

内99-66

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

新しい方策による原子核質量公式の作成
Construction of a nuclear mass formula
by means of a new strategy

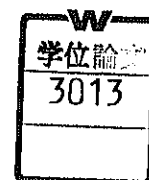
申請者

小浦 寛之

Hiroyuki Koura

物理学及应用物理学専攻 理論核物理学研究

2000年 1月



理 2499 (3013)

原子核の質量を陽子数 Z および中性子数 N の関数として表したものを原子核質量公式という。原子核質量公式は原子核物理や関連した科学技術の分野において非常に重要であり、それを作成するために、長い年月にわたり多くの人々の努力が捧げられてきたが、あらゆる点で満足できる質量公式はまだ得られていない。

質量公式の作成法としてはいくつかのものが考えられるが、そのひとつとして、原子核の質量を以下に示すような2つの部分から成るとする方法がある。その第一の部分は質量の一般的傾向を Z と N の関数として表すものであり、第二の部分はこの一般的傾向からのずれを表すものである。前者は原子核を液滴模型などで扱うことによりかなりよく説明できる。一方後者は広義の殻エネルギーと呼べるものである。なぜならこれは、変形核では平均的変形エネルギーからの寄与も含むが、本質的には殻構造に因るものだからである。この殻エネルギーを得るための一つの方法として、経験的に質量の実験値から推定するものがある。例えば宇野・山田の定数型殻項や、橘・宇野・山田・山田の経験的殻項はこの方法で求められた。この後者を用いた橘らによる質量公式（これをTUYY質量公式と呼ぶ）は、大局的部分、平均的偶奇部分、および殻部分から成るもので、原子核の質量を見積もるのにかなりの成功を収めている。ところで、この方法で得られた質量公式はおよそ300のパラメータをもち、それらを既知の質量の実験値をなるべく良く再現するように決めているが、比較すべき実験値がまだ存在しないような超重核の領域にまでは外挿できない等の問題点を抱えている。そこで本論文では、新しいモデルで原子核の殻エネルギーを求め、それを用いた原子核質量公式の作成を行った。

本論文における質量公式作成の大きな特徴は、変形核の殻エネルギーの新しい計算法である。変形原子核を扱う方法としては、変形単一粒子ポテンシャルを仮定し、その中に詰めた核子のエネルギーの和から殻エネルギーを抽出するというものがある。この方法は自然であるが、非常に長い計算時間を必要とするので、変形ポテンシャルの最善の形を探すのはかなり困難である。本論文ではこの困難を、球形単一粒子ポテンシャルのみを用いて変形原子核を扱うという新しい方法を考案することにより回避する。

本論文は以下の7章から構成されている。

第1章は序論であり、原子核質量の研究の歴史を概観し、本研究に導いた背景が述べられている。

第2章から第5章までが本論文の中心的部分で、質量公式作成の手順が説明され、得られた公式が提示される。

第2章では球形原子核に対する単一粒子ポテンシャルを新たに作成する。この単一粒子ポテンシャルは、 ${}^4\text{He}$ 、 ${}^8\text{He}$ から ${}^{208}\text{Pb}$ までの広い核種領域にある15種類の2重魔法核種または魔法-準魔法核種の単一粒子準位を魔法性の強さに応じた良い精度で再現する。とくに魔法性の強い ${}^{132}\text{Sn}$ と ${}^{208}\text{Pb}$ では精度の高い一致を見せる。

この単一粒子ポテンシャルの広範囲の適用性により、非常に軽い核までの殻エネルギーをかなりの精度で得ることができると期待される。このポテンシャルの中心力成分は、この種の計算でしばしば用いられるWoods-Saxon型ポテンシャルに比べて2つの新しいパラメータを含む5パラメータの関数とする。これらのパラメータおよびスピン・軌道力成分におけるパラメータはそれぞれ、 Z と N の滑らかな関数であり、したがって任意の核種に適用できて、その“球形の”単一粒子準位を得ることが可能となる。また、原子核内の陽子のクーロンエネルギーが純粋な単一粒子状態のものとして表しきれないことを考慮して、陽子が一時的に複雑な運動に移ることによるクーロンエネルギーの補正を行う。

