原子核のスピン・アイソスピン対称性をどう見るか?

笹野 匡紀 上坂スピン・アイソスピン研究室 理研仁科センター





原子核とは

ハドロン量子(有限)フェルミ多体系の一つ

系を構成する要素: ハドロン、特に核子(陽子、中性子)

中性子(neutron、n):アイソスピン:+1/2, 939.565 MeV/c2 スピン:+1/2(左図だと)

陽子(proton、p): アイソスピン:-1/2, 938.272 MeV/c2 スピン:+1/2(左図だと)



系を記述する相互作用: 核力 → アイソスピン空間で対称。

Framework(量子力学、known)x構成要素(陽子、中性子、known)x相互作用(QCD, known) → それでも多体系としては、unknown。

脱線1:そもそも多体系の物理とは。。。



原子核の層



ここではstrangenessなど、 flavorに関する軸は除いている。

原子核の特徴的なおもしろさ



スピン、アイソスピン、空間の対称性のからみあい

絡み合いの例1:重陽子

非来精 • $\mathbf{\Phi}$ $\mathbf{\hat{\Phi}} \mathbf{\phi}$ T=1 S=0 $\mathbf{\Phi}$ スピンがそろっている T=0→テンソルカ → 空間部分: S=1 角運動量L=0 (S波) とL=2(D波)の混合

アイソスピンを変える(T=1→T=0)
 → スピン(S=0からS=1) 反対称化を通した量子力学的なカップル
 → 空間成分をゆがめる(テンソル力を通して)
 → 引力を稼いで束縛する

絡み合いの例2: 殻構造と魔法数

設構造:

一般的に有限フェルミ粒子系が持つ性質

魔法数:

系が安定になる構成要素の数 (系全体を束縛させるポテンシャルの形を反映)

原子核の場合: ざっくりとは球体(それだけならfeatureless) →調和振動子ポテンシャル 系が安定になる陽子、中性子数(魔法数)は: 2,8,20,40,...

実際には、…

2, 8, 20, 28, 50, 82, ... が安定

原因は主に: 強い(原子と比べて)

スピンと軌道角運動量(空間運動)のカップル(軌道相互作用)角運動量L

ポテンシャルの空間的な対称性 → 空間がスピンとカップル → 魔法数をシフトさせる。 ここではふれないが実はアイソスピンともカップルしていることが近年わかってきた。



有限フェルミ粒子系が共通に持つ性質







世界の(大規模) RI ビーム施設



脱線2: 宣伝

RIBF (**R**adioactive **I**sotope **B**eam **F**actory) RIビーム工場



理研キャンパスの広大な土地面積の4分の1を占める。実際には地下に施設があるので、延床面積はもっと広い。 迷子にならないように。。。



Radioactive Isotope (RI)

- → 自然界には安定的に存在しない
- → じゃあ、作ってみせよう(人間の英知)

ビーム

→ 光速の60%

→ たとえ寿命が短くても(6x10のマイナス七乗秒以上あれば)、 100メートル以上壊れないで飛ぶ

→ その間にRIの種類を分類したり、

それぞれの種類の性質を調べる



世界初&世界最強のK値(2600MeV)超伝導リングサイクロトロン (SRC)

ウランを光速の60%まで加速できる

世界最大のアクセプタンスを持つ 9 Tm 超伝導RIビーム分離装置



RIBFにおける基幹施設



質量リング

Ozawa, Wakasugi, Uesaka et al.



SCRIT (RIと電子散乱→荷電分布)



0度スペクトロメーター(+ 大規模ガンマ線 検出器) EURICA

DALI2



EURICA EUROBALL-<u>RI</u>KEN <u>Cluster</u> Array (EURICA) 2012-14



Total gain factor for gamma-ray statistics at EURICA campaign in 2012-14 x1000 gamma efficiency x10 primary beam intensity x100 Approved MT 100 days Estimation for number of papers expected ~100 days * 4 papers/2.5 days= ~160 Cf. RHIC PHENIX ~100 papers/10years

これらの施設を使った展開の例



SU(4)対称性とガモフ・テラー遷移

核子一個だったら、ガモフ・テラー遷移とは、、、



- スピンSU(2)とアイソスピンSU(2)が同時に反転。
- 空間成分は変えない。
- → SU(4)空間での回転(単純)

多体系では???



SU(4)空間での回転に対応する集団的モードが見えるのだろうか?

⁵⁶Ni: 魔法数の核

⁵⁶Ni (Z=N=28)

- 陽子も中性子も魔法数
- → 安定なはず
- → 強い陽子中性子(p-n)残留 相互作用がきく
- → フェルミ面付近の分布が崩れる。
 → 崩れ方は陽子、中性子で対称的
- → SU(4)空間での回転モードを見るのに適している。



f7/2 70% in ⁵⁶Ni (GXPF1A, KB3G) (e.g., Honma et al., Phys. Rev. C 69, 034335 (2004))







逆運動学による(p,n)反応測定手法







中性子測定

10°





E_n (MeV) 6°_ 低エネルギー 中性子検出器アレイ (LENDA) -50 プラシチックシンチレーター 左のアレイ 24本2.5x4.5x30cm $150 \text{ keV} < E_n < 10 \text{ MeV}$ $\Delta E_n \simeq 5\% \quad \Delta \theta_n < 2^\circ$ 検出効率 15-40% 中性子飛行距離:1m



50

右のアレイ

20

10

g.s.

