研究論文

15. $Z=22 \sim Z=30$ の核の (p, n) 反応の断面積

田 中 重 男*

The Cross Sections of (p, n) Reactions for the Nuclei of Atomic Number 22 to 30

By S. TANAKA

The measurements of the (p, n) cross sections for the nuclei of atomic number 22 to 30 by means of the activation method were summarized. The analysis of the experimental results was made for some typical examples on the basis of the statistical model of nuclear reaction, and the validity of this simple model was discussed.

反応断面積は放射化法によって比較的簡単に求めることができる。放射化法では残留核の放射能の絶対値を測定して断面積を求めるので、残留核が放射性であり、測定可能な半減期をもっているものでなければならぬなどの制約があるので、すべての核についてこ

の方法を適用することはできない。

$Z=22 \sim Z=30$ の範囲の核について現在までに放射化法によって (p, n) 反応の断面積が測定されているものを第1表に示す^{(1)~(5)}。

第 1 表

標 的 核	存 在 比 (%)	残 留 核	半 減 期	エ ネ ル ギ ー 範 囲 と 測 定 者
Ti-47	7.28	V-47	31 min	≤ 14 MeV 田中ら
Ti-48	73.94	V-48	16.2 d	≤ 14 MeV 田中ら
V-51	99.76	Cr-51	27.8 d	≤ 14 MeV 田中ら
Cr-52	83.76	Mn-52	m 21 min g 5.7 d	≤ 14 MeV 田中ら, 12 MeV Blosser ら
Fe-56	91.66	Co-56	77 d	≤ 14 MeV 田中ら
Fe-57	2.19	Co-57	270 d	≤ 14 MeV 田中ら
Ni-60	26.23	Cu-60	24 min	≤ 6.7 MeV Blaser ら, 12 MeV Blosser ら
Ni-61	1.19	Cu-61	3.3 hr	≤ 6.7 MeV Blaser ら, ≤ 14 MeV 田中ら, 12 MeV Blosser ら
Ni-62	3.66	Cu-62	10 min	≤ 6.7 MeV Blaser ら
Ni-64	1.08	Cu-64	12.8 hr	≤ 6.7 MeV Blaser ら, ≤ 14 MeV 田中ら, 12 MeV Blosser ら
Cu-63	69.09	Zn-63	38 min	≤ 6.7 MeV Blaser ら, ≤ 12 MeV Howe, ≤ 22 MeV Ghoshal
Cu-65	30.91	Zn-65	245 d	≤ 6.7 MeV Blaser ら, ≤ 12 MeV Howe,
Zn-64	48.89	Ga-64	2.6 min	≤ 12 MeV Howe
Zn-66	27.81	Ga-66	9.4 hr	≤ 6.7 MeV Blaser ら, ≤ 12 MeV Howe, 12 MeV Blosser ら
Zn-67	4.11	Ga-67	78 hr	≤ 6.7 MeV Blaser ら
Zn-68	18.57	Ga-68	68 min	≤ 6.7 MeV Blaser ら, ≤ 12 MeV Howe, 12 MeV Blosser ら

I. 実 験

実験方法の一例として著者らの行なった⁴⁷Tiおよび⁴⁸Tiの (p, n) 反応について述べる。

4.5 mg/cm² の厚さの天然同位体組成のチタン金属箔を、いわゆる“stacked-foil technique”によって核研63インチ・サイクロトロンで照射し

た。チタン箔は 3×3 cm² のものを用い、陽子線束は黒鉛のストリットで 1×1 cm² 以下にしはり、多重散乱による拡がりによっても十分に全線束を受けられるようにした。照射は 14 MeV と 10 MeV との2回に分けて行なった。吸収体にはアルミニウム箔を用い、そ

* 東京大学 原子核研究所 (Inst. for Nuclear Study, Univ. of Tokyo)

の中でのエネルギー損失の値は Aron の表を用いて計算した。またチタン箔中での $-dE/dx$ の値は Bethe らの阻止能の公式によって計算した。陽子線束はファラデー・カップに受けビーム・カレント・インテグレーターに導いて入射陽子数を算出した。

照射後短寿命の妨害放射能を壊変させた後、各ターゲット箔を 5mm の厚さの真鍮板にはさんで、すべての陽電子を消滅させ、NaI シンチレーターで 0.51 MeV の消滅放射線のみをとった壊変曲線を解析して $^{47}\text{V}/^{48}\text{V}$ を求め、 ^{47}V を壊変させた後 0.6 MeV にバイアスをかけて ^{48}V の相対値を求めた。絶対値は ^{48}V について $E_p=10$ MeV 附近の二・三枚の箔について測定した。そこらのエネルギーでは第二粒子放出反応はあまり起らず、 (p, n) 反応断面積が大きいので測定しやすい。箔を 8 mmφ の肉厚ガラス管に封じ込み、1.33 MeV の γ -線と 0.51 MeV の消滅放射線との同時計数をとって測った。これらの方法では ^{48}Ti (p, α) ^{46}Sc および ^{47}Ti ($p, 2p$) ^{46}Sc でできる半減期 85 日の ^{46}Sc の 1.12 MeV の γ -線を完全に分離することはできないが、その影響は 1% 以下であった。なお 0.51 MeV のチャンネルに対するより高い γ -線によるコンプトン反跳電子の寄与は単一 γ -線によって実験的に求めたスペクトルの形にノーマライズして差し引いた。

