PROCEEDINGS

천문관측기기 워크숍 Astronomical Instrumentation

2007년 6월 14일(목)~15일(금) 단양 대명콘도

발행인 : 박석재 발행처 : 한국천문연구원 대전광역시 유성구 대덕대로 838 편 집 : 진 호 ISBN : 978-89-959219-5-1

피낸곳 : 도서출판 신광사 대전광역시 대덕구 오정동 386-6 042-636-2370 출판등록번호 : 대전대덕구 제52호

준비위원 : 김호일(의장), 이창훈, 천무영, 박장현, 육인수, 오세진, 이성호, 진 호, 박수종

© 한국천문연구원 2007

Volume 1



6 월 15 일 (금요일)

9:00	근적외선카메라 KASINICS 개발 진호, 육인수, 이성호, 남욱원, 박영식, 문봉곤, 차상목, 조승현, 목승원, 경재만 (한국천문연구원), 박수종 (경희대학교), 한원용 (한국천문연구원)
9:15	푸리에 변환 분광기의 특성과 천문학의 적용 박수종 (경희대학교)
9:30	최적화된 바닥고르기 영상 이충욱, 김승리 (한국천문연구원)
9:45	광 학망원경의 수요와 확보 전략 김영수, 김상철, 김호일, 박병곤, 성현일, 안상현, 이동욱, 천무영 (한국천문연구원)
10:00	휴식
10:15	BOES Exposuremeter 제작 현황 천무영, 성현철, 박윤호, 김강민, 송민규 (한국천문연구원)
10:30	Development of the Correlation Tracker for New Solar Telescope 나자경, 최성환, 문용재, 박영득 (한국천문연구원)
10:45	고속 영상 태양 분광기의 제작 안광수, 채종철 (서울대학교), 박영득, 나자경, 박형민, 장비호, 문용재 (한국천문연구원)
11:00	STJ 박막제작, 분석 및 검출기 개발 박영식, 박장현, 이성호 (한국천문연구원), 정연욱, 이용호, 이상길 (한국표준과학연구원), 이전국, 양민규 (한국과학기술연구원), 김동락 (한국기초과학지원연구원), 김석환, 손영종 (연세대학교)
11:15	Challenges for far-IR through mm-wave spectroscopy with ground-based telescopes 민영철 (한국천문연구원)
11:30	점심
1:00	밀리미터파 대역 국부발진시스템 비교연구

이창훈, 김광동, 김효령, 정문희, 제도흥 (한국천문연구원)

푸리에 변환 분광기의 특성과 천문학의 적용

FOURIER TRANSFORM SPECTROMETER IN ASTRONOMY

박수종*

경희대학교 우주과학과

SOOJONG PAK*

Department of Astronomy and Space Science, Kyung Hee University Yongin-si, Gyeonggi-do 446-701, Korea

ABSTRACT

The Fourier Transform Spectrometer (FTS), or Michelson interferometer, consists of a fixed beamsplitter and two movable mirrors. The optical path difference (OPD) between the two mirrors produces the interference effect. We need to calculate inverse Fourier Transforms of the measured data to get the source spectra. The FTS has advantages of high spectral resolution and multiplex capability, as well as imaging spectroscopy. Because of the complex operation and data calculations, however, the FTS has not been very popular, compared to a long slit grating spectrometer, for the astronomical observations in optical and infrared-bands. Based on the advanced computer technologies, we expect more usages of FTS in the future astronomical research. In this review, we describe the characteristics of the FTS and its operation techniques.

Keywords: instrumentation: spectrographs - techniques: spectroscopic

1. 서론

기체 상태의 원자 또는 분자는 양자화된 에너지를 갖고, 주변 물질과 복사 에너지, 열 에너지 등을 교환하는 과정에서 빛 에너지를 흡수 또는 방출한다. 분광기는 이러한 양자화된 에너지를 측정한다. 우리가 관측하는 대 부분의 천체는 기체 상태에 있으므로 천문학에서는 분광 관측을 통해 그 지역의 물리 화학적 특성을 연구한다.

