

FABRY-PEROT 분광기의 특성과 천문학의 적용 FABRY-PEROT SPECTROMETER IN ASTRONOMY

박수종

서울대학교 지구환경과학부 천문학전공
SOOJONG PAK

Astronomy Program, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University:
soojong@astro.snu.ac.kr

Received Jul. 12, 2000; Accepted Aug. 1, 2000

ABSTRACT

The purposes of spectroscopy in astronomy are to measure the radiation flux of the spectroscopic emission or absorption line and to measure the dynamical parameters of the line profile. In order to use an appropriate instrument for the scientific purpose, we need to understand the characteristics of various spectrometers, e.g., a prism spectrometer, a grating spectrometer, and a Fabry-Perot spectrometer (FPS), which are being used in ultra-violet, optical, and infrared bands. The Fabry-Perot spectrometer is not very popular compared to the grating spectrometer, because of its complex and tricky operations. The Fabry-Perot spectrometer, however, can get a two-dimensional image at one exposure, so we can study radiation mechanisms and dynamical properties of extended sources, e.g., clusters, nebula, and galaxies.

Keywords: instrumentation: spectrographs — techniques: spectroscopic

1. 서론

분광학은 양자화된 원자 또는 분자의 에너지 차이만큼 흡수되거나 방출되는 복사에너지를 관측하여, 그러한 현상이 나타나는 이유를 분석하는 학문이다. 천문학에서 분광관측을 하여 직접적으로 얻으려는 정보는 (1) 방출 또는 흡수선의 총 복사에너지와 (2) 선의 모양에서 구한 운동학적 성분이다. 총 복사에너지를 구하는 경우 선의 파장에 따른 에너지를 적분하는 것이 목적이기 때문에 분광기의 분해능은 중요하지 않지만, 선의 운동학적 성분을 구하기 위해서는 분광기의 분해능이 중요한 요소가 된다. 그리고 측정하려는 천체의 모양(점광원 또는 크기를 가진 천체), 복사에너지의 밝기, 측정하려는 파장대 등에 따라 적절한 분광기를 사용하여야 한다. 이 논문에서는 자외선, 광학, 적외선 파장대에서 사용하는 여러가지 분광기의 종류와 특징을 정리한다. 그리고 비교적 사용이 적은 Fabry-Perot 분광기에 대해 자세히 기술하여 천문학에서의 어떤 분야에 사용이 가능한지를 논의한다.

2. 여러 가지 분광기의 기본원리와 구조

자외선, 광학, 적외선 파장대에서 사용하는 분광기는 빛의 굴절(refraction) 또는 빛의 간섭 현상을 이용하는 종류로

크게 나뉜다. 프리즘 분광기는 빛의 굴절을 이용하고, 격자 분광기(grating)는 빛의 회절과 간섭 현상을 이용하고, Fourier Transform 분광기 (Michelson 분광기)와 Fabry-Perot 분광기는 빛의 반사에 의한 간섭 현상을 이용한다.

2.1. 프리즘 분광기

2.1.1. 프리즘의 원리

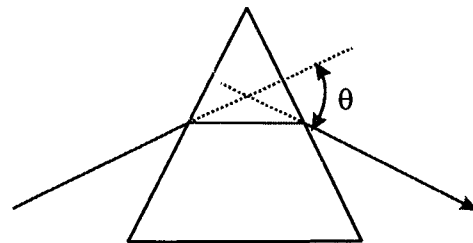


그림 1.— 프리즘의 원리. 프리즘을 통과하면서 굴절되는 빛의 경로를 보여준다.

Snell의 법칙에 의해 빛이 굴절될 때, 굴절율은 굴절지수 μ_λ 에 따라 결정된다. 굴절지수는 Hartmann의 분산 방

정식으로 표시할 수 있다:

$$\mu_\lambda = A + \frac{B}{\lambda - C} \quad (1)$$

여기에서 A, B, C 는 Hartmann 상수이다.

