

Radiochemical Yield Measurements of Photopion Reactions on Light and Medium-Heavy Nuclei : with a Special Emphasis on Rare-Gas Producing Reactions

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/15954

氏名	大浦泰嗣
生年月日	
本籍	石川県
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博甲第127号
学位授与の日付	平成7年3月25日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	軽核及び中重核の π^\pm 中間子生成光核反応の放射化学的収率測定 —希ガス同位体生成反応を中心にして— (Radiochemical Yield Measurements of Photopion Reactions on Light and Medium-Heavy Nuclei with a Special Emphasis on Rare Gas Producing Reactions)
論文審査委員	(主査) 坂本 浩 (副査) 中西 孝, 上野 馨 小村 和久, 藤原 一郎

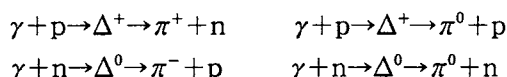
学位論文要旨

Abstract The radiochemical yield measurements of (γ, π^-) reactions on ${}^7\text{Li}$, ${}^{11}\text{B}$, ${}^{14}\text{N}$, ${}^{18}\text{O}$, ${}^{44}\text{Ca}$, ${}^{65}\text{Cu}$, ${}^{88}\text{Sr}$, and ${}^{130}\text{Te}$, (γ, π^-xn) reactions on ${}^{59}\text{Co}$ ($x=2$ and 3) and ${}^{127}\text{I}$ ($x=0, 2, 4, 5$, and 6), and (γ, π^+) reactions on ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{37}\text{Cl}$, ${}^{41}\text{K}$, ${}^{59}\text{Co}$, ${}^{87}\text{Rb}$, ${}^{88}\text{Sr}$, ${}^{133}\text{Cs}$, ${}^{138}\text{Ba}$, and ${}^{181}\text{Ta}$ induced by bremsstrahlung of end-point energy (E_0) from 50 to 1200 MeV in step of 100 MeV or less are reported. Special R&D for the experimental method were performed for the reactions producing rare gas isotopes and other short-lived isotopes. The results were compared with those obtained in our group and reported in the literature and also with a Photon-Induced Cascade Analysis code (PICA) and discussed in terms of E_0 , A_t (target mass number) and x dependences. Some new features of the variation of the yields of (γ, π^-xn) of $x \geq 0$ and (γ, π^+) as a function of the A_t were found; 1) The yield variations as a function of E_0 were confirmed to be characteristic of the $\Delta(1232)$ resonance, but the peak energy and width are somewhat different from those expected from the photoabsorption by a single nucleon. 2) the yields of (γ, π^-) on targets of $A_t \geq 51$ and (γ, π^+) on targets of $A_t \geq 27$ are independent of A_t and the yield ratio of (γ, π^-) to (γ, π^+) is about 5, independent of E_0 . But the PICA calculation shows the ratio of 1.6. 3) the yields of (γ, π^-) on targets of $A_t < 51$ appear to decrease with decrease of A_t . 4) the (γ, π^-xn) reaction yields for $x \geq 1$ are strongly dependent on A_t and the maximum yield from a given target of $A_t \geq 100$ is observed at $x=3-4$ with appreciable yields even at x up to 9. 5) the sum of the yields of (γ, π^-xn) of $x \geq 0$ are also strongly dependent on A_t . Above $E_0=400$ MeV the yields from the targets of $A_t \leq 30$ appear to be proportional to $A_t^{2/3}$, but those from the targets of $30 \leq A_t \leq 160$ are proportional to A_t^2 , and the yields become constant for $A_t \geq 160$. From these features we conclude that the photopion reaction is not restricted to the surface region of the target

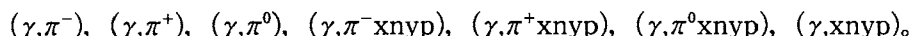
nuclei as deduced from the physical observations of emitted pions, but samples the entire nuclear volume in a more complicated way.

