

다목적 동시측정 장치 개발에 의한 원자핵 구조 연구 (II)*

- ^{125}I 붕괴시 K 각 이중 이온화 현상 -

정원모 · 정갑수 · 주관식 · 남기용 · 최혜진 · 전우주* · 나상균** · 황한열***

연세대학교, 명지대학교*,
울산대학교**, 목원대학교***

요 약

^{125}I 가 0.035 MeV 준위로 붕괴할 때 K-각 전자포획붕괴에 의한 K-각 이중 이온화 현상에 대하여, 이중 vacancy가 채워지면서 방출되는 K_{α}^{II} X-선과 K_{α}^{S} X-선을 동시계수하여 연구 분석하였다. 실험에 사용한 source는 ^{125}I 와 $^{125}\text{Te}^{\text{m}}$ 의 혼합시료이다. 한 대의 Ge(Li)검출기, 두 대의 NaI(Tl)섬광검출기와 T_rHC(Time-to-Pulse Height Converter)를 사용하여 동시스펙트럼을 분석한 다음 측정된 동시계수 $N(K_{\alpha}^{\text{II}}, K_{\alpha}^{\text{S}})$ 과 K_{α} X-선의 총 수인 $N(K_{\alpha})$ 을 얻었다. K-각 전자포획 당 이중 vacancy가 형성될 때의 이중 이온화 확률 P_{KK} 값, 2.15×10^{-4} 을 구하였다.

1. 서 론

핵 붕괴과정에서 일어나는 원자의 K-각의 이중 이온화 현상(double K-shell ionization)에 대한 연구는 핵에너지 준위, 붕괴형태 등과 같은 원자핵 구조 및 특성연구에 중요한 의의를 갖는다. K-각 이중 이온화는 여러 종류의 붕괴로 일어날 수 있는데, 전자포획(electron capture), 내부전환(internal conversion), 또는 β 붕괴등에서와 같이

중심원자내의 순간적인 전하량의 변화에 의한 전자-전자간의 Coulomb 상호작용이 소멸되어, 전자가 채워지지 않은 구속상태로 전이하거나(SU; Shake-Up), 또는 원자로부터 완전히 방출되는 SO(Shake-off) process[1]에 의하여 설명할 수 있다. 전자포획의 경우에는 K-각에 하나의 전자는 핵에 의하여 포획되고 다른 하나는 SO 또는 SU 되어 이중 vacancy를 생성시킨다. 내부전환의 경우에는 비전환(unconverted)전자와 전환전자간의

* 본 연구는 한국학술진흥재단(91. 10~92.9)의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

직접충돌(direct collision)에 의하여 이온화를 일으킬 수 있다. 원자 K-각의 이중 이온화의 또다른 mechanism은 자연적인 고차원적 전자기전이에 의해 설명된다. 이러한 자연적 붕괴에는 내부전환을 갖는 중간준위들을 거쳐 진행되는 핵 붕괴와 핵의 에너지를 원자의 궤도전자에 전달하여 원자로부터 전자가 방출하면서 광자(photon)를 방출하는, 즉 내부콤프톤효과(internal Compton effect)에 의한 전기적 붕괴형태로 이중 vacancy를 야기시킬 수 있다.

위의 모든 붕괴는 K-각을 이중 이온화 상태로 남기는데, 이 vacancy는 약 10^{-15} 초 뒤에 급속히 채워지면서 K X-선들을 복사한다. 이때 첫번째 복사하는 K_{α}^{II} X-선(Hypersatellite : $K^{II} : 1S^2 \rightarrow 1S^1 2P^1$)과 두번째 복사하는 K_{α}^S X-선(Satellite : $K^S : 1S^1 2P^1 \rightarrow 2P^2$)들은 부가적인 전자 vacancy를 채우면서 방출하는 정상 K X-선보다 더 높은 에너지로 이동(shift)된다. K-각 내부전환, 또는 전자포획 당, 이중 vacancy가 생성될 확률 P_{KK} 값은 실험적으로 K X-선과 위에서 언급한 K_{α}^{II} X-선, K_{α}^S X-선을 삼중동시계수하여 K-각 전자포획 당 K-각 이중 이온화 확률 P_{KK} 를 계산했다.

