Petits noyaux, gros problèmes ...

Jaume Carbonell

Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie(*) de Grenoble

Université de Genève, le 7 mai 2003

(*) Institut des Sciences Nucléaires avant le 7-04-04

Introduction

Un des **"mythes fondateurs"** (Bethe,. . . , Pandharipande...) de la Physique Nucléaire – qui a donné élan à des générations de théoriciens – a été la description des noyaux en termes de nucléons individuels en interaction

Donnez-moi V_{ij} et je vous donnerai (E,Ψ)

$$\left(H_0 + \sum_{ij=1,A} V_{ij} \right) \mathbf{\Psi} = \mathbf{E}\ \mathbf{\Psi} \tag{1}$$

. . . à condition de savoir résoudre (2)

On a dû attendre:

1985 Résultats convergés A=3

1995 Résultats convergés A=4 (états liés)

2000 Résultats convergés (Montecarlo) A=8 (états liés)

car on sait **Peu** faire si l'on veut tout faire (**Few**-Body)

Grandeurs et les misères de cette démarche

– **Interactions NN**

– **Résultats pour les noyaux légers (A=3,4,. . .)**

– **Existe-t-il des clusters de neutrons (^{3}n, ^{4}n,. . .) ?**

Les potentiels NN

Différentes sagas de potentiels NN dits réalistes

- **Nijmegen** (versions x-p equivalentes)
  - 1978
  - 1993 Nijm-I et Nijm-93 (non-local) , Nijm-II et Reid93 (local)
- **Urbana/Argonne** (locaux, espace de configuration)
  - 1984 v14
  - 1995 v18
- **"Bonn"** (espace d'impulsions)
  - 1987 R. Machleidt, K. Holinde, Ch. Elster
  - 2001 R. Machleidt Phys. Rev. C63 (2001) 024001

Excellents fits $(\chi^2/\text{datum} \approx 1.00)$ des données NN jusqu'à 350 MeV

- 40-50 paramètres (Est-ce tautologique ?)
- Extrêmement compliqués (sans précédent dans la physique)
- Les dernières versions brisent l'invariance de charge (nn≠np)

$$a_{nn}^{1S0} = -18.59 \pm 0.40 \quad \neq \quad a_{np}^{1S0} = -23.748 \pm 0.001$$

Supposées égales jusquà ∼ 95[1]

Difficile de faire mieux. Et pourtant . . .

[1] Quand on croit fort à une hypothèse . . . il vaut mieux ne pas la vérifier!

De NN à NNN et NNNN

72 Première solution de 3N avec V réalistes (Grenoble-Leningrad)
... et premier fiasco $B_3 \approx 7$ MeV Calcul incomplet, V pas bon ...

85 Fully converged Faddeev calculations for 3N (Los Alamos)
"The best potential" (AV14) donne $B_3 = 7.67$ et $a_{nd}^{1/2} = 1.20$ fm

95 Résultats convergés pour état lié A=4 (Bochum, Pisa, GFMC, ...)

Potentiel	^{3}He	^{4}He
AV14	7.67	23.93
AV18	7.58	24.28
Nijm II	7.71	24.56
Reid 93	7.65	24.53
Bonn CD	7.95	26.26
Exp	8.48	28.29

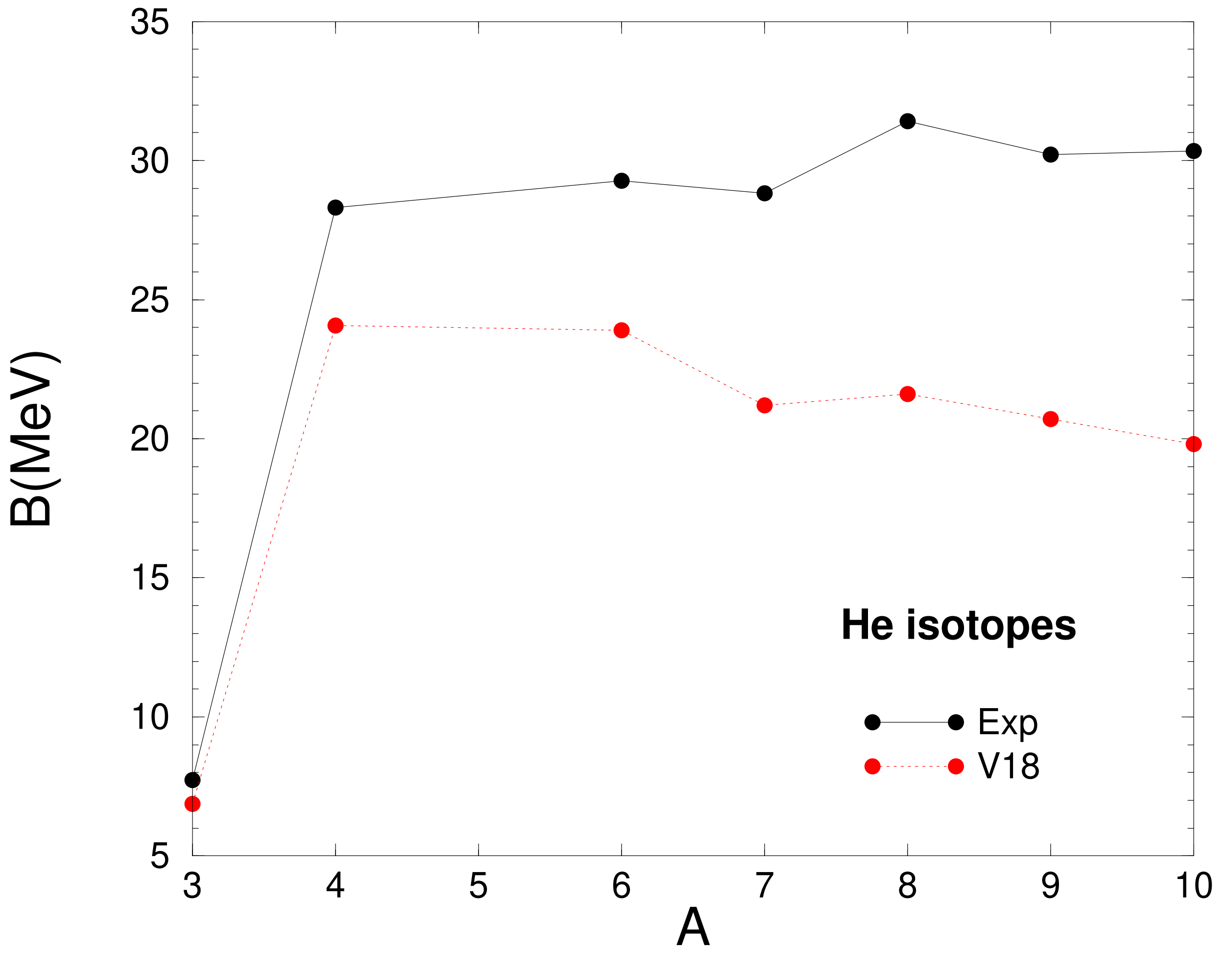
Il devint clair que quoique l'on fasse il manquerait $\sim$ 1 MeV pour A=3 et $\sim$ 4 MeV pour A=4

