

Fabry-Perot 간섭계 (Fabry-Perot Interferometer)

해설자: 박수중 (경희대학교 우주과학과, 2007.06.11)

분광학은 양자화된 원자 또는 분자의 에너지 차이만큼 흡수되거나 방출되는 복사 에너지를 관측하여, 그런 현상이 나타나는 이유를 분석하는 학문이다. 천문학에서 분광관측을 하여 직접적으로 얻으려는 정보는 (1)방출 또는 흡수선의 총 복사 에너지와 (2)선의 모양에서 구한 운동학적 성분이다. 총 복사 에너지를 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), 복사 에너지의 밝기, 측정하려는 파장대 등에 따라 적절한 분광기를 사용하여야 한다.

Fabry-Perot 간섭계 (Fabry-Perot Interferometer; FPI)의 개념은 20세기 초에 Fabry와 Perot(참고: ``페로"라고 발음함)에 의해서 창안되었다. FPI는 Fabry-Perot Spectrometer, etalon, Fabry-Perot etalon 등으로 불리기도 한다. 프리즘 분광기가 빛의 굴절을 이용하고, 격자 분광기(grating)가 빛의 회절과 간섭 현상을 이용하는데, Fourier Transform 분광기 (Michelson 분광기)와 FPI는 빛의 반사에 의한 간섭 현상을 이용하므로 간섭 분광기로 분류한다.

FPI의 원리

반사율이 높은 거울을 서로 마주보게 붙여놓고 평행한 빛을 입사 시켰을 때 (그림 1 참조), 위의 거울을 투과한 빛은 아래 거울의 표면에서 일부는 투과하지만 대부분의 빛은 투과와 반사를 반복한다. 입사한 방향의 반대쪽에서는 두 거울사이를 반사한 수만큼 빛 다발이 아래 거울을 투과하여 나오는데, 각각의 빛이 경로차이 만큼 서로 간섭현상을 보인다.

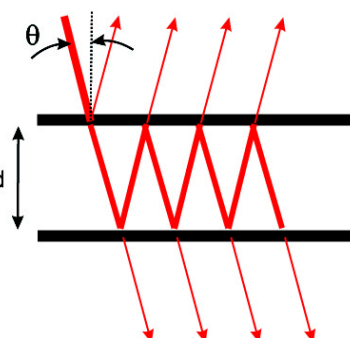


그림 1. FPI의 광학 원리.

이때 투과한 빛의 파장 (λ)과 경로차이의 관계는 다음과 같다.

$$m\lambda = 2\mu d \cos\theta$$

여기에서, m 은 간섭차수 (order of interference)이고, μ 는 두 거울사이 물질의 굴절지수 (refraction index)이고, d 는 두 거울의 간격, θ 는 입사각이다. 원하는 투과 파장을 결정하기 위해서는 위 식에 포함된 변수를 변화시키면 된다. 자동 제어가 발달하지 않았던 1980년 이전에는, 두 거울 사이에 기체를 채우고, 기체의 압력을 변화시켜서, μ 의 값을 조정하거나, θ 를 조정하여 투과 파장을 결정하였다. 최근에 제작되는 FPI는 PZT(piezoelectric transducer)를 반사 거울에 붙여서 거울의

간격을 미세 조정하는 방법을 사용하여 두 거울의 간격(d)을 변화시키는 방법을 사용한다.

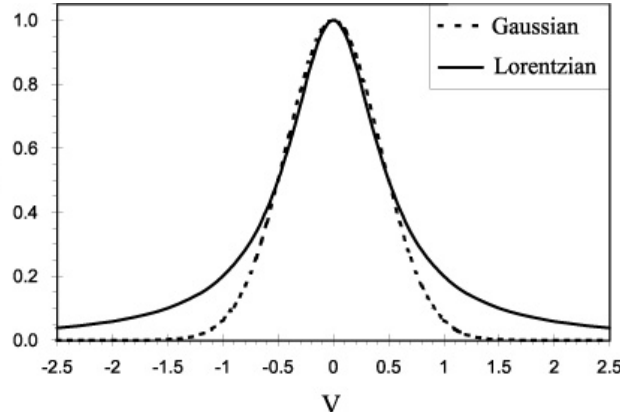
FPI의 분광 특성

FPI의 기기 선모양 (instrument profile)은 다음의 방정식으로 표시할 수 있다 (Moore, Davis, & Coplan 1989).

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

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

이 식에서 볼 수 있듯이, FPI의 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 2참조).



