

π 中間子-核子結合 と平均場理論

— テンソル力と核構造 —

2002.4.4

理化学研究所 (RNP)
"中間エネルギー ビームによる
核物理" 研究報告

理化学研究所

池田 清美

0 はじめに - 話の背景

[i] π 中間子-核子結合

1949 Yukawa の中間子論 (1934-5) に対するノーベル賞

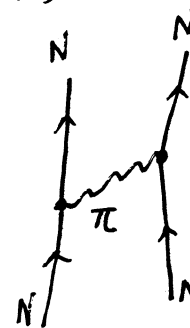
π 中間子の確認 $m_\pi \sim 140 \text{ MeV}$ $\frac{\hbar}{m_\pi c} \sim 1.4 \text{ fm}$

現実的核力の確立の出発点

中心力 $\pi + \sigma + \omega + \rho$

テンソル力 $\pi + \rho$

スピン軌道力 $\sigma + \omega + \rho$



[ii] 平均場模型

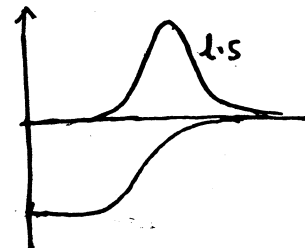
1949 Mayer & Jensen 殻模型

魔法数 $2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$
(6) (16) (40)

平均場: 中心力 + スピン軌道力
central ls

LS結合 $\leftrightarrow$ jj結合

微視的模型研究の出発点



[i] + [ii]

核力と核構造

[原子核物理の基礎課題①]

テンソル力と核構造(核物理)

今日の課題

1. 基本課題

2/28

“核力と核構造・核物理”

原子核物理の基本課題

50年余の研究の史
を通じて

H_{real}

$\Psi(1 \cdots A, t)$

$k = (r_k, \sigma_k, \bar{r}_k)$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(1 \cdots A, t) = H_{(real)} \Psi(1 \cdots A, t)$$

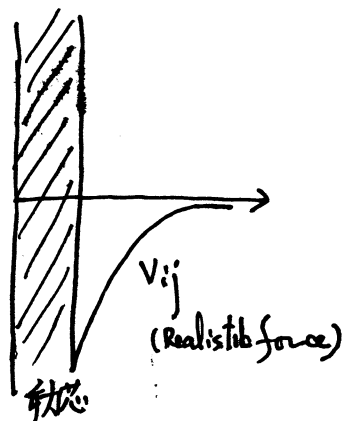
定常状態

[Real Space]

$$H\Psi = E\Psi$$

$$H = T + V \quad V = \sum_{ij} V_{ij}$$

(VS)

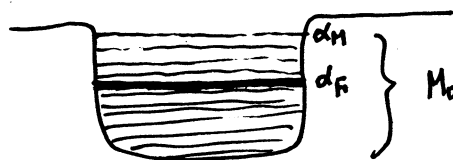
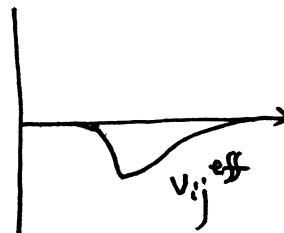


[Model Space]

$$H_M \Phi = E \Phi$$

$$P = \sum_{\alpha} |\alpha\rangle \langle \alpha|, \quad Q = 1 - P$$

$$H_M = P(T + V_M)P \quad V_M = \sum_{ij} V_{ij}^{eff}$$



Model Spaceの基底の設定
[但し設定に任意性]

Model Space
rの effective int.

$$V_{ij}^{eff} = g_{ij}$$

2体有効相互作用

$$V_{ijk}^{eff} = g_{ij} \frac{Q}{e} g_{jk}$$

3体 "

Reaction
Matrix.

$$g_{ij} = v_{ij} + v_{ij} \frac{Q}{e} g_{ij}$$

$$e = E_0 - Q T Q$$

2. テンソル力とは.

3/18

“テンソル力”

π中間子交換力から
主たる源

$$V^{(T)}(1,2) = f^2 \left(\frac{m_\pi}{\hbar c} \right)^2 \times (\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\nabla}_1)(\vec{\sigma}_2 \cdot \vec{\nabla}_2) \frac{\exp\left[-\frac{m_\pi}{\hbar} |\vec{r}_2 - \vec{r}_1|\right]}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|}$$

$$= \left(\frac{f^2}{\hbar c} \right) m_\pi^2 \frac{1}{3} (\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2) \times \left\{ (\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2) \frac{e^{-x}}{x} + S_{12} \left(1 + \frac{3}{x} + \frac{3}{x^2} \right) \frac{e^{-x}}{x} \right\}$$

(中心力) (テンソル力)

$$- 4\pi (\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2) \delta(\vec{r}) \}$$

中心力(5波)

$$\vec{x} = \frac{m_\pi}{\hbar} \vec{r}, \quad \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$$

$$V_T = \left(\frac{f^2}{\hbar c} \right) m_\pi^2 \frac{1}{3} \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2 \cdot S_{12} \left(1 + \frac{3}{x} + \frac{3}{x^2} \right) \frac{e^{-x}}{x}$$

$$S_{12} = 3 \frac{(\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{r})(\vec{\sigma}_2 \cdot \vec{r})}{r^2} - (\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2)$$

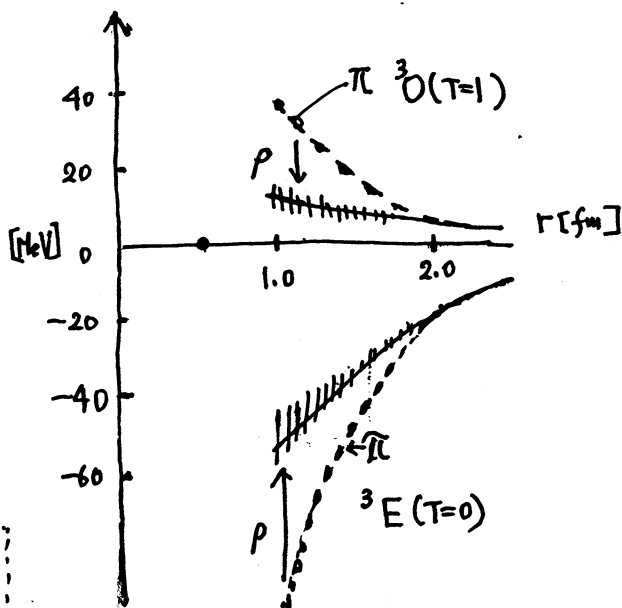
$$= \sqrt{\frac{24\pi}{5}} \sum_{\mu} (-1)^\mu \mathcal{S}_{2\mu} Y_{2-\mu}(\hat{r})$$

$$\mathcal{S}_{2\mu} = [\vec{\sigma}_1 \times \vec{\sigma}_2]_{2\mu}$$

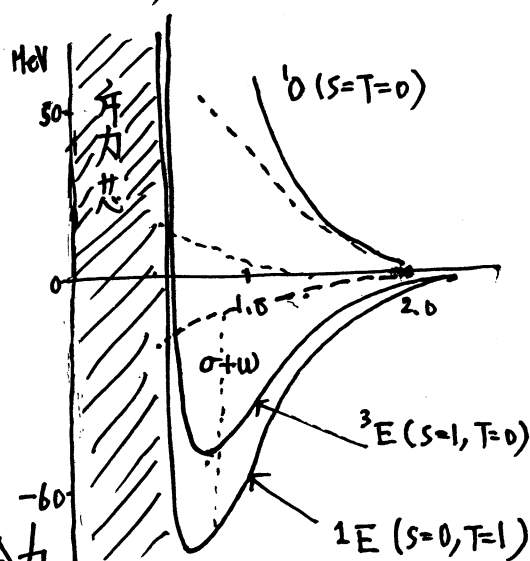
パイオン・スピン・軌道空間の結合

$$2^1P_1 \otimes 2^1S_0 = 2^3P_0, 2^3P_1, 2^3P_2$$

π + ρ
(pV結合) (Tensor結合)



法中心力



..... π中間子

テンソル力の"原子核"での役割

原子核: 少数多体系 + 有限核子系 + 無限系
(安定核・不安定核 ~ 核物質)