第1章 序

原子核と光子はそのエネルギーに特徴的な共鳴により相互作用することが知られている。140MeV以上のエネルギーを持つ光子が原子核内に入射すると核内の核子と共鳴的に相互作用を起こし π 中間子が生成が可能になる。原子核内では次の素反応により π 中間子が生成すると考えられている。



これらの反応については自由な核子については実験的にも理論的にも良く理解されている。しかし、複雑な原子核ではどのように Δ が生成し、さらにどのように振舞うかはまだ明らかになっていない。 Δ 粒子の壊変により生成した核子と π 中間子はどのようなのであろうか。核表面で Δ が生成すれば、両粒子、または一方のみが核外へ飛び出すことがあるであろう。核深部で Δ が生成した場合は、そのまま核外へ飛び出す場合もあるかもしれないが、ハドロンである核子と π は相互作用しやすく核内で再吸収されてしまうであろう。結局、 Δ の生成により以下の反応が生じると考えられる。



π は核深部から核外へ抜け出ることができるのか、それともすべて吸収されてしまうのか。核の表面からしか核外へでられないのであろうか。核の大きさ、つまり(表面積/体積)比を変えこれらの反応の断面積の変化を調べれば、 π の様子がわかると考えられる。物理的方法による π の測定によると核外に放出される π の微分断面積は、ターゲットの大きさの2/3乗に比例する。つまり、 π は核表面からのみ放出されること(表面反応)を示している。一方、全反応断面積を測定できる放射化学的方法による研究はこれまで散発的に行われてきたのにすぎず、系統的な研究がなされていない。放射化学的方法は物理的方法のように放出される π をすべて観測することはできないが、 π 放出に関与する反応ごとの内訳を全てではないが得ることができ、たいへん興味深い。そこで本研究では、希ガスを生成するターゲットを中心にLi~Taまで幅広くターゲットを選び (γ, π^+) 、 $(\gamma, \pi^- x n)$ 反応収率の測定を行い、ターゲットの大きさによる収率の変化を調べた。希ガス生成に関しては核破碎反応 $^{133}\text{Cs}(\gamma, p x n)^{132-x}\text{Xe}$ と $^{139}\text{La}(\gamma, 3 p x n)^{136-x}\text{Xe}$ の収率測定も行い知見を深めた。また、光核反応の計算コードであるPICAにより核反応の収率の計算も行い実験値と比較した。

第2章 実験方法

ターゲットには、 ^7Li 、 ^{11}B 、 ^{14}N 、 ^{18}O 、 ^{27}Al 、 ^{37}Cl 、 ^{41}K 、 ^{44}Ca 、 ^{59}Co 、 ^{65}Cu 、 ^{87}Rb 、 ^{88}Sr 、 ^{127}I 、 ^{130}Te 、 ^{133}Cs 、 ^{138}Ba 、 ^{181}Ta を用いた。斜体で示したターゲットは当研究室で予備的な結果が得られていたものである。本研究では、データの確認および補充の目的で再測定した。金属板または適当な試薬を加圧整形しペレットとしたものを東北大学原子核理学研究施設の300MeV電子ライナックおよび東京大学原子核研究所の1.3GeV電子シンクロトロンにより最大エネルギー(E_0)50~1200MeVの制動放射線照射した。照射後必要に応じて目的核種を化学分離した。希ガス同位体の分離にはガラス管で真空ラインを自作し、その中でターゲットを加熱熔融し、抽出された希ガスを液体窒素下の活性炭に吸着させた。化学分離した試料または照射したターゲットをそのまま γ 線スペクトロメトリーを行い、生成放射線量から反応収率を計算した。

第3章 実験結果

得られた反応収率をターゲットごとにエネルギー E_0 の関数として整理した。また、希ガスの捕集効率についての検討結果も示した。活性炭を2g用いて10分間捕集を行えば十分であることがわかった。

