第2章

原子核のスピン・荷電スピン応答概観

- 有効相互作用
- ランダウ・ミグダルパラメータ
- ベータ崩壊（FとGT遷移）
- スピン和則

ことの発端

VOLUME 42, NUMBER 16 PHYSICAL REVIEW LETTERS 16 APRIL 1979

Precritical Behavior in Pionlike Nuclear Excited States

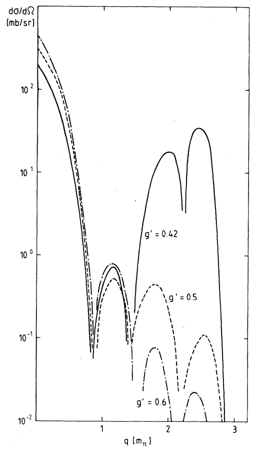
H. Toki and W. Weise
Institute of Theoretical Physics, University of Regensburg, D-8400 Regensburg, West Germany
(Received 27 December 1978)

The possible occurrence of precritical phenomena in finite nuclei due to the relative proximity of the pion condensation threshold is investigated. We point out that such precritical behavior may occur in inelastic scattering differential cross sections for the excitation of unnatural-parity states at high momentum transfers [$q \simeq (2-3)m_\pi$]. As an example, we discuss inelastic proton scattering to 1^+ states in ^{208}Pb.

➢パイ中間子凝縮の前駆現象が見えるかもしれないと予言
➢g’ の値に予言は依存

➢g’はランダウ・ミグダルパラメータと呼ばれる短距離離力
⇒ 有効相互作用の理解が欠かせない
その**q**依存性が重要

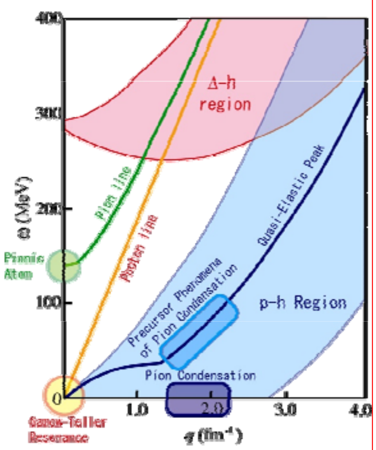
疑問？
- なぜ1^+状態？
- なぜg’依存？
- なぜqでプロット？



^{208}Pb核の1^+固有状態のq依存性
（qは運動量移行量）

原子核のスピン(S)荷電スピン(T)応答の面白さ

フェルミガス応答+ 相関



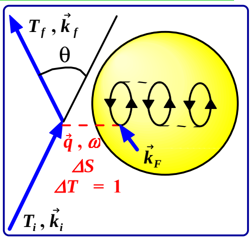
(q,ω)面での振る舞い

1. もし原子核＝フェルミガス
   → 原子核物理学は存在理由なし
2. パイ中間子による相関が最も重要
   → スピン･荷電スピン応答に現れる
   S=1,T=1 の量子数をもつR(q,ω、….)
   ex; $J=1^+$ (L=0,S=1)
   $J=0^-,1^-,2^-$ (L=1,S=1)
   $J=1^+,3^+,4^+$ (L=2,S=1), ….
3. (q,ω) でさまざまな現象が見つかり/予言されている
   - 小さな q(～0 fm^{-1})
     - ベータ崩壊（フェルミ型、ガモフ･テラー型）
     - ガモフ･テラー巨大共鳴
     - スピン単極巨大共鳴(?)
     - 二重ガモフ･テラー巨大共鳴(???)
   - 中間 q (0.5～1.0 fm^{-1})
     - スピン二重極巨大共鳴
     - スピン四重極巨大共鳴(???)
   - 大きな q (～$2m_p$～1.3 fm^{-1})
     - パイオン凝縮 ： $>\rho_C$
     - 前駆現象 ：ρ_0
     - QESの縦応答関数の増強