- ① 結合エネルギー, 飽和性
- ② 1体スピン軌道結合力の寄与, 魔法数
- ③ クラスタ化, 空間的局在性
- ④ Magnetic moment, Quadrupole moment, and EM Transitions.
- ⑤ アインスピン・スピン励起モード GTSの集中と分散
" " 2主極モード
アインベクターモードの Sum Rules
- ⑥ π 凝縮. 無限系での交代層状構造 (ALS構造)
[テンソル力が主役となっている π 凝縮構造]

[主役でなく裏方]

① 有効相互作用での

中心力
スピン軌道力 } への繰込み

例: 中心力 (無限系)

Ψ/Φ

$r > r_{\text{healing}}$

1E central

$$g_c^{L=0}(r) = v_c u_{00}^{00} / j_0(kr) \rightarrow v_c$$

3E central

$$g_c^{L=0}(r) = v_c u_{00}^{11} / j_0(kr) \rightarrow v_c$$

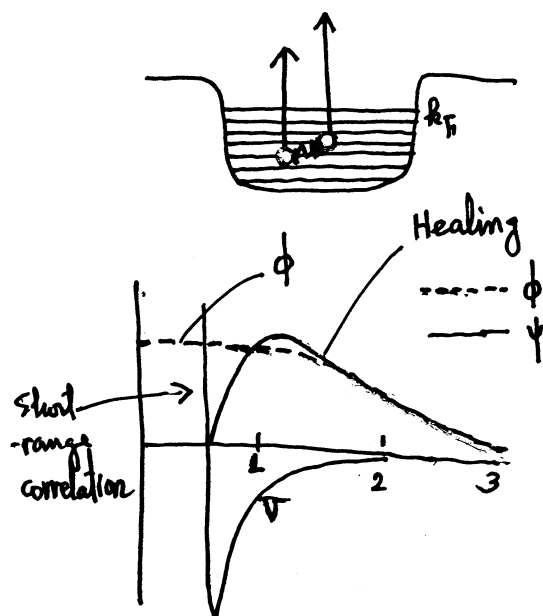
繰込み項

$$+ \sqrt{8} v_T u_{02}^{11} / j_0(kr)$$

$$v_T \frac{Q}{e} v_T$$

近距離相関を扱う
簡明な模型

Independent-pair scattering in nuclear matter



$$g|\phi\rangle = V|\psi\rangle$$

$$|\psi\rangle = |\phi\rangle + \frac{Q}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - t_1 - t_2} V|\psi\rangle$$

部分法展開

$$|\phi\rangle \propto j_0(kr)$$

$$|\psi\rangle \propto u_{LL'}^{JS}(r)$$

$$\text{例 } g_c^{L=0}(r) = v_c u_{00}^{II}(r) / j_0(kr) + \sqrt{8} V_T u_{02}^{II} / j_0(kr)$$

$$\parallel V_T \frac{Q}{\epsilon} V_T$$

(テンソル力の2次
が中心力にくり込まれる)

近距離相関を扱おうとすると

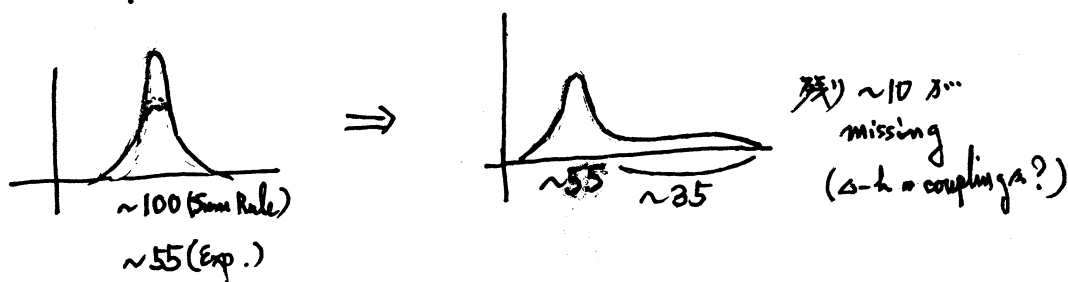
Healing するまでの領域のテンソル力の"くり込み"が必要になる。

問題は この中心力にくり込まれる テンソル力の 結合エネルギーの効果が非常に大きくなることである。

テンソル力のくり込み中心力が もとの中心力の有効中心力
と同じ程度であることである。

② GT strength の集束と分散

V_T を振動として分散させ得る。



"繰り込みか 振動" として取扱われる

≡ 裏方の役割

4. テンソル力が起す主要な相関

6/22

主役の資格の例示 (裏方で活躍)

(i) 核物質の飽和性

Nuclear Matter "Model space"

	(MeV)
E/A	-7.8
KE/A	23.9
PE/A	-31.7
1S	-15.9
3S	-15.8
1P	3.2
3P	0.3
1D	-2.2
3D	-1.3
P(D)	No D

Similar to "Volkov".

$V_T \frac{Q}{6} V_T$ is included.

	N.M.	⁴ He
3S/1S ratio	1.0	1.5

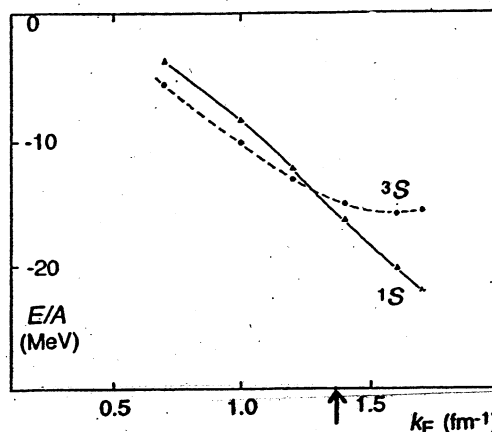
"Tensor enhancement"
Y. Akaishi & S. Nagata, P. T. P. 48 (1972) 133

Akaishi-Bando-Nagata, P. T. P. Suppl. 52 (1972) 339
Tensor effects on clusterization

Saturation of Nuclear Matter

H.A. Bethe, Ann. Rev. Nucl. Sci. 21 (1971) 93.

The (saturation) depends on three factors,
in decreasing order of importance:
(a) tensor force; (b) exchange force; (c) repulsive core.



(ii) 軽い核 (A ≤ 12)

(a) 重陽子の結合とテンソル力

理学的核力を用いた場合 (Quadrupole moment)

$$\psi = \frac{u(r)}{r} Y_{011}^M + \frac{w(r)}{r} Y_{211}^M$$

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{M} \frac{d^2}{dr^2} + V_C(r) \right\} u(r) + \sqrt{8} V_T(r) w(r) = E u(r)$$

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{M} \left(\frac{d^2}{dr^2} - \frac{6}{r^2} \right) + V_C(r) - 2V_T(r) - 3V_{LS}(r) + 7V_W(r) + 6V_{LL}(r) \right\} w(r) + \sqrt{8} V_T(r) u(r) = E w(r)$$

	RSC	SSC
Energy	-2.22	-2.23
Kin. E	22.16	18.06
Pot. E	-24.38	-20.29
³ S ₁	-0.47	-5.01
³ D ₁	4.55	-1.08
³ S ₁ - ³ D ₁	-28.46	-14.20

(MeV)

RSC: R.V. Reid Jr., Ann. Phys. 50 (1968) 411

SSC: R. de Tourreil et al., Nucl. Phys. A242 (1975) 445

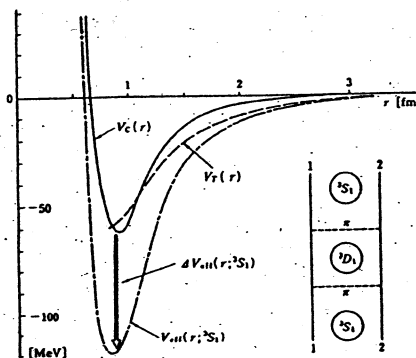
テンソル力に起因する³S₁状態の励起中心力

$$\Psi_d(r) = \frac{u(r)}{r} |^3S_1, m_J\rangle + \frac{w(r)}{r} |^3D_1, m_J\rangle$$

$$= \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \left(\frac{u(r)}{r} + \frac{w(r)}{r} \frac{S_{12}}{\sqrt{8}} \right) \chi_{1m_J}$$

$$V_{\text{eff}}(r; ^3S_1) = V_C(r; ^3E) + \Delta V_{\text{eff}}(r; ^3S_1)$$

$$\Delta V_{\text{eff}}(r; ^3S_1) = \sqrt{8} V_T(r) \frac{w(r)}{u(r)}$$



テンソル力による
S状態とD状態の結合により
大きな引力がもたらされる。

taken from "核力の多面性"
王耀良三
in 大学院原子核物理

T.P.: R. Tanguchi, Prog. Part. Nucl.
39, 91 (1998)
(訳: 谷本 幸夫)