효율적으로 설계한 프리즘 분광기에서 파장에 따른 분산각도(θ , 그림 1 참조)는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Kitchin 1991):

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{-180AB}{\pi(\lambda - C)^2} \quad (2)$$

위의 식에서처럼 분해능은 파장이 클수록 작아지는 비선형적 특성이 있다. 그리고 프리즘 분광기는 분해능을 높이는 데 한계가 있고, 반사에 의한 손실을 막을 수 없으며, 원하는 파장대를 관측하는데 제한이 있어서 천문학에서 많이 사용되지 않는다. 대신, 프리즘의 문제점을 보완한 그리즘(grism) 분광기는 여러 천문대 (예, Canada-France-Hawaii 천문대)에서 쓰이고 있다.

2.1.2. 긴슬릿 분광기의 특징

그림2에서 볼 수 있듯이, 프리즘을 통과한 빛은 한쪽 방향으로 분산되기 때문에, 다른 광원과의 중첩을 막기 위해서 슬릿(slit)을 초점면에 놓는다. 슬릿을 좁고(W) 길게(L) 만들면, 긴슬릿 분광기 (long-slit spectrometer)가 된다. 이때, 그림2에서 보여주듯이 2차원 수광기(Optical CCD 또는 Infrared Array)의 한쪽 방향은 슬릿의 길이 방향의 1차원 영상이 되고 다른 쪽 방향은 분광된 파장의 방향이 된다.

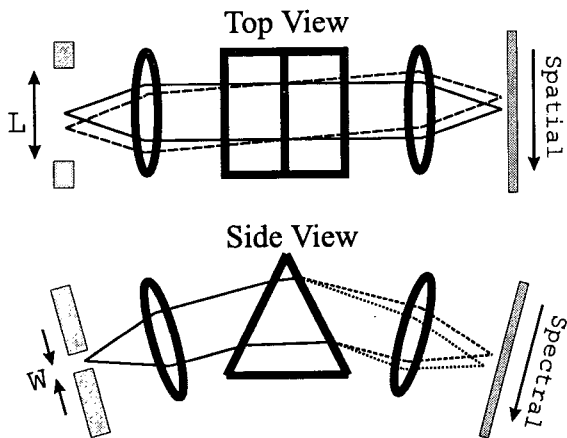


그림 2.— 긴슬릿 프리즘 분광기의 구조. 위에서 본 모습과 옆에서 본 모습을 보여준다.

긴슬릿 분광기의 구조는 격자 분광기에서도 사용되는데, 슬릿의 너비(W)의 크기가 작으면 분해능을 높일 수 있지만, 슬릿의 너비 자체의 회절현상이 나타나기 때문에 한

계가 있다. 슬릿의 너비가 크면, 많은 빛을 모을 수 있지만 분해능이 작아진다. 별과 같은 점광원을 관측하는 경우, 슬릿의 크기가 광원의 크기보다 크면, 분해능의 변화는 없지만, 광원이 슬릿 폭의 가장자리로 움직이면 분광된 파장도 따라서 움직여서 파장의 눈금을 맞출 때 오차 (wavelength calibration error)가 나타날 수도 있다.

2.2. 격자분광기

2.2.1. 회절 분산과 Free Spectral Range(FSR)

어떤 창을 통과한 빛은 그 창 크기에 따라 회절효과가 나타나서 분산효과가 나타나고, 여러 창을 통과하여 분산된 전자기파는 서로의 중첩효과에 의해서 상이 변조된다. 그림 3에서처럼, 크기가 D 이고 각각 d 만큼 떨어져 있는 N 개의 창을 통과한 전자기파가 회절, 중첩에 의해 변조되어 나타내는 상의 밝기를 각도 θ 의 함수로 표시하면 다음과 같다 (Kitchin 1991).

$$I(\theta) = I(0) \frac{\sin^2(\pi \frac{D}{\lambda} \sin \theta)}{(\pi \frac{D}{\lambda} \sin \theta)^2} \frac{\sin^2(\pi \frac{Nd}{\lambda} \sin \theta)}{\sin^2(\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta)} \quad (3)$$

식 3에서 D 가 포함된 분수식은 창이 하나인 경우에 나타나는 상의 변조이고, d 가 포함된 분수식은 N 개의 창들이 서로 중첩하여 상이 변조되는 것을 의미한다.