00 Calculs GFMC jusqu'à A=8 et c'est de pire en pire (Figure)

1. **Les forces à trois corps (TNI) sont incontournables**

2. **Le nouveau "mythe" s'écrit**

$$\left(H_0 + \sum_{i,j} V_{ij} + \sum_{i,j,k} V_{ijk} \right) \mathbf{\Psi} = \mathbf{E}\ \mathbf{\Psi} \tag{2}$$



Binding energy of He isotopes with NN interactions alone

Les TNI

Son **origine** microscopique est **multiple** (Figure)

Sa vraie **raison d'être** est **l'échec** des forces NN pour décrire $A \geq 3$

Modèle Urbana IX[2]

- Obtenu par des échanges à 2π
- Officielement il a deux paramètres $A^{2\pi,P}$ et A^R MAIS ...
- En les ajustant on obtient une description satisfaisante de
  - toutes les observables à 3N (sauf A_y)
  - la bonne énergie de liaison de ^{4}He mais des problèmes dans n+t
- Ce fût le nec-plus-ultra jusqu'à ce que GFMC calcule $A \leq 8$ (Fig)

  Mauvaise prise en compte de V_{nn}

Modèle Illinois (2001)

- Forte dépendence en T par des échanges à 3π
- 5 paramètres avec les remarques du MAIS
- Ce fût le nec-plus-ultra jusqu'à ce que GFMC calcule A=9,10 (Fig)

Mythe de Sisyphe malgré/grâce des progrès remarquables

La matiere à neutrons: c'est la que le bât blesse!

[2] De la saga Urbana IV-V-VI-...-IX initiée en 83

Urbana IV-V-VI[3]

Terme attractif

$$\begin{aligned}
V_{2\pi} &= \sum_{ij} A_{2\pi} \; [\tau_1 \cdot \tau_2, \tau_1 \cdot \tau_3]_+ \\
& \quad [S_{12}T(r_{12}) + \sigma_1 \cdot \sigma_2 Y(r_{12}), S_{13}T(r_{13}) + \sigma_1 \cdot \sigma_3 Y(r_{13})]_+ \\
&+ C_{2\pi} \; [\tau_1 \cdot \tau_2, \tau_1 \cdot \tau_3]_- \\
& \quad [S_{12}T(r_{12}) + \sigma_1 \cdot \sigma_2 Y(r_{12}), S_{13}T(r_{13}) + \sigma_1 \cdot \sigma_3 Y(r_{13})]_- \\
&+ B(r_{12}, r_{13}) \; [\tau_1 \cdot \tau_2, \tau_1 \cdot \tau_3]_+ \; [S_{12} + \sigma_1 \cdot \sigma_2, S_{13} + \sigma_1 \cdot \sigma_3]_+
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T(r) &= \left(1 + \frac{3}{\mu r} + \frac{3}{(\mu r)^2}\right) \frac{e^{-\mu r}}{\mu r} T_c(r) \\
T_c(r) &= \left(1 - e^{-br^2}\right)^2 \\
Y(r) &= \frac{e^{-\mu r}}{\mu r} Y_c(r) \\
Y_c(r) &= 1 - e^{-br^2}
\end{aligned}$$