K-각 포획 당 K-각 이중 이온화 확률은 1953년 Primakoff와 Porter[2]에 의하여 처음으로 계산되었다. 1965년, Feinberg[3]에 의하여 원자핵 Shake-off 현상을 최초로 제창했고, 1980년에는 Schupp와 Freedman[4]은 ^{64}Cu 의 입자에 의한 자동 이온화 현상(autoionization)을 연구하기 위하여 K각 X선- γ - β 선의 4중동시측정(quadrupole coincidence) 방법을 개발하여 자동 이온화 확률을 계산하였다. 1982년에는 Akira Suzuki와 J. Law[5](略, SL)에 의하여, 전자의 초기와 나중상태를 기술하는데 있어서 Dirac-Fock-Slater 파동함수와 자체일관장(self-consistent-field)을 계산하여 K-

각 이온화 현상에 대한 SU process의 기여도를 무시할 수 있는, 즉 $P_{KK} \approx P_{KK}(\text{SO})$ 인 두드러진 결과를 얻었다. 본 실험은 $K_{\alpha} X$ -선과 $K_{\alpha}^{II} X$ -선과 $K_{\alpha}^S X$ -선을 삼중동시측정하여 Schupp[6]이론에 근거하여 K-각 전자포획 당 이중 이온화 될 확률 $P_{KK}(\text{EC}) = 2.15 \times 10^{-4}$ 값을 얻었다.

2. 실험

1. 시료(source)

본 실험에서 사용한 시료는 반감기가 60.2일인 ^{125}I 와 준 안정준위에 있는 $^{125}\text{Te}^m$ 시료를 혼합하여 그림 1에서와 같이 액체상태의 시료를 Mylar 필

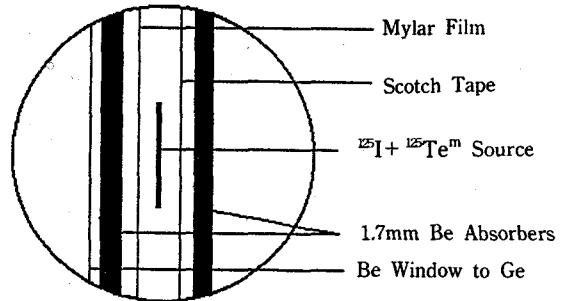


그림 1. 실험에 사용된 $^{125}\text{I} + ^{125}\text{Te}^m$ 시료

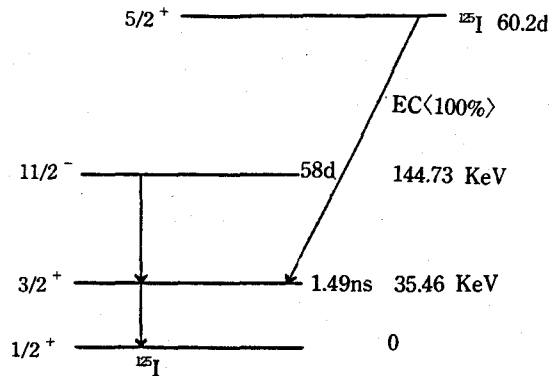


그림 2. ^{125}I 의 붕괴도

름에 접선원으로 떨어뜨려 건조시킨후, 밀봉하여 1.7mm 두께의 Be흡수체 사이에 끼워서 사용하였다. 시료의 붕괴도는 그림 2와 같다.

2. 검출기(detector)

실험에 사용한 검출기로는 한 대의 Ge(Li) 검출기와 두 대의 NaI(Tl) 섬광검출기를 사용하였다. Ge(Li)검출기로는 ORTEC에서 제조한 지름 16 mm, 감응깊이 13mm, 5.9keV 에서 179eV의 분해능을 갖는 검출기를 사용하였다.