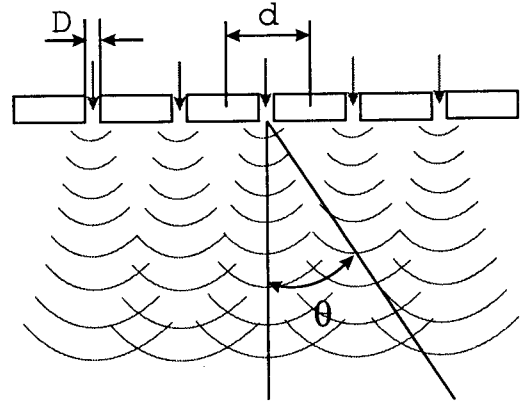


그림 3.— 여러 창을 통과한 빛의 회절과 중첩.

식 3에 포함된 사인함수에 의해서 θ 가 커짐에 따라 최대값은 다음의 식과 같이 일정한 간격을 두고 주기적으로 나타난다:

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{m\lambda}{d} \right) \quad (4)$$

이 식에서 m 은 줄무늬 순서(order of the fringe)를 의미한다. 주기적으로 나타나는 최대값의 간격을 파장의 단위로 바꾸면, λ/m 이 되고 이 값을 free spectral range (FSR)라고 한다. 즉 m 이 크면 FSR가 작아져서 서로 다른 m 에 의한 스펙트럼이 서로 겹쳐질 수가 있고, 이러한 현상을 막기

위해 필터(order sorting filter)를 사용해야 한다. 이 경우 필터의 투과 밴드폭은 FSR보다 작아야 한다.

2.3. 격자분광기의 구조

격자는 유리 등의 표면에 각도 i 만큼 기울어진 홈을 d 의 간격으로 길게 파서 만든다. 반사되는 각도를 표시하는 격자 방정식은 다음과 같다 (그림 4참조).

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{m\lambda}{d} - \sin i \right) \quad (5)$$

일반적으로 $m = 1 - 3$ 의 값에서 격자를 이용하고, 원하는 파장을 얻기 위해서 입사광과 격자의 각도를 조정한다.

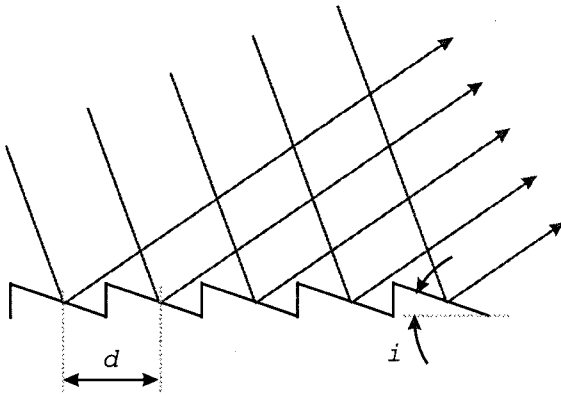


그림 4.— 격자분광기의 격자와 격자에서 반사된 빛의 경로.

2.4. Fabry-Perot 분광기

Fabry-Perot 분광기(Fabry-Perot Spectrometer; FPS)의 개념(그림 5 참조)은 20세기 초에 Fabry와 Perot(참고: “페로”라고 발음함)에 의해서 창안되었다. FPS는 Fabry-Perot Interferometer, etalon, Fabry-Perot etalon 등으로 불리기도 한다.

