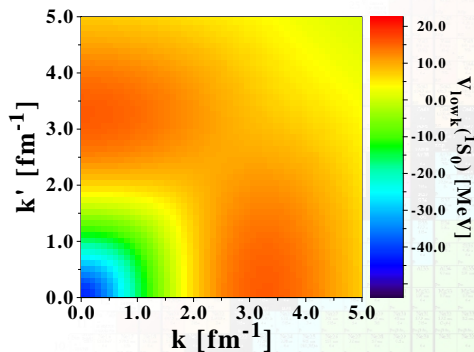
# Structure nucléaire à basse énergie : noyaux moyens et lourds

- Calculs avec des potentiels réalistes pour  $A > 40$  : impossible



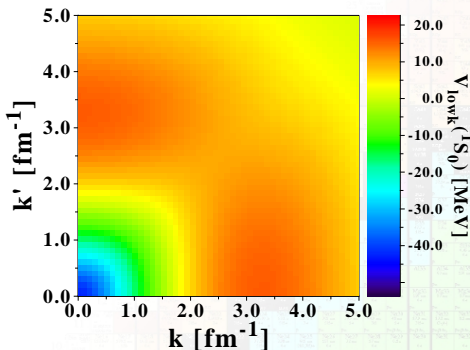
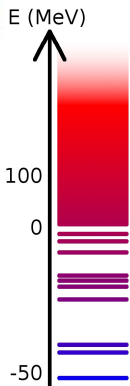
# Structure nucléaire à basse énergie : noyaux moyens et lourds

- Calculs avec des potentiels réalistes pour  $A > 40$  : impossible
- Système complexe à N corps : Schrödinger = no way
- Cœur dur de l'interaction :  
Contraintes pour le calculs d'éléments de matrice à 2 corps  $\langle ij|V|kl\rangle$



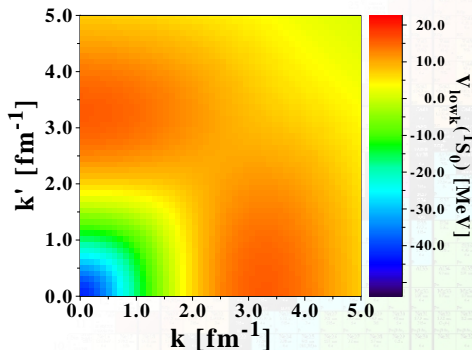
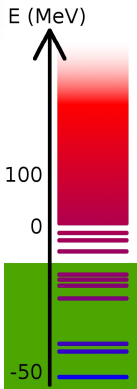
# Structure nucléaire à basse énergie : noyaux moyens et lourds

- Calculs avec des potentiels réalistes pour  $A > 40$  : impossible
- Système complexe à N corps : Schrödinger = no way
- Cœur dur de l'interaction :  
Contraintes pour le calculs d'éléments de matrice à 2 corps  $\langle ij|V|kl\rangle$



# Structure nucléaire à basse énergie : noyaux moyens et lourds

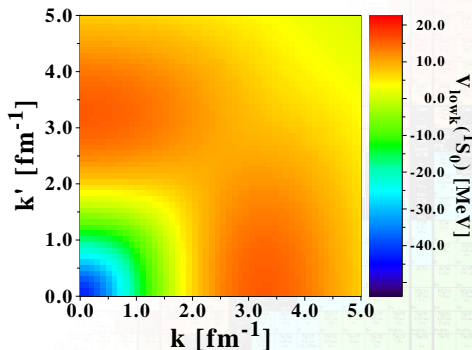
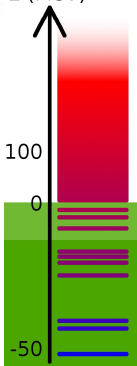
- Calculs avec des potentiels réalistes pour  $A > 40$  : impossible
- Système complexe à N corps : Schrödinger = no way
- Cœur dur de l'interaction :  
Contraintes pour le calculs d'éléments de matrice à 2 corps  $\langle ij|V|kl\rangle$