3. 측정장치 및 전자기기

실험에 사용한 전자장치로는, 바이어스 전원(bias

supply), 두 대의 TSCA(Timing Single Channel Analyser), 지연장치(delay system) 및 start와 stop 입력단자에 입력된 논리펄스(logic pulse)들의 단자간에 시간간격을 측정하여 아날로그 펄스로 변환시켜 출력시키는 TPHC모듈을 사용하였고 2대의 MCA(Multichannel Analyser)로 분석하였다. 상세한 전자장치의 계통도는 그림 3과 같다.

4. 측정

본 실험에서의 측정은 세 개의 검출기로 $K\alpha$, $K\alpha^H$ X-선, 그리고 $K\alpha^S$ X-선을 동시계수하여 여러 계수값을 구하였다.

그림 3에서와 같이, 세 개의 검출기 사이에

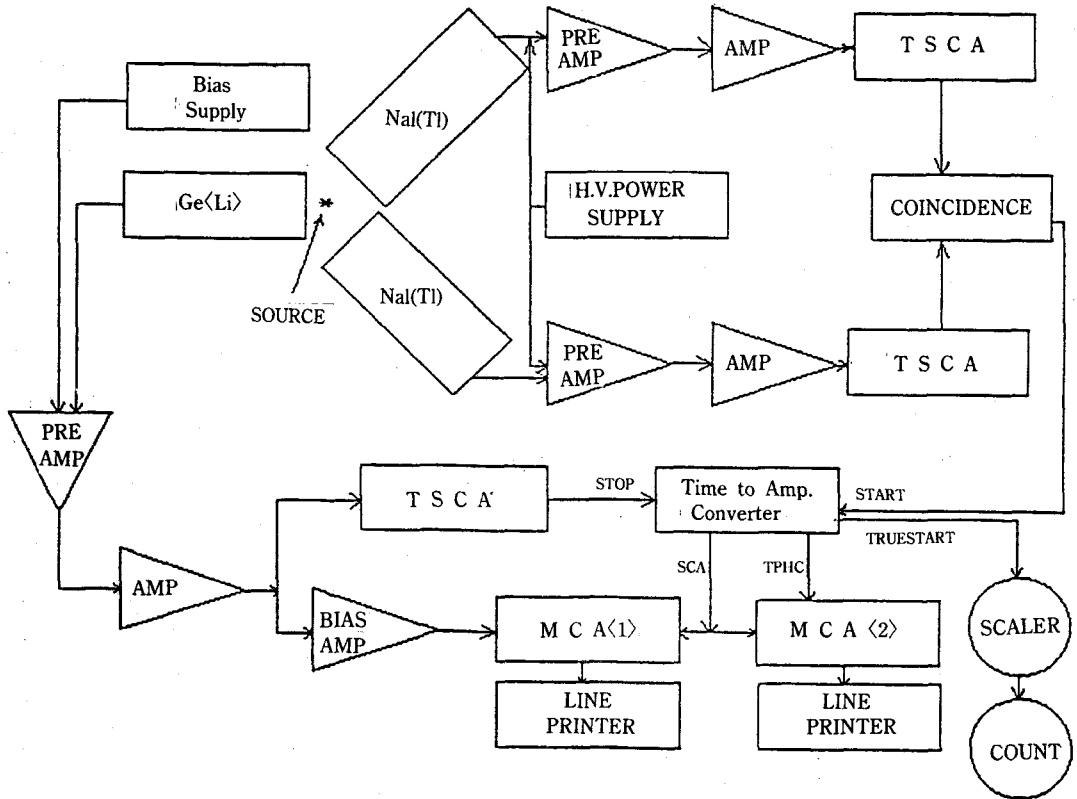


그림 3. 전자장치 계통도

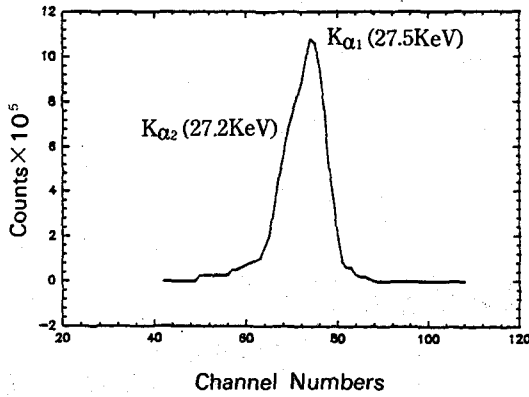


그림 4. 단일 스펙트럼

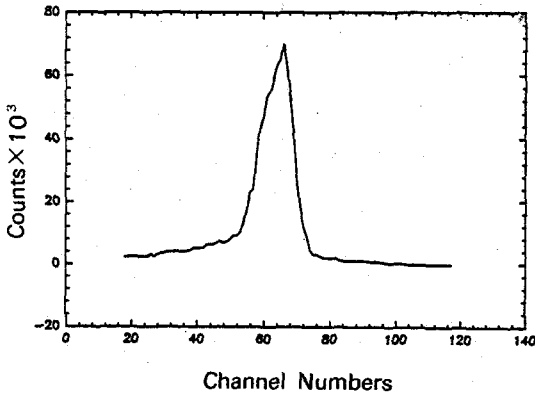


그림 5. 이중 동시계수 스펙트럼

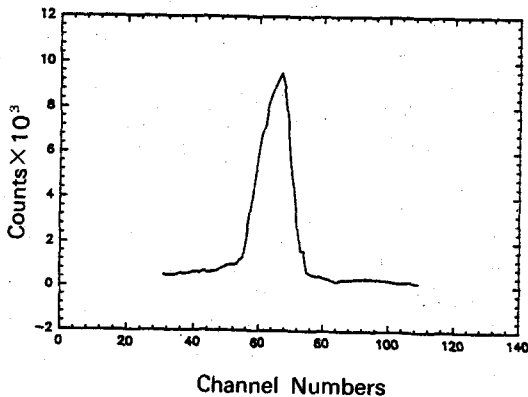


그림 6. 삼중 동시계수 스펙트럼

시료를 위치시키고 각 검출기에 고전압을 걸어 주고 각 검출기에서 잡은 미소한 펄스를 전치증폭기로 1차 증폭하고 주 증폭기로 2차 증폭시켜 TSCA를 사용하여 스펙트럼을 얻었다. 먼저 Ge(Li)에서 증폭기와 Bias 증폭기를 거쳐 MCA로 단일 스펙트럼을 얻었고, TSCA에서 동시계수(coincidence)하여 TAC(Time-to-Amplitude Converter)를 이용하여 이중 동시 스펙트럼(double coincidence spectrum)을 얻은 다음 두대의 MCA로 분석했다. 