따라서 FPI 데이터는 관측한 선의 모양에서 Doppler 변환된 값을 구하는 데는 지장이 없지만, 총 복사 에너지를 구할 때는 더 넓은 파장 대에서 적분을 해야 한다. **그림 2. Gaussian 선모양과 Lorentzian 선모양의 비교. 선 중심의 높이가 1이고 높이가 최대값의 반일 때의 선폭 (Full Width at Half Maximum)이 1인 경우이다.**

자유 스펙트럼 영역 (Free Spectral Range)

FPI는 격자 분광기에서처럼 간섭 현상을 이용하기 때문에, 자유 스펙트럼 영역 (Free Spectral Range; FSR)을 고려해야 한다. 그림 3은 하나의 방출선을 FPI로 관측할 때, 간섭차수(m)에 따라 투과되는 양상을 거울간격(d)의 함수로 보여준다.

천체에서 나오는 방출선이 많이 있다면, 다음의 식에서 볼 수 있듯이 주어진 거울의 간격(d_0)에서 서로 다른 간섭순서를 가진 방출선이 동시에 관측될 수 있다:

$$d_0 = \frac{m_1 \lambda_1}{2} = \frac{(m_1 + 1) \lambda_2}{2}.$$

이 식으로부터 FPI의 FSR는 다음과 같이 정의할 수 있다 ($\mu = 1$, $\theta = 0$ 이라고 가정):

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

or

$$\Delta\lambda_{FSR} \approx \frac{\lambda_1\lambda_2}{2d_o} = \frac{\lambda_2}{m_1}$$

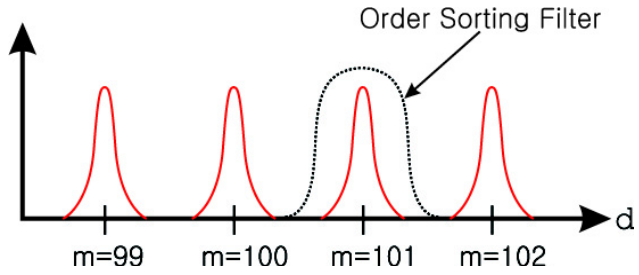


그림 3. Fabry-Perot 분광기를 통과한 하나의 방출선이 거울간격(d)의 함수로 나타나는 모습. 특정 파장대를 관측하기 위해서는 필터(order sorting filter)를 사용해야 한다.

이러한 파장의 중첩을 막기 위해서는 격자 분광기에서 사용한 것처럼 필터(order sorting filter)가 필요하다. 여기에서 주의할 점은 간섭차수(m)의 값이 격자분광기의 경우($m=1-3$)보다 크기 때문에, FSR의 값이 작고, 따라서 필터의 투과폭이 좁아야 한다. 일반적으로 투과폭이 투과파장의 0.5%보다 작은 협대역필터는 제작하기가 어렵다.

따라서, 간섭차수가 200보다 큰 경우에는, 그림 4와 같이 고정필터를 쓰지 않고 간섭순서가 다른 (또는 FSR가 다른) FPI를 동시에 사용하여 원하는 파장을 골라내는 Tandem FPI 방식을 쓸 수 있다.

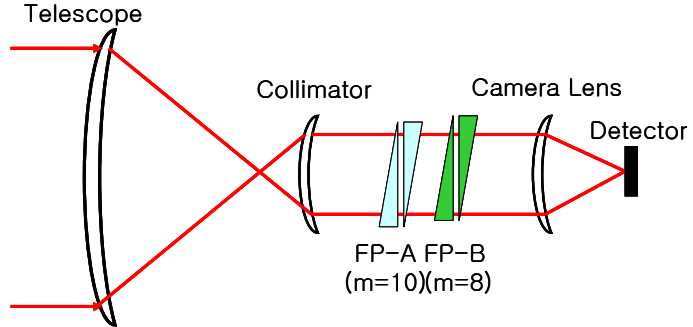


그림 4. 두 개의 FPI를 사용한 Tandem FPI 개념도.

Finesse와 분해능

FPI 기기 선모양 방정식의 분모에 있는 $4R/(1-R)^2$ 항은 분광분해능과 관계가 있다. 특히 거울의 반사율(R)이 커질수록 FPI의 분광분해능이 증가함을 알 수 있다.

FPI의 분광 성능을 나타내는 값 중에서 가장 중요한 것은 *finesse* (coefficient of finesse, 예리도 상수)이다. *finesse*는 거울의 반사율 (R), 두 거울의 평행상태 (Δs), 입사광의 각범위($\Delta\theta$) 등 여러 가지 원인에 의해서 결정 된다:

$$F_{ref} = \frac{\pi \sqrt{R}}{1-R}$$

$$F_{pp} = \frac{\lambda}{2\Delta s}$$

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

위 식에서 표현된 각각의 finesse는 다음의 식으로 종합하여 effective Finesse

값으로 표시하는데, 거울의 반사율에 의한 finesse가 가장 중요하다:

$$\frac{1}{F_{eff}^2} = \frac{1}{F_{ref}^2} + \frac{1}{F_{pp}^2} + \frac{1}{F_{ang}^2}$$