# Structure nucléaire à basse énergie : noyaux moyens et lourds

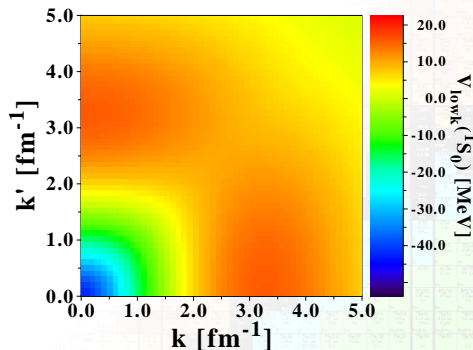
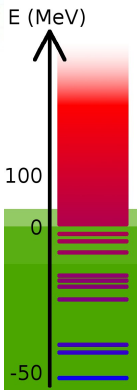
- Calculs avec des potentiels réalistes pour  $A > 40$  : impossible
- Système complexe à N corps : Schrödinger = no way
- Cœur dur de l'interaction :  
Contraintes pour le calculs d'éléments de matrice à 2 corps  $\langle ij|V|kl\rangle$

E (MeV)



# Structure nucléaire à basse énergie : noyaux moyens et lourds

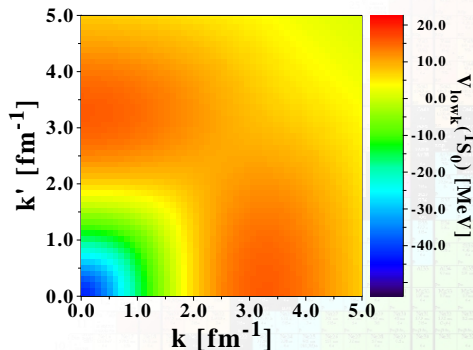
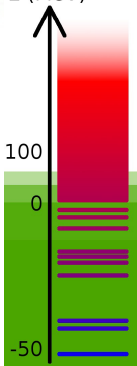
- Calculs avec des potentiels réalistes pour  $A > 40$  : impossible
- Système complexe à N corps : Schrödinger = no way
- Cœur dur de l'interaction :  
Contraintes pour le calculs d'éléments de matrice à 2 corps  $\langle ij|V|kl\rangle$



# Structure nucléaire à basse énergie : noyaux moyens et lourds

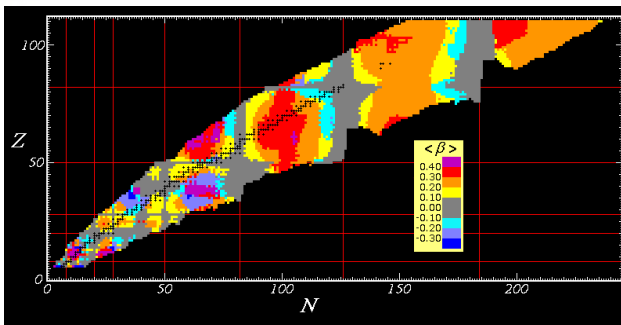
- Calculs avec des potentiels réalistes pour  $A > 40$  : impossible
- Système complexe à N corps : Schrödinger = no way
- Cœur dur de l'interaction :  
Contraintes pour le calculs d'éléments de matrice à 2 corps  $\langle ij|V|kl\rangle$

E (MeV)



# Calculs de fonctionnelle d'énergie (EDF)

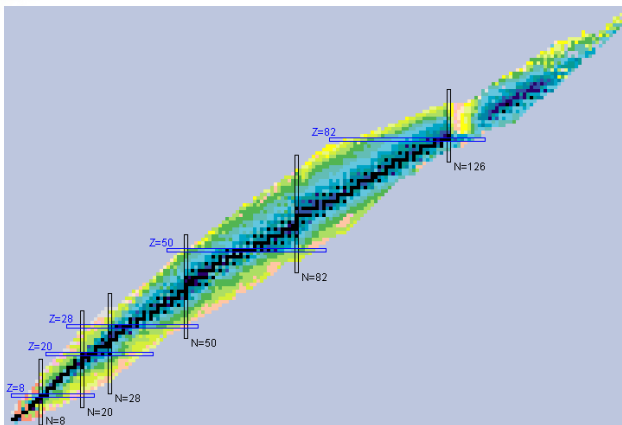
- Formalisme Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) : calcul possible pour tout  $A$
- Forme simples d'interactions "soft"
- Ajustement des paramètres sur des données expérimentales
- Problème d'extrapolation aux limites de stabilité