또한, 동시계수한 것을 TAC의 start 입력단자에 입력시킨 것과 TAC의 stop 단자의 입력시킨 것을 삼중 동시계수 (triple coincidence)하여 MCA를 통하여 스펙트럼을 측정하였다.

컴퓨터 fitting 프로그램인 LSFP(Least Square Fitting Program)을 사용하여 각각의 스펙트럼을 분석하였으며 단일 스펙트럼, 이중 동시계수 스펙트럼 그리고 삼중 동시계수 스펙트럼은 각각 그림 4, 그림 5, 그림 6과 같다. 그림 4에서의 K_{α1}, K_{α2}의 에너지 값들은 에너지 보정(energy calibration)에 의하여 각각 27.5keV와 27.2keV로 결정하였다.

3. 분 석

두 대의 NaI검출기에서 측정한 계수값들을 각각 N₁, N₂라고 하고 Ge(Li) 검출기에서의 계수값을 N₃라고 하면, N₁, 또는 N₂ (略; N_{1,2})와 N₃를 구하는 식은 다음과 같다. 즉,

$$N_{1,2} = N_0 \left[\frac{K_{\alpha}}{K_{\gamma}} \left|_{EC+\alpha\kappa(35.5)} \right\} \omega_{\kappa(35.5)} + \alpha\kappa(35.3) \right] (aE)_{1,2}$$

$$N_3 = N_0 \left[\frac{K_{\alpha}}{K_{\gamma}} \left|_{EC+\alpha\kappa(35.3)} \right\} \frac{K_{\alpha}}{K_{\gamma}} \omega_{\kappa(35.5)} (aE)_{3} \right]$$

