

다중셀 비례계수기의 X-선 검출효율에 대한 수치모의 실험

이기원¹ · 최철성¹ · 남옥원¹ · 선광일²

¹ 천문대, 대전광역시 유성구 화암동 산 36-1, 305-348

² 인공위성연구센터, 대전광역시 유성구 구성동 373-1, 305-701

A MONTE CARLO SIMULATION FOR THE X-RAY DETECTION EFFICIENCY OF A MULTI-CELL PROPORTIONAL COUNTER

Ki-Won Lee¹, Chul-Sung Choi¹, Uk-Won Nam¹, and Kwang-II Seon²

¹ Korea Astronomy Observatory, 36-1 Hwaam, Yusong, Taejon 305-348

² Satellite Technology Research Center, 373-1 Kusong, Yusong, Taejon 305-701

email: kwlee@hanul.issa.re.kr, cschoi@hanul.issa.re.kr, uwnam@hanul.issa.re.kr, kiseon@satrec.kaist.ac.kr

(Received October 18, 1998; Accepted November 12, 1998)

요 약

천문대 X-선연구팀에서는 검출기 내부잡음을 줄이기 위해, 반-동시 계수법을 채택하는 다중셀 비례계수기를 개발할 예정이다. 이러한 계수기의 X-선 검출효율 결정을 위해, 몬테카를로법을 이용하는 수치모의실험 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램을 이용하여 Ginga/LAC의 검출효율을 재현할 수 있었고, 그럼으로 해서 수치모의실험 방법에 대한 검증을 할 수 있었다. 이 논문에서는 천문대에서 고려하고 있는 비례계수기에 대한 수치모의실험 결과들을 보고한다.

ABSTRACT

The X-ray astronomy team of the Korea Astronomy Observatory(KAO) is planning to develop a multi-cell proportional counter, adopting an anti-coincidence method to reduce its internal background. We have developed a Monte Carlo code to determine the X-ray detection efficiency of the counter. As a check of our code, we successfully reproduced the detection efficiency of Ginga/LAC. In this paper, we report the simulation results for the counter being considered in KAO.

1. 서 론

비 초점면 검출기 중의 하나인 비례계수기는 "UHURU" 위성에서부터(1970년 발사), 현재 지구궤도 상에서 관측을 수행중인, "RXTE" 위성(Rossi X-ray Timing Explorer; 1995년 발사)에 이르기까지 천체관측에 가장 많이 활용된 X-선 검출기 중의 하나이다. 비례계수기는 에너지 분해능의 개선에 한계가($\Delta E/E \sim 0.1E^{-1/2}$) 있다는 단점이 있지만, X-선 검출면적을 확장시키기가 용이하여 검출감도를 증가시키기가 쉽고, 안정된 동작특성을 갖는다는 장점이 있다.

대부분의 천체 X-선원은 그 세기가 매우 미약하다. 예를 들어, 가장 밝은 X-선원인 Sco X-1의 광자 계수율은 $F_X \sim 100 \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 그리고 표준 X-선원인 게성운 (Crab nebulae)의 경우는 $F_X \sim 3 \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 이다. 몇몇 밝은 X-선원을 제외한 대부분의 X-선원은 광자 계수율이 $F_X < 0.3 \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 이다. 따라서, 이러한 X-선원들을 관측하기 위해서는 검출기 내부에서 발생하는 잡음제거가 필수적이다. 검출기 내부잡음 요인은 크게 우주선 (cosmic ray), 지구대기와 우주선과의 상호작용에 의해 발생하는 감마선, 그리고 지구 자기장에 포획된 대전입자 등이 있다(e.g., Peterson 1975; Hayashida et al. 1989). 이들은 최소한 수 MeV 이상의 에너지를 가지고 있기 때문에 검출기 벽면을 쉽게 투과할 수 있으며, 검출기 내부에서 X-선 신호와 유사한 신호를 발생시킨다.

검출기 내부잡음을 줄이기 위한 방법으로는 크게 수동적 차폐와 능동적 차폐가 있다. 수동적 차폐로는 검출기 몸체를 납으로 보호하는 방법등을 사용하고 있으나 탐재물의 무게를 증가시키는 단점이 있다. 능동적 차폐로는 펄스모양 선별법(pulse shape discrimination) 혹은 상승시간 선별법(rise time discrimination)과 반-동시 계수법(anti-coincidence) 등이 있다. 상승시간 선별법을 채택할 경우, 복잡한 다중셀 구조를 필요로 하지않는 장점이 있으며, 2 - 10 keV 영역에서 약 80%의 내부잡음 제거율을 얻을 수 있다. 그러나, 10 keV 이상의 에너지 영역에서는 적용하기 어렵다는 단점이 있다 (남육원 & 최철성 1995). 반-동시 계수법의 경우 다중셀과 같은 복잡한 내부구조가 필요하다는 단점이 있으나, 내부잡음 제거율이 매우 높고(> 90%) 적용 에너지 범위에 대한 제약이 없다는 장점이 있다.

천문대/X-선연구팀에서는 비례계수기의 내부잡음 제거율을 높이기 위해 반-동시 계수법을 채택할 예정이며, 다중셀 형태의 비례계수기를 개발할 계획이다. 반-동시 계수법을 적용할 경우, 상승시간 선별법과 마찬가지로, 에너지에 따라 일정량의 X-선 신호의 손실이 불가피 하다. 이는 결국 다음과 같은 이론적인 검출효율에 영향을 미치게 된다.

$$\epsilon(E) = \exp\left(-\sum\left(\frac{\mu(E)}{\rho}\right)\rho t\right)_w \times \left[1 - \exp\left(-\sum\left(\frac{\mu(E)}{\rho}\right)\rho t\right)_g\right] \quad (1)$$

여기서 $\mu(E)/\rho$, ρ , t 는 각각 질량흡수계수(mass attenuation coefficient, cm^2/g), 밀도(g/cm^3), 그리고 두께를(cm) 나타내고, 첨자 w 와 g 는 검출기창 그리고 검출개스를 나타낸다. 에너지의 함수인 검출효율은 다음의 식 (2)에서 보는 바와 같이 X-선 스펙트럼 분석에 필수적이다.

$$F_{obs}(E) = \int_0^\infty F_{mdl}(E')\epsilon(E')R(E, E')dE' \quad (2)$$

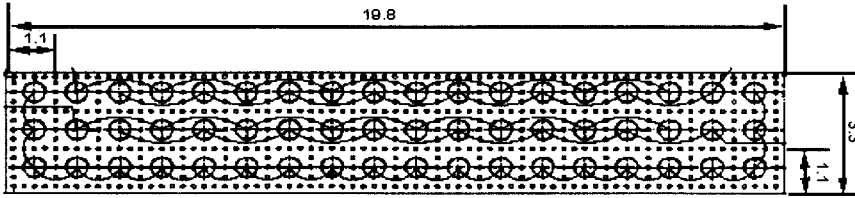


그림 1. 천문대/X-선 연구팀에서 고려하고 있는 다중셀 비례계수기의 구조. 여기서 검출기는 두개의 감지층(2×1.1 cm)과 한개의 비토층(1.1 cm)으로 구성되어 있으며, 각각의 감지셀과 비토셀의 크기는 1.1×1.1 cm 이다.

여기서, $F_{obs}(E)$ 와 $F_{mdl}(E')$ 은 각각 관측된 스펙트럼과 모델 스펙트럼을 나타내고, $\epsilon(E')$ 와 $R(E, E')$ 는 각각, 주어진 에너지 E' 에서의 검출효율과 검출기의 반응함수(response function)을 나타낸다. 그러므로, 검출효율과 반응함수, 그리고 관측된 스펙트럼으로부터 입사 스펙트럼을 결정하게 되고, 그 스펙트럼 인자들로부터 X-선 복사환경(*e.g.*, 복사온도 혹은 power-law spectral index, 시선방향의 개스 분포 등)과 복사에 관한 정보를 얻게된다.