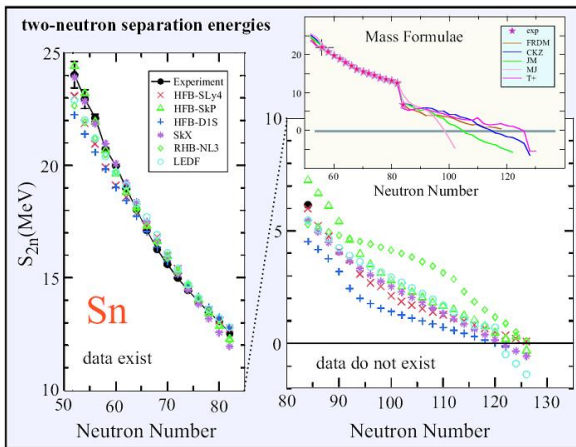
# Calculs de fonctionnelle d'énergie (EDF)

- Formalisme Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) : calcul possible pour tout  $A$
- Forme simples d'interactions "soft"
- Ajustement des paramètres sur des données expérimentales
- Problème d'extrapolation aux limites de stabilité



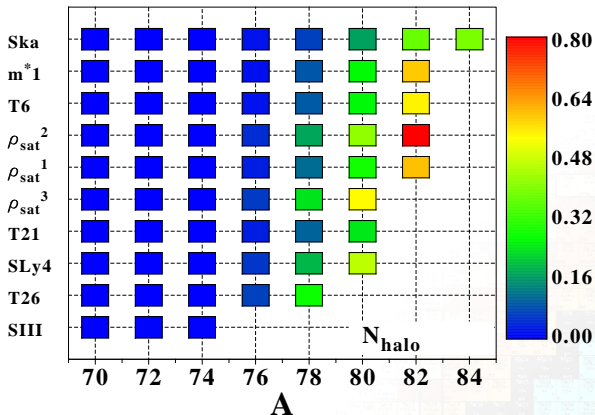
# Calculs de fonctionnelle d'énergie (EDF)

- Formalisme Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) : calcul possible pour tout  $A$
- Forme simples d'interactions "soft"
- Ajustement des paramètres sur des données expérimentales
- Problème d'extrapolation aux limites de stabilité



# Calculs de fonctionnelle d'énergie (EDF)

- Formalisme Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) : calcul possible pour tout  $A$
- Forme simples d'interactions "soft"
- Ajustement des paramètres sur des données expérimentales
- Problème d'extrapolation aux limites de stabilité



# Position du problème



## Ground state

Mass, deformation



## Heavy elements

Fission, superheavy



## Spectroscopy

Excited states



## Symmetry restoration

$J$  Projection, PNP



## Collective modes

RPA, QRPA, GCM



## Exoticity

Drip-lines, halos

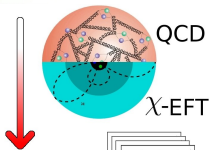


## Astrophysics

r-process, SN



# Position du problème



## Ground state

Mass, deformation



## Heavy elements

Fission, superheavy



## Spectroscopy

Excited states



## Symmetry restoration

$J$  Projection, PNP



## Collective modes

RPA, QRPA, GCM



## Exoticity

Drip-lines, halos



## Astrophysics

r-process, SN



# Vertex microscopique pour calculs EDF

## Objectifs

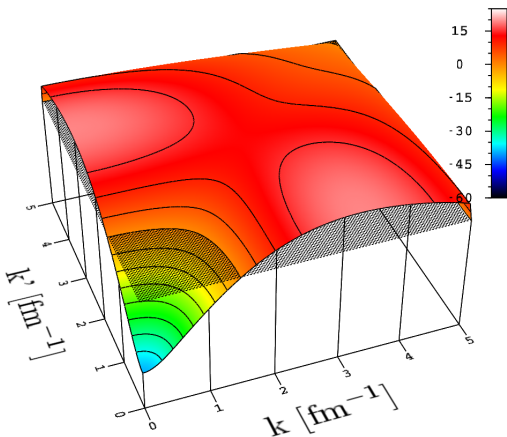
- Force effective SANS paramètres ajustés sur des données expérimentales
- Utilisation des potentiels nus NN(+NNN) high-precision : Quid du cœur dur ?