また、活性炭容器や非破壊照射試料からの希ガスの散逸は数カ月にわたって無視できる程度であることも確かめた。

第4章 エネルギー収率曲線

放射化学的方法による収率測定の際には、二次粒子反応による妨害が問題となる。二次粒子反応とは、ラジエーターやターゲット自身で光核破碎反応等により放出された陽子 (photoproton) または中性子 (photoneutron) により誘起される二次的な核反応である。ターゲット内で (p,x'n) 反応や (n,p) 反応が生ずると (γ,π^-xn) や (γ,π^+) 反応と同じ生成物を与え、収率を過大に見積もってしまう。そこで、photoproton と photoneutron のエネルギー分布を文献値より推定、低エネルギー部ではマクスウェル分布を仮定し、これに ALICE コードで計算した (p,n) 及び (n,p) 反応の励起関数をかけることにより二次粒子反応の収率を推定した。ALICE コードによる計算値と実験値を比較し、ALICE コードによる計算値の確かさを検討した。観測値からこの推定した二次粒子反応収率を差し引き正味の収率を得た。この正味の収率を E_0 に対し片対数グラフにプロットし(エネルギー収率曲線)、その変化の様子を調べた。収率はその反応のQ値付近より急激に立ち上がり 400~500MeV 以上ではほぼ一定となり、このエネルギー域にピークを持つ共鳴型を示すことを確かめた。このことより反応に寄与する光子は 140~400MeV が大部分であることがわかる。この傾向はどの反応でも同様であった。しかし、中性子放出を伴わない (γ,π^+) 、 (γ,π^-) 反応と、放出を伴う (γ,π^-xn) 反応で立ち上がり部からプラトー部への移る曲線の曲がり方に違いが見られた。 (γ,π^-xn) 反応は (γ,π^+) 、 (γ,π^-) 反応の場合よりも曲率がきつかった。本研究では行わなかったが、単色光子に対する励起関数に変換したときにピークエネルギーと半値幅に差が出てくると考えられる。つまり、いずれの反応も $\Delta(1232)$ 共鳴に特徴的といえる。PICA コードによる計算値と文献値を同時にプロットし比較した。計算との比較から水素核による $\gamma p \rightarrow \pi^+$ 、重水素核による $\gamma n \rightarrow \pi^-$ から期待されるピークエネルギーよりは高く、また幅も広く、それらは反応タイプによって変わる、即ち核内過程の違いを反映することがわかった。

第5章 生成核質量収率曲線

(γ,π^-xn) 反応について、ターゲットごとに放出中性子数 (x) に対して反応収率をプロットし(生成核質量収率曲線)、その変化を調べた。また、PICA コードによる計算値とも比較した。Fig.1 に $E_0=400\text{MeV}$ での実験値とPICAによる計算値を示した。丸が実験値で四角が計算値である。 $^{59}\text{Co}(\gamma,\pi^-xn)^{59-x}\text{Ni}(x=2,3)$ と $^{127}\text{I}(\gamma,\pi^-xn)^{127-x}\text{Xe}(x=0,2,4,5,6)$ 以外は当研究室で以前に求められた結果である。 ^{51}V ではxが増加するにつれて収率は激減する。ターゲットが大きくなり ^{89}Y になると $x=0$ よりも $x=1$ の方が収率が高くなり、収率の減少も緩やかとなる。さらにターゲットが大きくなると $x=2\sim 3$ で収率が最大となる。 ^{175}Lu 以上になると $x=3\sim 4$ で収率が最大になりxが増えても収率はあまり減少しなくなる。今回の $^{127}\text{I} \rightarrow ^{127-x}\text{Xe}$ の結果はこのような特徴と良く整合し、結論の確証度を高めたが、 $^{59}\text{Co} \rightarrow ^{59-x}\text{Ni}$ についてはxの変化に対する特徴は合うが、収率の値が異常に低く、今後の課題として残った。xが8あたりより大きくなると生成核の半減期が短くなり、一般的な放射化学的方法では測定が非常に困難であるが、中性子をいくつまで放出できるのか非常に興味を持たれる。PICA による計算値は概ね実験値を再現するが、 ^{127}I より重い標的核での $x \geq 6$ で過剰に収率が見積もられる傾向がある。この傾向は、 $E_0=250\text{MeV}$ ではもっとはっきり現れている。以上より、光子からターゲットに移行するエネルギーはターゲットの大きさに依存することが分かった。また、PICA コードは、重い核ほど残留励起エネルギーを実際よりも高く評価しているようである。