 θ_{lab} (degrees)



(NSF MRI proposal – Lew Riley (Ursinus college)



液体水素標的 "陽子"標的 65 mg/cm² (~7 mm) ~3.5 cm 直径 T=20 K ~1 atm



利点(CH2標的と比べて)

- 水素の数:多
- •低バックグラウンド
- ・ビームのsmaller energy loss of the beam

S800でのイベント選択



ΔE in ion chamber (A.U.)

55Coビームから

中性子エネルギースペクトル



二回微分断面積





多重極展開の結果



比例式の較正

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}(q=0)\right)_{(p,n)} = \hat{\sigma} B(GT)$$



GTとフェルミの遷移: GT : B(GT)=0.267 (Aysto et al., Phys. Lett. B138, 369 (1984)) Fermi : B(F)=1



GT断面積の割合: 0.51+-0.03

using $\hat{\sigma}_{GT} / \hat{\sigma}_{F} = 4.0 \pm 0.2$

Taddeucci et al., Nucl. Phys. A469, 125 (1987).

GT単位断面積

- → 3.2 +- 0.5 mb/sr
- → 安定核実験の結果と一致

(3.5+-0.2 mb/sr for ⁵⁸Ni(p,n) at 120 MeV

20

結果と殻モデル計算との比較



大規模殻モデル計算との比較

GXPF1J: Honma et al.: pf 設核全体のデータでコンストレイン KB3G: Poves et al.: 弱いコンストレイン – 宇宙物理における弱い相互作用過程の 計算で標準的に使われてきた

違い:

- •KB3Gはより弱いスピン軌道、p-n残留相互作用
- •KB3G はより低いレベルデンシティ



Consistent with the comparison in ⁵⁶Ni

両計算の違いは若干少ない!? (GXPFがよくあい、KB3Gがだめだが)





わかったこと:

N=ZではB(GT)が相互作用のある部分に非常に敏感であり、それが二本のピークを作っている 疑問:

その物理的描像は?







- ガモフ・テラー遷移:
 - スピン・アイソスピン空間での回転

– 空間部分を変えない

→ 空間の情報を捨象しつつ、スピンとアイソスピンの 対称性を調べるのに適している。

 N=Z(⁵⁶Ni)核でSU(4)空間での回転に対応した モードが見えている可能性がある。

→ N=Z線にそった系統的な測定計画が進行中。





RIBF Theory Forum





アイソスピンをコントロール
 →中性子物質の密度を希薄に
 →nn間相互作用が強くなる(スピン0に組んだ状態)
 →空間の対称性が変化

どうやって確認?: ¹¹Liの例



$$B(E1) = \frac{3}{4\pi} \left(\frac{Ze}{A}\right)^2 \langle r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 \cdot r_2 \rangle = \frac{3}{\pi} \left(\frac{Ze}{A}\right)^2 \langle r_{c,2n}^2 \rangle,$$

→ オープニングアングル

現在の問題点: S=0とS=1の分離。 オープニングアングルの分布はどうなっている? → スカラー量(和測値)ではなく、2次元的な量が必要。



みるべきもの

⁶Heの基底状態の場合



三体の構成要素の運動量ベクトルを測る必要

どうやって測る?

- 三体の構成要素の運動量ベクトルを図る必要
- → 原子核を壊す必要がある。。。
- → どうやって壊す?
- → たとえばクーロン破砕反応



クーロン破砕反応のような"そっと"壊す反応

- → スペクトルの形は終状態相互作用でゆがんでしまう。
- → 初期(基底状態)運動量ベクトル ≠ 測定される(漸近的領域)運動量ベクトル

ボロミアン核における(p,pn)ノックアウト反応



どうやってみえる?

Work done by Y. Kikuchi and K. Ogata



一見、情報は失われたように見えるが。。。

どうやってみえる

Work done by Y. Kikuchi and K. Ogata



うまく一体のFSIをよけた領域をみる → 基底状態のダイニュートロン相関(量子的コヒーレンス)が直接見える!

SAMURAI



実験セットアップ (SAMURAIxMINOS)



まとめ

- 原子核:
 スピン対称性xアイソスピン対称性x空間の対称性
- これらの対称性がどうやぶれるかによって、多様な性質、
 現象が生まれる。
- RIビーム
- → アイソスピンをコントロール
- 二つ例:
- N=Z : SU(4) 空間での回転。空間は不変。
- N>>Z

極端に大きいアイソスピン

- → 空間対称性を変える
- → ダイニュートロン相関
- 始状態を見るには、FSIを切るのが重要。