## Groupe de renormalisation pour les interactions nues “soft”

- Idée : la très haute énergie (QCD) n'intervient pas aux échelles d'énergie en jeu
- Possibilité de couper ces composantes avec des contre-termes de contact
- ... tout en préservant toutes les observables physiques
- Universalité du potentiel effectif à basse énergie

# Groupe de renormalisation pour les interactions nues "soft"

- Idée : la très haute énergie (QCD) n'intervient pas aux échelles d'énergie en jeu
- Possibilité de couper ces composantes avec des contre-termes de contact
- ... tout en préservant toutes les observables physiques
- Universalité du potentiel effectif à basse énergie



AV18 ( $\Lambda \approx 6.0 \text{ fm}^{-1}$ )



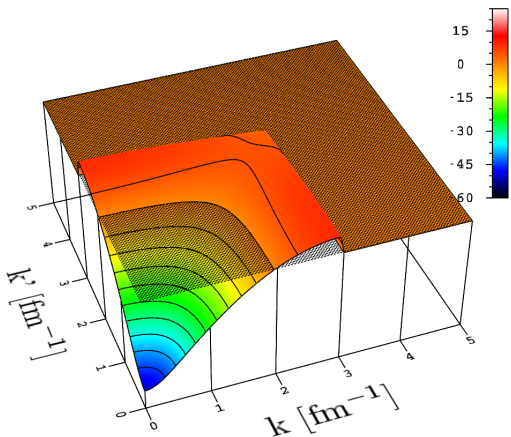
$V_{lowk}^{1S_0}(k, k', \Lambda)$

$\Lambda = 5.0 \text{ fm}^{-1}$



# Groupe de renormalisation pour les interactions nues "soft"

- Idée : la très haute énergie (QCD) n'intervient pas aux échelles d'énergie en jeu
- Possibilité de couper ces composantes avec des contre-termes de contact
- ... tout en préservant toutes les observables physiques
- Universalité du potentiel effectif à basse énergie



AV18 ( $\Lambda \approx 6.0 \text{ fm}^{-1}$ )

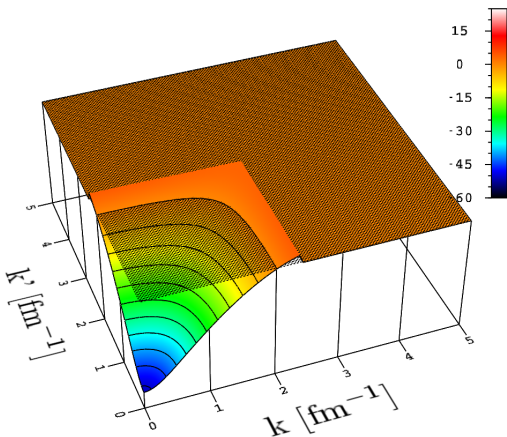


$V_{lowk}^{1S_0}(k, k', \Lambda)$

$\Lambda = 3.0 \text{ fm}^{-1}$

# Groupe de renormalisation pour les interactions nues "soft"

- Idée : la très haute énergie (QCD) n'intervient pas aux échelles d'énergie en jeu
- Possibilité de couper ces composantes avec des contre-termes de contact
- ... tout en préservant toutes les observables physiques
- Universalité du potentiel effectif à basse énergie



AV18 ( $\Lambda \approx 6.0 \text{ fm}^{-1}$ )

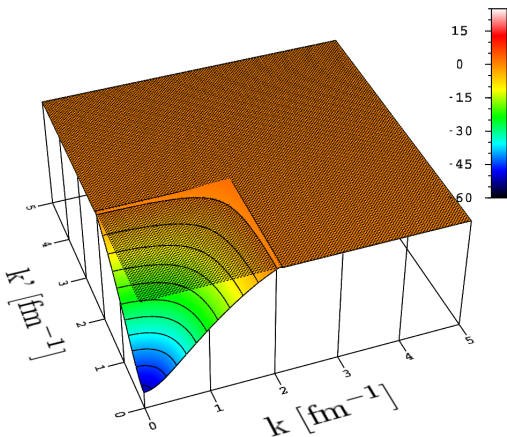


$V_{lowk}^{1S_0}(k, k', \Lambda)$

$\Lambda = 2.4 \text{ fm}^{-1}$

# Groupe de renormalisation pour les interactions nues "soft"

- Idée : la très haute énergie (QCD) n'intervient pas aux échelles d'énergie en jeu
- Possibilité de couper ces composantes avec des contre-termes de contact
- ... tout en préservant toutes les observables physiques
- Universalité du potentiel effectif à basse énergie