이 연구에서는 다중셀 비례계수기의 검출효율 함수를 구하기 위하여 몬테카를로법을 이용하는 컴퓨터 프로그램을 개발하였으며, Ginga/LAC(Turner *et al.* 1989)의 검출효율을 재현함으로써, 수치모의실험 과정과 방법에 대한 검증을 하였다. 또한, 이 연구에서는 천문대/X-선연구팀에서 개발할 계획으로 있는 다중셀 비례계수기의 X-선 검출효율에 대한 수치모의실험을 수행하였으며, 반-동시 계수법에 의한 X-선 신호의 손실 요인에 대해 정성적인 분석을 하였다.

2. 다중셀 비례계수기의 구조와 반-동시 계수법

천문대/X-선 연구팀에서 개발할 계획으로 있는 다중셀 비례계수기의 구조는 그림 1과 같다(Agrawal 1998). 검출기의 내부 구조는 3개의 층으로 구성되어 있으며, 각 층마다 여러개의 양극 셀로 구성된다. 각 셀들은 셀의 중심에 양극선이 위치해 있으며, 각 셀들 사이에 음극선들을 배열하여 각 셀들을 독립적인 비례계수기와 같이 동작시킬 수 있다. 검출기 몸체 3면에 인접해 있는 셀들을 가드 셀(guard cell) 혹은 비토 셀(veto cell)이라 부르며 큰 에너지를 가진 우주선이 검출기 벽, 혹은 검출기 내부의 전극선 등과 상호작용하여 만들어내는 내부 잡음을 제거하는 역할을 한다. 비토셀을 제외한 나머지 안쪽 셀들은 X-선을 검출하는 감지셀이다.

이러한 구조에서 X-선을 감지하는 감지셀들은 신호선을 통하여 교대로 연결되며, 셀들을 각 층마다 두 그룹으로 나누어 신호를 검출하게 된다. 이들 신호들과 비토셀의 신호를 이용하여 신호처리 회로단에서 반-동시 계수법을 적용시킴으로써 잡음 제거율을 더욱 높일 계획이다. 이러한 구조에서도 만약 저에너지 하전입자가 검출기 창을 투과하여 비행 거리가 감지셀 한 층의 크기보다 작고, 그 신호를 레벨 선별기를 통해 걸러낼 수 없으면, 이러한 유형은 제거할 방법이 없다. 또 검출기의 양극선

이 설치된 전극 부분 양단에 end-veto를 설치할 경우 잡음 제거율을 더 높일 수 있으나, 수치모의 실험에서는 문제의 단순성을 위해 이를 고려하지 않았다.

3. X-선 검출원리와 수치모의 실험

3.1 X-선 검출원리

열차폐창(thermal shield)과 검출기창을 투과해 들어온 X-선은 광-전자 흡수과정을 통해 검출개스에 흡수되고, 검출개스 원자들의 원자각 중의 하나로부터 광전자가 방출된다. 이 광전자는 입사 X-선과 전자의 구속에너지 차에 해당하는 에너지를 갖는다($E_{pe} = E_X - E_b$). 광전자들은 다시 검출개스와 반응하여 부가적인 전자-이온 쌍을 만들게 되는 과정을 거쳐 결국 에너지가 소실되고, 경로상에 전자-이온쌍 구름을 형성 하게 된다.

검출개스 원자들로부터 광전자가 방출된 후 여기된 원자들은 오제전자(Auger electron; $E_{Ae} \sim E_n - 2E_{n-1}$, $n = 1, 2, 3 \dots = K-, L-, M-shell \dots$)나 형광 X-선(fluorescent X-ray; $E_{fX} = E_n - E_{n+1}$) 방출과정을 통해 재천이 된다. 오제전자는 광전자와 마찬가지로 경로상에 전자-이온쌍 구름을 형성하게 되고, 형광 X-선은 보다 낮은 에너지 준위의 원자각과 광-전자 흡수과정을 통해 흡수된다. 광전자와 오제전자에 의해 형성된 전자 구름은 부가된 전기장에 의해 증폭과정을 거친 후 양극선으로(이온 구름은 음극선으로) 모이게 되고, 최종적으로 검출기 뒷단에 연결된 전자회로를 통하여 신호가 처리된다. 신호 출력펄스의 크기는 입사 X-선 에너지에 비례한다.

3.2 수치모의 실험

3.2.1 Monte Carlo 방법

검출효율에 대한 수치모의실험을 하기 위해서는 먼저 입사 X-선의 이동길이를 계산하여야 한다. 에너지 E 를 갖는 X-선이 혼합 검출개스내에서 이동할 평균 자유거리(mean free path)는 아래와 같이 주어진다.

$$l_f = \left[\sum_i^n \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \rho_i \right]^{-1}_E, \quad (3)$$

여기서 $(\mu/\rho)_i$ 와 ρ_i 는 각각 i 기체 원소의 질량흡수계수와 밀도를 나타낸다. 따라서 거리 l 만큼 갈 확률은

$$p_l = 1 - \exp(-l/l_f) \quad (4)$$

이고, 이를 규격화하여 역함수법을 이용하면 다음과 같다.

$$l = -\ln(1 - R) \cdot l_f. \quad (5)$$

즉, l 은 0과 1사이의 균일한 값을 갖는 난수(R)에 의해 발생된다. 그리고 거리 l 만큼 이동한후 i 원소와 반응할 확률은

$$p_i = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \rho_i / \sum_i^n \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \rho_i \quad (6)$$

이다. 또한, 총 질량흡수계수에 대한 각 원자각의 기여도와 광전자 발생후 형광 X-선이나 오제전자가 생성될 확률은 난수를 발생시켜서 선택한다.

3.2.2 모델 설정

모델을 설정하는데 있어 중요한 요소 중의 하나는 검출기의 구조이다. 계산에 사용된 다중셀 비례계수기의 구조와 구조인자에 대한 값들은 그림 1에 나타나 있으며, 여기서는 설정 모델에 대해서만 기술하기로 한다.

1) X-선은 콜리메이터에 의해 수직으로 입사되는 것으로 가정한다(그림 2).

2) X-선이 검출개스와 반응하는 과정은 광전효과, 콤프턴 산란, 쌍생성(pair production)등이 있으나, 이 계산에서는 50 keV 이하의 X-선에 대한 검출효율 계산을 하므로 콤프턴 산란과 쌍생성의 과정은 무시한다. X-선이 검출개스 내에서 광전효과를 일으키는 과정은 입사에너지에 따라 그림 3과 같이 고려한다. 검출개스들에 대한 질량흡수계수와 각 원자각의 흡수단(absorption edge) 에너지, 원자각의 기여도는 Storm & Israel (1970)의 자료를 사용하였으며, 열차폐창 및 검출기창 재질에 대한 밀도와 질량흡수계수는 Zombeck(1990)의 자료를 따랐다.

3) 광전효과에 의해 생긴 광전자, 오제전자, 형광 X-선은 등방적으로 생긴다고 가정한다. 그리고 형광 X-선 생성율(fluorescence yield)과 오제전자 생성율(Auger yield + Coster-Kronig yield)는 Krause(1979) 자료를 사용하였다.

4) 광전자와 오제전자의 비행거리는 에너지가 같은면 일정하다고 설정하고 감지셀간, 감지셀과 가드셀, 그리고 감지층간의 경계를 가로지르는 경우 선분비에 따라 각 영역에 에너지를 분배한다고 가정한다. 자유거리의 계산은 Zombeck(1990)의 range-energy 관계식을 사용하였다.