우리가 분광기를 사용하여 구한 스펙트럼에서 직접 측정하는 물리량은 방출 또는 흡수선의 총 복사에너지 (그림 1 의 1)와 선의 모양에서 구한 운동학적 성분 (그림 1 의 2, 와 42)이다. 원자 또는 분자의 스펙트럼 선은 양 자에너지의 불확정성 원리에 의한 자연 선폭 증가, 열적 도플러 선폭 증가 등으로 델타 함수에서 벗어난 상태로 방출된다. 그리고 분광기를 통한 스펙트럼은 기기의 특성함수와 콘벌루션 (convolution) 변환으로 측정된다. 따 라서 원하는 물리량을 측정하기 위해서는 목적에 맞는 분광기를 선택해야 한다. 광학 및 적외선 파장대에서 사 용하는 분광기는 작동 원리에 따라 (1) 빛의 파장에 따른 굴절차이를 이용하는 프리즘 분광기; (2) 빛의 회절과 간섭 효과를 이용하는 격자 분광기; (3) 빛의 간섭 효과를 이용하는 푸리에 변환 분광기 (Fourier Transform Spectrometer; FTS)와 페브리-페로 분광기 (Fabry-Perot Spectrometer; FPS) 등으로 나눌 수 있다. 여기에서 FTS 는 빛다발 둘이 간섭하고 (double-beam interference) FPS 는 빛다발 여럿이 간섭한다(multi-beam interference).

^{*} E-mail: soojong@khu.ac.kr; phone: 031-201-3813



그림 1. 스펙트럼 방출선의 측정 물리량.

광학 파장대에서 가장 많이 관측되는 항성 스펙트럼 연구에서는 광구의 연속 스펙트럼에 나타나는 항성대 기의 흡수선을 연구하는 것이 주 목적이다. 이 경우 연속 스펙트럼에 대한 상대적인 흡수량인 등가폭을 측정하 므로, 복사에너지의 절대 값과 운동학적 성분은 구할 필요가 없다. 그래서 대부분의 전통적인 광학 분광기는 슬 릿과 격자를 사용한다.

그런데, 복사에너지의 절대 값을 측정하거나 분광 분해능이 높은 관측을 필요로 하는 연구, 또는 점광원이 아닌 천체의 관측에서는 이러한 격자 분광기가 적절하지 않을 수 있다. 천체의 빛은 망원경의 촛점에 위치한 슬 릿을 통과하고 격자에 의해 슬릿의 길이 방향과 수직으로 분산된다. 따라서 분광기의 분광 분해능을 높이려면 슬릿의 폭을 줄여야 하고, 따라서 천체의 복사 에너지의 많은 부분이 차단된다. 이 경우 플럭스 값을 표준화 하기 위해서는 표준성의 PSF (Point Spread Function)를 측정하여 손실된 부분을 보정하는 방법 (Lee & Pak 2006)을 사 용하여 제한적으로 문제를 해결할 수 있다. 10 여 년 전부터는 2 차원 이미지를 영상분할장치 (IFU; Integral Field Units)를 사용하여 1 차원으로 재 정렬하고 격자에 의한 분산 데이터를 얻는 영상분광기를 개발하여 사용하기도 한다(Weitzel et al. 1996).