核（内）相関と有効相互作用

核内相関の最も簡単な形

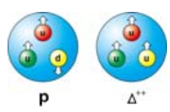
- π+ρ+g' モデル （短距離力＋パイ･ロー中間子交換力）
- パイ中間子･核子の結合は、（τとσは核子の自由度）
  $\tau(\sigma\cdot\hat{q})$
  荷電･縦スピンモードを励起
- ロー中間子･核子の結合は、
  $\tau(\sigma\times\hat{q})$
  荷電･横スピンモードを励起
- g'：Landau-Migdal(LM) parameter （短距離力）
  $\delta(r)$ 力とすれば、運動量表示では g'=const



パイ中間子場はΔ粒子とも強く結合

- パイ中間子･ Δ粒子の結合は、（TとSはΔ粒子の自由度）
  $T(S\cdot\hat{q})$
- ロー中間子･ Δ粒子の結合は、
  $T(S\times\hat{q})$

核子以外の自由度の導入



Δ粒子:核子の励起状態
M_Δ=1232MeV
spin(S): 3/2
isospin(T):3/2
parity: +

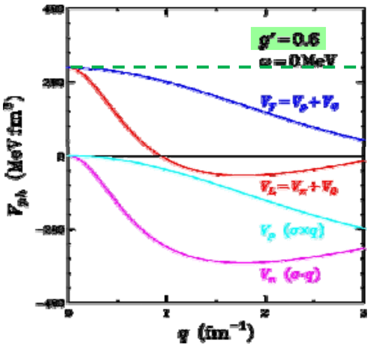
核子内クオークのスピン･荷電スピン反転した状態と見なせる

有効相互作用とLMパラメータ

π+ρ+g' モデルによる有効相互作用

$$V_{eff}(\vec{q},\omega) = V_{LM} + V_{\pi}(\vec{q},\omega) + V_{\rho}(\vec{q},\omega)$$

- ●g'の値によってパイ中間子の引力相関が大きく変更される
  ⇒パイ中間子凝縮？　その前駆現象？
- ● ロー中間子相関は斥力
- ●従って、g'の値を実験的に決めるのは極めて重要
- ●g' は、Δ の自由度を含めると3種類
  g'_{NN}、$g'_{N\Delta}$、$g'_{\Delta\Delta}$



LMパラメータは：

$$V_{LM} = C_0\Big[g'_{NN}(\sigma_1\cdot\sigma_2)(\tau_1\cdot\tau_2) + \Big\{\frac{f_{\pi N\Delta}}{f_{\pi NN}}g'_{N\Delta}\big((\sigma_1\cdot S_2)(\tau_1\cdot T_2)+(\sigma_1\cdot S_2^+)(\tau_1\cdot T_2^+)\big) + \frac{f_{\pi N\Delta}^2}{f_{\pi NN}^2}g'_{\Delta\Delta}(S_1\cdot S_2^+)(T_1\cdot T_2^+)\Big\} + (1\leftrightarrow 2)\Big]$$

ベータ崩壊との関係

ベータ崩壊やGT巨大共鳴は、
q=smallの現象
⇒　g 'による集団運動

LMパラメータを決めるには？

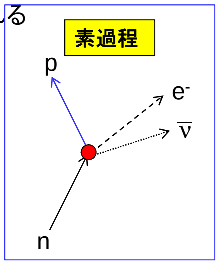
- ● g'_{NN}: $q=0$　で斥力
  ⇒ GT巨大共鳴の励起エネルギー
- ●$g'_{N\Delta}$: $q=0$　での　N と Δ の結合
  ⇒ GT クエンチング値
- ●これらのg'は、大きなqでの有効相互作用に強い影響
  ⇒ 縦応答関数V_L *(Pionic Enhancement)*
  （今回の講義では説明しない ⇒ 市村・酒井・若狭
  PPNP **56**(2006)446-531 を参照のこと）

GT遷移は、極めて重要な物理量と関連
- – パイ中間子、ロー中間子、短距離、などによるの核内相関
- – 非核子の自由度（クオークの寄与）

次はとりあえずベータ崩壊入門

ベータ崩壊入門

- ●スピン・荷電スピン応答の代表的な例は、ベータ崩壊(**弱い相互作用)**
- ●ベータ崩壊は核分光学の手段として確立している
- ●荷電交換核反応の断面積から物理量（B(GT)）の絶対値が得られる
  定量的な議論が可能