5) 경계를 가로지르는 경우 판별수준(혹은 트리거 레벨) 이상의 에너지가 분배될 경우 반-동시 계수법에 의해 신호를 제거한다.

6) 전기장의 효과, 그리고 양극선과 음극선의 효과는 무시한다.

3.2.3 수치모의 실험 과정

검출효율 계산을 위한 수치모의실험을 하기 위해서는 먼저 에너지에 따른 열차폐창, 검출기창, 그리고 검출개스의 질량흡수계수를 알아야만 한다. 이를 위해 Storm & Israel(1970)의 자료를 이용하여 fitting 함수를 구한다(Press *et al.* 1992). 이 함수를 각각의 질량흡수 계산에서 이용하며, 수치모의실험의 전반적인 과정은 아래와 같다.

1) 1 - 50 keV 사이의 임의의 에너지를 발생시켜 검출기창에 수직으로 입사시킨다.

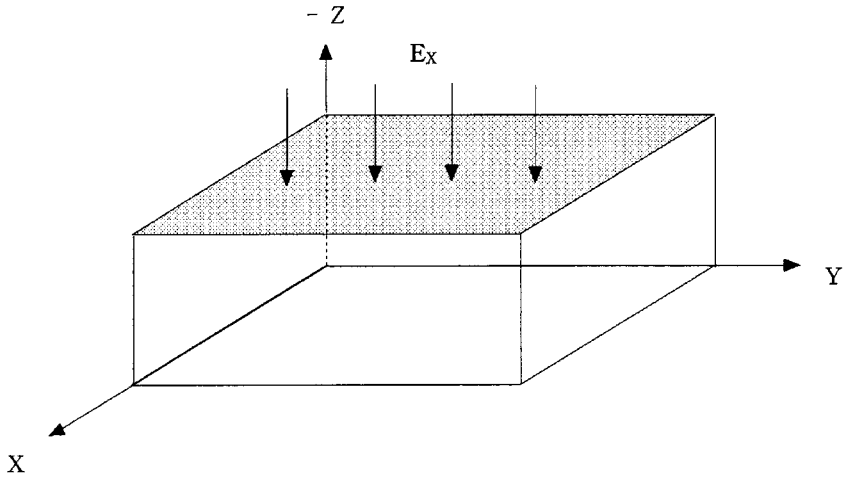


그림 2. 검출효율을 위한 수치모의실험 개요도.

2) 발생된 에너지에 해당하는 질량흡수계수를 구하고, 열차폐창과 검출기창 투과여부를 판별한다.

(a) 투과된 경우 → 과정 3)

(b) 투과 하지못한 경우 → 과정 1)

3) X-선에 대한 자유거리를 구하고 검출기로부터 이탈여부를 확인.

(a) 이탈한 경우 → 과정 1) (b) 이탈하지 않은 경우 → 과정 4)

4) 자유거리만큼 간곳에서 반응할 원자와 원자각을 결정한다.

5) 광전자의 이동방향과 자유거리를 계산하고 검출조건을 조사한다.

(a) 검출된 경우 → 과정 6)

(b) 검출되지 않은 경우 → 과정 1)

6) 오제전자 혹은 형광 X-선 생성 여부를 선택한다.

7-1) 오제전자의 이동방향과 자유거리를 구하고 검출여부를 판단한다.

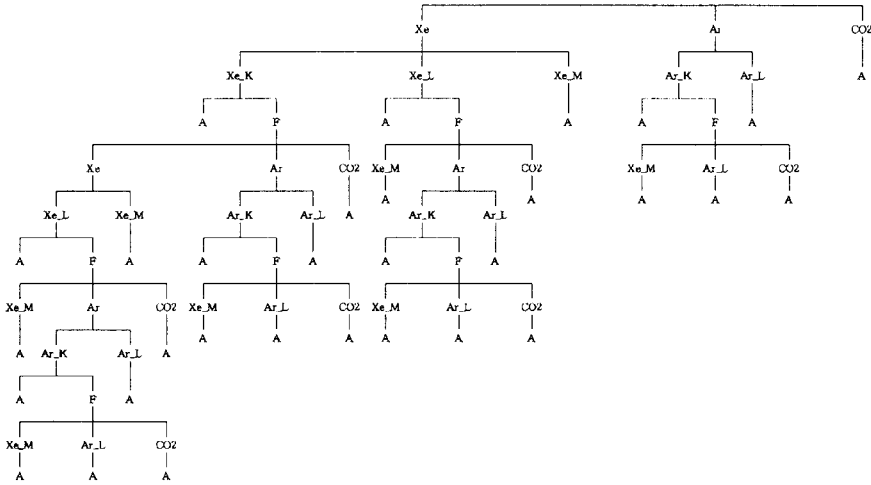
(a) 검출된 경우 → 과정 1)

(b) 검출되지 않은 경우 이전 사건(event)을 없애고 → 과정 1)

7-2) 형광 X-선의 이동방향을 결정 → 과정 3)

8) 위의 과정을 통한 에너지 결손량으로부터 검출효율을 구한다.

$$E_X \geq E_{Xe,K}$$



$$E_{Xe,L} < E_X \leq E_{Xe,K}$$

$$E_{Ar,K} < E_X \leq E_{Xe,L}$$

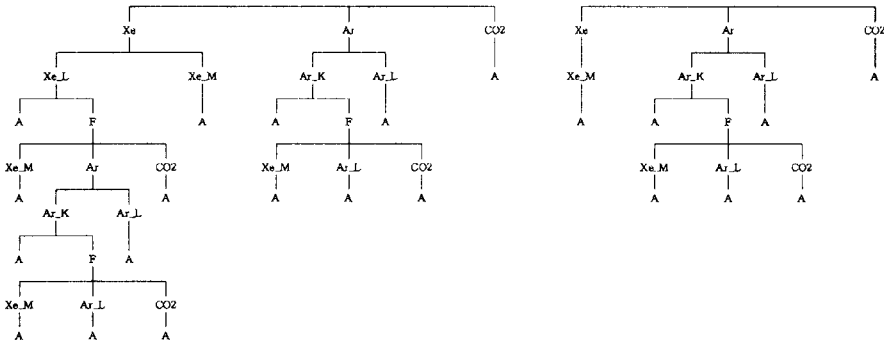


그림 3. 에너지에 따른 검출개스의 X-선 흡수과정. $E_X < E_{Ar,K}$ 에 대해서는 생략하였다. 이 그림에서 A와 F는 각각 오제전자와 형광 X-선의 흡수과정을 나타낸다. 또한 Xe와 Ar은 각각 Xenon과 Argon원자를 그리고 CO₂는 이산화탄소 분자를 의미하며, 아래첨자 K, L, M은 각각의 원자들에 대한 원자각을 나타낸다.

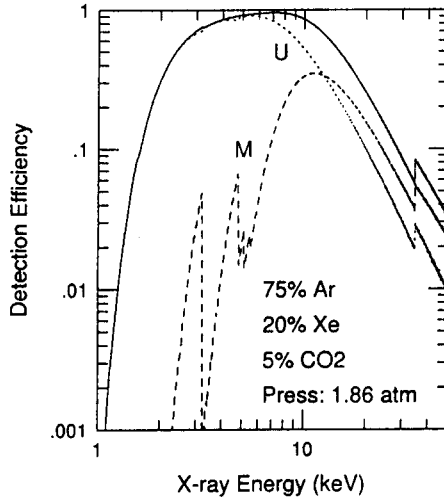


그림 4. Ginga/LAC의 X-선 검출효율의 재현. 이 계산을 위해 4×10^8 개의 X-선 광자를 사용하였고, 에너지 분해능은 0.025 keV 그리고 판별기의 트리거 레벨은 0.5 keV로 설정하였다. 이 그림에서 실선은 총 검출효율을 나타내고, U, M은 각각 상층과 중간감지층의 검출효율을 나타낸다.

