

論文内容要旨

第1章 緒 論

原子核反応はいくつかの点で化学反応とは異っている。化学反応は原子ないしは分子間の反応であり主要な役割は電子によって演じられ、電子を媒介とする結合エネルギーの問題と考えられるが、原子核反応は中間子を媒介とする核子間の結合エネルギーが本質的な役割をはたしている。それ故、原子核反応は一般には化学反応より約 10^6 倍高いエネルギーを要することになり、東北大学理学部原子核理学研究施設附置の 300 MeV 電子線型加速器を主として用いて本実験は行なわれた。この加速器で得られた高速の電子を白金やタンタルのような重金属コンバーターで制動輻射に転換し、この制動輻射をターゲット試料に照射することによって原子核反応の 1 種である光核反応がおこる。光核反応の放射性残留核を測定し、その生成量に関する基礎検討を行なうことにより、従来不足していた照射エネルギーの選択を可能にするデータを提供することを目的とした。すなわち、10MeV から 250MeV までの制動輻射で軽核から重核までのターゲット試料を照射し、 (γ, n) 反応および多粒子放出反応を主とした多くの光核反応収率の照射エネルギー依存性を求め、また、光核反応機構に関して若干の考察を行ない、その詳細を第 2 章から第 8 章までの各章に記述した。

第2章 低エネルギー領域の (γ, n) 反応の収率

光核反応の収率が一般に高い (γ, n) 反応に関してその照射エネルギー依存性を求め、放射化分析あるいは RI 製造において従来不足していた照射エネルギーの選択に関しての考慮を可能にした。

照射エネルギーとしては 10MeV, 13MeV, 16MeV, 30MeV, 45MeV および 68MeV の制動輻射を用い、ターゲット元素としては主として単一天然同位体組成の元素を選び、照射実験を行なった。照射後のターゲット試料は γ 線スペクトロメトリーによって (γ, n) 反応残留核を確認し、定立体角法によって目的残留核の絶対生成量を求め、既に核反応の絶対収率が求められている $^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$ 反応を基準にして各ターゲット試料毎の照射線量を算出し、 (γ, n) 反応の収率を求めた。16MeV 以下のエネルギー領域では $^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$ 反応の代りに $^{203}\text{Tl}(\gamma, n)^{202}\text{Tl}$ 反応を用いて照射線量を算出し、 (γ, n) 反応の収率を求めた。また、参考のために既に求められた 20MeV 制動輻射で照射した場合の (γ, n) 反応の収率も併記した。その結果、20MeV 付近までは (γ, n) 反応の収率は急激に増加するが、30MeV から 68MeV の間ではその増加傾向はゆるやかである。30MeV ~ 68MeV 制動輻射の照射により (γ, n) 反応の収率は軽核では $\sim 10^{-27} \text{ cm}^2$ 、中核では $\sim 10^{-28} \text{ cm}^2$ 、重核では $\sim 10^{-29} \text{ cm}^2$ となった。

本実験で得られた (γ, n) 反応の収率と従来の放出中性子直接測定法により求められたデータと比較したところ、軽核と重核では良く一致したが、中核ではあまり一致が良くはなかった。

第3章 ^{24}Na を生成する光核反応

低エネルギーから高エネルギーまでの光量子照射による多粒子放出反応の研究を行なうことを目的として、ターゲット元素はマグネシウム、アルミニウム、ケイ素、リン、イオウ、塩素、カリウム、カル

シウムおよびスカンジウムを選び、 ^{24}Na を生成する光核反応の収率を20MeVから250MeVまでのエネルギー範囲で制動輻射による照射実験を行なって求めた。それぞれの光核反応のしきい値を求め、得られた光核反応の収率とから核反応の経路を調べた結果、陽子および中性子の放出以外に α 粒子等の複合粒子の放出を伴う光核反応もその核反応経路に含まれることがわかった。

$^{27}\text{Al} \rightarrow ^{24}\text{Na}$ 反応、 $^{28}\text{Si} \rightarrow ^{24}\text{Na}$ 反応、 $^{31}\text{P} \rightarrow ^{24}\text{Na}$ 反応および $^{32}\text{S} \rightarrow ^{24}\text{Na}$ 反応の収率曲線から反応断面積をPenfold - Leissの方法に従って計算により求めた。 $^{27}\text{Al} \rightarrow ^{24}\text{Na}$ 反応、 $^{28}\text{Si} \rightarrow ^{24}\text{Na}$ 反応および $^{31}\text{P} \rightarrow ^{24}\text{Na}$ 反応の断面積曲線において50MeV~70MeVのエネルギー領域にピークが示され、70MeVから150MeVまでの間で断面積値はさほど増加しないが、150MeVから250MeVまでの間でその増加傾向はやや著しい。反応断面積曲線で認められたピークは反跳法による簡易な角度分布の測定から、複合核過程により残留核に導かれたものによるとみなした。