第3章では、球形単一粒子準位を用いて球形殻エネルギーを中性子グループと陽子グループそれぞれに対して計算する。以下、説明は中性子グループについて行うが、陽子グループについてもほとんど同様である。陽子数 Z 、中性子数 N の単一粒子ポテンシャルの中へ n 個の中性子を低い準位から順に詰めていき、詰まった全中性子のエネルギーの和を n の関数と見ると、それは滑らかな関数ではなくて、殻構造が表れる。とくに殻エネルギーだけを抽出するために、このエネルギーの和から、詰めた中性子の個数 n およびポテンシャルを決める陽子数 Z と中性子数 N の滑らかな関数を引き去る。引き去りは2段階に行う。まず、全エネルギーの中のかなりの部分をThomas-Fermiエネルギーで引き去る。次にまだ引き去りきれない残りのエネルギーを、やはり n 、 Z 、 N の滑らかな関数で最小2乗法により引き去る。このような方法によって得られた球形殻エネルギーにBCS型対相関相互作用を考慮して修正を加え、さらにこの対相関には含まれていない配位混合の効果想定して殻エネルギーを現象論的に縮小させる。こうして得られた中性子、陽子それぞれの球形殻エネルギーは、原子核全体の殻エネルギーを計算するための材料となるが、とくに球形原子核の殻エネルギーは簡単にそれら2種の殻エネルギーの和として表される。

第4章では変形原子核の殻エネルギーを新しい方法で計算する。球形原子核の場合と同様に、もし変形原子核の形状が与えられた場合（ただし大きさは Z と N によって変わる）、そのような原子核の基底状態の質量は一般的傾向とそれからのずれから成るであろう。前者は Z と N のある滑らかな関数で表され、また後者は変形殻構造によるもので、ここではintrinsicな殻エネルギーと呼ぶことにする。ところで、前者は球形核の質量の一般的傾向とは異なっており、その差は平均変形エネルギーと呼ぶべきものである。平均変形エネルギーとintrinsicな殻エネルギーの和が、ある形状を与えたときの殻エネルギーとなる。そして、基底状態の殻エネルギーは、いろいろな変形を考えたときの殻エネルギーの最小値であり、この最小化によって基底状態の形状も定まる。

変形原子核のintrinsicな殻エネルギーを得るために、変形原子核をいくつかの球形核の部分を重ね合わせたものと見る。すなわち、変形原子核のintrinsicな殻エネ

ルギーを球形原子核の殻エネルギーの重ね合わせと仮定するのである。この重ね合わせの構成要素となる球形原子核としては、その内部の密度が非一様である可能性も含めた扱いをする。

本論文では変形を比較的単純な形状に限定する。つまり、軸対称で反転対称な形状をとり、中性子グループと陽子グループに対して同じ形状を仮定する。核の表面はsharp-cutとし、内部では中性子と陽子はそれぞれ一様に分布しているとする。平均変形エネルギーへの寄与として、3種類のエネルギーを考える。それは表面エネルギー、クーロンエネルギー、およびprolateな形を好むようなエネルギーである。この3番目のエネルギーは、通常はあからさまには考慮されないが、本論文では、実験的に観測されているprolate変形の優勢さを現象論的に扱うために、平均変形エネルギーに寄与するもののひとつとした。

第5章では、原子核質量の一般的性質を表す関数に殻エネルギーを加えることによって、質量公式を構築する。本論文の質量公式は、TUYY公式と同様に、大局的部分、平均的偶奇部分、および殻部分から成る。大局的部分および平均的偶奇項に含まれるパラメータは現在までに測定された質量の実験値を参考にして定める。この実験値としてAudi-Wapstraの95年版の表を用いる。こうして得られた質量公式は、適用範囲が $Z \geq 2$, $N \geq 2$ から $Z \leq 130$, $N \leq 200$ と広く（原理的にはさらに重い原子核まで計算可能）、 ^{208}Pb の次の2重魔法核までを十分含むような核種領域である。また、質量の実験値からの2乗平均誤差は680keVであり、最近発表された他の質量公式と比べても同等または幾分小さい値となっている。

第6章で議論を行う。前章で質量公式の大局的項のパラメータを定める際に、質量の実験値を参考にしたが、その入力データの量や性質により、パラメータや実験値との合い方がどう変わるかを調べた。この調査により、目的によってはAudi-Wapstraの95年度版以外に入力データを用いた方がより有利であることが示唆された。次いで、計算で用いた球形ポテンシャルについて、そのパラメータの組の違いによる質量公式への影響に触れた。また、第4章で行った変形原子核の殻エネルギーの計算に含まれている物理的意義を論じた。さらに、殻エネルギーを特徴づける物理量のひとつとして、本論文では扱わなかった原子核の振動の効果に触れ、それを考慮した場合の質量公式の改善の可能性を述べた。

第7章をまとめとし、第2章から第6章までの内容を要約し、今後の研究課題を指摘した。

最後に付録として表を用意した。そこには $2 \leq Z \leq 130$, $2 \leq N \leq 200$ の原子核に対して、質量超過（原子質量から原子質量単位の質量数倍を引いたもの）、変形パラメータ α_2 , α_4 , α_6 , 殻エネルギー、アルファ崩壊とベータ崩壊のQ値、中性子と陽子の分離エネルギー、そしてもし存在すれば質量超過の実験値を載せてある。