第6章 ターゲット質量収率曲線

$E_0=400\text{MeV}$ での A_t に対する (γ,π^-) と (γ,π^+) 反応の収率の変化をPICAによる計算値とともに Fig.2に示した。 (γ,π^-) 反応は $A_t \geq 51$ で、 (γ,π^+) 反応は $A_t \geq 27$ でその収率は A_t に依存せず一定にな

る傾向を示している。その加重平均は、($\mu\text{b}/\text{eq.q.}$)単位で、(γ, π^-)反応は 79 ± 7 、(γ, π^+)反応は 15 ± 2 である。 $E_0=800\text{MeV}$ では(γ, π^-)反応は 95 ± 8 、(γ, π^+)反応は 18 ± 2 で、 $E_0=250\text{MeV}$ では(γ, π^-)反応は 50 ± 5 、(γ, π^+)反応は 6.8 ± 1.0 であった。その収率比は $E_0=400\text{MeV}$ で 5.3 ± 0.8 、 $E_0=800\text{MeV}$ で 5.3 ± 0.7 、 $E_0=250\text{MeV}$ で 7.4 ± 1.3 である。PICAによる計算値は、(γ, π^-)反応で実験値の50%と低く、(γ, π^+)反応で実験値の2倍と大きく見積もられている。そのためその収率比は 1.6 ± 0.2 となり、実験値よりも小さく、ターゲットの中性子数と陽子数の比(平均1.3)に近い。この反応収率の大きな違いは、Sakamoto et al.(1990)により ^{51}V と ^{133}Cs の場合に見いだされていたが、本研究で一層確かなことがわかり、PICAコードでは考慮されていない新しい物理現象、例えば中性子と陽子の核内密度の違い、があることを示しているかもしれない。 $A_t < 51$ では A_t の減少とともに収率も減少する傾向があるようである。(γ, π^+)反応については $A_t < 27$ の領域で文献値の $^9\text{Be}(\gamma, \pi^+)^9\text{Li}$ しかないが類似の傾向はありそうである。

中性子の放出を伴う(γ, π^-xn)はFig.1からもわかるように、 x の大きい反応は大きい A_t でしか起こらず、それぞれ A_t の増加とともに収率は急増し、ある A_t 以上で一定となった。一定となる A_t は $x=1$ のとき約110で、 x の増加とともに大きくなっていく。この変化の様子は非常に系統性が良い。 $E_0=800\text{MeV}$ と 400MeV では同じ様な傾向を示したが、 $E_0=250\text{MeV}$ では一定とならずに減少した。PICAの計算はほぼ実験値を再現するが、 x が大きくなるに従い計算値は実験値よりも高く収率を見積もる。この傾向は $E_0=250\text{MeV}$ で著しい。

(γ, π^-xn)反応の $x=0\sim 9$ までの収率の和の A_t に対する変化を Fig.3に示した。収率は軽核では約2/3の傾きで増加しているようであるが、 $A_t=30$ 付近で傾きが約2に変わり、 $A_t=160$ からは一定となる。 $E_0=250\text{MeV}$ では $A_t=180$ を越えると収率は減少する。このことにより、(γ, π^-xn)反応は全質量領域で一様な反応機構が支配しているのではなく、軽核、中核、重核で異なっていると推察される。

第7章 結 論

本研究は、光 π 放出核反応の内、(γ, π^-xn)反応と(γ, π^+)反応の収率を広い A_t 域にわたって調べ、 A_t 依存性を初めて明らかにした。これは物理的方法では得ることができず、放射化学的方法を用いることにより成し得たことである。そして、従来物理的方法により得られていた原子核からの π の放出は表面反応であるという結果に対し、実は、もっと複雑な反応機構を持つ核反応の重畳した結果をみているであろうことをはじめて明らかにした。

なお、 ^{133}Cs と ^{139}La の核破碎の結果は本研究室のSarkar et al. (1991,1993)の結果と整合し、彼らの導いた経験式がうまく再現すること、また、 π^\pm の核内吸収が卓越し、 π^\pm 放出反応は全体の0.5~2%程度であることがわかったが、詳細の記述は省いた。