Terme répulsif

$$V_R = U_C \; W(r_{12}) \; W(r_{13}) \; W(r_{23})$$

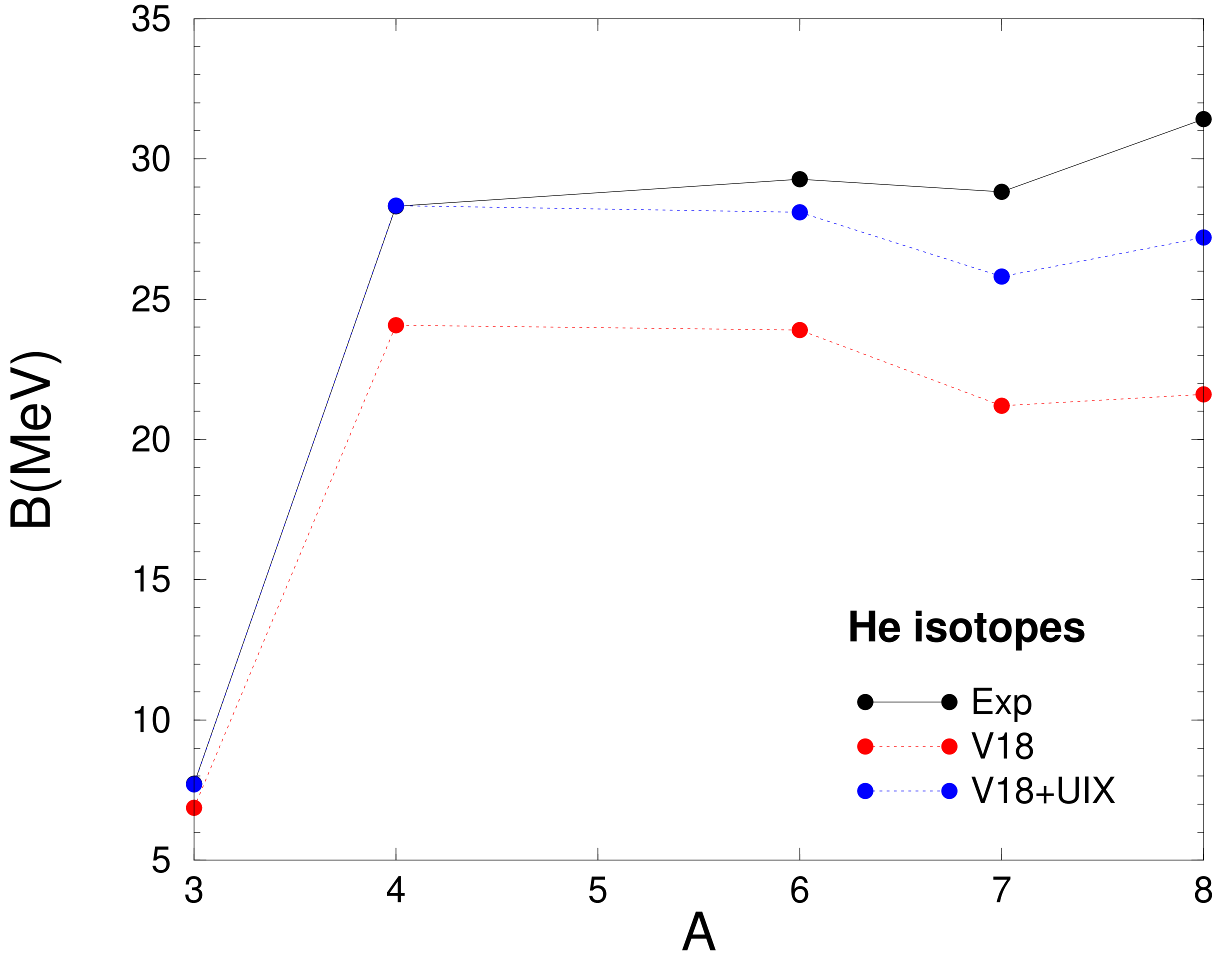
$$W(r) = \frac{1}{e^{\frac{r-R}{a}}}$$

$A_{2\pi}$ et U_c sont les paramètres du modèle

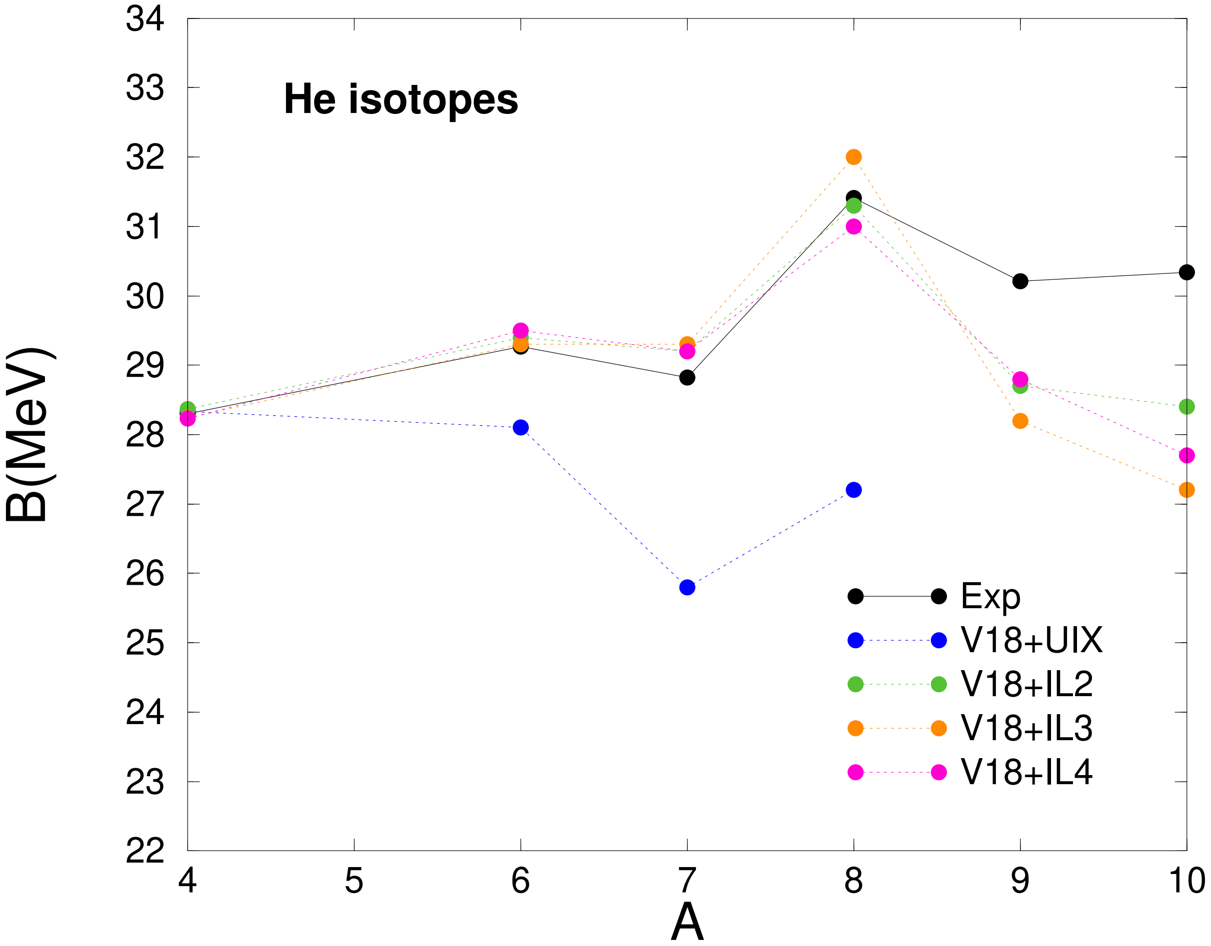
MAIS

$$4C_{2\pi} = A_{2\pi} \quad B = 0 \quad b = 2.0 \; fm^{-2} \quad R = 0.5 \quad a = 0.2 \; fm$$