4. 모의실험 결과

4.1 프로그램의 검증

그림 4는 개발된 프로그램을 이용하여 계산된 Ginga/LAC의 검출효율을 보여준다. 이 그림에서 실선은 총 검출효율을 나타내고, U와 M은 각각 검출기의 상층과 중간 감지층을 나타낸다. 34.56 keV 근방에서 보이는 구조는 Xe-K 흡수단에 의한 효과이다. 중간 감지층에서 뚜렷하게 보이는 5.45 keV, 5.10 keV, 4.78 keV, 그리고 3.20 keV의 구조들은 각각 Xe-L_I, -L_{II}, -L_{III}, 그리고 Ar-K 흡수단에 의한 영향 때문이다. 이 계산에서는 Turner *et al.* (1989)에 보고된 검출기 구조인자를 사용하였으며, 검출 개스는 혼합개스로서 75% Ar + 20% Xe + 5% CO₂를 사용하였다(여기서, 검출개스의 압력은 1.86 기압 그리고 온도는 273 K 이다). 열차폐창은 Mylar(2.0 μm) 와 Kapton(3.0 μm) 이며, 열차폐창에 도금된 알루미늄의 총 두께는 0.1 μm 이다. 검출기창은 두께가 62.0 μm인 베릴륨(Be)을 사용하였다. 그림 5에 입사 X-선 에너지에 따른 검출기창과 열차폐창의 투과율을 계산하였다.

그림 4의 검출효율은 열차폐창과 검출기창의 투과율을 고려한 값이며, 감지층과 층 그리고 감지셀과 비토셀 사이에 반-동시 계수법을 적용하였다. 판별기의 트리거 레벨은 0.5 keV로 설정하였다. 감지셀과 셀 사이의 반-동시 계수법은 상층에만 적용하였다. 계산결과 3 keV, 10 keV, 20 keV, 그리고 34.56 keV의 X-선에 대한 총 검출효율은 각각 72%, 85%, 25%, 그리고 8% 이다. 이 값들은 Ginga/LAC의 계산결과와 비교할 때(Turner *et al.* 의 그림 8) 약 1-2% 범위 내에서 아주 잘 일치하

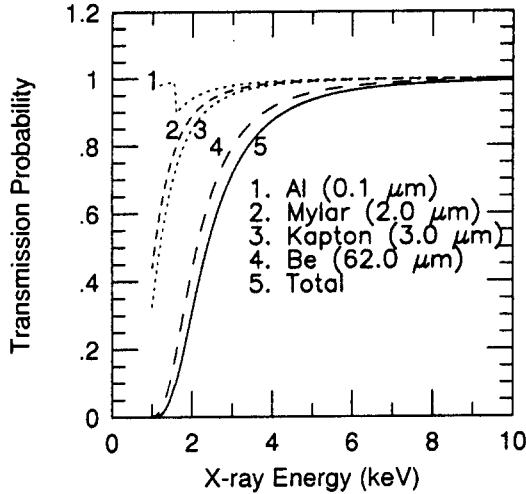


그림 5. 열차폐창과 검출기창에 대한 X-선 투과율. 곡선 1은 0.1 μm 두께의 알루미늄에 대한 투과율을 나타내고, 곡선 2 - 4는 각각 2.0 μm 의 Mylar, 3.0 μm 의 Kapton, 그리고 62.0 μm 베릴륨에 대한 투과율을 나타낸다. 곡선 5는 이들 열차폐창과 검출기창에 의한 총 X-선 투과율을 나타낸다.

고 있음을 알 수 있다. 중간 감지층의 Ar-K 흡수단과 Xe-L 흡수단들에서의 검출효율 역시 매우 잘 일치하고 있다. 따라서, 이 연구에서 개발된 프로그램의 모의실험 과정과 방법이 적절하다고 결론 내릴 수 있다. 1-2%의 오차는 계산에 사용된 가스원자들의 데이터, 열차폐창(특히, Kapton)의 질량흡수계수와 밀도, 콜리메이터 경계로부터 양극선 끝단까지의 거리, 등의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

4.2 검출효율 계산

천문대/X-선연구팀에서는 그림 1에서 보는 바와 같은 형태의 다중셀 비례계수기를 계획하고 있다. 그림 6은 이러한 비례계수기에 75% Ar + 20% Xe + 5% CO₂의 혼합가스(압력 1.05 기압)와 검출기창으로 25 μm 두께의 Mylar를 사용하였을 때의 검출효율을 나타낸다. 여기서, 각각의 감지셀과 비토셀 크기는 1.1 \times 1.1 cm 그리고 두 개의 감지층(2 \times 1.1 cm)과 한 개의 비토층(1.1 cm)을 고려하였다. 반-동시 계수법은 앞에서 언급한 바와 같이 감지층과 층, 감지셀과 비토셀, 그리고 감지셀과 셀 모두에게 적용하였다. 열차폐창으로는 알루미늄이 도금된 6 μm 의 Polypropylene과 6 μm 의 Mylar를 가정하였고, 도금된 알루미늄의 총 두께를 0.1 μm 로 가정하였다. X-선은 검출기 몸체로부터 한 셀 안쪽부터 입사된다고 가정하였고, 판별기의 트리거 레벨을 2.0 keV로 설정하였다.

그림 6에서 곡선 5와 6은 각각 상층과 중간 감지층의 검출효율을 나타내고 곡선 4는 총 검출효율을 나타낸다. 곡선 3은 반-동시 계수법을 적용하지 않았을 때의 총 검출효율을 나타내고, 곡선 1은 혼합가스의 검출효율을 그리고 곡선 2는 열차폐창과 검출기창의 투과율을 나타낸다. 곡선 6에서 뚜렷하게 볼 수 있는 불연속적인 구조들은 그림 4와 마찬가지로 Ar-K, Xe-K & -L 흡수단들에 의한 효과

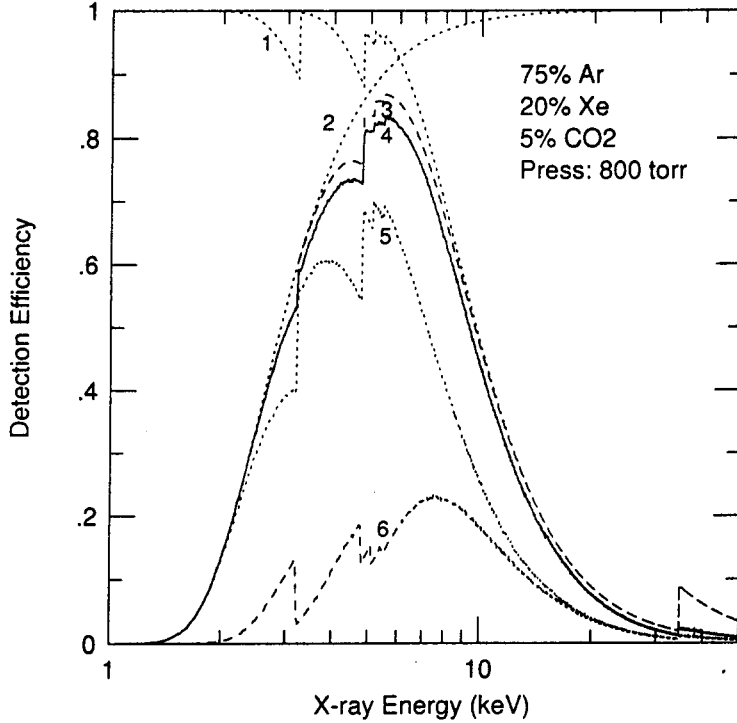


그림 6. 다중셀 비례계수기의 X-선 검출효율. 이 계산을 위해 2×10^8 개의 X-선 광자를 사용하였고, 에너지 분해능은 0.025 keV 그리고 판별기의 트리거 레벨은 2.0 keV로 설정하였다. 이 그림에서 곡선 1은 혼합개스의 검출효율을 나타내고, 곡선 2는 열차폐창과 검출기창의 투과율을 그리고 곡선 3과 4는 반-동시 계수법을 적용하지 않았을 때와 적용하였을 때의 총 검출효율을 나타낸다. 곡선 5와 6은 각각 상층과 중간 감지층에서의 검출효율을 나타낸다.