AV18 ( $\Lambda \approx 6.0 \text{ fm}^{-1}$ )

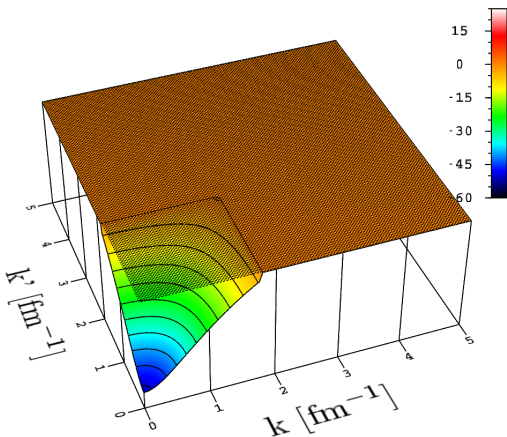


$V_{lowk}^{1S_0}(k, k', \Lambda)$

$\Lambda = 2.1 \text{ fm}^{-1}$

# Groupe de renormalisation pour les interactions nues "soft"

- Idée : la très haute énergie (QCD) n'intervient pas aux échelles d'énergie en jeu
- Possibilité de couper ces composantes avec des contre-termes de contact
- ... tout en préservant toutes les observables physiques
- Universalité du potentiel effectif à basse énergie



AV18 ( $\Lambda \approx 6.0 \text{ fm}^{-1}$ )

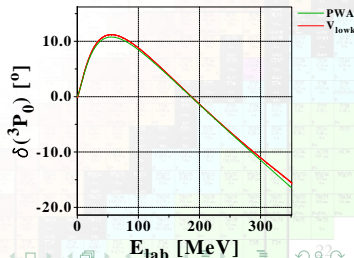
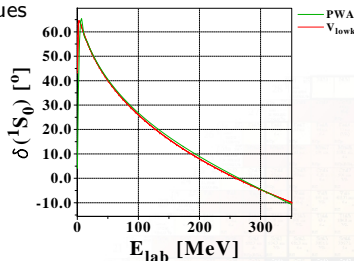
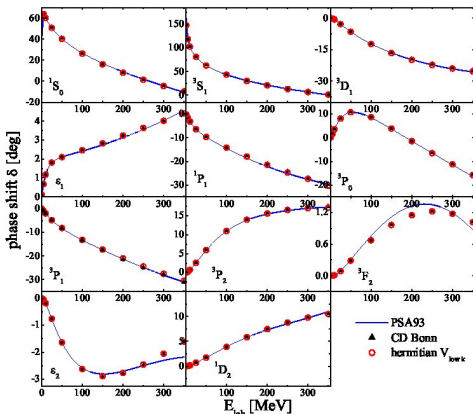


$V_{lowk}^{1S_0}(k, k', \Lambda)$

$\Lambda = 1.8 \text{ fm}^{-1}$

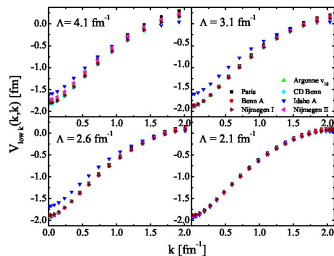
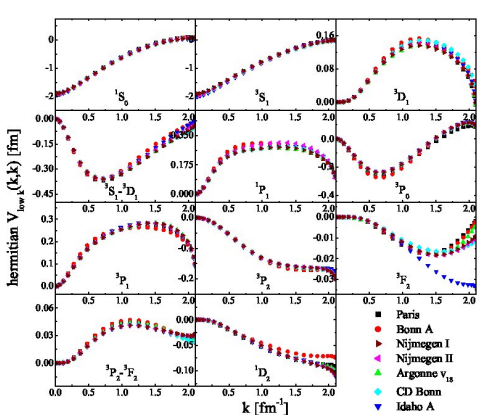
# Groupe de renormalisation pour les interactions nues "soft"