II. 議 論

これら中重核に対するこの程度の入射エネルギーをもつ粒子による反応は大部分複合核形成の道筋を通過して起ると考えられている。そこで通常複合核の仮説を統計理論に従って取扱い、その統計理論よりえられる計算値と実験値とを比較して、その単純な理論の可否を議論することが行なわれている。

その時取扱いを簡単化するために個々の核の特性を全く無視して、

- (a) 複合核の中性子・陽子・ α -粒子などの粒子に対する結合エネルギーをすべて同じとする。
- (b) 残留核の単位密度も核の Z および A が奇数であると偶数であるとかかわらず同じである。

と仮定すると、複合核の蒸発過程においてクーロン障壁の効果だけがきて陽子・ α -粒子などの荷電粒子は放出されにくく、 (p, n) 反応の断面積はほぼ複合核形成の断面積に等しくなり、 (p, n) 反応のしきい値から二粒子放出反応が起るまでのエネルギー範囲では、主として (p, n) 反応のみが起り、 (p, n) 反応断面積を反応全断面積に等しいとしてよいという結論になる⁽⁶⁾。

この仮定に従って、 (p, n) 反応断面積の実験値を複合核形成断面積の理論値と比較した例を第 1, 2 図に示す。ここに複合核形成の断面積は Shapiro の計算方式⁽⁷⁾に従って計算してある。

第 1 図

第 2 図

この比較の結果を見ると、入射エネルギーの変化にともなう断面積の変化の模様は大体一致させることができるが、同じ元素の標的核でも質量数の相異に従って核反応の助変数 r_0 の値を大きく変えなければ実験値に合わせることができないことがわかる。ここに核半径 R は $R = r_0 \times A^{1/3}$ で表わされ、他の多くの観測から r_0 はすべての核に対してほぼ一定であるとされ

ている。

この矛盾は主に上述の(a), (b) 2つの仮定が正しくないことによって生ずると思われる。ここに対象としている中重核では陽子の結合エネルギーは中性子のそれよりほぼ 3~4 MeV 低いものが多い。また残留核の Z および A が奇数か偶数かによってそれらの単位密度に数倍程度の差があることも指摘されている。この2つのことを考慮するだけで、ここで取扱っているエネルギー範囲で (p, p') 反応を (p, n) 反応に比して起りにくくして、すべての核について (p, p') 反応を無視してしまうことが必ずしも正しくはないことになる。すなわち核の個性を全く無視したことによって上の矛盾が生じたと考えられる。

そこで核反応の統計理論に上述の核の個性を入れて筆者が複合核の蒸発過程を計算した結果の一例を第3図に示す。この計算では

(c) $r_0 = 1.5 \times 10^{-13}$ cm とし、

(d) 残留核の単位密度 ω を核の Z および A が奇数か偶数かによって

$$\omega_{0-0}/12 \sim \omega_{0-6}/5 \sim \omega_{6-6}/1 \quad (8)$$

第 3 図

ととった。実験値との比較のために $\sigma(p, n)/\sigma_0$ なる値をとってあるが、この比較の結果を見ると実験値と理論値とはかなりよく一致している。ここに σ_0 は複合核形成の断面積の計算値である。他の核についても同じ r_0 の値 (1.5×10^{-13} cm) を用いて計算すると、 ^{64}Ni , ^{68}Zn を除くすべての実験値とかなりよい一致を得ることができる。またこの計算では

(e) 核ポテンシャルとして井戸型ポテンシャルを用いる。

(f) 核の励起状態に対する複合核形成断面積と基底状態に対するそれとの差を無視する。

など、便宜的な取扱いをしているので、より精密な議論はできない。

核反応の統計理論にはさらに多くの助変数があるが、それらの値を変えると計算値がかなりの範囲にわたって変るので、このような計算でただちに統計理論の正当性やそれからのずれを定量的に云々することは危険である。

しかし筆者の計算によれば、 $Z=22 \sim Z=30$ の範囲の核に対する 12 MeV 程度までのエネルギーの陽子による反応では、統計理論の予想値に比較してすべての核について、特に陽子が出やすいとか中性子が出やすいとかの画一的な傾向は見られなかった。

(1959年 6月 23日 受理)

— 参 考 文 献 —

- (1) J. P. BLASER, F. BOEHM, *et al.*: *Helv. Phys. Acta*, **24**, 441 (1951).
- (2) S. N. GHOSHAL: *Phys. Rev.*, **80**, 939 (1950).
- (3) H. G. BLOSSER, T. H. HANDLEY: *Phys. Rev.*, **100**, 1340 (1955).
- (4) H. A. HOWE: *ibid.*, **109**, 2083 (1958).
- (5) S. TANAKA, M. FURUKAWA: *J. Phys. Soc. Japan*, (投稿中)
- (6) J. B. BLATT, V. WEISSKOPF: "Theoretical Nuclear Physics", (1953), John Wiley, New York.
- (7) M. M. SHAPIRO: *Phys. Rev.*, **90**, 171 (1953).
- (8) G. BROWN, H. MUIRHEAD: *Phil. Mag.*, **2**, 473 (1957).