70MeVから150MeVのエネルギー領域では偽重陽子過程により ^{24}Na が生成するものと考えられ、150MeVから250MeVのエネルギー領域では偽重陽子過程と光パイオン生成過程とは競争状態にあり、両反応機構により ^{24}Na に導かれるものと思われる。

第4章 ^{28}Mg を生成する光核反応

陽子のみが放出される多粒子放出反応の収率を求めるためにターゲット元素をケイ素、リン、イオウ塩素、カリウムおよびカルシウムとし、30MeVから250MeVまでのエネルギー範囲で制動輻射による照射実験を行なった。各ターゲット核種から ^{28}Mg を生成する光核反応の収率を求め、さらに $^{30}\text{Si}(\gamma, 2p)^{28}\text{Mg}$ 反応、 $^{31}\text{P}(\gamma, 3p)^{28}\text{Mg}$ 反応および $^{32}\text{S}(\gamma, 4p)^{28}\text{Mg}$ 反応の断面積を算出した。 $^{30}\text{Si}(\gamma, 2p)^{28}\text{Mg}$ 反応と $^{31}\text{P}(\gamma, 3p)^{28}\text{Mg}$ 反応の収率曲線においても50MeV~70MeVのエネルギー領域にピークが示され、これも複合核過程によるものと思われる。70MeVから150MeVのエネルギー領域では陽子のみ放出されて ^{28}Mg を生成する核反応断面積は ^{24}Na を生成する核反応断面積に比してかなり小さい値であった。150MeVから250MeVのエネルギー領域では偽重陽子過程の他に光パイオン生成過程も加わるために核反応断面積はより高い値となる。30MeVから70MeVの間での収率の増加傾向は著しいが、偽重陽過程あるいは光パイオン生成過程等のカスケード過程が寄与するエネルギー領域での収率はあまり急激に増加しない。

第5章 ^{22}Na を生成する光核反応

軽核領域での多粒子放出反応の研究として光核反応と陽子照射による核反応との比較を行ない、異なる核反応間の差異を見る目的で照射実験を行なった。 ^{22}Na を生成する光核反応の収率を30MeVから250MeVにわたって求め、 $^{24}\text{Mg} \rightarrow ^{22}\text{Na}$ 反応、 $^{27}\text{Al} \rightarrow ^{22}\text{Na}$ 反応および $^{28}\text{Si} \rightarrow ^{22}\text{Na}$ 反応は断面積を算出した。

100MeV以上の照射エネルギーでは核反応は主としてカスケード-蒸発過程によっておこるが、陽子の運動量は光量子のそれに比してかなり大きいために本実験で得られた光核反応断面積値より既に報告されている陽子照射による断面積値の方が約20倍高い値を示した。

第6章 ^{97}Ru を生成する光核反応の収率

第3章から第5章までは軽核領域での多粒子放出反応の収率を求めたが、同様に中重核領域での多粒子放出反応の収率を求める目的で ^{97}Ru を生成する光核反応の収率を求めた。ターゲット元素としてはパラジウム、銀、カドミウム、インジウムおよびアンチモンとし、150 MeV、200 MeVおよび250 MeV制動輻射で照射を行なった。用いた元素は単一同位体組成の元素ではないが、光核反応の収率を求め、その大略の傾向を調べる上で支障はないと考えた。得られた多粒子放出光核反応の収率は (γ, n) 反応の収率と比較するとかなり低く、250 MeV制動輻射照射による場合でもそれぞれの多粒子放出反応の収率は $^{98}\text{Ru}(\gamma, n)^{97}\text{Ru}$ 反応に比して約 $1/10^2$ 以下であり、より低エネルギー照射の場合はさらに収率は低い値となる。

第7章 モリブデンの光核反応の収率

前章の中重核領域での多粒子放出反応の収率に続いて同じく中重核領域での単純反応の収率を求めることを目的として、モリブデンをターゲット元素とし、 $^{98}\text{Mo}(\gamma, p)^{97}\text{Nb}$ 反応および $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反応の収率の照射エネルギー依存性を求めた。照射は30 MeVから250 MeVまでの制動輻射で行なった。従来は低エネルギー領域でのモリブデンターゲットからの光核反応収率あるいは断面積が報告されているが、高エネルギー領域でのデータは非常に少ない。 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反応の収率は30 MeVから250 MeVの間においてはあまり増加しないが、 $^{98}\text{Mo}(\gamma, p)^{97}\text{Nb}$ 反応の収率は照射エネルギーの増加と共にやや増加する。