반사율이 높은 거울을 서로 마주보게 붙여놓고, 그림에서처럼 위에서 평행한 빛을 입사시켰을 때, 위의 거울을 투과한 빛은 아래 거울의 표면에서 일부는 투과하지만 대부분의 빛은 반사를 반복한다. 입사한 방향의 반대쪽에서는 두 거울 사이를 반사한 수만큼 빛이 아래거울을 투과하여 나오는데, 각각의 빛이 경로차만큼 서로 간섭현상을 보인다. 이때 투과한 빛의 파장 (λ)과 경로차의 관계는 다음과 같다.

$$m\lambda = 2\mu d \cos \theta \quad (6)$$

여기에서, m 은 간섭 순서 (order of interference)이고, μ 는 두 거울사이 물질의 굴절지수 (refraction index)이고, d 는 두 거울의 간격, θ 는 입사각이다. 따라서, 원하는 투과 파장을 결정하기 위해서는 위 식에 포함된 변수를 변화시키면 된다. 자동 제어가 발달하기 전인 1980년 이전에

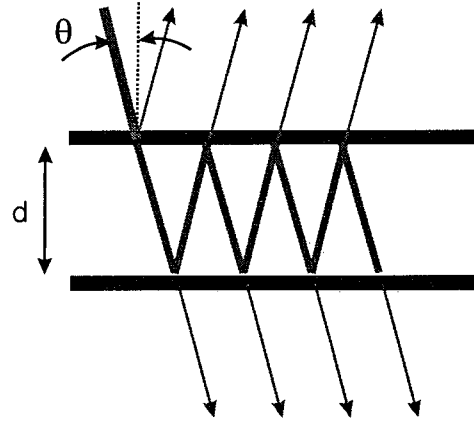


그림 5.— Fabry-Perot 분광기의 원리. 서로 마주본 두 거울을 빛이 투과할 때, 거울 내부에서 반사된 빛의 경로차에 의한 간섭현상을 이용한다.

는, 두 거울 사이에 기체를 채우고, 기체의 압력을 변화시켜서, μ 의 값을 조정하거나, θ 를 조정하여 투과 파장을 결정하였다. 최근에 제작되는 FPS는 PZT(piezoelectric transducer)를 반사 거울에 붙여서 거울의 간격을 미세 조정하는 방법을 사용하여 두 거울의 간격(d)을 변화시키는 방법을 사용한다. FPS의 기기 선모양 (instrument profile)은 다음의 방정식으로 표시할 수 있다(Moore, Davis, & Coplan 1989).

$$I(\mu, \theta, d, \lambda) = \frac{I_{peak} \left(\frac{T}{1-R} \right)^2}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left(\pi \frac{2\mu d \cos \theta}{\lambda} \right)} \quad (7)$$

위 식에서 T 는 거울의 투과율이고, R 은 거울의 반사율이다. 여기에서 주의할 점은, 관측하는 천체의 이미지의 중심부와 가장자리에서 나오는 빛의 입사각도 (θ) 차이에 의해서, 두 거울의 간격이 같아도, 중심부와 가장자리의 투과 파장이 달라진다는 것이다.

3. Fabry-Perot 분광기의 특성

3.1. Fabry-Perot 분광기의 기기 선모양

위의 식에서 볼 수 있듯이, FPS의 기기 선모양은 Lorentzian 선모양에 근사할 수 있다. 참고로 격자 분광기는 Gaussian 선모양을 만든다. Lorentzian 선모양을 Gaussian 선모양과 비교하면, 최대값 부근이 뾰족하고, 가장자리의 날개 부분이 두껍다(그림 6참조).

따라서 FPS는 관측된 선모양에서 Doppler 변환된 값을 구하는데 지장이 없지만, 총 복사에너지를 구할 때 더 넓은 파장대에서 적분을 해야 한다.