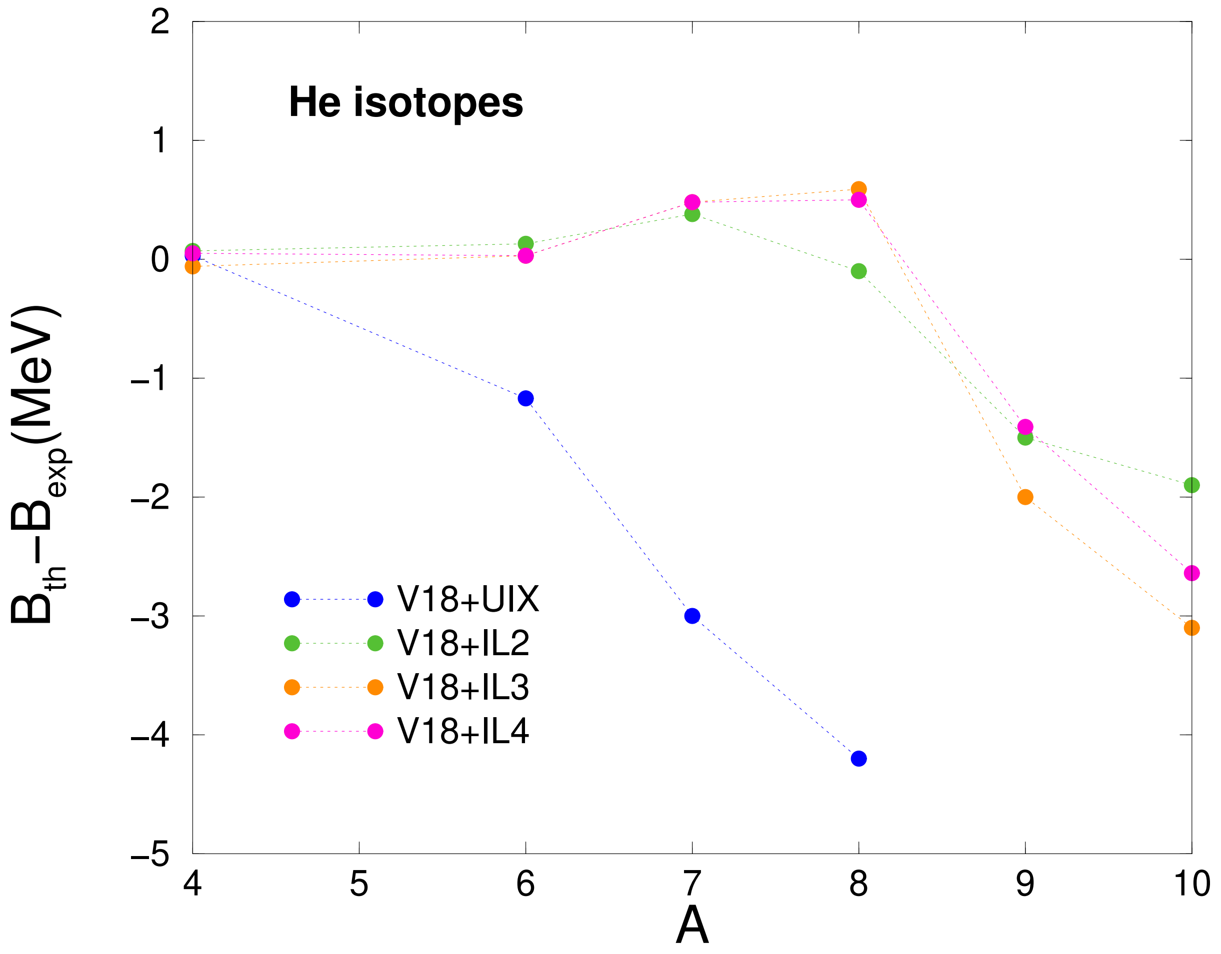
[3] J. Carlson, V. R. Pandharipande and R. B. Wiringa, Nucl. Phys. A401, (1983) 59

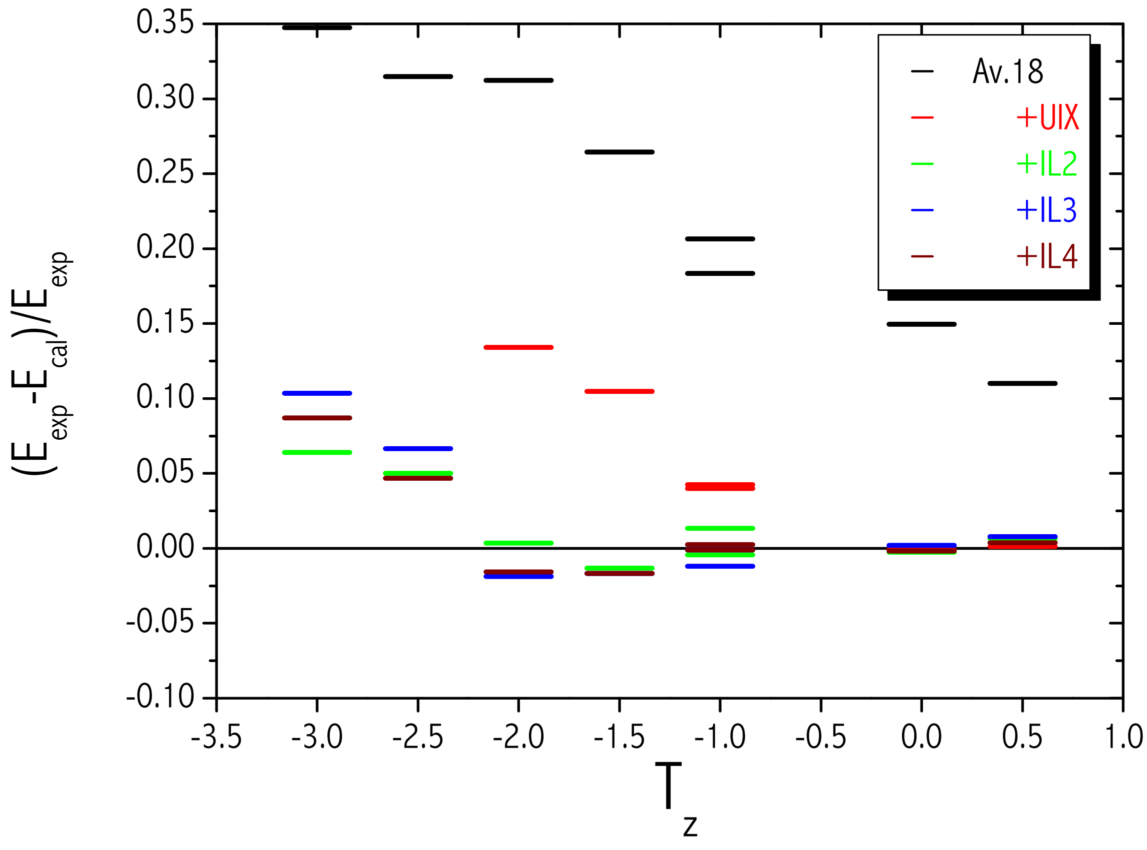


35
30
25
20
15
10
5
3
4
5
6
7
8
A
B(MeV)
He isotopes
Exp
V18
V18+UIX



He isotopes
B(MeV)
A
Exp
V18+UIX
V18+IL2
V18+IL3
V18+IL4
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
4
5
6
7
8
9
10