이다. 계산결과, 반-동시 계수법을 적용하였을 때의 검출효율은 3 keV, 10 keV, 20 keV, 그리고 34.56 keV에서 각각 50%, 43%, 8%, 그리고 2% 정도이다. 이러한 값들은 반-동시 계수법을 적용하지 않았을 때의 50%, 47%, 9%, 그리고 9%와 비교할 때 에너지 따라 4% - 7% 정도 적은 값이다. 반-동시 계수법을 적용하지 않았을 때의 검출효율은 식 (1)을 사용하여 계산하였다. 반-동시 계수법을 적용하였을 때 X-선 신호의 제거요인은 그림 7에서 보는 바와 같다. 이 그림에서 번호 1-3은 각각 형광 X-선, 광전자, 그리고 오제전자에 의한 X-선 신호의 제거율을 나타내고, 각각의 방향은 그림 2에 나타낸 것과 같다. 이 결과에서 알 수 있는 사실은 10 keV 미만에서는 형광 X-선과 오제전자에 의한 X-선 신호의 손실이 두드러지고(형광 X-선 > 오제전자 > 광전자), 10 - 34 keV 영역에서는 광전자의 영향이(광전자 > 형광 X-선 > 오제전자), 그리고 35 keV 이상에서는 다시 형광 X-선에 의한 영향이(형광 X-선 >

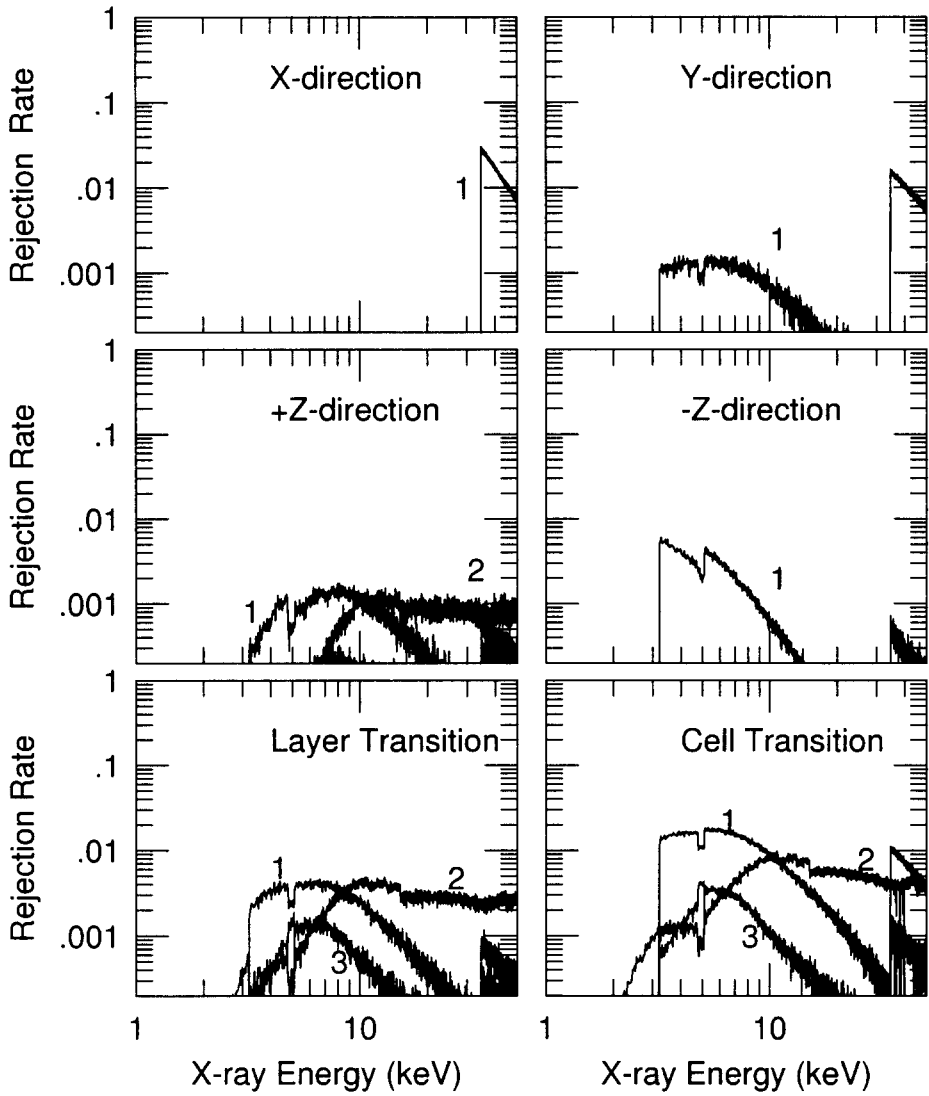


그림 7. 반-동시 계수법에 의한 X-선 신호제거요인. 이 그림에서 번호 1 - 3은 각각 형광 광자, 광전자, 그리고 오제 전자에 의한 제거 성분을 나타내고, X-방향과 Y-방향은 각각 양극선에 평행한 방향과 수직인 방향을 그리고 Z-방향은 X-선의 입사방향을 의미한다(그림 2 참조). 또한, 이 그림에서 Layer Transition은 감지층과 층 혹은 감지층과 비토층 사이의 경계를 가로지르는 경우를 그리고 Cell Transition은 감지셀과 셀의 경계를 가로지르는 경우를 나타낸다.

광전자 > 오제전자) 두드러진다는 것이다. 이 결과에 대한 토의는 5.2절에서 언급하기로 한다.

그림 8은 개스압력과 개스성분비에 따른 검출효율변화를 보여준다. 검출효율은 예측했던 바와 같이, 개스압력이 증가할수록 그리고 Xe 개스의 성분비가 증가할수록 증가한다. 예를 들어, 95% Ar + 5% CO₂의 경우, 개스압력을 1 기압에서 2 기압으로 높여줄 경우, 검출효율은 3 - 10 keV 범위에서 6 - 22%가 증가하고, 15 - 30 keV 범위에서는 1 - 6% 증가한다. 반면, 95% Xe + 5% CO₂의 경우는 3 - 10 keV 범위에서 0.1 - 10% 그리고 15 - 30 keV 범위에서 10 - 25% 증가한다. Ar + Xe 혼합개스의 경우(1 기압), Xe 개스의 비율을 20%에서 47%로 약 2.5배 증가시켰을 때, 검출효율은 3 - 10 keV 범위에서 3 - 22% 그리고 15 - 30 keV 범위에서 3 - 13% 증가한다. 개스압력이 2 기압일 때, Xe 개스의 혼합비율에 따른 검출효율 차이는 3 - 10 keV 범위에서 0.5 - 19% 그리고 15 - 30 keV 에서 4 - 20% 정도가 됨을 알 수 있다. 그림 8의 결과에서 한가지 흥미 있는 사실은 다음과 같다. 주어진 개스에 대해 압력을 1 기압에서 2기압으로 높여준다고 해도 반-동시 계수법에 의한 X-선 신호의 제거율에는 거의 변화가 없다는 것이다. 예를 들어, 95% Ar + 5% CO₂와 95% Xe + 5% CO₂의 경우, 10 - 40 keV 범위에서, 압력변화에 따른 신호 제거율의 차이는 1% 미만이다. 그러나 개스의 혼합비율을 변화시켜줄때 그 결과는 약간 다르다. 즉, Xe 개스의 비율을 약 2.5배 증가시킬 경우, 30 keV 이하의 영역에서 X-선 신호 제거율의 차이는, Xe 개스의 비율을 높이지 않았을 때와 비교할 때, 약 1% 미만이다(개스의 압력이 1 기압일 때). 그러나 34.56 keV 이상에서는 그 차이가 약 8%에 이른다.