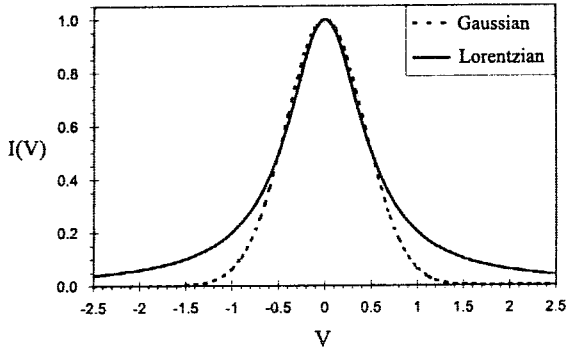


그림 6.— Gaussian 선모양과 Lorentzian 선모양의 비교. 각각의 선모양에서, 선 중심의 최대값이 1이고, 높이가 최대값의 반일때의 선폭 (Full Width at Half Maximum)이 1인 경우이다.

3.2. Free Spectral Range

FPS의 원리는 격자 분광기에서처럼 간섭 현상을 이용하기 때문에, Free Spectral Range를 고려해야 한다 (Section 2.2.1. 참조). 그림 7은 하나의 방출선을 FPS로 관측할 때, 간섭순서(m)에 따라 투과되는 양상을 거울간격(d)의 함수로 보여준다.

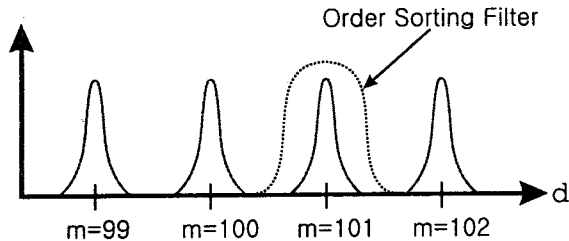


그림 7.— Fabry-Perot 분광기를 통과한 하나의 방출선이 거울간격(d)의 함수로 나타나는 모습. 특정 파장대를 관측하기 위해서는 필터(order sorting filter)를 사용해야 한다.

천체에서 나오는 방출선이 많이 있다면, 주어진 거울의 간격(d_o)에서 서로 다른 간섭순서를 가진 방출선이 동시에 관측될 수 있다:

$$d_o = \frac{m_1 \lambda_1}{2} = \frac{(m_1 + 1) \lambda_2}{2}. \quad (8)$$

FPS의 Free Spectral Range는 다음과 같이 정의할 수 있다 ($\mu = 1, \theta = 0$ 이라고 가정):

$$\Delta \left(\frac{1}{\lambda} \right)_{FSR} = \frac{1}{2d_o} \quad (9)$$

$$\Delta \lambda_{FSR} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2d_o} = \frac{\lambda_2}{m} \quad (10)$$

이러한 파장의 중첩을 막기 위해서는 격자 분광기에서 사용한 것처럼 필터(order sorting filter)가 필요하다. 여기

에서 주의할 점은 간섭순서(m)의 값이 격자분광기의 경우($m = 1 - 3$)보다 크기때문에, Free Spectral Range의 값이 작고, 따라서 필터의 투과폭이 작아야 한다. 일반적으로 투과폭이 투과파장의 0.5%보다 작은 협대역필터는 제작하기가 어렵고, 관측에 많은 제약이 있다. 따라서, 간섭순서값이 200보다 큰 경우에는, 고정필터를 쓰지 않고 간섭순서가 다른 (또는 FSR가 다른) FPS를 동시에 사용하여 원하는 파장을 골라내는 방법을 쓸 수 있다.