He isotopes
V18+UIX
V18+IL2
V18+IL3
V18+IL4
$B_{th}-B_{exp}$(MeV)
A
2
1
0
−1
−2
−3
−4
−5
4
5
6
7
8
9
10



Av.18
+UIX
+IL2
+IL3
+IL4
$(E_{exp}-E_{cal})/E_{exp}$
T_z
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
-0.05
-0.10
-3.5
-3.0
-2.5
-2.0
-1.5
-1.0
-0.5
0.0
0.5
1.0

Les clusters de neutrons

Un résultat récent obtenu au **GANIL** suggère la **possible mise en évidence de clusters liés à 3,4,... neutrons**[4]

Objet récurrent, aussi bien du point de vue théorique qu'expérimental

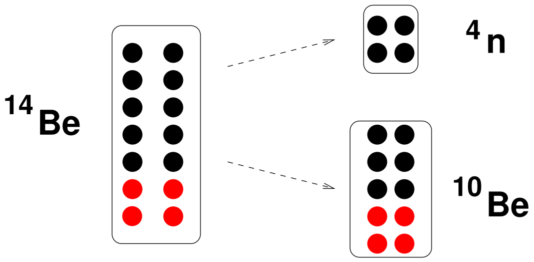
Son existence ouvrirait la porte à une série de noyaux "purs", sans possibilité de former des atomes – ou alors des atomes pas comme les autres. Si 4n, pourquoi pas 3n, 6n, 8n ...?

La méthode utilisée au GANIL – du fait de son faisceau de noyaux riches en neutrons – est **différente de celles utilisées auparavant**

Il ne s'agit plus de créer un 4n, e.g. par double échange de charge

$$\pi^- + {}^4He \rightarrow \pi^+ + {}^4n$$

mais plutôt de lui plumer les quelques parasites qui l'empèchent de vivre lui qui pré-existe déjà dans des noyaux exotiques comme le ^{14}Be



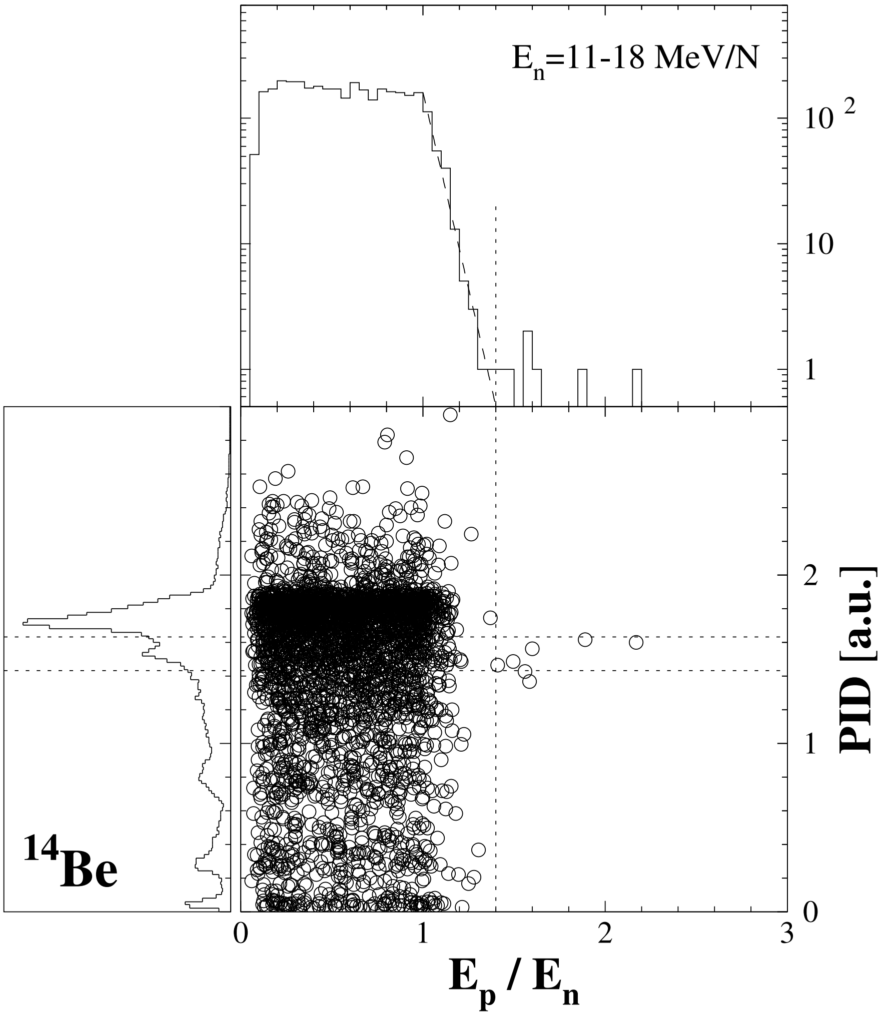
Le signal est faible mais clair Figure

Affaire à suivre[5]

Est-ce compatible avec les forces nucléaires ?

---

[4]F.M. Marqués et al., nucl-ex/0111001, Phys Rev C46 (2002) 044006
[5]Ganil II, d(^{8}He,^{6}Li)4n à Spiral, en automne 2002



Multineutron clusters in

$$^{14}Be \quad (35\ \mathrm{MeV/N}) + {}^{12}C \to {}^{10}Be + {}^{4}n + X$$

From F.M. Marqués et al., Phys Rev C46 (2002) 044006

I. Le dineutron

Le signe $a_{nn}(^1S_0) < 0$ **nous dit que** $\mathbf{n_2}$ **n'existe pas** ... de peu!