간섭 분광기의 종류인 FTS 와 FPS는 슬릿을 사용하지 않으므로 2 차원 이미지의 직접적인 분광 데이터를 구할 수 있어서 전통적으로 영상분광기로 분류한다. 이 분광기는 넓은 시야 뿐만 아니라 높은 분광 분해능 데이 터 (R > 10,000)를 비교적 쉽게 얻는 장점이 있다. 그러나 파장 단위의 초정밀 제어를 해야 하고 데이터 분석이 수 치적으로 복잡하다는 단점이 있어서 천문 관측에서는 널리 사용되지 못했다. 최근의 컴퓨터 산업의 발달로 초정 밀 제어 기술과 빠른 계산이 가능하여 앞으로는 FTS 와 FPS 가 더 널리 사용될 수 있다. FPS 의 특성과 천문학 적 용 예에 대한 내용은 Pak (2000)에 기술 하였고, 본 발표에서는 FTS 의 내용을 간략히 정리한다. 그리고 미래의 FTS 시스템 설계를 위해 IDL 로 수행한 관측 시뮬레이션 결과도 보여준다. FTS 의 원리와 천문학 응용에 대한 자세한 설명은 Connes (1970)과 Ridgway & Brault (1984)에 있다.

2. FTS 의 기본 원리

FTS 는 마이켈슨 간섭계 (Michelson interferometer)의 원리를 이용한다. 그림 2 에서 분광기의 왼쪽으로 입사 한 빛은 중간에 있는 광분해기 (beamsplitter)에 의해 위로 반사되거나 오른쪽으로 투과되어 각각 거울에 반사되 어 광분해기에서 다시 만난다. 이 때 아래쪽으로 반사되거나 투과되는 두 빛다발은 각각의 광경로차 (optical path difference; OPD)에 의해 서로 간섭현상이 생기고, 아래의 검출기에서 복사 세기를 측정한다. 하나의 거울을 조금 씩 움직이면서 변화하는 복사 세기의 함수를 인터페로그램 (interferogram)이라 한다.



그림 2. FTS 의 기본 구조. 고정된 광분해기와 두 개의 움직이는 거울로 구성되어 있다.

입사한 빛의 스펙트럼 I(\sigma) 과 인터페로그램 F(p) 는 다음과 같이 푸리에 변환 관계가 있다.

$$F(p) = \frac{1}{2} \int_{\sigma \min}^{\sigma \max} I(\sigma) [1 + \cos(2\pi\sigma p)] d\sigma$$

여기에서 *p* 는 변화하는 거울의 상대적 위치이고, *σ*는 빛 파장의 역수 (wave number, 1/λ)이다. *σ_{min}* 와 *σ_{min}* 는 투 과한 빛의 파장대 범위를 의미한다. 실제 관측에서는 광학 필터가 투과 파장대를 제한한다. 그림 3 의 왼쪽 스펙 트럼과 같이 입사한 빛 *I(σ)* 이 델타함수에 가까운 단색선 (monochromatic line) 이라면, 측정된 인터페로그램은 정현과 (sinusoidal function) 가 된다.



그림 3. 입사광이 단색선인 경우 (왼쪽 스펙트럼) 측정되는 FTS 의 인터페로그램 (오른쪽 그림).



그림 4. 인터페로그램을 역 푸리에 변환하여 구한 FTS 스펙트럼. 인터페로그램 데이터의 가장자리 처리 (apodization)를 하지 않아서 기기 스펙트럼에 파형이 보인다.

그리고 인터페로그램을 다음과 같이 역 푸리에 변환 (inverse Fourier Transform) 하면,

$$I_{FTS}(\sigma) = \int_{p\min}^{p\max} F(p)\cos(2\pi\sigma p)dp$$

FTS 스펙트럼 *I_{FTS}*(σ)을 구할 수 있다 (그림 4 참조). 여기에서 *p_{max}* 와 *p_{min}* 는 FTS 거울의 스캔 범위를 나타내고 이 범위가 클 수록 FTS 의 분광 분해능이 커진다. 즉 FTS 기기스펙트럼의 FWHM (Full Width at Half Maximum) *σ_{FWHM}* 을 얻기위한 거울의 스캔 범위는 다음의 식으로 표시 된다.

$$p_{\min} = \frac{-1.22}{\sigma_{FWHM}}$$
$$p_{\max} = \frac{1.22}{\sigma_{FWHM}}$$

초기에는 인터페로그램 데이터를 아날로스 시그널로 연속적으로 측정하였는데, 최근 컴퓨터 기술의 발전으로 디지털 신호처리 시스템으로 바뀌면서, 스캔 범위 안에서 측정 점의 수 N_p 는 Nyquist 샘플링 원칙으로 다음과 같 이 구한다.

$$N_p = P_{\max} \cdot (2\sigma_{\max}) \cdot S$$

여기에서 숫자 2는 Nyquist 샘플링을 위한 상수이고, S는 경험적으로 추가하는 상수 (over sampling factor)이다. 본 연구의 FTS 시뮬레이션에서는 S 값으로 5를 사용하였다.