5. 토의

5.1 검출효율 분석

그림 6의 효율계산에서, 약 3 keV 이하의 X-선 검출효율은 에너지가 감소함에 따라 급격히 감소하고 약 7 keV 이상에서는 에너지가 증가함에 따라 검출효율이 매우 빠르게 감소하는 현상을 보인다. 이는 저 에너지 영역의 경우, 에너지가 감소함에 따라 검출기창과 열차폐창의 투과율이 현저히 감소하기 때문이며, 고에너지 영역의 경우는 에너지가 증가함에 따라 입사 X-선과 검출개스가 반응할 확률 즉, 질량흡수계수가 급격히 감소하기 때문이다. 따라서 관측된 X-선 스펙트럼의 형태는 이러한 검출효율 변화에 따라 결정되게 된다. 그림 9는 입사 스펙트럼이 power-law ($F(E) \propto E^{-\alpha}$) 와 흑체복사 ($F(E) \propto E^2 / [\exp(E/kT) - 1]$) 형태를 갖는다고 가정하였을 때, 그림 6과 같은 효율을 갖는 검출기에서, 관측된 스펙트럼의 모양을 보여준다.

단순하게, 검출효율을 높이기 위한 측면만 고려한다면, 그림 8의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 개스의 압력을 높이거나(혹은 감지셀의 크기를 크게 하거나), Xe 개스의 비율을 높이는 방법을 고려할 수 있을 것이다. 먼저 개스 압력을 높이는 경우, 가장 우려되는 점은 검출기창이 압력에 견딜수 있는가 하는 것이다. 앞의 계산에서 검출기 창으로 25 μm Mylar 필름을 고려하였다. 이 Mylar 창은 베릴륨 창에 비해 가격이 매우 저렴하다는 장점이 있지만 베릴륨 창에 비해 투과율이 낮고 압력에 약하다는 단점이 있다(예를 들어 3 keV 에너지에 대해서 62 μm 베릴륨의 투과율은 80%, 25 μm Mylar는

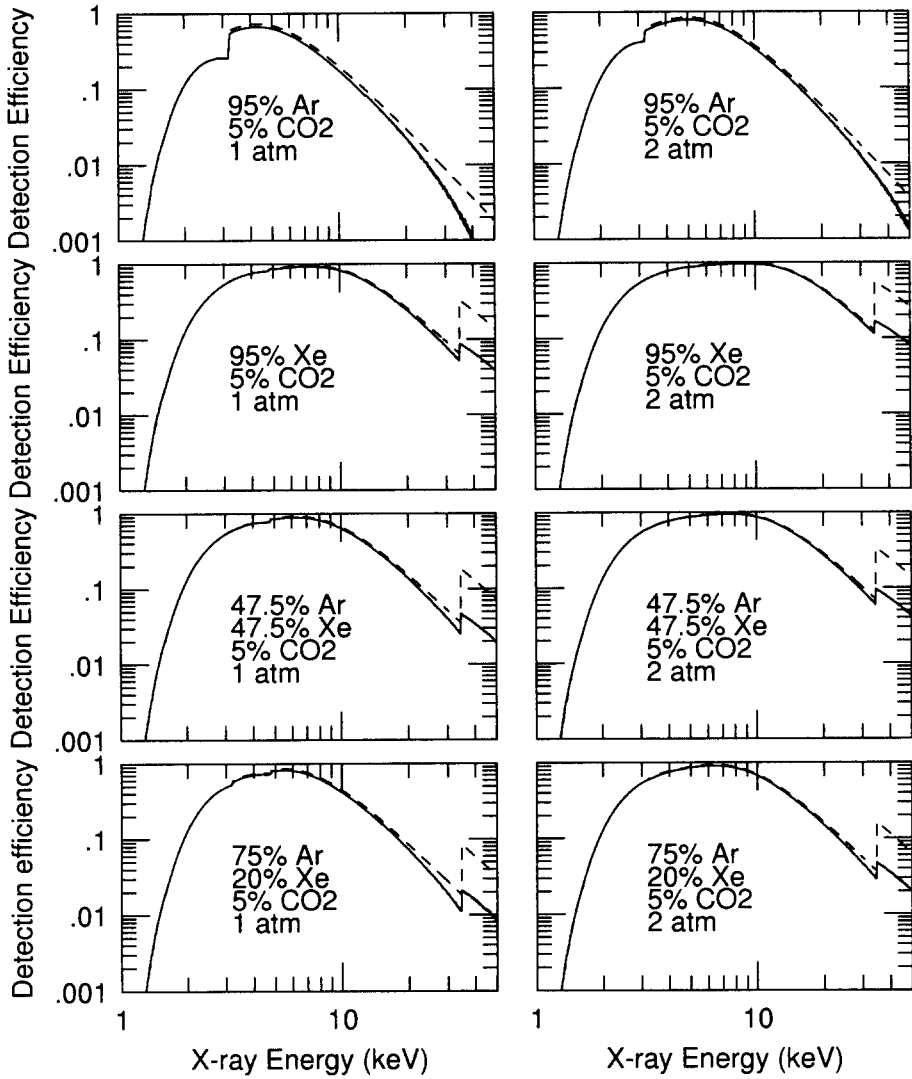


그림 8. 개스압력과 성분비에 따른 검출효율의 변화. 이 그림에서 파선과 실선은 각각 반-동시계수법을 적용하지 않았을 경우와 적용하였을 경우에 대한 검출효율을 나타낸다.

64% 이다). 만약 베릴륨 창을 사용한다고 하더라도 압력에 견딜 수 있도록 검출기 창의 두께를 증가시켜야 하는데, 이럴 경우 고에너지 영역에서는 개스 압력 증가로 인하여 효율이 증가하지만 저에너지 영역에서는 투과율 감소로 인하여 오히려 효율은 감소하게 된다. 또한, 압력을 증가시켜 주게 될 경우 이에 따라 검출기 동작 전압도 높혀주어야 하는 문제점이 발생한다.