여기서 $[K_{\alpha}/K_T]_{EC} = 0.781$ 은 전자포획붕괴시 총 K X-선에 대한 K_{α}^{II} X-선과 K_{α}^s X-선의 비이고 $\omega_K(35.5) = 0.877$ 와 $\alpha_K(35.5) = 11.9$ 은 각각 K-각의 형광수율(fluorescence yield)과 내부전환계수 (internal conversion coefficient)이며 $K_{\alpha}/K_T = 0.816$ 은 총 K_{α} X-선에 대한 K_{α}^s , K_{α}^{II} X-선의 비를 나타낸다. 즉,

$$\frac{K_{\alpha}}{K_T} = \frac{K_{\alpha_1} + K_{\alpha_2}}{K_{\alpha_1} + K_{\alpha_2} + K_{\beta_1} + K_{\beta_2}}$$

로 주어지는 식에 동위원소 표[7]에서 주어진 K_{α_1} 을 100으로 기준하여 각각의 K_{α_2} , K_{β_1} , K_{β_2} 의 값을 위 식에 대입하여 구했다.

K_{α}^{II} 와 K_{α}^s X-선에 대한 흡수인자 (a)와 검출 효율을 E라고 했을 때, NaI(Tl)검출기의 검출효율 $(aE)_{12}^K$ 은 다음식에서 구할 수 있다. 즉,

$$(aE)_{12}^K = \frac{N_{12}^K(K_{\alpha} - K_{\alpha}^s)}{N_1^K} \times \frac{\left[\frac{K_{\alpha}}{K_T} \Big|_{EC} + \alpha_K(35.5) \right]}{2 \frac{K_{\alpha}}{K_T} \Big|_{EC} \alpha_K(35.5) \frac{K_{\alpha}}{K_T} \omega_K(35.5) E_{23}}$$

$$= \frac{1.0424 \times 10^7}{1.523 \times 10^7} \times \frac{0.781 + 11.9}{2 \times 0.781 \times 11.9 \times 0.869 \times 0.877 \times 0.95}$$

$$= 0.6747 \quad \dots\dots(1)$$

여기서 $N_{12}^K(K_{\alpha} - K_{\alpha}^s) = 1.0424 \times 10^7$ 는 두 대의 NaI(Tl)의 동시계수값을 peak fitting한 값이고, $E_{23} = 0.95$ 는 TAC의 동시계수효율값이며, $N_1^K = 1.523 \times 10^7$ 은 TPHC의 true start 계수기의 값이다. 두 대의 NaI(Tl)검출기와 한 대의 Ge(Li) 검출기로 K_{α} , K_{α}^{II} X-선 그리고 K_{α}^s X-선을 삼중동시 측정하여 peak fitting한 $N_{123}^K(K_{\alpha} - K_{\alpha}^s - K_{\alpha}^{II})$ 는 1.079×10^3 을 얻었다. 이 값과 식(1)에서 얻은 값을 Schupp[6]의 이론에 근거한 아래의 식에

대입하면,

$$P_{KK} = \frac{N_{123}^K(K_{\alpha} - K_{\alpha}^s - K_{\alpha}^{II})}{N_{12}^K(K_{\alpha} - K_{\alpha}^s) \omega_K(K_{\alpha}/K_T)^{II} (aE)_{23} E_{23}}$$

$$= \frac{1.079 \times 10^3}{1.0424 \times 10^7 \times 0.877 \times 0.816 \times 0.6747 \times 0.9967}$$

$$= 2.15 \times 10^{-4}$$

의 값을 얻었다. 여기서 $(K_{\alpha}/K_T)^{II} \approx K_{\alpha}/K_T$ 로 근사하였으며 $E_{23} = 0.9967$ 은 TAC의 동시계수 효율값이다.