5. 現実的核力を用いた計算

(i) Alpha Particle

$$\hbar\omega = 21.6 \text{ MeV}$$

$$KE = 3 \times \frac{3}{4} \hbar\omega = 48.6 \text{ MeV}$$

	(MeV)			Volk
Energy	H-J	RSC-v8		-29.0
Kin. E	131.1	103.6	are 2~2.5 times larger than Strong short-range correlation	48.6
Pot. E	-151.7	-125.4		-77.6
C	1E	-51.3	The largest contribution	-38.8
	3E	-26.2		-38.0
	10+30	-0.4		0.0
T	3E	-69.7		0
	30	-0.5		0
LS+QLS	-3.6	1.9		0
P(D) %	12.8	11.0	D-state correlation due to tensor force	0

H-J: T. Hamada & I.D. Johnston, Nucl. Phys. 34 (1962) 382

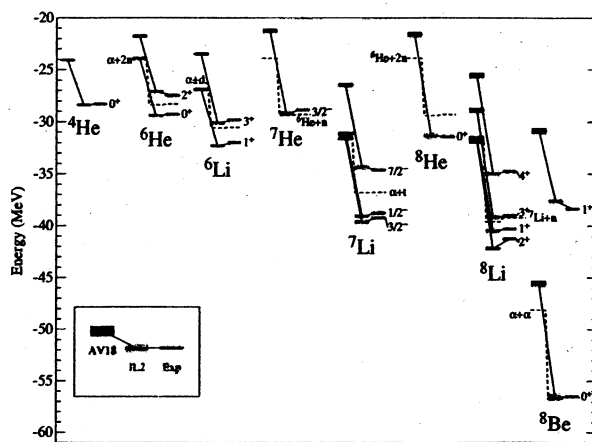
Volk: A.B. Volkov, Nucl. Phys. 74 (1965) 33

Y. Akaishi, *Few-Body System in Realistic Interaction* in Cluster Models and Other

Topics, Int. Review of Nuclear Physics, edited by T. T. S. Kuo and E. Osnes (World Scientific, 1986) Vol. 4, p. 259

(ii) 軽い核 ($A \leq 8$)

R.B. Wiringa, Steven C. Pieper, J. Carlson and V.R. Pandaripande
Phys. Rev. C62(2000)014001



AV18/IL2

- 強い斥力芯、状態依存性を持つ生の核力を直接用いる。
- 2, 3 核子間の相関を直接扱う
- 変分計算
- 実験データとのすばらしい一致
- One Pion Exchange の重要性
- $A = 12$ 系までが限界

taken from Pieper *et al.* nucl-th/0103005

	K	v_{ij}	v_{ij}^{π}	V_{ijk}	$V_{ijk}^{2\pi}$	$V_{ijl}^{3\pi}$	$-B$	$-B_{\text{exp}}$	v_{ij}^{π}/v_{ij}
^4He :	115.(1)	-136.(1)	-105.	-8.4(1)	-16.3(1)	0.63(1)	-28.37(3)	-28.30	0.77
^8Be :	256.(4)	-303.(3)	-234.(2)	-21.(1)	-38.5(9)	-0.9(9)	-56.6(4)	-56.50	0.77

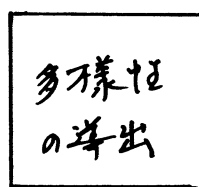
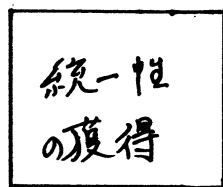
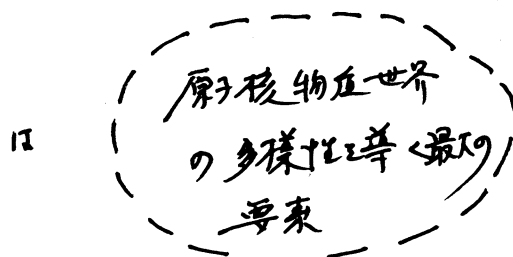
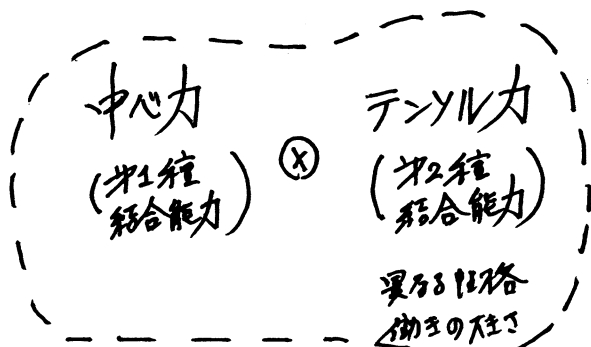
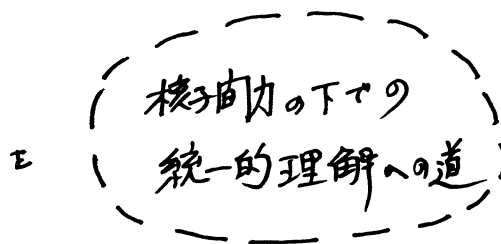
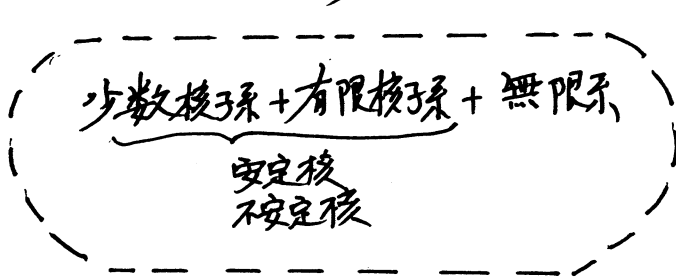
[単位: MeV]

$3 \leq A \leq 8$ の系で One Pion Exchange からの寄与が
2 体ポテンシャル・エネルギー全体の 70-80% を占める!!

6. テンソル力による相図がもたらすもの(その1)

8/22

主役の1人となつたら

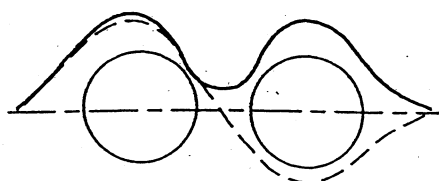


多様性の1例

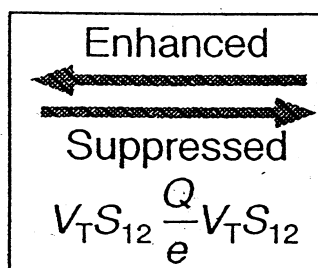
"-7の原子核の系に異なる性格の構造の出現"

クラスター構造 と 殻模型構造

クラスター化 と テンソル力

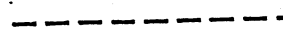
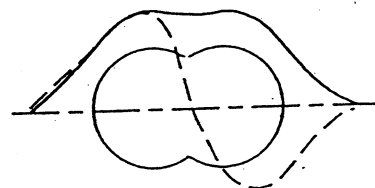


$$\omega = \epsilon_1 + \epsilon_2$$



$$\approx -8 \frac{V_T^2}{|A|} + 2 \frac{V_T^2}{|A|} S_{12}$$

Central Tensor $\Delta = (\epsilon_1 + \epsilon_2) - (t_1 + t_2)_{\text{avg}}$



構造によってテンソル力の効果は大きく変化する。

7 現実的核力を用いた厳密計算の示したこと (^8Be , 2α 構造の変形回転体)

9/22

そして、実現した構造は、彼等の言葉を借りれば、"These results obtained VMC (variational Monte Carlo calculations) wave functions, suggest that the 0^+ , 2^+ , and 4^+ wave functions for ^8Be have the structure of a deformed rotor consisting two α 's. The structure is not manifest in the shell model part of the VMC wave functions; it is induced by the correlations. The optimum spatial correlations between pairs of s-shell and p-shell nucleons are similar, but those between one s-shell and one p-shell nucleon are different. Calculations using GFMC (Green function Monte Carlo) configurations give very similar results expect that, especially for the $J=4^+$ state, the rms radius is still growing at the end of the GFMC propagation [Ref.2, page 21-22]."