3.3. Finesse와 분해능

식 7의 분모에 있는 $4R/(1-R)^2$ 항은 기기 선모양과 관계가 있고, 거울의 반사율(R)이 커질수록 FPS의 분광분해능이 증가함을 알 수 있다. FPS의 성능을 나타내는 값 중에서 가장 중요한 것은 Finesse이다. Finesse는 거울의 반사율, 두 거울의 평행상태(Δs), 입사광의 각범위($\Delta \theta$) 등 여러가지 원인에 의해서 표시할 수 있다:

$$F_{ref} = \frac{\pi \sqrt{R}}{1-R} \quad (11)$$

$$F_{pp} = \frac{\lambda}{2\Delta s} \quad (12)$$

$$F_{ang} = \frac{\lambda}{d(\Delta \theta)^2} \quad (13)$$

위 식에서 표현된 각각의 Finesse는 다음의 식으로 종합하여 effective Finesse값으로 표시한다:

$$\frac{1}{F_{eff}^2} = \frac{1}{F_{ref}^2} + \frac{1}{F_{pp}^2} + \frac{1}{F_{ang}^2} \quad (14)$$

그리고, FPS의 분광 분해능은 Finesse와 간섭순서의 곱으로 나타난다:

$$\frac{\lambda}{\Delta \lambda} = m F_{eff} \quad (15)$$

3.4. Fabry-Perot 분광기의 제작

광학과 적외선에서 사용되는 FPS는 독립된 구조로 만들 수 있고, 상용으로 구입할 수 있다. 그리고 FPS는 투과 필터와 같은 역할을 하기때문에 (그림 5 참조), FPS의 사용이 광학계의 구조에 별 영향을 주지 않는다. 대부분의 천문대는 FPS를 사용할 때, 기존의 카메라 시스템의 앞에 부착과 탈착이 가능한 FPS를 장착하여, 고정 필터를 사용하는 이미지 관측과 FPS를 사용한 분광 관측을 병행하고 있다.

그림 8은 University of Texas Fabry-Perot Spectrometer (Luhman et al. 1995)의 구조를 보여준다. 이 기기는 FPS가 듀어의 창 앞에 설치되어 있는 간단한 광학계로 만들어져 있음을 알 수 있다. 격자 분광기와 비교할 때, FPS는 훨씬 간단하게 제작할 수 있는 장점이 있다.

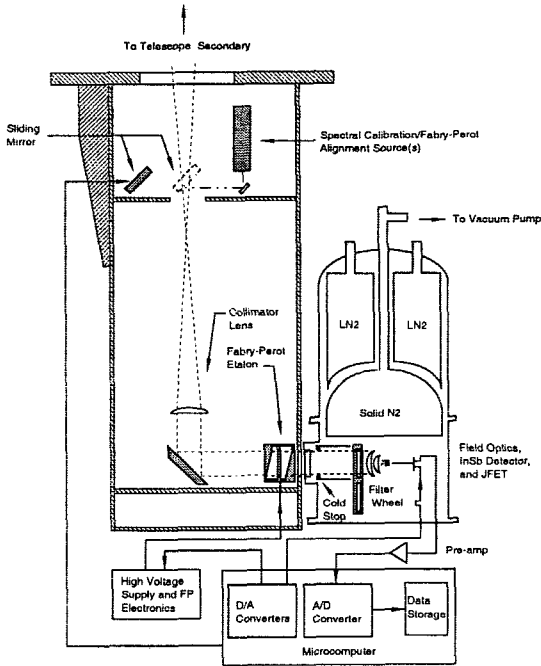


그림 8.— University of Texas Fabry-Perot Spectrometer의 구조 (Luhman et al. 1995).

3.5. Fabry-Perot 분광기의 데이터 구조

1차원의 이미지를 갖는 긴슬릿 분광기(프리즘 또는 격자 분광기, 그림 2 참조)를 사용하여 얻은 2차원 데이터에서 한쪽 방향은 긴슬릿의 길이에 해당되고, 다른 방향은 분산에 의한 분광 성분에 해당된다(그림 9참조). FPS는 투과 파장을 조절할 수 있는 협대역 필터와 같은 개념이다. FPS에 의해 얻은 2차원 데이터는 두 방향이 전체의 2차원 이미지에 해당되고, 각각의 프레임은 분광 성분에 해당된다.