4. 결 론

^{125}Te 의 P_{KK} 값에 관한 실험값이나 이론값에 관하여 발표된 논문이 없어서 원자번호 Z에 대한 여러 시료들의 P_{KK} 값의 실험치와 이론치를 근거로 하여 fitting한 그래프에서 본 실험에서 구한 P_{KK} 값을 적용·비교해 보았다. 표 1은 여러 시료에 대한 $P_{KK}(\text{SL})$ 이론값과 실험값을 나타낸다. 이 값들은 원자번호 Z에 대하여 각각 fitting한 그래프가 그림 7 및 그림 8과 같고, 이 그래프의 함수에서 추정된 ^{125}Te 의 실험치 $P_{KK}(\text{EXP})$ 는 3.15×10^{-5} 이고, 이론치 $P_{KK}(\text{SL})$ 은 4.4×10^{-5} 이다. 이 값을 본 실험에서 구한 값과 비교한 것이 표 2와 같다.

그림 7, 8에서 원자번호의 증가에 따른 여러 시료들의 K-각 이중 이온화확률 P_{KK} 값이 10^{-5} 의 범위내에서 지수함수적으로 감소하는 곡선을 중심으로 분포함을 알 수 있다. 표 2와 같이 전자 포획 붕괴에 의한 K-각 이중 이온화 확률은 실험과 이론값이 큰 차이를 보이고 있는데 이에 대한 이론 및 실험에 대한 연구가 필요하다고 생각된다. 특히 K-각 이중 이온화 현상이 원자핵의

표 1. 원자번호 Z에 대한 여러시료들의 P_{kk} 값

시 료	원자번호 Z	실험치 P _{kk} (Exp.)	이론치(SL) P _{kk} (SL) ⁸⁰	참고문헌
⁶⁵ Zn	30	1.32×10 ⁻⁴	1.60×10 ⁻⁴	[8]
¹⁰⁹ Pd	46	1.02×10 ⁻⁵	1.20×10 ⁻⁵	[9]
¹⁰⁹ Ag ^m	47	1.53×10 ⁻⁴	4.00×10 ⁻⁵	[10]
¹¹⁴ In	49	1.70×10 ⁻⁵	1.20×10 ⁻⁴	[11]
¹³¹ Xe	54	1.10×10 ⁻⁴	4.00×10 ⁻⁵	[12]
¹³¹ Cs	55	1.33×10 ⁻⁵	4.13×10 ⁻⁵	[13]
¹⁴¹ Pr	59	3.40×10 ⁻⁵	5.74×10 ⁻⁵	[14]
¹⁶⁵ Er	68	6.70×10 ⁻⁶	2.70×10 ⁻⁵	[13]
²⁰³ Tl	81	4.00×10 ⁻⁵	4.13×10 ⁻⁵	[15]
²⁰⁷ Bi	82	6.00×10 ⁻⁶	1.10×10 ⁻⁵	[16]

표 2. 그래프에서 추정한 ¹²⁵Te의 P_{kk}(Exp.), P_{kk}(SL)⁸⁰ 과 본 실험과의 비교

원자번호 (Z)	추정값 P _{kk} (Exp.)	추정값 P _{kk} (SL) ⁸⁰	본 실험값 P _{kk} (Exp)
52	3.40×10 ⁻⁵	4.25×10 ⁻⁵	2.15×10 ⁻⁴