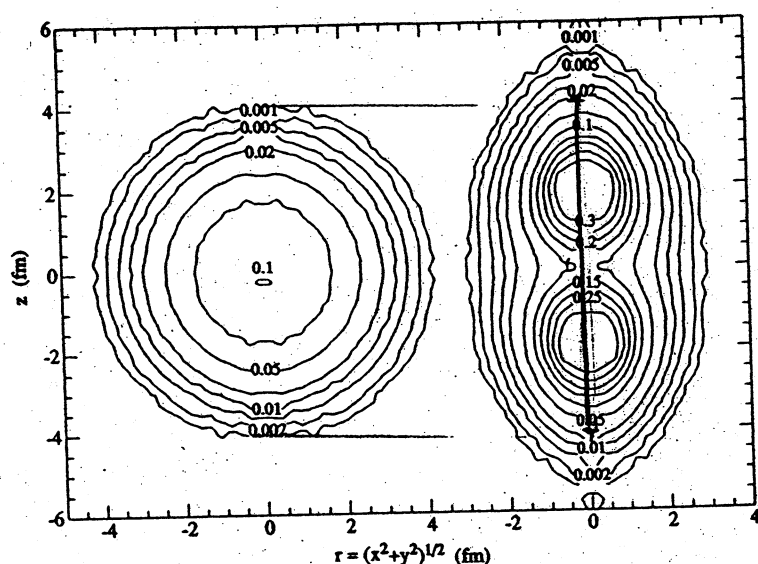


TABLE XIII. VMC calculation of moments and transition strengths for different multiplicities λ in the rotational states of ^8Be ; the units are fm and the proton charge.

Observable	λ	Value	Q_0 or M_4
$Q(2^+)$	2	-7.61(8)	26.6(3)
$Q(4^+)$	2	-9.76(10)	26.8(3)
$B(E2, 2^+ \rightarrow 0^+)$	2	14.8(4)	27.3(4)
$B(E2, 4^+ \rightarrow 2^+)$	2	18.2(4)	25.3(3)
$\langle 2^+, 2 r^4 Y_{4,0} 2^+, 2 \rangle$	4	2.5(2)	53.(4)
$\langle 4^+, 4 r^4 Y_{4,0} 4^+, 4 \rangle$	4	4.3(2)	34.(2)
$B(E4, 4^+ \rightarrow 0^+)$	4	167.(16)	39.(2)

左図は密度の等高線を描いたもので、
右図は Intrinsic frame のもので左図は
Laboratory frame のものである。

さて、上記の様に、基底回転帯を2つの α 粒子からなる変形回転体構造とすると、 ^8Be から裸の2つの α 粒子を引き去った残りのエネルギーは、2つの α クラスターの間の相対運動に関わる相関エネルギーと見なすことができます。表の最後の行は、その相関エネルギーに対応しています。 α クラスター間相関は α を凝縮させる相関エネルギーに比して、一桁程度弱い相関になっていることが判ります。即ち、この報告を我々の視点から言及すると、 ^8Be 系では2つの α クラスターに π 凝縮した構造が結合エネルギーを最大にすることを意味していると理解できます。

結合エネルギー
の内訳

^4He

^8Be

K	$v_{ij} (= v_{ij}^{\pi} + v_{ij}^R)$	v_{ij}^{π}	$v_{ij}^R (= v_{ij}^{\pi 2\pi} + v_{ij}^R)$	-B	-Bexp.
^4He	110.7 - 135.3 (= -102.4 + -32.9)	0.86	-6.3 (= -11.5 + 5.2)	-28.34	-28.30
^8Be	248. - 301. (= -227. + -73.)	3.27	-14.9 (= -27.1 + 12.3)	-54.44	-56.50
$^8\text{Be} - 2(^4\text{He})$	27.6 - 30.4 (= -22.2 + -7.2)	1.75	-2.3 (= -4.1 + 1.9)	2.24	0.10

[単位: MeV]

8 テンソル力による相関が起るもの(その2)

交代層状 (ALS) 構造

1 軸方向に周期性を持つスピ密度変化のある構造 - 1 種の π 凝縮 [テンソル力による]

スピ密度 - 1 種 $\rightarrow$ 1 軸方向の平行移動に変化する

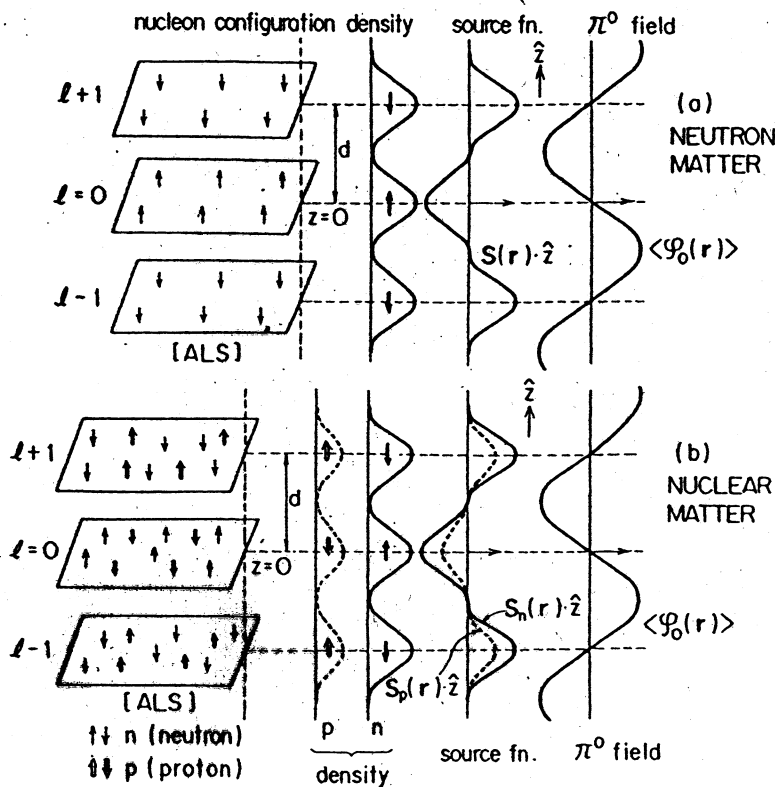
↓
スピ密度変化は 2 の対称性を破る。

有限核 での スピ密度変化 (スピ密度) は
パリティ対称性を破る。

ALS 構造

PTP, Suppl. No. 112

Takahashi,
Tamagaki,
Tatsumi.



Equivalence between
the potential description
and the field description

nucleon state	π^0 state
ALS structure $ \Phi_{ALS}\rangle$	pion coherent state $ \Phi_B\rangle$
π^0 source function	condensed ϕ_0 wave
$\nabla \cdot S(r) \neq 0$	$\langle \phi_0(r) \rangle \neq 0$
$\uparrow$	$\downarrow$
$S = \langle \psi_N^\dagger \sigma_{T3} \psi_N \rangle$	$U_\pi = -\tilde{f}_{T3} \sigma \cdot \nabla \langle \phi_0 \rangle$
$\frac{1}{2} \sum_{a,\beta}^{(occ)} \langle a\beta V^{OPE} \alpha\beta \rangle = \langle \Phi_0 H_{\pi^0} + H_{\pi^0-N} \Phi_0 \rangle$	$= \frac{1}{2} \int dr \{ (\nabla \langle \phi_0 \rangle)^2 + m_\pi^2 \langle \phi_0 \rangle^2 \}$
direct term	classical part
$-\frac{1}{2} \sum_{a,\beta}^{(occ)} \langle a\beta V^{OPE} \beta\alpha \rangle \dots$	lowest order
exchange term	quantum correction

主役の1人とする方策の1つ.