学位論文の審査結果の要旨

本論文に関し、各審査委員において予め個別に検討の上、2月1日の口頭発表の前後に審査委員会を開催し、協議の結果、次のように判定した。

本論文は、140MeV以上の光子エネルギーで起こる荷電 π 中間子放出核反応の放射化学的研究に関するものである。申請者は、残留核測定を行う化学的方法で識別可能な(γ, π^+)、(γ, π^-)及び(γ, π^-xn)、 $1 \leq x \leq 9$ の反応について、それぞれの反応断面積の光子エネルギー及び標的核質量(A_t)に対する依存性を実験的に詳しく調べ、所属グループ及び他の既報の結果と合わせて検討し、さらに光子誘導核内カスケード-蒸発モデルによる計算(PICA)を行って比較した。即ち、先ず希ガスを生成する ^{41}K 、 ^{87}Rb 、 ^{133}Cs の(γ, π^+)反応と $^{127}\text{I}(\gamma, \pi^-xn)$ 、 $x=0, 2, 4, 5, 6$ の反応収率を制動放射線最大エネルギー $E_0=30\sim 1200\text{MeV}$ の範囲で100MeV以下のステップで調べ、さらに ^{27}Al 、 ^{37}Cl 、

^{59}Co , ^{65}Cu , ^{88}Sr , ^{139}La , ^{181}Ta の (γ, π^+) 反応, ^7Li , ^{11}B , ^{14}N , ^{18}O , ^{44}Ca , ^{65}Cu , ^{88}Sr , ^{89}Y , ^{139}La , ^{175}Lu , ^{197}Au (γ, π^-) と A_t 範囲を拡大して新規に及び追加の測定を行い, また, これらと競合する光核破砕反応のうち $^{133}\text{Cs}(\gamma, \text{pxn})^{132-x}\text{Xe}$ ($x=1\sim 11$ の 7 核種) 及び $^{139}\text{La}(\gamma, 3\text{pxn})^{136-x}\text{Xe}$ ($x=7\sim 15$ の 6 核種) を調べた。その結果, 1) エネルギー依存性は $\Delta(1232)$ 共鳴に特徴的であるが, 単一核子共鳴とはピーク位置及び幅が異なること, 2) (γ, π^\pm) 反応の断面積は軽核で A_t 依存性があるが, $A_t \leq 30\sim 50$ で A_t に拘わらず一定であり, その比は計算の 1.6 とは異なり, E_0 によらず約 5 であること, 3) $(\gamma, \pi^- \text{xn})$ 反応では, A_t 及び x に対する強いかつ系統的な依存性があり, さらに全断面積は A_t に対しては 3 つの異なる変化が存在すること, 4) 核破砕反応については当グループの既報の結果と合わせてよいシステムaticsが存在し, 未知収率の評価に使えること, またこのチャンネルにも核励起の A_t 依存があること, など数々の新しい知見を明らかにし, PICA 計算及び放出粒子の物理測定との違いを基に, 原子核での $\Delta(1232)$ 共鳴に伴う核内過程に関する新しい示唆を導いた。