第8章 高エネルギー領域の光核反応の積分断面積

光核反応の巨大共鳴現象を説明するためにGoldhaberとTellerが双極子模型を提案し、その後、Levingerら、Gell-MannらあるいはDohnertらが光量子を吸収した原子核内の集団的な運動の終状態について加え合わせて積分断面積を求める式を得ている。しかし、これらの原子核の励起状態に関する理論的な式の実験的証明としての光核反応の最終的生成物である全残留核の生成量を求める実験は従来はほとんど行なわれていない。それ故、軽核のナトリウム、中核のコバルト、中重核のヨウ素および重核の金を250 MeV制動輻射で照射してその (γ, n) 反応収率を求め、さらに (γ, p) 反応、 (γ, xn) 反応($x=2,3,\dots$)、 (γ, xpy_n) 反応($x, y=1,2,3,\dots$)の収率を第3章から第7章までの実験結果および文献値から求め、これらの収率値を加算することにより全光核反応の収率とみなしうる値を得た。

同様にして68 MeV制動輻射の照射による全光核反応収率値がみつもられた。これらの値は $^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$ 反応を基準にして積分断面積に換算し、理論式から得られた積分断面積と比較すると、中核領域ではかなり良く一致した。軽核領域では理論値の方が実験値よりやや高い値を示し、この領域では巨大共鳴領域以降のかなり高いエネルギー領域まで電気双極子遷移等によって励起される状態がまだ存在していると思われる。中重核領域および重核領域においては実験値の方が理論値より高い値を示し、この領域ではカスケード過程等の寄与が少なくないものと思われる。

論文審査結果の要旨

光核反応の収率あるいは断面積のエネルギー依存性に関する研究結果は原子核の諸性質や核反応機構を解明する上に重要な知見を与えるものである。かゝる研究は核物理学の分野では主として反応過程で放出される粒子や γ 線を測定する方法で行なわれている。しかし、種々の核反応が複雑に競合するような条件下に着目した核反応の収率を放出粒子や γ 線測定法のみによって求めることは困難な場合が多い。このような場合、残留核測定法は有利な手段となる。必要に応じて化学的分離法を併用すればさらに効果は上がる。とくに、照射 γ 線のエネルギーが数100MeVにも及ぶ領域では核破砕型の反応が起り、結果は一層複雑なものとなるから、本法は極めて有利な手段となる。

斎藤達弥はこの点に着目し、東北大学理学部の300MeV電子線型加速器を利用し、光核反応のしきいエネルギーに相当する10MeV附近から250MeVまでの間で最大エネルギーを変化させた制動輻射 γ 線で種々のターゲット核を照射して残留核法による光核反応収率の照射エネルギー依存性の研究を行ない多くの励起関数を求めた。また、核光電効果や高エネルギー核反応機構に関するモデルを引用しつつ結果を解釈しようと努力した。

第1章緒論に続いて第2章では (γ, n) 反応に着目して、その収率の照射エネルギー依存性を検討した。すなわち、軽核から重核に至る広い質量数領域のターゲット核を選んで70MeV附近までの収率を求め、従来、放出中性子測定法で求められていた結果と比較検討した。

第3章から第5章までは軽核における多粒子放出反応を研究した。第3章では ^{24}Na を生成する光核反応をとりあげマグネシウムからスカンジウムまでの9元素をターゲットとして250MeVまでのエネルギー範囲でそれぞれの励起関数を求めた。いずれの場合にも50～70MeVにピークを示し、以後エネルギーの増加と共に反応断面積は増加した。このピークは反跳法による角度分布の測定から複合核過程に起因するものとみなし、以後の増加には偽重陽子過程と光パイオン生成過程が寄与すると推定した。

第4章では ^{28}Mg を生成する $(\gamma, \alpha p)$ 反応について、第5章で ^{22}Na を生成する光核反応について同様の実験と考察を行なった。

第6章では中重核領域の ^{97}Ru を対象とし、パラジウムからアンチモンまでのターゲット元素からの収率の照射エネルギー依存性を調べた。

第7章は $^{98}\text{Mo}(\gamma, p)^{97}\text{Nb}$ および $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反応の収率を250MeVまでのエネルギー領域で求めたものであるが、前者のエネルギー依存性は後者に比べて著しいという結果を得、これは前者に直接反応過程の寄与が著しいことによると論じた。

第8章ではこれまでに得た結果をもとに250MeV制動輻射で種々のターゲット元素を照射した場合の積分断面積を求め、Levingerら、Gell-mannら、あるいはDohnertらによる理論式から算出した値と比較し、断面積に対する統計過程と直接過程の寄与の割合を論じた。

以上のように斎藤達弥は光核反応収率の照射エネルギー依存性の問題と熱心に取組み、注目すべき多くの成果を得たので論文審査担当者は斎藤達弥提出の論文を理学博士の学位論文として合格と認めた。