テンソル力のもたらす相関と

"擬粒子 (quasi-particle)" の導入で取扱う.

即ち

1粒子基底とテンソル力のもたらす相関と
組込む方向で変更する.

別言

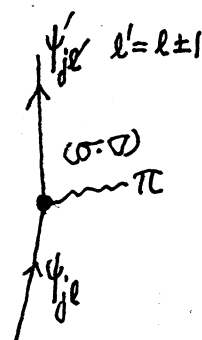
π 中間子交換力と組込む (π 中間子と働かざる称と)
1粒子基底導入する

模式的に123

$$\psi_{je} \Rightarrow \sum \psi_{je} + \sum \psi'_{je}$$

$$\psi'_{je} \propto (\sigma \cdot \nabla) \psi_{je}$$

$l' = l \pm 1$
(パリティ変化)
(スピン反転)



擬粒子導入例との対照.

[取扱う相関]

$\pi=0^+$ 対相関

4重極変形相関

"テンソル力 (π 交換力) 相関"

[1粒子状態の拡張において
破れる対称性 (Broken Symmetry)]

粒子数

軌道角運動量

"パリティ (+スピン + アイスピン)"

π 中間子場と組込む平均場理論の構築

【 π 中間子核子結合を含む平均場理論の構築】 (杉本聡 (RMP) の類研) 土岐博 (RMP) にFB

π 中間子核力 (テンソル力) の核子相関を
あつちに取り扱うことが可能にする。

現在 $\langle \sigma \rangle \neq 0$ $\langle \omega \rangle \neq 0$ $\langle \rho \rangle \neq 0$ (σ, ρ, ω) RMF理論
の構築中

↓

$\langle \pi \rangle \neq 0$, $\langle \sigma \rangle \neq 0$, $\langle \omega \rangle \neq 0$, $\langle \rho \rangle \neq 0$.

即ち $(\pi, \sigma, \rho, \omega)$ 相対論的平均場理論 (RMF理論)
の構築を行う。

① $(\sigma, \rho, \omega) \rightarrow (\sigma, \rho, \omega, \pi)$ RMFT. を採用する理由.

- ① 非相対論を含む
- ② Dirac 方程式を取り扱う (4元スピナー: スピン空間が内在的に含れる)
スピン空間 ⊗ 軌道空間, 結合を dynamical に取り扱う.
- ③ 中間子の働きが直接的に見える.

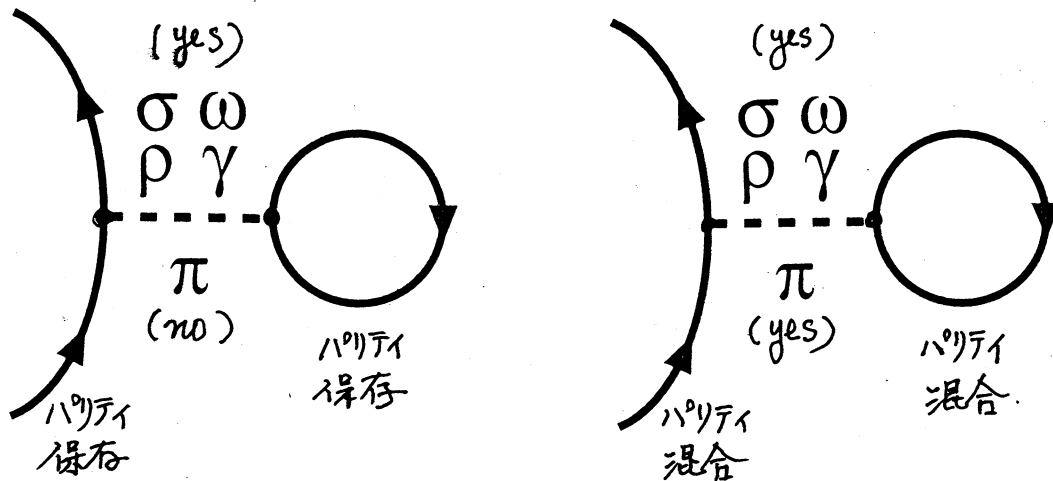
② $\langle \pi \rangle \neq 0$ 導入の展望のふろか

- ① π 中間子を含むテンソル力相関を議論できる.
- ② OPEP 模型で核力と導く必要が、異質性核の
中間子とすべて含めることによる.

従って 非相対論的構造研究 (核力に基づき) と対比が
可能となる

- ① 改善点 {
 - ② Hartree $\rightarrow$ Hartree-Fock
 - ③ ρ 中間子の空間成分をいれ、テンソル結合を取り扱う
 - ④ あらかじめ Model Parameters (結合定数) の設定
 - ⑤ 110 MeV, 140 MeV の領域に復活.

パリティ対称性の破れに平均場の導入.

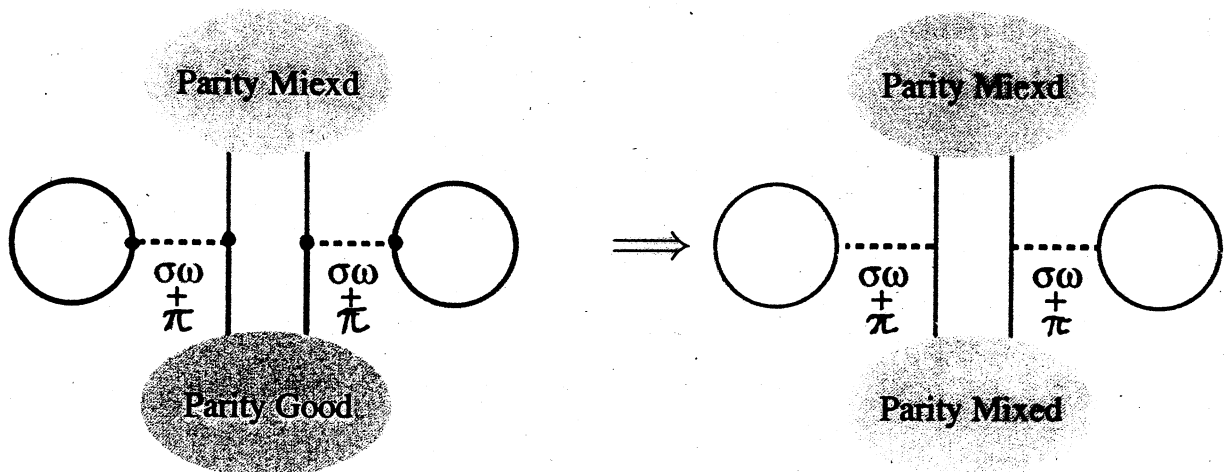


何故か $(\vec{\sigma} \cdot \vec{\nabla}) \pi$ π 中間子は擬スカラー
 π -N 結合は $\vec{\sigma} \cdot \vec{\nabla} \pi$ 結合 $\propto (\vec{\sigma} \cdot \vec{\nabla})$