그림 4 의 FTS 스펙트럼에 보이는 파형은 인터페로그램을 역 푸리에 변환을 할 때 인터페로그램 데이터 가 장자리 처리 (apodization) 를 하지 않아서 나타난다. 이 파형이 나타나지 않도록 하려면 인터페로그램에 창함수 (Window Function or Apodization Function)를 곱하고 역 푸리에 변환을 하면된다. 창함수로는 Hamming 함수 또 는 Gauss 함수를 많이 사용한다. 3.1. 다중 분광 정보 (Multiplexing)

패브리-페로 분광기는 한 번 관측에 한 파장 채널의 정보만 알 수 있지만, FTS 의 관측을 통해 얻은 인터페로 그램 데이터에는 투과 파장대의 모든 분광 정보가 복합적으로 포함되어 있다. 예를 들면 입사광이 그림 5 의 왼 쪽 스펙트럼과 같이 4 개의 방출선이 있다면, FTS 로 측정한 인터페로그램은 오른 쪽과 같이 주기가 다른 정현파 가 중첩된 형태로 보인다. 이 인터페로그램을 역 푸리에 변환하면 그림 6과 같은 스펙트럼을 얻을 수 있다.



그림 5. 입사광에 여러 개의 방출선이 있는 경우 (왼쪽)의 인터페로그램 모습 (오른쪽).



그림 6. 그림 5 의 인터페로그램을 역 푸리에 변환하여 구한 스펙트럼. 인터페로 그램의 가장자리 처리를 하지 않아서 파형이 남아있다.

페브리-페로 분광기의 투과 파장을 변화시키면서 전체 스펙트럼을 얻는 동안에 날씨 또는 기기 상태가 변한 다면 올바른 스펙트럼을 구할 수 없다. 그렇지만 FTS 는 전체 스펙트럼을 포함하는 인터페로그램을 구하므로 관 측 중간의 상태 변화에 덜 민감하다.

3.2. 넓은 시야와 고분광 분해능

격자 분광기는 슬릿의 폭 방향으로 회절 간섭하여 분산된 스펙트럼을 얻는다. 따라서 분광 분해능과 슬릿의 시야는 서로 상쇄하여, 분광 분해능을 높이면 시야가 줄어들 수 밖에 없다. 그러나 FTS 와 페브리-페로 분광기와 같은 간섭 분광계는 회절 현상을 이용하지 않아서 분해능과 시야가 서로 제한하지 않는다.

그리고, 격자 분광기의 분광 분해능을 크게하기 위해서는 격자 등의 광학계가 비례하여 커져야 하지만, FTS 의 분광 분해능은 거울의 스캔 범위 (*p_{max}* 와 *p_{min}*)를 크게하면 쉽게 높일 수 있다. 따라서 하드웨어의 구조 변화 없이 원하는 분광 분해능을 구현할 수 있다. FTS 의 광학 장치 크기는 고분광 분해능 격자 분광기와 비교하여 작 고 간단한 구조이다. 또한 고분광 분해능 모드에서도 정확한 플럭스를 구할 수 있다는 장점도 있다.

3.3. 배경 잡음의 영향

FTS 는 입사광 에너지의 50%가 검출된다. 배경 복사가 크고 천체의 신호가 작은 관측에서는 관측 파장대 전 체에 의한 광자 잡음 (photon noise)이 커져서 감도가 낮아질 수 있다. 특히 열복사가 큰 적외선 관측에서는 치명 적인 단점이다.