- Idée : la très haute énergie (QCD) n'intervient pas aux échelles d'énergie en jeu
- Possibilité de couper ces composantes avec des contre-termes de contact
- ... tout en préservant toutes les observables physiques
- Universalité du potentiel effectif à basse énergie



# Groupe de renormalisation pour les interactions nues "soft"

- Idée : la très haute énergie (QCD) n'intervient pas aux échelles d'énergie en jeu
- Possibilité de couper ces composantes avec des contre-termes de contact
- ... tout en préservant toutes les observables physiques
- Universalité du potentiel effectif à basse énergie



## Groupe de renormalisation pour les interactions nues “soft”

- Idée : la très haute énergie (QCD) n'intervient pas aux échelles d'énergie en jeu
- Possibilité de couper ces composantes avec des contre-termes de contact
- ... tout en préservant toutes les observables physiques
- Universalité du potentiel effectif à basse énergie

The image shows a terminal window with a menu bar (File, Edit, Options, Buffers, Tools, Help) and a toolbar. The main area is filled with a dense grid of text, which appears to be the output of a complex calculation or simulation. The text is organized into columns and rows, with some lines containing numbers and symbols. The terminal window is titled 'emacs@vintrial4topop' and the system tray at the bottom shows the date and time as 'Thu Dec 13, 5:08 PM'.

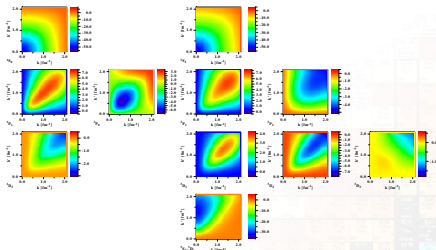
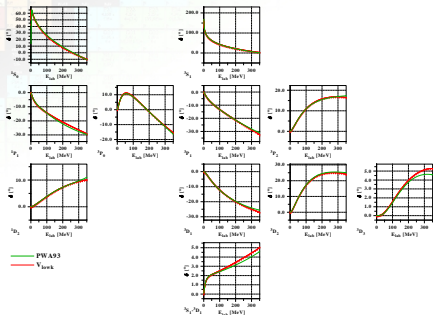
Problème

Non analytique !!!



# Un nouveau vertex microscopique

- Vertex effectif + termes spin-orbite et tenseur de portée finie
- Ajustement des paramètres : ondes partielles de  $V_{lowk}$  (EM, déphasages...)



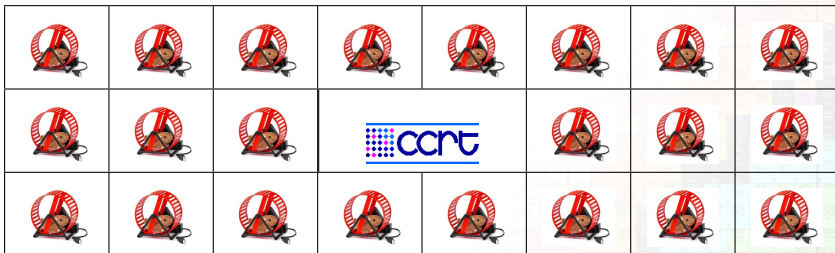


# Un nouveau vertex microscopique

- Vertex effectif + termes spin-orbite et tenseur de portée finie
- Ajustement des paramètres : ondes partielles de  $V_{lowk}$  (EM, déphasages...)

## Phase 1: Optimisation des paramètres (en cours)

- Optimisation à grand nombre de paramètres ( $D = 15 - 25$  typ.)
- Figure de mérite complexes (nombreux minima secondaires) + corrélée
- Code dédié basé sur des algorithmes génétiques
- Très couteux numériquement : parallélisation massive au CCRT (~ 500 CPUS)



# Un nouveau vertex microscopique

- Vertex effectif + termes spin-orbite et tenseur de portée finie
- Ajustement des paramètres : ondes partielles de  $V_{lowk}$  (EM, déphasages...)