1. Pôle de $f_{nn}(k)$ en $k_{nn} \approx -\frac{i}{a_{nn}}$ $\rightarrow$ $\mathbf{E}_{nn} = \frac{\hbar^2}{m_n} k_{nn}^2 = 0.12$ MeV (Fig)
2. Modèle V_{nn} simple

$$V_{nn}(r) = V_r \frac{\exp(-\mu_r r)}{r} - V_a \frac{\exp(-\mu_a r)}{r}$$

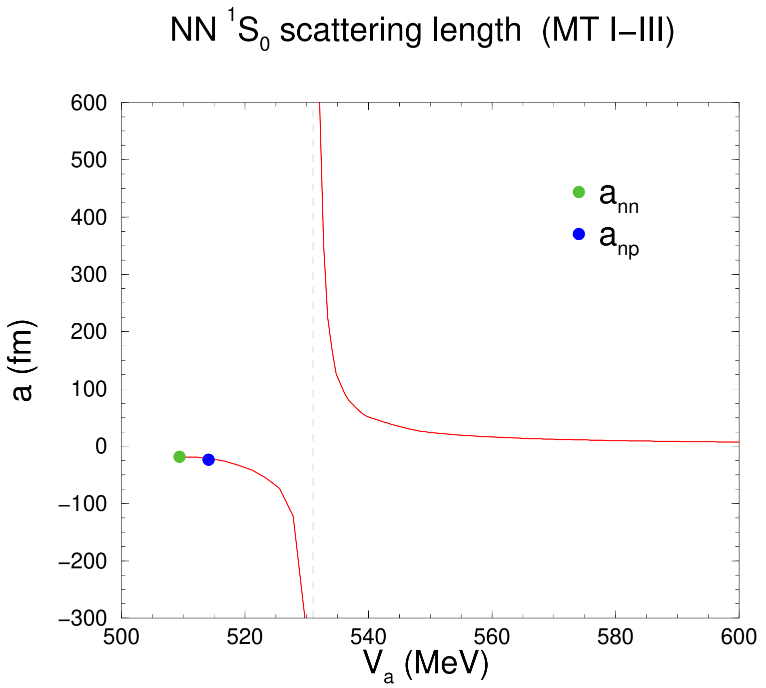
   Il faut augmenter V_a de 4% pour lier n_2

3. Ajouter de l'attraction à V_{nn} (d'un autre n-n, des TNI, ...)
   Si $V'_{nn} = V_{nn} - V_0 e^{-\mu_\pi r}$, alors **$\mathbf{V_0}$=3 MeV suffisent**

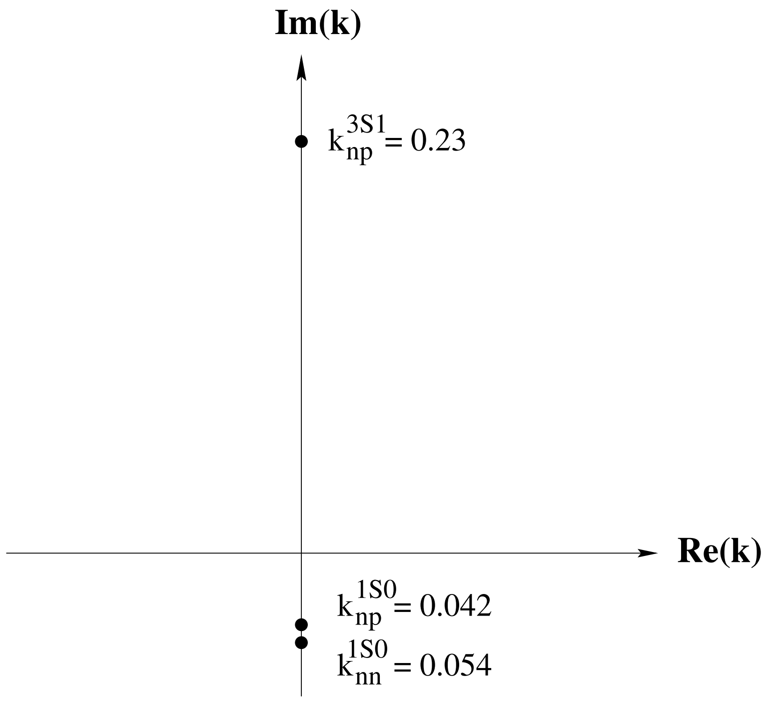
Mais on n'a pas trop le droit d'y toucher

Dans $\mathbf{n_3}$ ou $\mathbf{n_4}$ la liaison manquante ne peut venir que des

- **Forces à trois corps**
  Un certaine liberté dans la matière à neutrons
- **Ondes P dans V_{nn}**
  Ne touchent pas $\mathbf{n_2}$ mais jouent un rôle dans un cluster



NN $^1S_0$ scattering length (MT I–III)
600
500
400
300
200
100
0
−100
−200
−300
500
520
540
560
580
600
a (fm)
V_a (MeV)
a_{nn}
a_{np}



Im(k)
Re(k)
$k_{np}^{3S1} = 0.23$
$k_{np}^{1S0} = 0.042$
$k_{nn}^{1S0} = 0.054$

II. Le trineutron

Avec des "neutrons bosoniques" $B_{3n'} \approx$ 1 MeV
Pas besoin de lier n_2 pour lier n_3 ("effet Borromée")
Attraction s'amplifie lorsque $n_2 \rightarrow n_3$!

Avec des "vrais" neutrons pas de liaison[6]

- **En modifiant V_{nn}**

  On arrive à lier n_3 mais après que n_2 est lié

  Il faut $V_a \approx 2V_{nn}$ pour $B_3 > B_2$ mais $B_2 \approx$150 MeV (Figure)

  Même ilegitimes, ces résultats ne laissent pas trop optimiste

- **Avec des TNI**

$$W_{ijk} = -W_a \frac{e^{-\mu_a \rho}}{\rho} \qquad \rho = \sqrt{x^2 + y^2}$$

  On lie n_3 avec $W_a \sim 400$ MeV fm mais alors B(^{4}He)$\approx$ 70 MeV

- **En modifiant les ondes P neutron-neutron**

$$V^P(x) = V^P(x) \; - \; V_0 \, e^{-\left(\frac{x}{xc}\right)^2}$$

  On lie n_3 mais elles deviennent résonantes!

Pauli est très repulsif!

Le système n_3 doit pouvoir se configurer pour minimiser la "répulsion"

Pour cela n_3 est un très mauvais système car il "manque de place"

[6] Car on ajoute attraction supplémentaire V_a et on voit que la liaison disparaît bien avant $V_a \rightarrow 0$

III. Le tétraneutron

Avec des "neutrons bosoniques" $B_{4n'} \approx$ **10 MeV**

Seul candidat crédible à la stabilité est $J^\pi = 0^+$

Nombres quantiques **T=2** $\mathbf{J}^\pi = 0^\pm, 1^\pm, 2^\pm \ldots$

Plus facile à lier que le trineutron

Si l'on force la liaison de n_4 avec $V_{nn} = \eta V_{nn}$ et $\eta = 5$ (!!!)