3.4. 많은 픽셀 데이터의 처리 문제

FTS 는 넓은 관측 시야를 가지고 있어서, 픽셀이 많은 CCD 또는 적외선 어레이 (infrared array)를 사용할 수 있다. 그렇지만 인터페로그램을 얻기 위해서는 검출기 프레임의 각각의 픽셀을 빠르게 읽고, 저장하여 역 푸리 에 변관 계산을 해야 한다. 현대의 관측기기는 픽셀이 많은 검출기를 선호하므로, 천문학에서 FTS 의 제작을 제 한하는 가장 심각한 문제가 될 수 있다.

4. FTS 의 예

FTS 는 간단한 광학 구조로 분광관측을 할 수 있어서, 적외선 우주망원경의 탑재체로 널리 사용된다. 특히 원적외선 파장대를 관측하는 검출기는 픽셀의 수가 적어서 데이터 계산이 문제되지 않는다. 현재 일본의 적외 선 천문위성 AKARI 의 FIS (Far-Infrared Surveyor; Kawada et al. 2004, Takahashi et al. 2003)에 장착된 FTS 가 위성 궤도에서 테스트 관측을 하고 있고(그림 7), 유럽의 적외선 천문위성 Herschel 의 SPIRE 에 장착할 FTS 를 제작 중이다(그림 8).



그림 7. 일본의 적외선 천문위성 AKARI 의 FIS (Far-Infrared Surveyor) 구조도 (왼쪽)와 내부에 장착된 FTS 의 모습 (오른쪽). 현재 궤도에서 시험 관측을 하고 있다 (Kawada et al. 2004, Takahashi et al. 2002).



그림 8. Herschel 우주망원경의 원적외선 분광기에 설치될 FTS 의 광학 구조도 (왼쪽, Swinyard et al. 2003). 오른쪽 모형 사진은 Mach-Zehnder 구조를 보여준다.

5. 결론

FTS 는 화학 분야의 실험실 분광 측정에는 널리 사용되고 있지만, 천문 관측에서는 많이 사용하지 않는다. 천문 관측은 실시간 데이터 처리를 해야하므로 컴퓨터가 없던 시절에는 사용이 제한되었는데 컴퓨터가 상용화 된 1970년 대 부터 활발히 FTS의 제작과 관측을 시작했다. 그런데, 현대에는 전자 공학이 발전하여 많은 픽셀 을 가진 검출기를 사용하여 오히려 데이터 처리의 문제가 다시 나타났다. 그래서 현제 FTS 눈 픽셀이 적은 원적 외선 관측에서 많이 사용된다.

FTS 는 작고 간단한 구조로 제작할 수 있고, 고 분광 분해능과 넓은 시야의 관측이 가능하다. 특히 성단, 은하 단, 성운의 별탄생 지역 등의 분광 관측에 적합하다. 데이터 처리 속도를 향상시키는 노력을 하면 앞으로 발전가 능성이 높다고 기대된다.

참고 문헌

Connes, P. 1970, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 8, 209

Kawada, M., Shibai, H., Kaneda, H., & Nakagawa, T. 2004, Proceedings of the SPIE, 5487, 359

Lee, S., & Pak, S. 2006, Journal of the Korean Astronomical Society, 39, 151

Pak, S. 2000, Publications of the Korean Astronomical Society, 15S, 127

Ridgway, S. T., & Brault, J. W. 1984, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 22, 291

Swinyard, B. M., et al. 2003, Proceedings of the SPIE, 4850, 698

Takahashi, H., Kawada, M., Murakami, N., Ozawa, K., Shibai, H., & Nakagawa, T. 2003, Proceedings of the SPIE, 4850, 191

Weitzel, L., Krabbe, A., Kroker, H., Thatte, N., Tacconi-Garman, L. E., Cameron, M., & Genzel, R. 1996, A&ASS, 119, 531