以上の成果は, 光核反応の研究に全く新しく重要な貢献であり, 本論文は博士の学位論文として十分に値するものである。

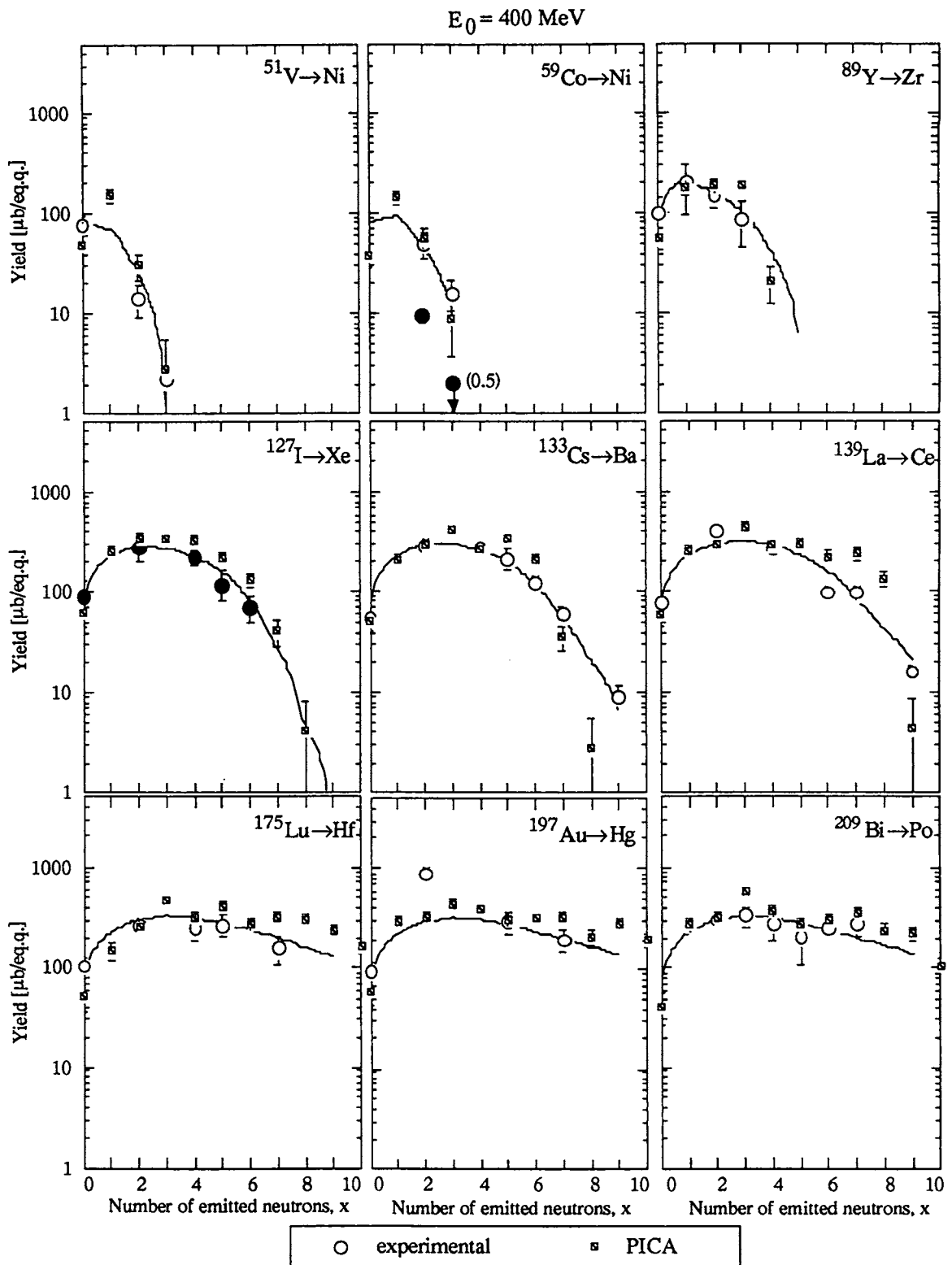
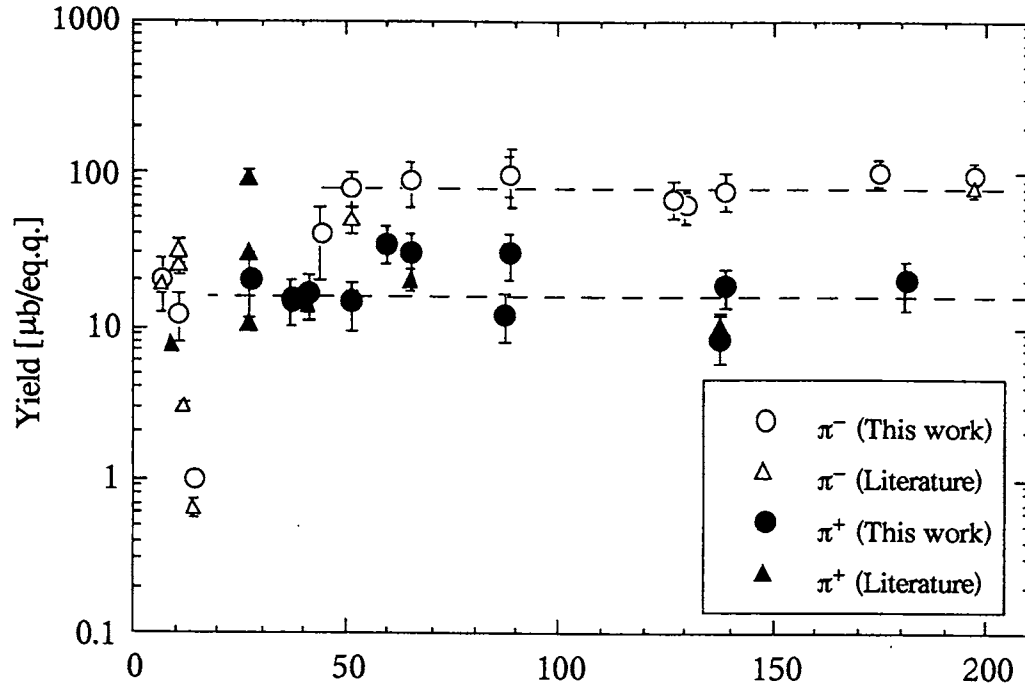