그리고, FPI의 분광 분해능은 finesse와 간섭차수의 곱으로 나타난다:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = m F_{eff}$$

FPI의 제작

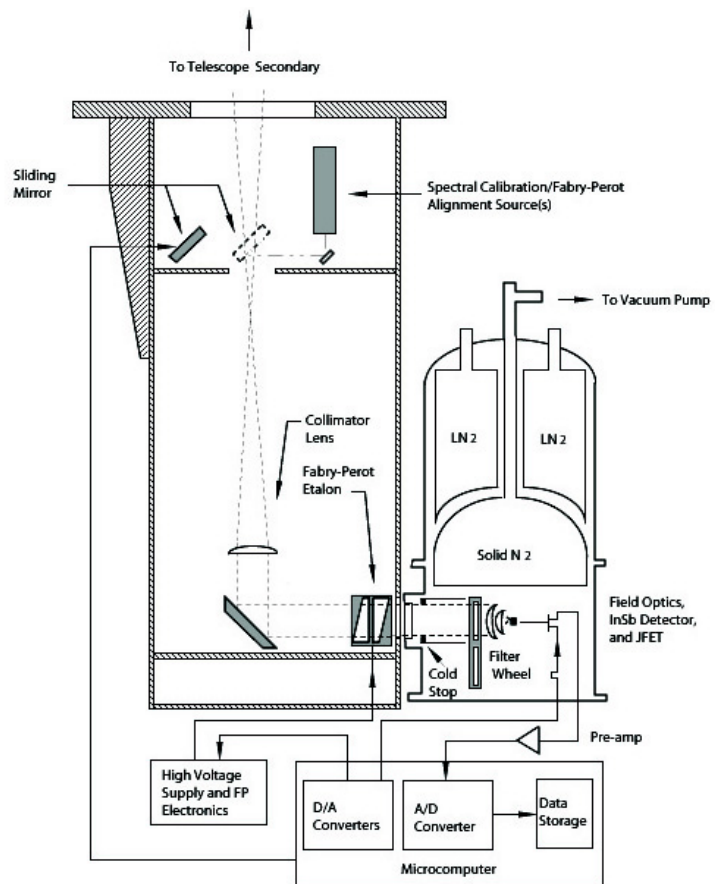
광학과 적외선에서 사용되는 FPI는 독립된 모듈 구조로 만들 수 있고, 상용으로도 구입할 수 있다. 그리고 FPI는 투과 필터와 같은 역할을 하므로 (그림 4와 그림 5 참조), FPI의 사용이 광학계의 전체 구조에 별 영향을 주지 않는다.

대부분의 천문대에서는 카메라 시스템의 앞에 부착과 탈착이 가능한 FPI를 장착하여, 고정 필터를 사용하는 이미지 관측과 FPI를 사용한 분광 관측을 병행하고 있다.

그림 8은 University of Texas Fabry-Perot Spectrometer (Luhman et al. 1995)의 구조를 보여준다. 이 기기는 FPI가 듀어의 창 앞에 설치되어 있는 간단한 광학계로 만들어져 있음을 알 수 있다. 격자 분광기와

비교할 때, FPS는 고 분해능 그림 5. University of Texas Fabry-Perot Spectrometer의 분광기를 훨씬 간단하게 제작 구조 (Luhman et al. 1995). 할 수 있는 장점이 있다.

FPI 천문 관측



FPI는 화학, 물리 등의 분야에서 널리 사용되는 분광기이다. 그러나 천문학에서는 주위 환경이 안정되지 않은 개방된 공간에서 사용하므로, 온도와 습도의 변화와 장치의 각도차이 변화 등으로 FPI의 두 거울의 평행상태를 유지하는데 많은 주의가 필요하기 때문에 많이 사용되지 않는다. 또한, 격자분광기에서는 한번 노출로 분광 관측을 할 수 있지만, FPI는 순차적으로 노출을 주어야 하므로 날씨의 변화에 민감해서 FPI의 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, 긴 슬릿 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.

참고문헌

- McLean, I. S. 1997, "Electronic Imaging in Astronomy" (John Wiley & Sons Ltd, West Sussex)
- 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
- Moore, J. H., Davis, C. C., & Coplan, M. A. 1989, "Building Scientific Apparatus", Second Ed., Addison Wesley
- Rieke, G. H. 1994, "Detection of Light: From the Ultraviolet to the Submillimeter" (Cambridge University Press, Cambridge)
- Tokunaga, A. T. 2000, in "Allen's Astrophysical Quantities, 4th Edition", edited by A. N. Cox (Springer-Verlag, New York), p. 143