



ガモフ・テラー遷移強度とクエンチング (Gamow-Teller strength and its quenching)
若狭 智嗣 (九州大学大学院理学研究院)

原子核の主要な崩壊形式の1つであるベータ崩壊は弱い相互作用により引き起こされます。代表的なガモフ・テラー型の場合、その演算子にパウリのスピン行列とそれを荷電スピンの拡張したものの両方が含まれますので、スピン・荷電スピン両空間での反転と考える事ができます。一般に親核(始状態)にこのガモフ・テラー遷移演算子を作用させた場合、色々なエネルギー固有値を持った状態が考えられますが、実際にベータ崩壊で観測されるものは、エネルギー保存により娘核(終状態)のエネルギーが親核より低い場合に限られます。この限られた領域におけるベータ崩壊の強度分布は原子核の多様性をまさに反映しますが、このような多様な現象を統一的に理解する為には保存則が役立ちます。ここで考えるガモフ・テラー遷移演算子に対しては、その遷移強度に対して池田の和則と呼ばれる保存則がありますが、これはベータ崩壊が許されるエネルギー領域だけでなく全てのエネルギー領域の積分値に対する保存則です。実際に中重核以降の原子核に対して保存則を検証してみると、期待される遷移強度のごく僅かしかベータ崩壊では観測されないことが分かりました。このことから、ベータ崩壊で許されるエネルギー領域より上に保存則から期待される遷移強度の大部分を有する共鳴状態(ガモフ・テラー巨大共鳴)が存在することが、1963年に池田、藤井、藤田によって予言されました。

ベータ崩壊が許されないエネルギー領域の遷移強度を実験的に研究するためには、 (p, n) 反応などの荷電スピン反転型反応によりエネルギーを持ち込んで励起する必要があります。理論が提唱された1960年代は実験に適した中間エネルギー陽子加速器や中性子検出器が存在しませんでした。1970年代に入り実験技術の進歩と共にミシガン大学及びインディアナ大学のグループによりガモフ・テラー巨大共鳴が発見されその存在が確立しました。その遷移強度は巨大共鳴と呼ぶに相応しい大きさで理論の予測を裏付けるものでしたが、保存則を満たすには不十分(保存則の約半分にクエンチング(減少)している)であったため、「ガモフ・テラー遷移強度のクエンチング」という新たな問題を提起しました。このクエンチング問題に対する解釈として大きく分けて以下の2つが考えられました。

保存則の前提が間違っている 保存則は核子を内部構造の無い粒子として扱っていますが、実際にはデルタ粒子等への内部励起の自由度(クオーク自由度)が存在します。この自由度を考慮すると、1粒子1空孔状態で表されるガモフ・テラー状態が1デルタ粒子・1空孔状態と結合し、遷移強度が励起エネルギー 300 MeV のデルタ励起領域に移動する可能性があります。

積分領域が不十分 1粒子1空孔状態で表されるガモフ・テラー状態が、配位混合により2粒子2空孔状態のような複雑な状態と混ざり合うことが考えられます。この場合、ガモフ・テラー遷移強度が共鳴領域より高い励起エネルギー 50 MeV 位まで分散移動している可能性があります。

この両者の理論・実験両面での研究の歴史は極めて興味深いものがありますが、詳しくは鈴木と池田や有馬による物理学会誌の解説記事 [1,2] や最近のレビューを参照ください。

クエンチング問題を解決するには、結局は「失われたガモフ・テラー遷移強度がどこにあるのか？」という問いに答える必要があります。いずれの解釈の場合も、失われた遷移強度は共鳴領域より高い励起エネルギー領域に存在しますが、励起エネルギーの増大と共に運動量移行も大きくなるため、軌道角運動量移行を伴うガモフ・テラー遷移以外の遷移が物理的バックグラウンドとなります。従って、この物理的バックグラウンドからガモフ・テラー遷移のみを抽出する必要がある訳ですが、これは遷移強度の角度（運動量移行）依存性が軌道角運動量移行毎に異なることを利用すると実験的に可能であり、これを多重極展開法といいます。多重極展開法を簡単に説明すると、まず各軌道角運動量移行の遷移強度を互いに1次独立な基底と考え、実験で得られる遷移強度はそれらの線形結合和であるとしてします。そして、基底の直交性（互いに1次独立であること）を利用して、軌道角運動量移行が0であるガモフ・テラー遷移強度のみを抽出します。この手法は、まず筆者らによりベータ・マイナス側である $^{90}\text{Zr}(p,n)^{90}\text{Nb}$ 反応に適用され、後に矢向らによりベータ・プラス側である $^{90}\text{Zr}(n,p)^{90}\text{Y}$ 反応を含めた統一的解析がなされました。結果、励起エネルギーが50 MeVまでの領域に和則値の約90%の遷移強度が見つかり、失われた遷移強度は主に配位混合により分散移動している事が明らかにされました。しかしながら、この時点では系統誤差が16%存在したため、クオーク自由度の寄与の定量的理解には至りませんでした。

系統誤差が16%と大きな値になってしまった最大の要因は、実験値である断面積と求めるべきガモフ・テラー遷移強度を結びつけている比例係数（ガモフ・テラー単位断面積）の不定性にありました。この比例係数は、遷移強度がベータ崩壊から既知の状態に対する断面積を測定することにより精度良く求める事が出来ます。そこで筆者らのグループがベータ崩壊が既知の状態を分離するのに十分な分解能を持った中性子検出器を開発・整備し、それを用いて笹野らが測定・解析を行った結果、系統誤差を5%にまで小さくすることに成功しました。最新の値は、和則値に対して 92 ± 6 (統計誤差) ± 5 (系統誤差) %が励起エネルギー 50 MeV までで尽くされているというものです。

ガモフ・テラー巨大共鳴はスピンと荷電スピン自由度が両方関与する最も基本的な共鳴モードですが、同様のものに「荷電ベクトル・スピン単極巨大共鳴」や「二重ガモフ・テラー巨大共鳴」があります。これらの共鳴モードの励起エネルギーは、ガモフ・テラー巨大共鳴より大きいと想定されます。残念ながら、 (p,n) 等の核子を用いた反応では励起エネルギーの増大と共に運動量移行が大きくなり、運動量移行0で定義されるこれらの共鳴モードが十分な精度で研究出来ません。しかしながら、不安定核ビームを用いた発熱型反応では運動量移行0でエネルギーを持ち込む事が可能であるため、この問題を克服することが出来ます。現在、酒井らのグループにより特別推進研究「発熱型荷電交換反応による時間的領域でのスピン・アイソスピン応答」が推進中で、RIBFからの不安定核ビームを用いた発熱型反応による研究が始まろうとしています。また、不安定核は安定核に比べてベータ崩壊が許されるエネルギー領域が一般に広いため、安定核の場合には核反応に依るしか無かった高い励起エネルギーの領域へのガモフ・テラー遷移強度分布を直接ベータ崩壊により観測する事が出来ます。

このように、ガモフ・テラー遷移強度のクエンチング問題は、実験・理論両方の側面で日本のグループが大きな役割を担ってきましたが、これからも新しい実験施設においてスピン・荷電スピン自由度に関する研究が不安定核を用いて更に発展することが期待されます。

[1] 鈴木敏男、池田清美：日本物理学会誌 37 (1982) 664.

[2] 有馬朗人：日本物理学会誌 51 (1996) 706.