Fig.1 Comparison with the experimental yields(circles) and PICA calculation (squares) as a function of the number(x) of emitted neutrons at $E_0=400\text{MeV}$. The values in this work are shown by closed circles.

(a) $E_0=400\text{MeV}$ measured



(b) $E_0=400\text{MeV}$ PICA

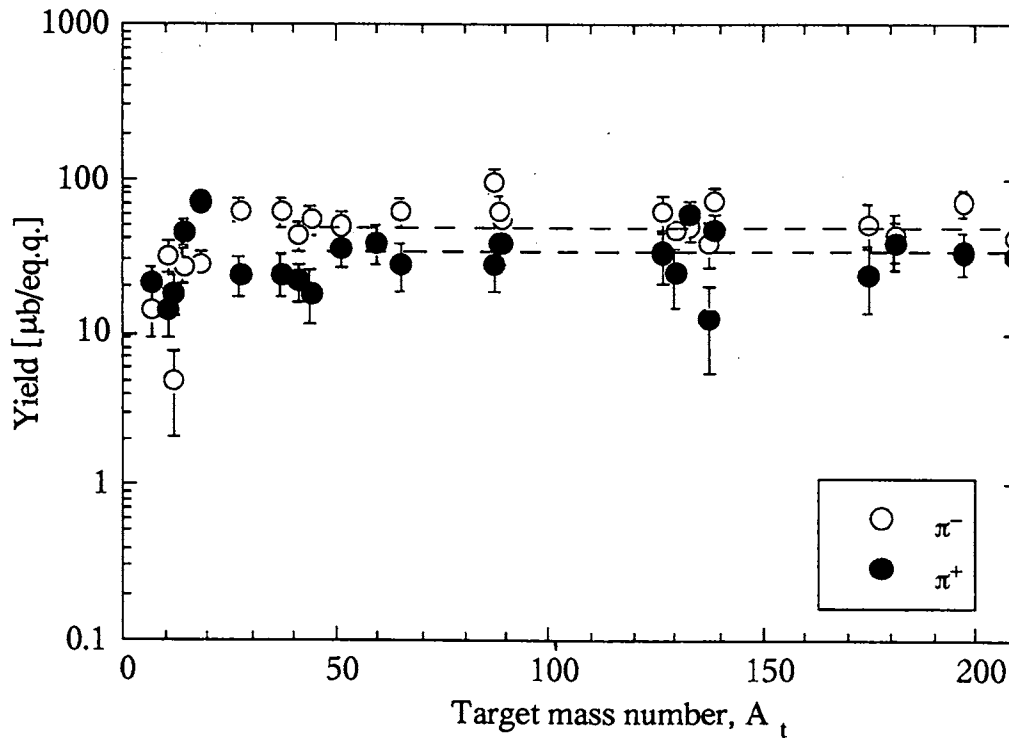


Fig.2 Variations of (γ,π^-) and (γ,π^+) reaction yields as a function