従って 1粒子状態 及び 核内からつくられる
 内部状態がハリテイ混合状態であると、核内の核子は
 自由に π 交換が可能となる。

ニハルによって

パイオンの効果を取り込んで平均場(波動関数) Σ



Self-Consistent Mean Field breaks Parity Symmetry

得られた内部状態波動関数はハリテイ混合状態であるか

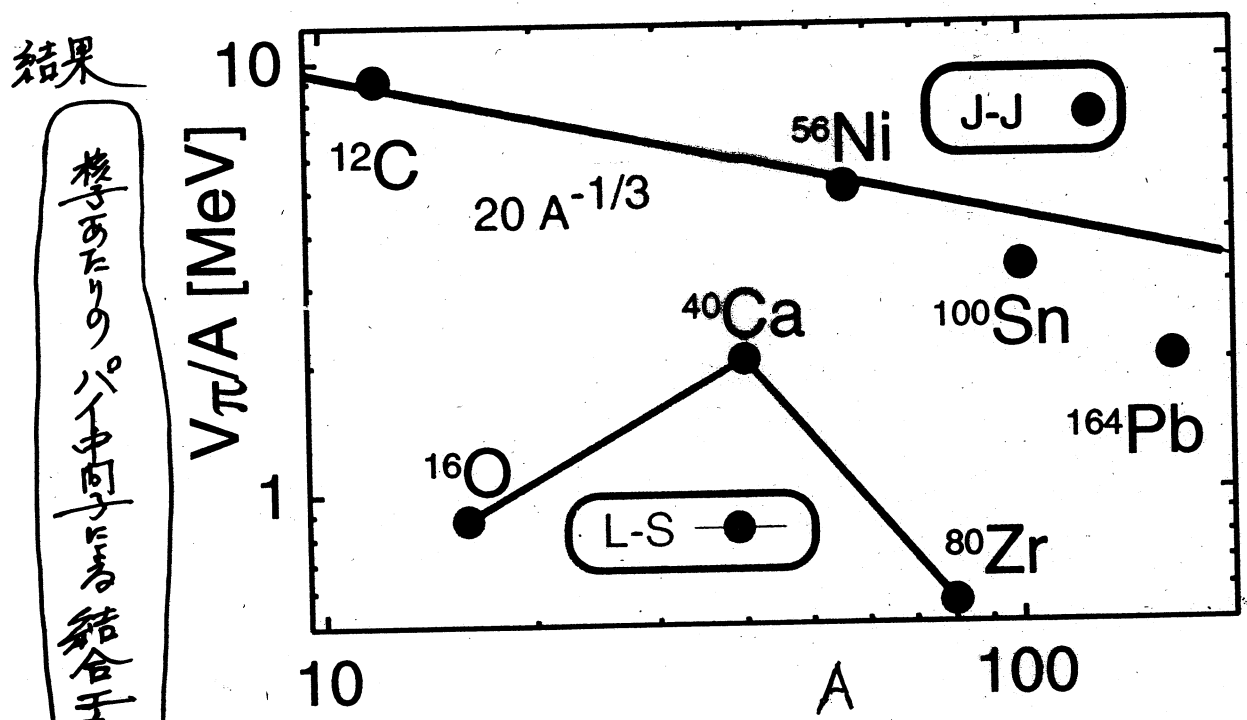
ハリテイ射影により ハリテイ対称性を回復する=と見る。

閉殻核 ($N=Z=6, 8, 20, 28, 40, 50, 82$) への適用
 (杉本・土岐・池田 共同研究) による.

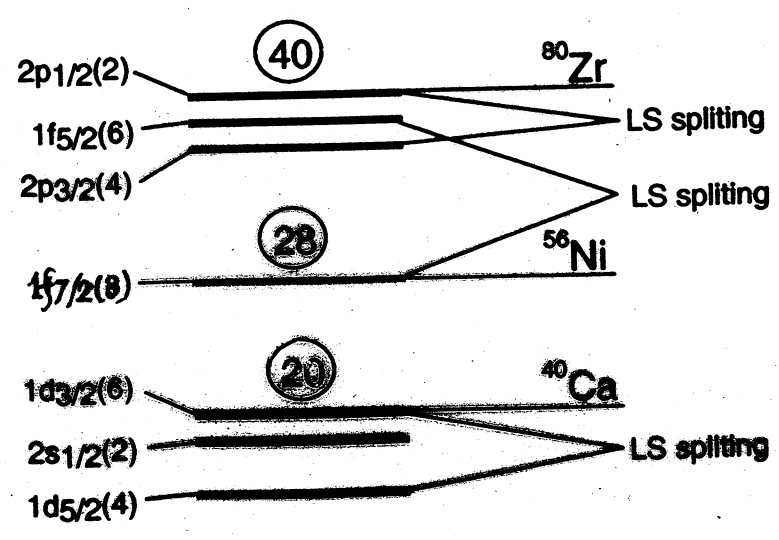
- ① (σ, ω, ρ) 模型のパラメータを採用.
- ② 新たに π -N 結合を加える.
 (π 交換核力と等しく結合定数を採用)

有限 $\langle \pi \rangle$ 場が
 得られるかどうかを見る
 ため.

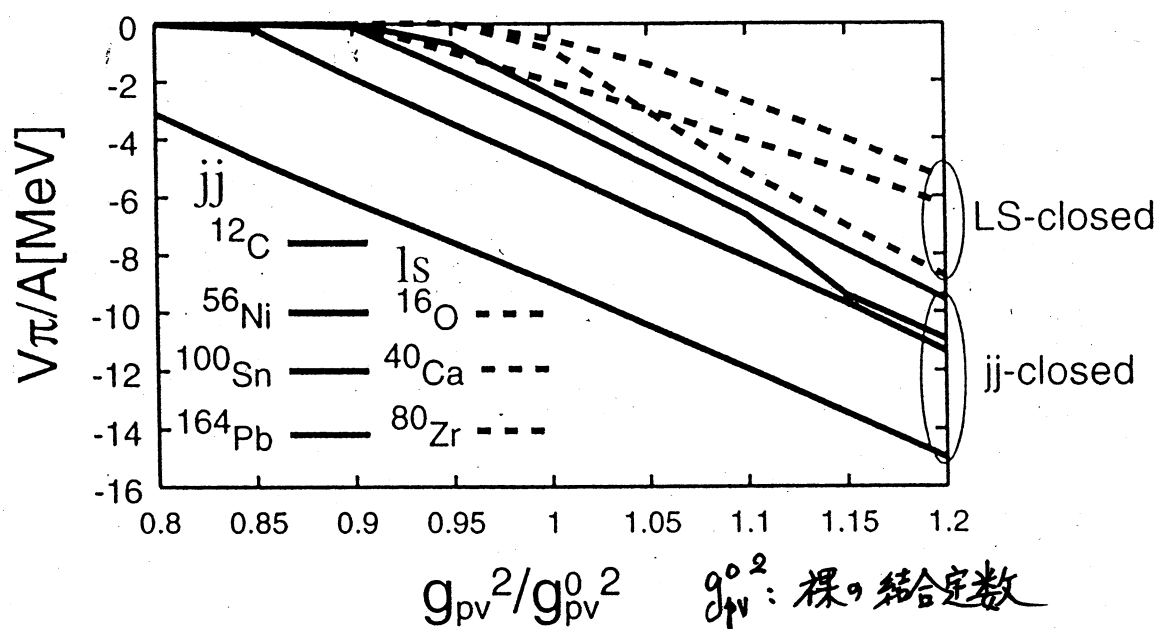
既に (σ, ω, ρ) で 結合エネルギー等が得られているので. 有限 $\langle \pi \rangle$ 場が
 得られると 結合エネルギーは 余分に得られることになるが. 有限 $\langle \pi \rangle$ 場が
 得られるかどうか. 焦点であるので. 上記の様に 結合定数パラメータを設定



- パイオン場を持つ核が得られ.
- $j-j$ 閉殻核 と L-S 閉殻核
 で異なった振舞をする解が得られ.
- $j-j$ 閉殻核の (結合エネルギー/A) は
 Surface-like な核相 $\propto A^{1/3}$ と
 示している.