– B_{3n}=3 MeV sous le seuil n_2

– B_{4n}=5 MeV sous le seuil n_2-n_2

Mais l'effet sur W_a est faible et l'énergie manquante est du même ordre.

Ces résultas ne plaident pas pour un n_4 lié

- **Les TNI utilisées soit trop simplistes . . .**

  Problème pour décrire les noyaux riches en neutrons

  Avec UIX et la contribution des TNI au n_4 est ≈ 0

  Structure spin-isospin des TNI très différente dans n_4 et dans ^{4}He

- **Une certaine liberté sur $\mathbf{V}_{nn}^{(P)}$ . . .**

Tout cela a un sens quand il s'agit de quelques MeV

Mais il s'agit de quelques dizaines . . .

Conclusion

MERCI de cette invitation !

Un noyau, même simple, est un objet très compliqué

- **La demarche "fondamentale" a montré ses limites dès qu'elle a pu vraiment être testée (au delà de A=2)**

  Les forces à deux corps inspirées de QFT (Yukawa, OBEP) sont loin de représenter l'énergie nucléaire

  Les forces à trois corps, indispensables, sont mal connues

  – On reproduit le spectre (discret) à coup de paramètres

  ... mais il faut recommencer chaque fois (Sisyphe)

  – Parametrisation de la charte plutôt que théorie predictive

- **A-t-on la bonne philosophie?**

  Si r_N=0.9 fm et $r_{^4He}$=1.4 fm, un noyau est un ensemble de nucléons ou bien une soupe hadronique?

- **Des voies de recherche** (on ne peut pas se passer des Ψ_A)

  1. Potentiels à deux corps "pragmatiques". Cela existe![7]
     V_{NN} *ad hoc* qui donne la bonne B_3 sans TNI. Quid de B_4?
  2. Théorie effective de perturbation chirale χPT
  3. La dynamique relativiste (pas seulement cinématique!) nous a déjà réservé des surprises
     – F. Gross pour NNN
     – M. Mangin-Brinet sur la non limite non relativiste (Figure)

[7] P. Doleschall, Nucl. Phys. A602 (1996) 60; Few-Body Systems 23, (1998) 149

Le tétraneutron, fause piste mais un grand brain-storming

1. **Son existence n'est pas compatible avec les forces NN et NNN actuelles**

   – elles sousestiment l'interaction nn

2. **Les pistes envisagées – modifier TNI et V_{nn}^{P} – détruisent l'accord avec les noyaux A=3,4 connus**

   – n_4 serait un noyau $\sim$ 5 fois plus grand que l'^{4}He

3. **Chercher des clusters liés de neutrons n'est pas une idée farfelue!**

   On "sait" que l' $^3He_{35}$ atomique est lié !

   Il existe des analogies ...et des différences entre V_{nn} et V_{HeHe}:

   - Différentes masses, qui favorisent l'^{3}He
   - n-n est "plus proche de la liaison" que ^{3}He-^{3}He

   $$a_{nn} = -18 \text{ fm} \qquad a_{HeHe} = -7\ \mathring{A}$$

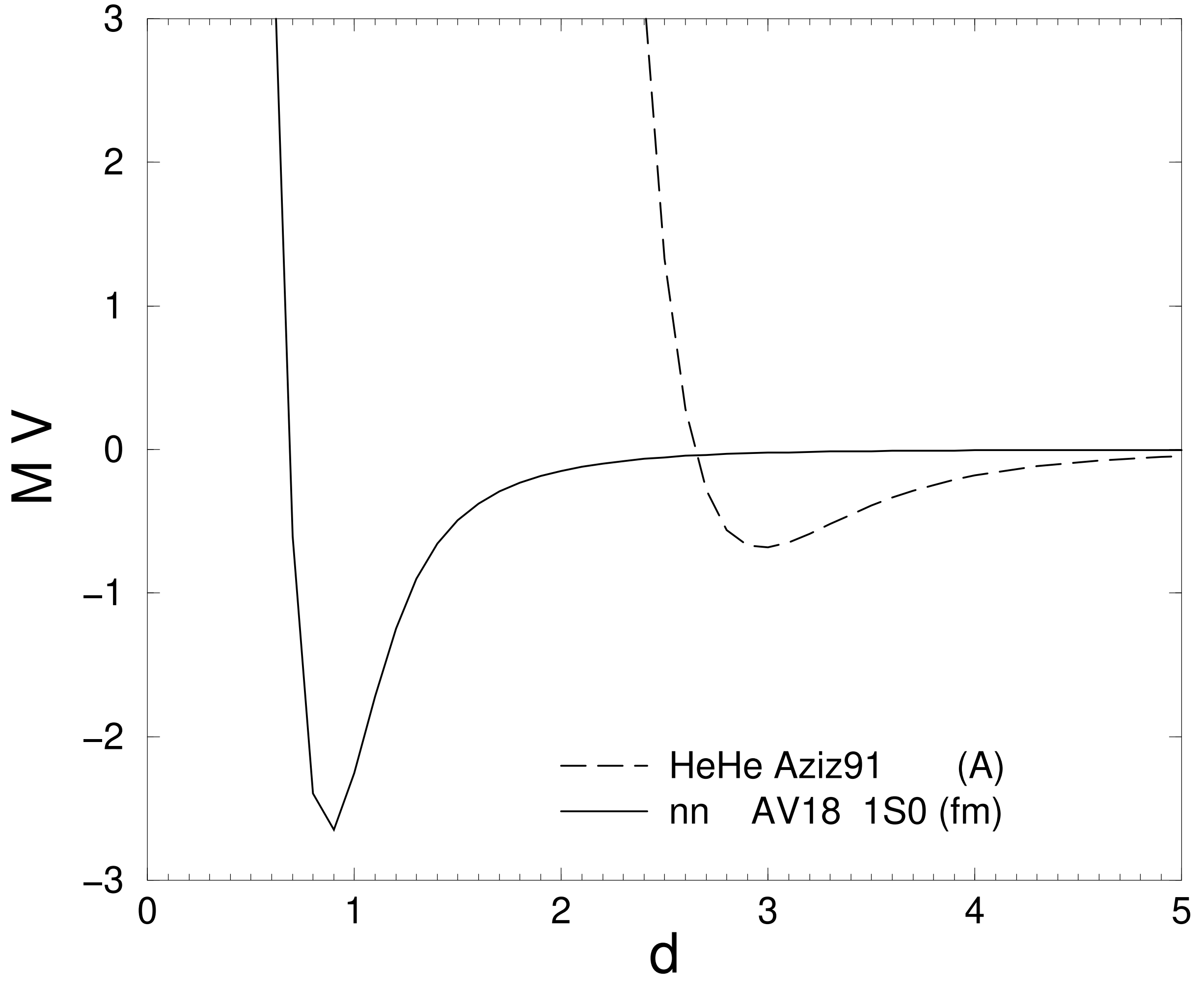
   - Potentiels similaires (Figure)
     - Décroissance plus lente pour He ($\sim \frac{1}{r^6}$) que pour n ($\sim \frac{e^{-\mu r}}{r}$)
     - Interaction en ondes P plus forte pour nn