다른 방법으로, 감지셀을 크게하면 검출효율의 증가를 기대할 수 있다. 그러나 감지셀의 크기를 단순히 증가시키게 되면 다음과 같은 불리한 점이 따른다. 감지셀과 셀들은 양극선을 중심으로 일정한 간격으로 설치된 음극선들에 의해 전기적으로 분리 된다. 따라서 감지셀 단면은 사각형 모양을 갖게 된다. 이러한 모양에서 감지셀의 크기를 증가 시키면 적절한 개스 증폭도($\sim 10^3$)를 얻기 위한 검출기 전압이 증가하게 되며, 동작 전압이 증가하게 되면 전극선 고정부에서의 고전압 누설, 코로나 방전등을 고려한 검출기 설계가 어려워지게 된다. 또 감지셀의 모양이 사각형인 검출기에서는 셀의 중앙부에 비해 셀의 모서리 부분에서 전기장의 세기가 균일하지 않게된다. 이곳에서는 전자의 이동 시간(drift time)이 길어지고, 따라서 초기 이온화 경로에서 재결합할 확률이 커지게 될 뿐만아니라, 검출개스 내에 존재하는 산소와 전자 친화력을 가진 불순 개스와 전자 결합하여 음이온을 만들 확률이 더 커지게 되므로, 검출기 모서리에서 검출되는 사건(event)은 에너지 분해능을 저하시키게 된다(Tomitani 1972). 따라서 검출기 셀의 크기를 증가시키면 에너지 분해능이 그만큼 나빠질 것으로 판단된다. 그러므로, 감지셀의 크기를 증가시키기 보다는 감지층의 개수를 늘리는 방법이 더 적절해 보인다. 실제로 Ginga/LAC에서는 검출기 창으로 베릴륨을 사용하고, 압력이 1.86 기압이며, 감지층이 세 개이기 때문에 이 연구에서 고려하고 있는 검출기 형태보다 10 keV 이상의 고에너지 영역에서 높은 에너지 효율을 얻을 수 있었다고 분석된다.

다음으로 검출기 효율과 관련하여 고려해야될 사항은 검출개스와 동작 안정성 문제이다. 비례계수기에서의 개스 증폭은 양이온보다는 자유 전자에 더 많이 의존하기 때문에, 비례계수기 내의 검출 개스는 전자 친화력을 갖지 않는 개스 종류를 선택하는 것이 중요하며, 주로 아르곤(Ar) 혹은 제논(Xe) 개스를 사용하고 있다. 또 주 개스의 이온화 포텐셜보다 낮은 이온화 포텐셜을 가진 2차 개스를 소량 첨가함으로써 검출 개스의 기본적 특성을 크게 향상 시킬 수 있다. 이러한 효과를 페닝 효과(penning effect)라고 부르며, 주 개스가 가진 긴 수명의 준안정 상태와 관련된 효과이다. 만약 주 개스의 준안정상태로 여기된 에너지가 첨가된 2차 개스의 이온화 에너지보다 높으면, 원자 충돌에 의해 2차 개스 원자를 이온화시킬 수 있다. 이러한 효과로 인하여, 2차 첨가 개스가 없을 경우에 비해, 입사 X-선의 단위 에너지 손실 당 형성되는 이온쌍의 수가 더 많게 된다. 따라서 총 이온 수에서의 상대적인 변동량도 감소하게되므로 비례계수기에서의 에너지 분해능이 훨씬 향상된다(Knoll 1979). 페닝 효과는 80% Ar + 20% Xe 혼합 개스에서 가장 잘 나타나고 검출기 수명도 길어지는 것으로 알려져 있다. 그러나 페닝 개스는 개스 성분에 포함된 불순물의 양에 그 특성이 좌우되기 때문에 불순물 양을 수 ppm 수준으로 줄여야 하는 취급상의 어려움이 있으며(Agrawal et al. 1989), 특히 Ar-Xe 혼합 개스는 중이온 입자와 같은 큰에너지에 대한 포획 효과가 잘 알려져 있지 않기 때문에 많이 사용되지 않는다. 따라서 비례계수기의 안정된 동작 특성을 얻기 위해 90% Ar + 10% CH₄ 검출 개스가

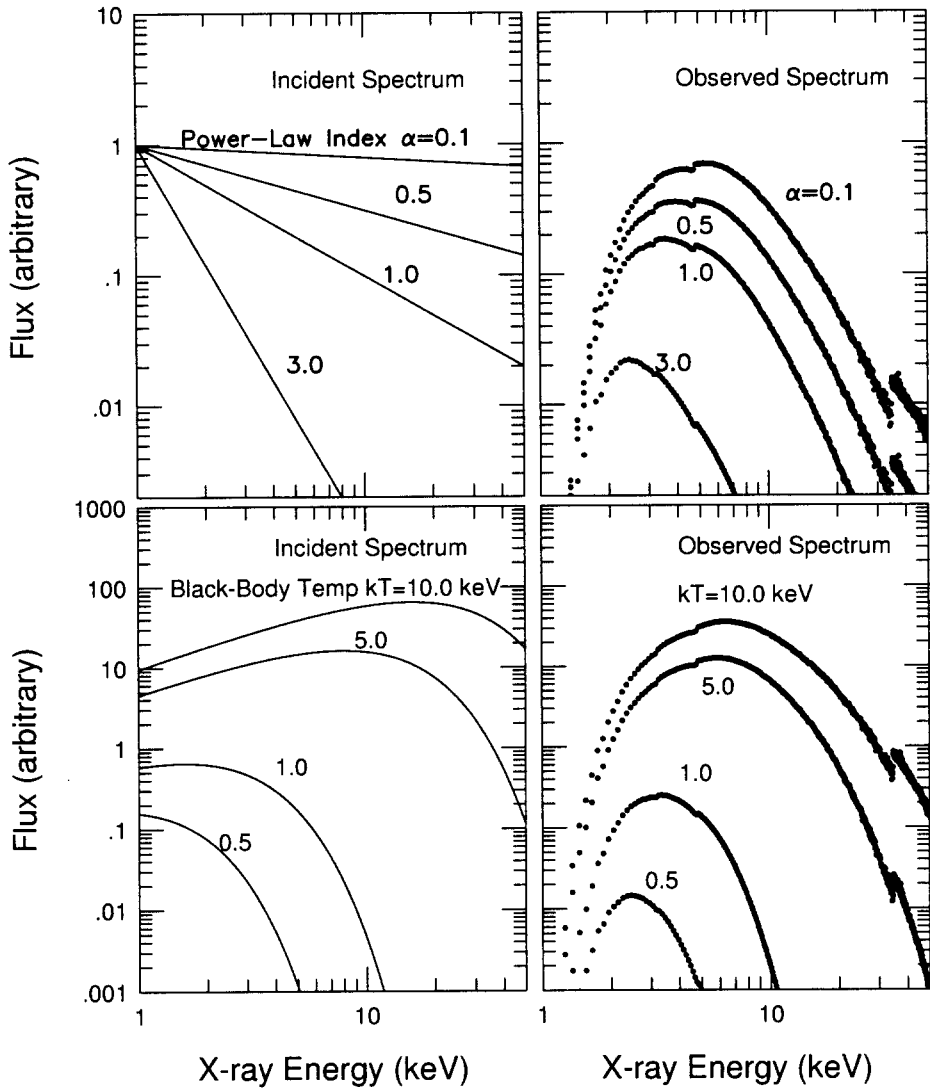


그림 9. 검출효율에 따른 입사스펙트럼 형태의 변형. 좌 상단과 좌 하단의 그림은 각각 power-law 스펙트럼과 흑체복사 스펙트럼을 나타내고, 우 상단과 우 하단은 각각에 대하여 검출된 스펙트럼을 나타낸다.

많이 선호되고 있는 실정이다(Agrawal 1998). 여기서 CH_4 개스는 안정된 개스 증폭 특성을 얻기 위해 첨가하는 억제용(quenching) 개스이다.

이상과 같은 검토에서 검출효율 증대를 위해 검출기 압력의 증가, 검출기 셀의 크기 증가로 인한 불리한 점들과 또한 검출기의 동작 특성을 확보하기 위해 검출 개스의 선정에 대해 살펴보았다. 결과적으로, 검출효율 증대를 위해 감지층의 개수를 늘려나가는 방법이 최선의 방법으로 보인다. 하지만 감지층의 개수를 늘리면, 그에 따라 검출기 부피가 커지고, 전극선의 수가 많아져서 조립 시간, 경비 및 무게가 그만큼 늘어나게 된다. 실제의 경우에는 검출기 무게와 공간의 제약이 다른 어떤 구속조건보다 우선하기 때문에 앞서 언급된 검출기 효율을 높이는 방법들 중에서 적절한 취사선택이 이루어져야 한다.