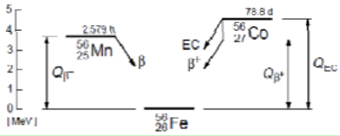
■ **3種類の崩壊様式**

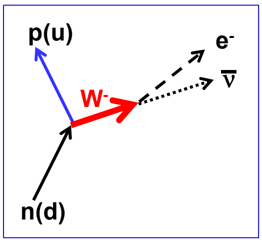
- **β⁻崩壊** $(A,Z) \rightarrow (A,Z+1)+e^- + \bar{\nu}_e$
- **β⁺崩壊** $(A,Z) \rightarrow (A,Z-1)+e^+ + \nu_e$
- **電子捕獲** $e^- + (A,Z) \rightarrow (A,Z-1)+\nu_e$

■ **Q 値(Q value)**

- **β⁻崩壊** $Q(A,Z) = B(A,Z+1) - B(A,Z) + (m_n - m_{\rm H})$
- **β⁺崩壊** $Q(A,Z) = B(A,Z-1) - B(A,Z) - (m_n - m_{\rm H}) - 2m_e$
- **電子捕獲** $Q(A,Z) = B(A,Z-1) - B(A,Z) - (m_n - m_{\rm H})$

■ **例**





- ●$Mc^2(W^{\pm})$=80.2GeV、 R_w=0.0025 fm
- ●ベータ崩壊は短距離力 (δ-force)
- ●運動量移行は小さい！q~数MeV/c

ベータ崩壊の分類

	ΔL	ΔJ	$\Delta\pi$	$\log ft$	オペレータ
Fermi 遷移	0	0	no	～3	$t^{\pm}$
Gamow-Teller 遷移	0	1	no	3 - 6	$\sigma t^{\pm}$ $(\sigma\tau^{\pm})$
第一禁止遷移	1	0, 1, 2	yes	6 - 10	
第二禁止遷移	2	1, 2, 3	no	11 - 15	
第三禁止遷移	3	2, 3, 4	yes	16 - 20	
第四禁止遷移	4	3, 4, 5	no	21 -	

t:崩壊の半減期

許容遷移(Fermi, Gamow-Teller)の場合

$$ft = \frac{\log 2}{G_\mu^2} \frac{2\pi^3\hbar^7}{m_e^5 c^4} \frac{1}{g_V^2|M_F|^2 + g_A^2|M_{GT}|^2}$$

行列要素が実験から求められる

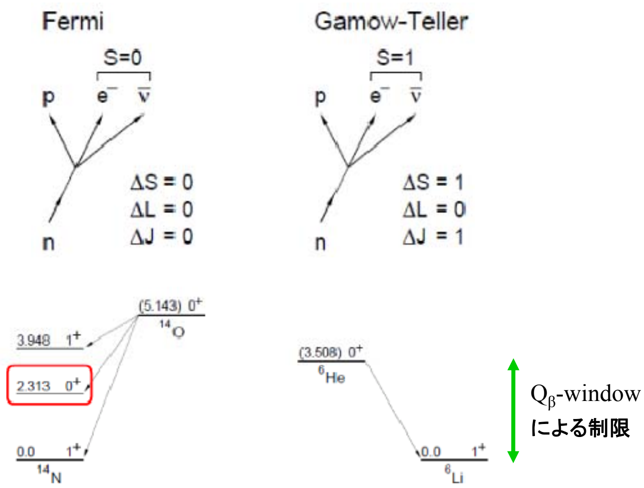
$$ft = \frac{6147 \pm 7}{B(F) + \left(\frac{g_A}{g_V}\right) B(GT)}$$

$$B(F) = \frac{1}{(2J_i+1)} \left| \left\langle \psi_f \left\| \sum_{j=1}^{A} \tau_j^{\pm} \right\| \psi_i \right\rangle \right|$$

$$B(GT) = \frac{1}{(2J_i+1)} \left| \left\langle \psi_f \left\| \sum_{j=1}^{A} \vec{\sigma}_j \tau_j^{\pm} \right\| \psi_i \right\rangle \right|$$