FPS는 ON-OFF 방식과 SCAN 방식으로 사용할 수 있다. ON-OFF 방식은 FPS를 협대역 필터처럼 사용한다. 투과 파장이 관측하려는 분광선의 중앙(λ_{ON})과 일치하도록 맞춰서 얻은 이미지와 투과 파장을 분광선에서 떨어진 파장대(λ_{OFF})에 맞춰서 얻은 이미지를 얻어서, 두 이미지의 차이를 구한다. 이 방법은 관측시간을 줄일 수 있다는 장점이 있지만, Section 2.4.에서 지적한 것처럼, 관측한 이미지의 중심부와 가장자리의 입사각 차이에 의해서 투과 파장이 달라지는 문제가 있다. 그리고, OFF-band (λ_{OFF})에 다른 분광선이 중첩된 경우에는 올바른 관측이 어려워진다. SCAN 방식은 투과 파장대를 조금씩 움직이

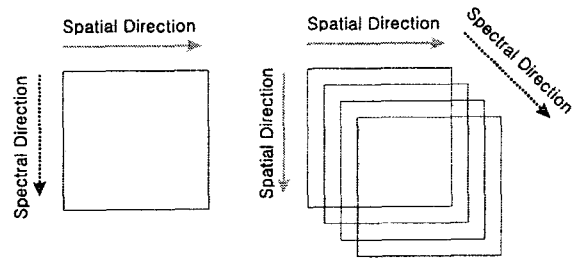


그림 9.— 긴슬릿 분광기와 Fabry-Perot 분광기의 데이터 구조 비교. 왼쪽은 긴슬릿 분광기로 얻은 이미지이고, 오른쪽은 Fabry-Perot 분광기로 얻은 이미지이다.

면서 이미지를 얻어서, 완성된 분광선의 프로파일을 구하는 방법이다. 그림 10는 이러한 방법을 사용하여 얻은 분광선의 모양을 보여준다 (Pak et al. 1998). 이 방법은 관측시간이 오래 걸리지만, 분광선의 모양을 구하여 운동학적 연구를 하는 경우에 필수적이다.

30 Dor (0,0)

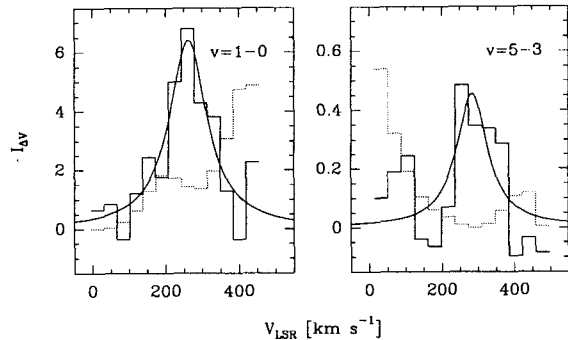


그림 10.— SCAN 방식을 써서 구한 분광선의 모양. 대마젤란 은하에서 관측한 H₂ v = 1 - 0 S(1)과 H₂ v = 5 - 3 O(3)의 방출선이다(Pak et al. 1998).

3.6. Fabry-Perot 분광기의 관측 대상

FPS는 2차원의 이미지를 한번 노출로 얻을 수 있기 때문에, 크기가 있는 천체의 분광선을 연구하는데 적절하다. 최근에 관측 연구한 예를 보면, 목성의 오로라에서 보이는 H₃⁺ 2.093 μ m, H₂ 2.121 μ m의 방출선을 비교하여 그 지역의 물리적 상태를 연구하거나 (Mai & Jockers 2000), 우리 은하의 반사성운인 NGC 2023와 NGC 7023의 photodissociation region (PDR)에서 방출되는 근 적외선 밴드의 H₂ 방출선들을 관측하여 서로의 밝기 비를 이용하여 충격 파에 의한 방출과 구분하는 연구(Takami et al. 2000), 가스에서 방출되는 여러 분광선의 밝기를 연구하는 것이 일반적이다. 이 경우에는 ON-OFF 방식의 관측으로 충분하다. 그리고 SCAN 방식으로 관측하여, protostellar out-