5.2 반-동시 계수법의 영향 분석

반-동시 계수법에 의한 X-선 신호의 손실요인을 살펴보면(그림 7), 10 keV 미만에서는 형광 X-선과 오제전자의 영향이 두드러지고 10 keV - 34 keV 영역에서는 광전자의 영향이, 그리고 35 keV 이상에서는 다시 형광 X-선에 의한 영향이 두드러진다. 10 keV 미만에서 형광 X-선(Xe-L & Ar-K)에 의한 X-선 신호의 손실요인은 감지셀과 셀간에 의한 영향이 가장 크고, 다음으로는 검출기창을 통한 형광 X-선의 탈출이, 그리고 감지층과 층사이에 의한 영향 순이다. 오제전자에 의한 손실요인은 셀간 에너지 분배에 의한 영향과 층간 에너지 분배에 의한 영향이 있는데 이 중 셀간 분배의 영향이 더 우세하다. 광전자에 의한 손실 요인은 셀간 영향과 층간의 영향 그리고 +Z-방향으로의 영향이 있는데, 그 순서는 셀간 효과, 층간효과, 그리고 +Z-방향 효과 순이다.

광전자와 오제전자의 경우 -Z-방향 즉, 검출기창 밖으로 탈출할 확률은 0%에 가깝다. 이는, 주어진 에너지에 대해, 전자의 평균자유거리(mean free path)가 X-선 광자에 비해 매우 적기 때문에, 입사 X-선에 의해 생성된 광전자와 오제전자는 검출기창 밖으로 탈출하지 못함을 의미한다. X-방향은 양극선에 평행한 방향이며, Y-방향은 양극선에 수직인 방향이다. 여기서, 우리는 X-선이 검출기 몸체로부터 한 셀(1.1 cm) 안쪽부터 입사된다고 가정하였다. 그러므로 가장 바깥쪽으로 입사된 X-선에 의해 생성된 광전자와 오제전자라 할지라도 검출 영역을 벗어날 확률은 매우 적다. 예를 들어, 75% Ar + 20% Xe + 5% CO_2 (1.05 기압)의 검출개스에서 30 keV의 에너지를 갖는 전자의 평균자유거리는 약 1.1 cm 이다. 형광 X-선에 의한 X-선 신호의 손실은 10 keV 미만과 35 keV 이상에서 두드러진다. 이는 10 keV 미만에서는 Xe-L 형광 X-선 효과 때문에, 그리고 35 keV 이상에서는 Xe-K 형광 X-선에 의한 효과 때문이라 이해된다. 예를 들어, Xe-K 형광 X-선(~ 29 keV)은 75% Ar + 20% Xe + 5% CO_2 (1.05 기압)의 혼합개스에서 대략 80 cm의 평균자유거리를 갖는다. 이러한 거리는 검출기의 감지셀 혹은 감지층의 크기와 비교할 때 매우 크다. 따라서, Xe-K 형광 X-선은 광전효과가 일어난 셀이나 층이 아닌 다른 곳에서 흡수될 확률이 매우 높으며, 이러한 형광 X-선은 반-동시 계수법에 의해서 제거되게 된다.

우리는 그림 8의 결과를 토대로, 개스압력과 조성비에 따른 검출효율 변화와 반-동시 계수법에

의한 X-선 신호의 손실에 대해 정성적인 분석을 하였다. 그 결과, 주어진 개스조성 아래서, 압력이 2배 증가된다고 할지라도 반-동시 계수법에 의한 X-선 신호 제거율에 큰 변화가 없음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 개스압력이 증가함으로써 X-선 흡수율이 증가되어, 광전자와 오제전자 그리고 형광 X-선의 발생률이 증가하게 되지만, 반대로 개스 밀도가 증가되기 때문에 이들의 평균자유거리가 줄어들게 되고, 이로 인하여 인접셀과 인접 층으로의 에너지 분배가 적게 일어나기 때문이라 이해된다. 그러나, 혼합개스에서 Xe 개스의 비율을 약 2.5배 증가시킬 경우, 30 keV 이하의 에너지 영역에서 X-선 신호의 제거율 차이는 1% 미만인 반면, 35 keV 이상에서는 제거율의 차이가 약 8% 가까이 됨을 알 수 있었다. 이는 34 keV 이하의 입사 X-선에 대해서는 신호의 주 손실요인이 광전자인 반면 35 keV 이상의 X-선에 대해서는 ~ 29 keV의 Xe-K 형광 X-선이 주 손실 요인이기 때문이다. 이러한 분석결과들을 고려해볼 때, 반-동시 계수법 적용에 의한 X-선 신호의 손실은 압력 변화와 거의 무관하다는 결론을 내릴 수 있으며, 검출효율을 증가시키기 위한 방법으로 Xe 개스의 성분비를 증가시키는 방법보다 압력을 증가시키는 방법이 더 적절할 것으로 판단된다.

6. 결론

천문대/X-선연구팀에서는 검출기 내부잡음을 줄이기 위해, 반-동시 계수법을 채택하는 다중셀 비례계수기를 개발할 예정이다. 이러한 계수기의 X-선 검출효율 결정을 위해, 몬테카를로법을 이용하는 수치모의실험 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램을 이용하여 Ginga/LAC의 검출효율을 재현할 수 있었고, 그럼으로 해서 수치모의실험 방법에 대한 검증할 수 있었다. 천문대/X-선연구팀에서 계획하고 있는 비례계수기에 대한 검출효율 계산 결과, 2 - 20 keV 영역에서 10% 이상의 X-선 검출효율을 기대할 수 있다는 결론을 얻는다. 반-동시 계수법 적용에 의한 X-선 신호의 손실은, 반-동시 계수법을 적용하지 않았을 때와 비교하여, 에너지에 따라 약 4 - 7% 정도 차이가 남을 확인할 수 있었다. 이 연구에서 개발된 수치모의실험 프로그램과 실험결과들은 앞으로 다중셀 비례계수기의 상세 설계와 검출효율 함수 결정에 활용될 예정이다.

감사의 글: 이 연구는 한국항공우주연구소의 수탁과제 "3단 과학로켓 탑재용 저잡음 X-선 관측기기 개발" 과 한국과학재단 중점과제 연구회(1998-02-02)의 일부 지원에 의한 것임

참고문헌

- 남옥원, 최철성 1995, 한국우주과학회지, 12, 66
 Agrawal, P. C., Ramsey, B. D., & Weisskopf, M. C. 1989, Nucl. Instr. & Meth., A277, 557
 Agrawal, P. C. 1998, private communication
 Hayashida, K. *et al.* 1989, PASJ, 41, 373
 Knoll, G. F. 1989, Radiation Detection & Measurement, 2nd Ed. (Jhon Wiley & Sons), 169

Krause, M. O. 1979, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 8, 307

Peterson, L. E. 1975, *ARAA*, 13, 423

Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. & Vetterling, W. T. 1992, *Numerical Recipes in Fortran*,
2nd Ed. (Cambridge Univ. Press), 668

Storm, E. & Israel, H. I. 1970, *Nucl. Data Tables*, A7, 565

Tomitani, T. 1972, *Nucl. Instr. & Meth.*, 100, 179

Turner, M. J. L. *et al.* 1989, *PASJ*, 41, 345

Zombeck, M. V. 1990, *Handbook of Space Astronomy & Astrophysics*, 2nd Ed. (Cambridge Univ.
Press), 307