of A_t at $E_0=400\text{MeV}$. (a) Experimental yields. (b) PICA calculations. The dashed lines represent the weighted mean values of the yields of (γ,π^-) on $A_t \geq 51$ and of (γ,π^+) on $A_t \geq 27$.

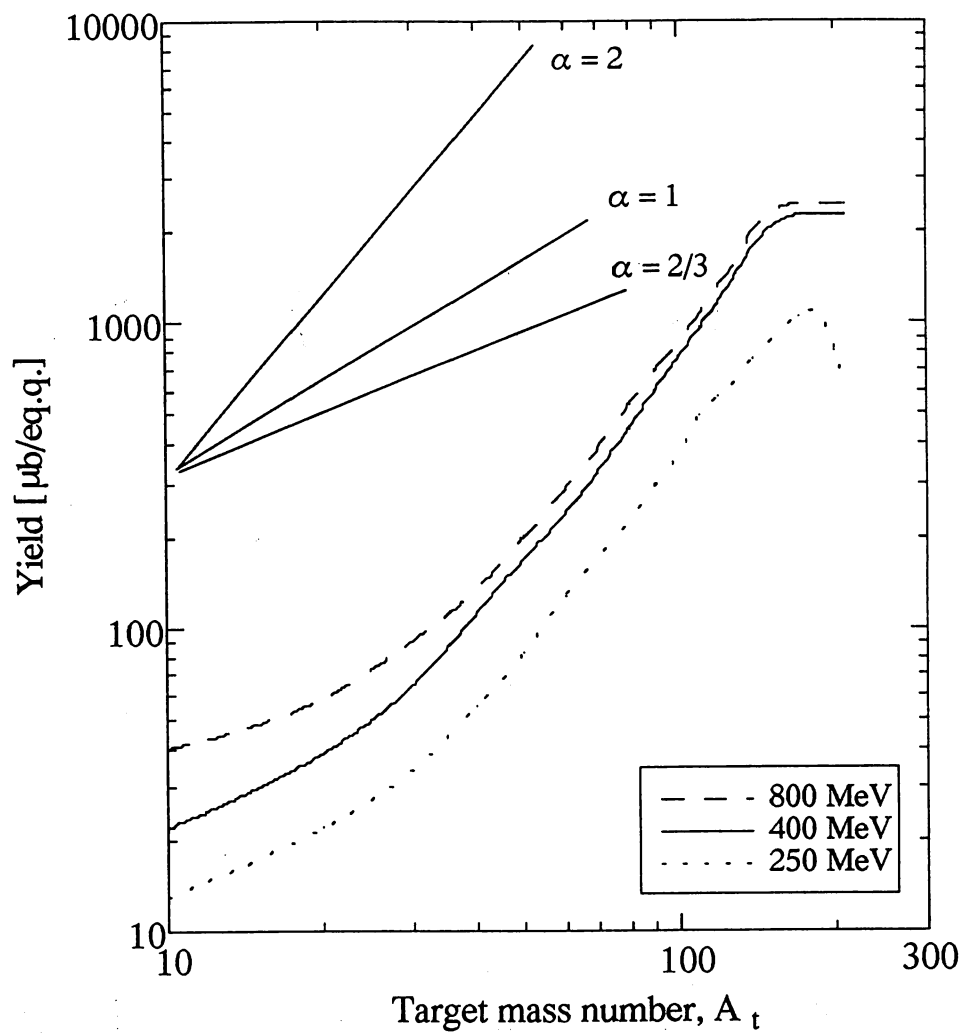


Fig.3 Variation of the sum of the yields of $(\gamma, \pi^- xn)$ of $x \geq 0$ at $E_0=800, 400,$ and 250MeV as a function of target mass number.