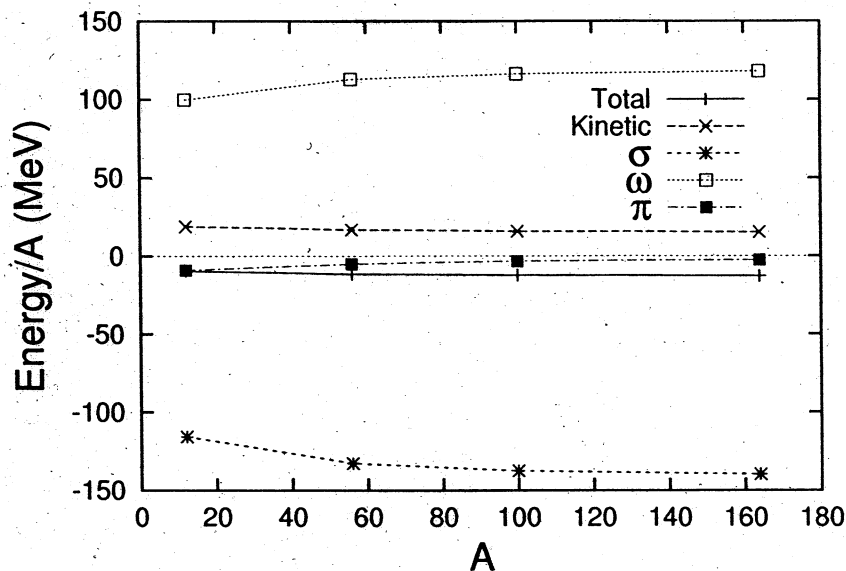
核子平均場の結合エネルギー $\langle V_\pi \rangle / A$ の結合定数 $g_{\pi N}^2$ の強さに対する依存性



- パイオンの結合エネルギーの寄与が生じる 臨界結合定数 $(g_{\pi N}^2)_{cr}$ が存在する。上記の結果は $0.85 \sim 0.95 g_{pv}^0{}^2$ の領域に $(g_{\pi N}^2)_{cr}$ が存在することを示す。
- パイオンがもたらす相互作用による パリティ混合状態への相転移は 運動エネルギー 及び他の中間子のエネルギー寄与への損失をパイオンのエネルギーの寄与を上まわることによって生じる。
- パイオンのエネルギーへの寄与の大きさに比例する $\langle \pi \rangle$ が パリティ混合の大きさの指標であり (1- 位の秩序パラメータ)、これは α 核での D-state 振幅に対応するものである。
- パリティ混合が どの程度生じているのか、実際の原子核で調べていくのが今後の重要な課題である。そのためには、前述した 相対論的平均場理論を $(\pi, \sigma, \omega, \rho \dots)$ 模型で検証していくことが不可欠である。
- ここでも LS-closed と jj-closed 核での相違はあらわであり、jj-closed 核の方がよりパイオン場と強く結合している様相が明らかに示されている。

[結合エネルギーの寄与の内訳と π 中子を入れた場合と入れない場合の値の変化] 16/22

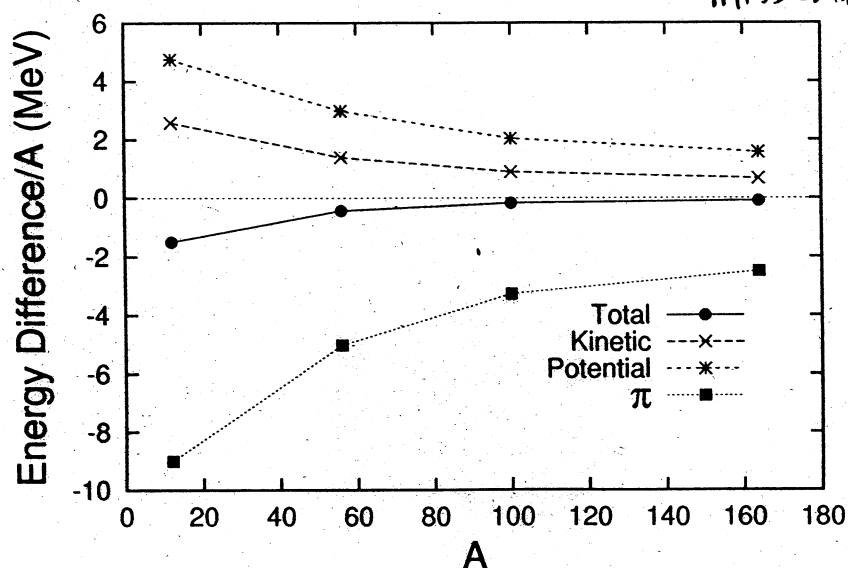
Energy Per Particle



- σ , ω , 運動エネルギーの寄与はほぼ Volume-Like

(a) TM1 Parameter set の (σ , ω) 模型 での計算値
 (b) 上記(σ , ω) 模型に OPEP に対する π -N 結合を加えての計算値) 二の差を以下に示す。

Energy Difference (π 中子を入れた場合と π 中子を入れない場合の差)



- 運動エネルギーは大きくなり損をする。
- ポテンシャルエネルギーへの σ , ω のそれぞれからの寄与は 減少し、全体としても損をする。
- パイオンがそれらの損に打ち勝つ寄与を及ぼし全体としてはエネルギー的に得をする。

$j-j$ closed 核と LS closed 核の違いについて.

$j-j$ closed 核の最次の配位は $1h$ の中の最も大きい $j = l_{max} + 1/2$ に核子がすべて埋まっている. $\rightarrow$ LS closed 核では $\Rightarrow$ j によって埋まっている場合である. (^{40}Ca と ^{56}Ni では $1f_{7/2}$ が埋まっているか埋っていない場合である.) π 中核子核子結合を考えると.

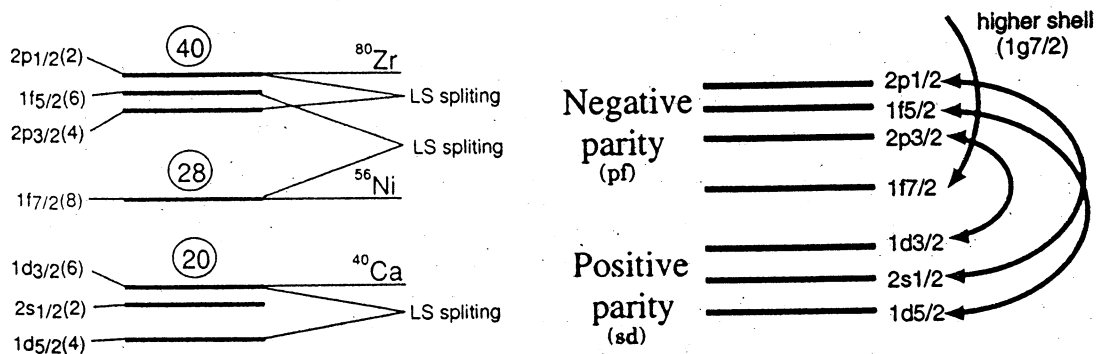
• $j-j$ -closed

High- j 軌道を含めて占拠している 1 粒子状態はすべてフルミ率位以上の軌道と結合することができる.

• LS-closed

High- j 軌道がフルミ率位近傍にあるにも関わらず. $\Rightarrow$ 状態は占拠されている 1 粒子状態と結合することができない.

• 結合に与えることが可能な ($j-j$ closed) High- j 軌道は. 大抵 $2j+1$ の多重度を持つ.



例示, $1f_{7/2}$ は high shell の $1g_{7/2}$ と結合する. 占拠されている $1f_{7/2}$ は $\Rightarrow$ 結合は生じない. 占拠されていない $1f_{5/2}$ は結合は生じる. $\Rightarrow$ この差が大きく, π -N 結合によるエネルギーに大きな相違をもたらす.

『まとめ-おわりに』

18/22

〔テンソル力と取上げる状況〕

テンソル力 また π 中間子核子結合の相互作用の原子核構造に与える大きな影響は、現在の構造模型においては、直接でなく間接的に“繰込”まれている。

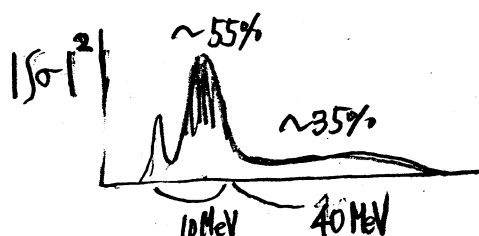
現在の実験的・理論的研究は、間接的な“繰込”みを超えて、テンソル力(すなわち π 中間子核子結合)のもたらす効果を露呈するまでになって来ていると考えられる。

実験的な例

- (1) Gamow-Teller strength $|\int \sigma|^2$ の sum rule の約 35% の励起エネルギー 50 MeV までの分散
- (2) π 相関による縦方向のスピン応答の大きな減殺
- (3) 一粒子運動状態の光学的因子の総和の 70% しか低励起エネルギー-励起領域には見つからないこと。

理論的な側面の例

- (1) 飽和性、結合エネルギーへの寄与、スピン軌道力への繰込み等にテンソル力と核交換核力の寄与に大きな寄与。
- (2) 8 体系までの模型空間に制限を置き、現実的核力を用いての研究によって示されたこと。 π 交換力の圧倒的な寄与(〜70%)。
- (3) GT 分散等の広エネルギー領域への分散はテンソル力に主として因っていることが示されたこと。



等である。

[二] 情況に対応するには]

(1) 理論面

テンソル力(特に π 中間子核子結合)のとりま相関
を "あつに直接的に" 取扱うことが要請され.