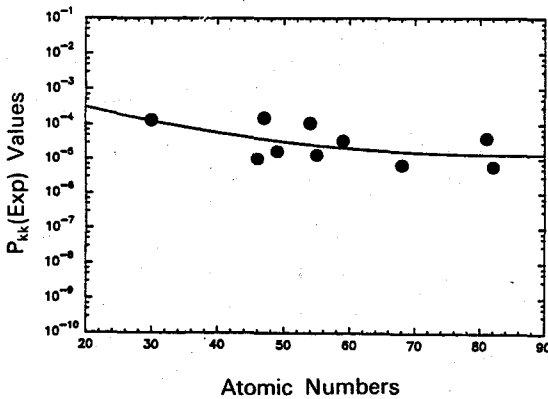


그림 7. 원자번호 Z에 대한 P_{kk}(Exp) 값의 Fitting 곡선

스핀, 반전성, 핵 에너지 준위, 붕괴형태등 원자 핵의 특성연구에 직접적인 연관성이 있으므로 원

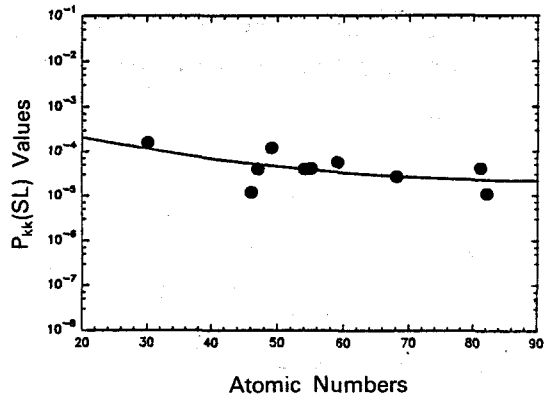


그림 8. 원자번호 Z에 대한 P_{kk}(SL)값의 Fitting 곡선

자핵 구조 연구에 중요한 현상의 하나로서 최근 많은 연구가 진행되고 있다.

참고 문헌

1. H. J. Nagy and G. Schupp, Phys. Rev. **C30**, 2031 (1984).
2. H. Primakoff & F. T. Porter, Phys. Rev. **C89**, 903 (1953).
3. E. L. Feinberg, Jad, Fig.1, 612 (1965) (English)

- Translation; Sov. Journ. Nucl. Phys. **1**, 438 (1965).
4. G. Schupp & M. S. Freedman, Phys. Rev. **A20**, 391 (1982).
 5. A. Suzuki & J. Law, Phys. Rev. **C25**, 2722 (1982).
 6. G. Schupp & H. J. Nagy, Phys. Rev. **C29**, 1414 (1984).
 7. C. Michael Lederer, *Table of Isotope*(John Wiley, N.Y., 1978), 7th ed..
 8. H. J. Nagy & G. Schupp, Phys. Rev. **C27**, 2887 (1983).
 9. C. W. E. van Eijk & M. A. Popelier, Phys. Rev. **C19**, 1047 (1979).
 10. H. J. Nagy et al., Phys. Rev. **C11**, 205 (1975).
 11. R. Vukanovic et al., Phys. Lett. **29** B, 576 (1969).
 12. K. Knaut et al., Z. Phys. **197**, 101 (1966).
 13. H. J. Nagy et al., Phys. Rev. **C6**, 607 (1972).
 14. H. J. Nagy, Phys. Rev. **C32**, 2043 (1985).
 15. J. P. Desclaux et al., Phys. Lett. **32**, 447 (1974).
 16. J. P. Briand et al., J. Phys. B: Atomic Molec. Phys., **13**, (1980).

A Study on the Nuclear Structure through the Multipurpose Coincidence Measurement System Developement (II)

— Double Ionization of the K-shell in ^{125}I —

Won-mo Chung · Kap-soo Chung
Koan-sik Joo · Kie-yong Nam · Hey-jin Choi · Woo-ju Jeon*
Sang-kyun Na** · Han-yull Hwang***

*Yonsei University, Myungji University**
*Ulsan University**, Mokwon Univesity****

ABSTRACT

Double ionization of the K-shell accompanying K-shell electron capture of the 0.035 MeV transition of ^{125}I has been studied by counting coincidences between K_{α} hypersatellite X-rays and K_{α} satellite X-rays emitted when double vacancies are filled. The ^{125}I and $^{125}\text{Te}^m$ source materials were used in the measurement. We obtained the coincidence spectrum using two NaI(Tl) detectors and a Ge(Li) detector and TAC(Time-to-Amplitude Converter), and then analysed the measured coincidence number $N(K_{\alpha}^H, K_{\alpha}^S)$, the total number $N(K_{\alpha})$ of K X-ray. The probability per K-shell electron capture that a double vacancy is formed, P_{KK} is formed, P_{KK} is found to be 2.15×10^{-4} .