## Phase 1: Optimisation des paramètres (en cours)

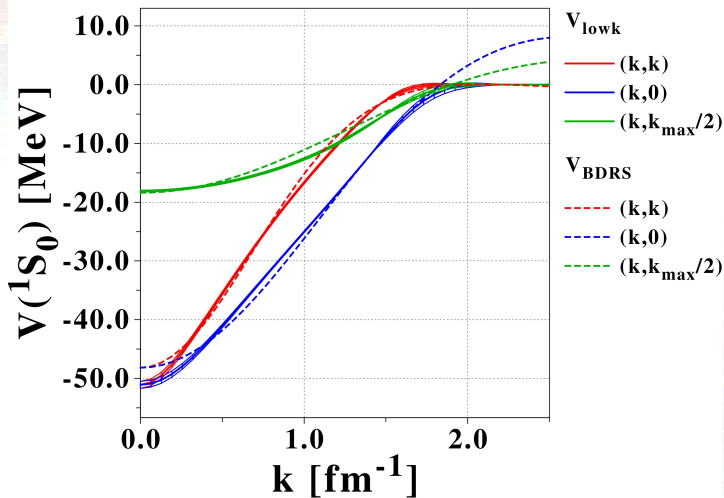
- Optimisation à grand nombre de paramètres
- Figure de mérite complexes (nombreux minima secondaires) + corrélée
- Code dédié basé sur des algorithmes génétiques
- Très couteux numériquement : parallélisation massive au CCRT (~ 500 CPUS)

## Phase 2: Applications

- Calculs de noyaux finis : nombreuses propriétés à comparer
- Inclusion des effets de milieu (NNN) + théorie des perturbations
- Forces issues de QCD/ $\chi$ -EFT
- Contraintes supplémentaires : matière infinie (stay tuned...)

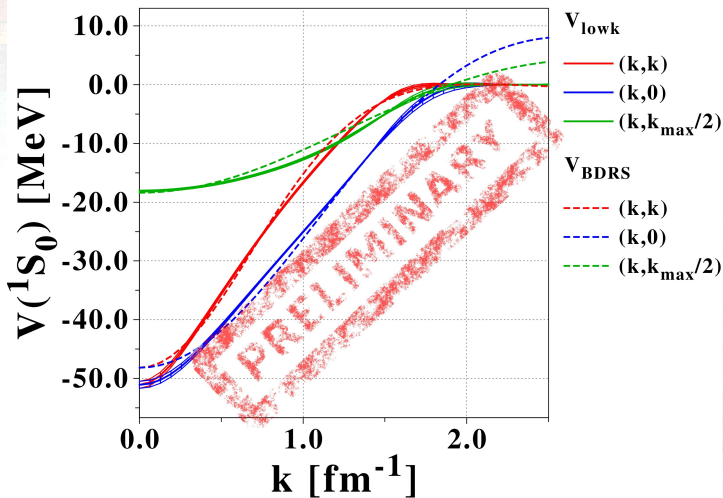
# Proof of principle

- Exemple d'ajustement dans le canal  $^1S_0$



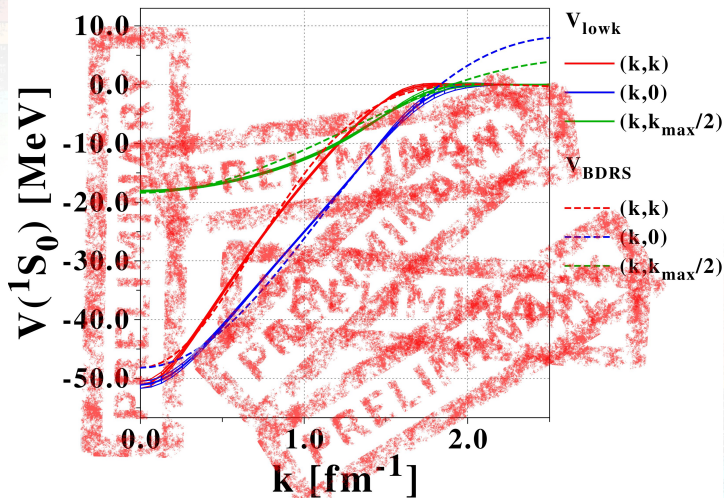
# Proof of principle

- Exemple d'ajustement dans le canal  $^1S_0$



# Proof of principle

- Exemple d'ajustement dans le canal  $^1S_0$



# Proof of principle

- Exemple d'ajustement dans le canal  $^1S_0$