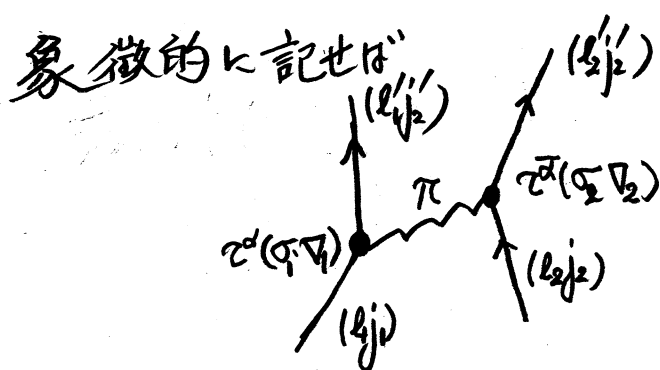
(2) 実験面

木と森を同時に観測することが
要請される. 二つを RCNP の近未来との実験計画
で"いふ".

(A) 高エネルギー領域での精密実験の系統的研究

(B) スピンと軌道運動の結合の解明を明らかにする
系統的研究

が要請されているといふ.

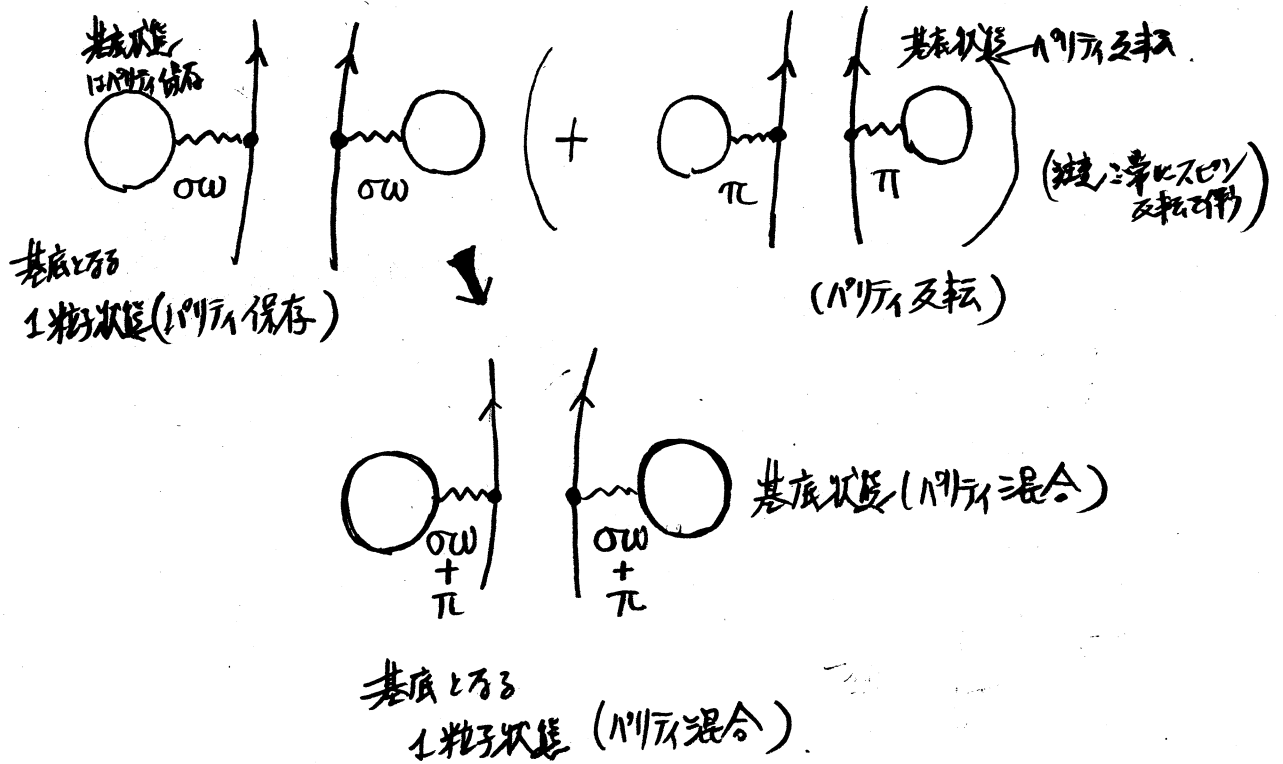


のとりま 粒子間相関現象の研究を.

理論的・実験的に 系統的全面的に
発展させることが 要請されている.

[新たな π 場を含む平均場理論の試み]

π 中間子核子結合場を組み入れた平均場理論の構築



- 粒子状態の対称性を破る (全系の状態は元の対称性を復活させる)
対称性を保存する射影

破る対称性 アイスピン・スピン・パリティ

(= 4次元での
種類でも破れる)

即ち

新たに破る対称性は

パリティとアイスピンの

つらねて

[π 中間子核子結合 (あるテンソル力) のおける相関
を基底状態 (平均場近似) に組込む]

[π 場が自己無撞着解として存在する意味]

パリティ混合に自己無撞着解が得られることは

$$\text{即ち } \langle \pi \rangle = \langle \phi(0, \vec{r}) \rangle \neq 0 \text{ (finite)}$$

π 中間子核子結合場が有限振幅を持つ - 種の相転移を意味する。これを "核表面 π 凝縮" と呼称している。

この様な、パリティの変化するポテンシャル場での1粒子状態の粒子は "quasi-particle (擬粒子)" といい、現在の場合には通常の粒子状態と異って、virtualに存在した π 中間子と結合した "1粒子-1 π " の成分の衣をまとって、パリティ混合の1粒子状態にある粒子となっている。

[パリティ混合によって生じた事柄]

その基本を示すと次の様になる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{パリティ保存の} \\ \text{平均場理論} \end{array} \right\} = \frac{\text{パリティ保存の平均場}}{\text{ハミルトニアン}} = \frac{\text{近距離相関の繰込み}}{\text{[斥力芯 + テンソル力等]}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{パリティ混合の} \\ \text{平均場理論} \end{array} \right\} = \frac{\text{パリティ混合の平均場}}{\text{ハミルトニアンと波動関数に}} = \frac{\text{テンソル力相関の組み込み}}{\text{}} \oplus \frac{\text{斥力芯のハミルトニアンへの繰込み}}{\text{}}$$

1拾われていく相関を分離していくことにある。

[二つにおいて、実験的には30%近い相関振幅確率の内の半分を越えたと考えられるテンソル力相関を抜き出し、その及ぼす構造への影響とそのもたらす現象を明らかにすることにある。]

① $(\pi, \sigma, \omega, \rho, \dots)$ の $\left\{ \begin{array}{l} \text{相対論的} \\ \text{非相対論的} \end{array} \right\}$ 平場場理論の確立

特に有効結合定数の設定と Fock 項の組入れ

② これによる平場場理論の現象^{*}理解への有効性を示すこと

* 現象例

① GT-強度肉数の集中 (GTR) と分散 (数 10 MeV) と同時に再現

② エネルギーと密度の飽和性と平均場
閉殻の導出, 1 体スピン軌道結合力の導出
スピンの関与する性質の導出

③ スピン・パイ・スピン巨ス共鳴状態

[近い将来への目標]

① 模型理論の拡張

② 変形による構造変化とテンソル相関

③ クラスター化あるいは空間的局在化の構造変化とテンソル相関

④ 無限系核物質における π 凝縮効果
あるいはテンソル力相関効果と構造

将来計画との関係では

" 若いエネルギーとの結合が何よりも重要 "