flow L1551의 충격파에 의해서 방출되는 [S II] $\lambda 6731$ 과 $H\alpha$ 분광선의 속도 변이를 측정하여 충격파의 구조를 연구하거나 (Hartigan et al. 2000), 구상 성단의 중심 별 대기의 흡수선을 관측하여 중심부의 블랙홀의 존재 가능성을 연구하거나 (Gebhardt et al. 2000), 나선은하 NGC 5668의 $H\alpha$ 방출선을 관측하여 은하의 특이 회전운동을 연구하기도 (Jimenez-Vicente & Battaner 2000) 한다. 그 외에도, FPS의 높은 분광능력을 이용하여, Orion IRc2의 H_2O 흡수선을 Infrared Space Observatory의 중적외선 밴드에서 관측한 경우도 있다 (Wright et al. 2000).

4. 결론

FPS는 화학, 물리 등의 분야에서 널리 사용되는 분광기이지만, 천문학에서는 주위 환경이 안정되지 않은 개방된 공간에서 사용하므로, 온도와 습도의 변화와 장치의 각도차이 변화 등으로 FPS의 두 거울의 평행상태를 유지하는데 많은 주의가 필요하기 때문에 많이 사용되지 않는다. 또한, 격자분광기에서는 한번 노출로 분광관측을 할 수 있지만, FPS는 순차적으로 노출을 주어야 함으로 날씨의 변화에 민감해서 FPS의 관측을 하려면 정밀 측광에서 요구하는 날씨가 필요하다. 그리고, 한번에 하나의 분광선을 관측하므로, 여러 분광선의 밝기 비교를 연구하는데 어려움이 많다. 그 외에 FPS로 관측한 특정 파장대의 2차원 이미지를 모아서 우리가 원하는 3차원 (2차원 데이터 + 1차원 분광)의 데이터를 만들려면 많은 시간과 노력을 투자해야 한다.

그렇지만 FPS는 격자 분광기와 비교할 때 제작이 간편하다는 장점이 있고, 긴슬릿 분광기로 할 수 없는 넓은 지역을 관측해야 하는 성단, 성운, 은하의 연구에 적합하다.

특히 성단의 방출선을 관측하거나, 은하의 운동학적 연구를 할 때 최대의 효율을 얻을 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENTS

이 논문은 대한민국 정부의 BK21 사업의 지원에 의한 것임.

참고문헌

- Gebhardt, K., Pryor, C., O'Connell, R. D., Williams, T. B., & Hesser, J. E. 2000, AJ, 119, 1268
 Jimenez-Vicente, J., & Battaner, E. 2000, A&A, 358, 812
 Hartigan, P., Morse, J., Palunas, P., Bally, J., & Devine, D. 2000, AJ, 119, 1872
 Kitchin, C. R. 1991, "Astrophysical Techniques", Second Ed., Adam Hilger Ltd
 Luhman, M. L., Jaffe, D. T., Keller, L. D., & Pak, S. 1995, PASP, 107, 184
 Mai, H., & Jockers, K. 2000, Icarus, 146, 494
 Takami, M., Usuda, T., Sugai, H., Kawabata, H., Suto, H., & Tanaka, M. 2000, ApJ, 529, 268
 Moore, J. H., Davis, C. C., & Coplan, M. A. 1989, "Building Scientific Apparatus", Second Ed., Addison Wesley
 Pak, S., Jaffe, D. T., van Dishoeck, E. F., Johansson, L. E. B., & Booth, R. S. 1998, ApJ, 498, 735
 Wright, C. M., van Dishoeck, E. F., Black, J. H., Feuchtgruber, H., Cernicharo, J., Gonzalez-Alfonso, E., & de Graauw, Th. 2000, A&A, 358, 689