$$|M_F|^2 = B(F), \quad |M_{GT}|^2 = B(GT)$$

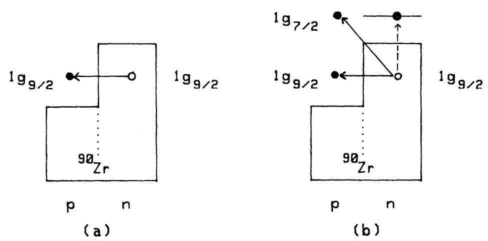
Fermi 遷移と Gamow-Teller 遷移



ω>Q_β 領域を調べたい！ ⇒ 荷電交換核反応

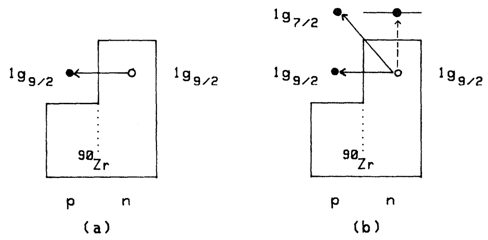
殻モデルによるF/GTベータ遷移

GT型ベータ崩壊
- △S=1 ⇒ スピン反転
- △T=1 ⇒ 荷電スピン反転（荷電交換反応）
- △L=0 ⇒ 軌道を変えない



殻モデルによるF/GTベータ遷移

GT型ベータ崩壊
- △S=1 ⇒ スピン反転
- △T=1 ⇒ 荷電スピン反転(荷電交換反応)
- △L=0 ⇒ 軌道を変えない



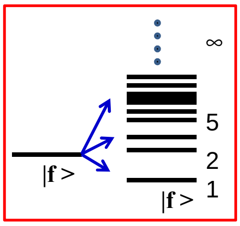
GTスピン和則 (sum rule)

$$\beta_\pm(\mu) = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{A}\sigma_{\mu k}\tau_{\pm k} \qquad S_\pm(GT) = \sum_{f,\mu}\left|\langle f|\beta_\pm(\mu)|i\rangle\right|^2$$

$$S_\pm(GT) = \sum_{f,\mu}\langle f|\beta_\pm(\mu)|i\rangle^*\langle f|\beta_\pm(\mu)|i\rangle$$

$$= \sum_{f,\mu}\langle i|\beta_\pm^+(\mu)|f\rangle\langle f|\beta_\pm(\mu)|i\rangle$$

$$= \sum_{\mu}\langle i|\beta_\pm^+(\mu)\beta_\pm(\mu)|i\rangle$$



$$S_-(GT) - S_+(GT) = \sum_{\mu}\langle i|\beta_-^+(\mu)\beta_-(\mu) - \beta_+^+(\mu)\beta_+(\mu)|i\rangle$$

$$= \frac{1}{4}\langle i|\sum_{k=1}^{A}\sum_{\mu=-1}^{+1}[\sigma_{\mu k}^+\tau_{+k}\sigma_{\mu k}\tau_{-k} - \sigma_{\mu k}^+\tau_{-k}\sigma_{\mu k}\tau_{+k}]|i\rangle$$

$$= \frac{1}{4}\langle i|\sum_{k=1}^{A}[\sigma_{\mu k}^2\tau_{+k}\tau_{-k} - \sigma_{\mu k}^2\tau_{-k}\tau_{+k}]|i\rangle$$

$$= \frac{3}{4}\langle i|\sum_{k=1}^{A}[\tau_{+k}\tau_{-k} - \tau_{-k}\tau_{+k}]|i\rangle$$

$$\tau_+\tau_-|n\rangle = 4|n\rangle$$
$$\tau_-\tau_+|p\rangle = 4|p\rangle$$
$$\tau_+\tau_-|p\rangle = 0$$
$$\tau_-\tau_+|n\rangle = 0$$

$$S_-(GT) - S_+(GT) = \frac{3}{4}\times 4(N-Z) = 3(N-Z)$$

モデルに依存しない！
非常に重要な和則

この章のまとめ

- 核内相関　g'+π+ρ　モデル　　スピン・荷電スピン応答
- LMパラメータ　g'　の重要性
- ベータ崩壊（FとGT遷移）　（△S=0,1、△ T=1、△ L=0）
- スピン和則　　GT: 3(N-z)　　F: (N-Z)

次章は荷電交換反応