   Leur existence pour $A \geq 4$ n'est pas exclue (aujourdhui)

4. **L'interaction n-n est mal connue**

   Le seul résultat ($^1S_0$) ne nous confirme guère dans nos *a priori*

   Son étude expérimental serait un challenge (n-TOF ?)



3
2
1
0
−1
−2
−3
M V
0
1
2
3
4
5
d
HeHe Aziz91 (A)
nn AV18 1S0 (fm)

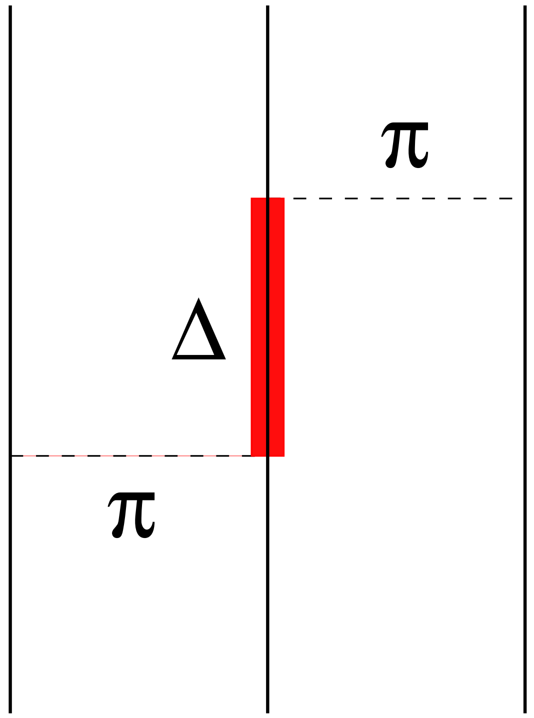


Figure 1: *Two-pion TNI in πN P-waves Δ*

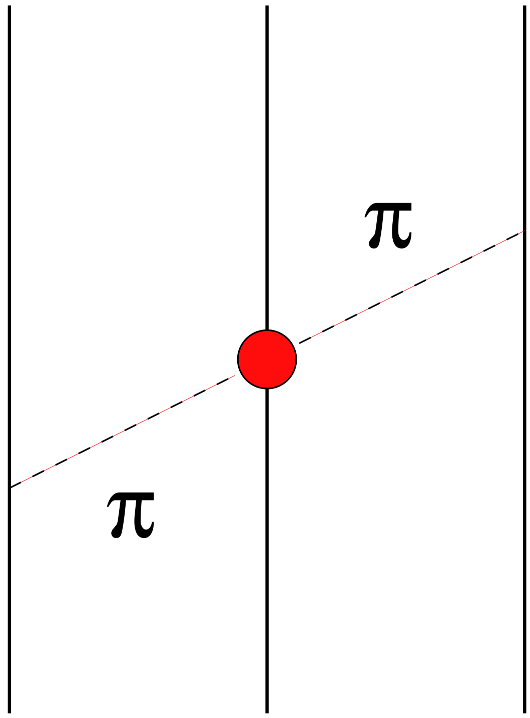


Figure 2: *Two-pion TNI in πN S-waves*

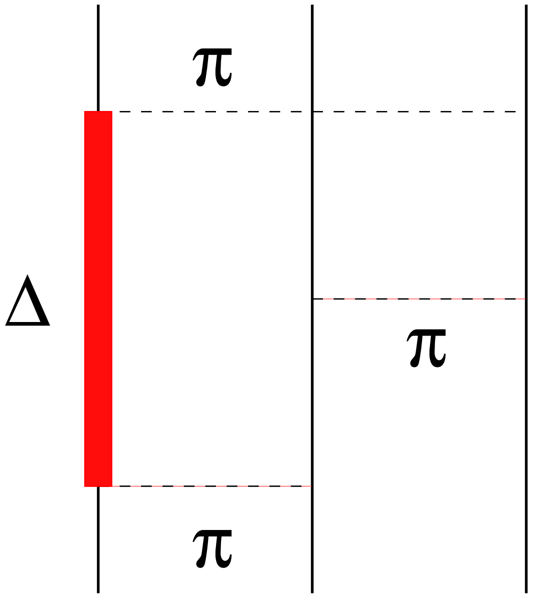


Figure 3: 3π *TNI in with one intemediate Δ*

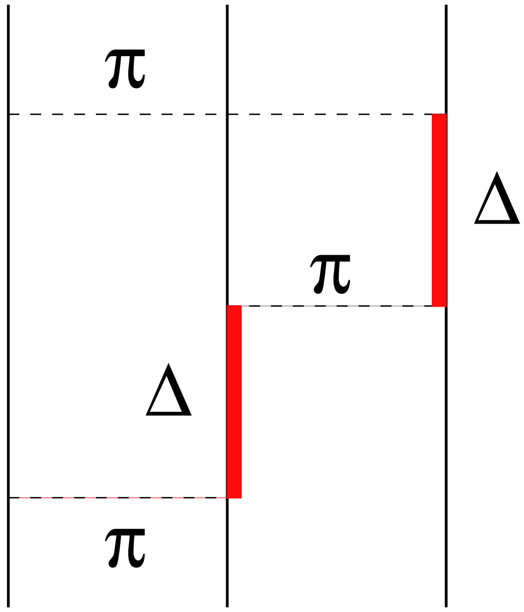


Figure 4: 3π *TNI with two intemediate Δ*