

1.8m 망원경을 이용한 방출선 천체 연구 EMISSION LINE SPECTROSCOPY WITH THE 1.8M OPTICAL TELESCOPE

형식¹, Lawrence H. Aller², 김강민¹

¹한국천문연구원 보현산 천문대, ²UCLA

SIK HYUNG¹, LAWRENCE H. ALLER² AND KANG-MIN KIM¹

¹Korea Astronomy Observatory

²Dept. of Physics and Astronomy, UCLA, CA 90095, U.S.A.

Received Jul. 5, 2000; Accepted Aug. 4, 2000

ABSTRACT

The emission line objects such as planetary nebulae, symbiotics, gaseous nebulae, HII regions, novae, supernovae, SNRs, nearby spiral galaxies, dIrr, dE, and nearby active galactic nuclei, would be goldmines for us to dig with the 1.8m bohyunsan optical (BOAO) telescope. We discussed the importance of strategically important diagnostic lines and atomic constant calculation for a study of Galactic and extragalactic emission objects. The scientific background on a spectrometer development history is briefly presented and spectroscopic research areas other than the emission objects are also summarized.

Keywords: photoionization model: emission line spectrum: plasma and nebular physics: echelle spectrometer

1. 서론

방출선을 내는 천체로는 행성상 성운, 가스 성운, 공생별, 신성 및 초신성과 그 잔해, 그리고 이러한 대상을 가진 외 은하, 즉 나선 은하와 거대 질량(supermassive black hole)을 가지고 있을 것으로 추정되는 Seyfert 은하, 준항성 (quasars) 등의 활동성 은하핵 (AGN)이 있다. 한국천문연구원에서는 1.8m 광학 망원경용 관측기기로 광섬유에셀 분광기 (BOAO Echelle Spectrograph - BOES)를 제작 중이다. 보현산 천문대에서 분광기가 활용될 때 고분산 분광 연구가 본격적으로 진행될 수 있을 것이다. 이 시점에서, 우리는 방출선 연구가 천문학에 왜 유용하고, 어떠한 방법으로 진행될 수 있는지를 살펴보기로 한다. 이를 위해 제 1 장에서는 항성대기 분광 연구에서부터 이후 행성상 성운 연구에 이르기까지의 간단한 역사적인 배경을 살펴 보고, 원자물리, 플라즈마 물리의 연구 결과가 어떻게 관측자료와 비교되어 연구되는지 개관하였다. 제 2 장에서는 고분산 분광 관측법이 어떠한 필요성에 의해 개발되어 왔으며 CCD 출현이후 에셀 분광 관측이 가져온 변혁을 논하였다. 또한 제 3 장에서는 고분산 분광기를 이용한 연구 과제를 알아보고, 보현산 에셀 분광기의 설계에 어떤 점이 고려되었는지를 언급하였다. 제 4 장에서는 1.8m 망원경으로 수행할 수 있는 연구 과제 등을 토론했다 보고자 한다.

2. 저분산 분광 관측과 가스 성운연구

별의 분광자료의 해석은 1922년경 Saha 방정식이 나온 후, Boltzman Saha equation의 이론적인 방법에 의해 비교적 잘 이해되었고 이에 근거해 1930년대 말부터 1940년대 초까지 온 우주에 존재하는 천체의 화학 원소비는 태양과 같고 단지 온도만 다르다고 믿어져 왔었다. 1930년대 말에 Fred Whipple과 Cecilia PayneGaposckin 등이 초신성 분광선을 분광합성법(spectrum synthesis method)에 의해 해석을 시도하였는데, 초신성 분광 관측 결과가 태양과 다른 화학원소를 암시하는 듯 했다. 이러한 결과가 당시 Boltzman Saha의 전통적인 방법으로 적용할 수 없는 연구, 예를 들면, Wolf-Rayet 별의 분광선 연구등에 힌트를 주었다. 그 결과 Aller는 1940년대 초에 36-inch 망원경을 이용한 분광 관측을 진행하고 이를 해석하여 WR 별은 무거운 별의 표피층 (envelope)에서 분출된 가스라는 제안 하에, 질소가 풍부한 별과 탄소가 풍부한 별인, WN 및 WC 별의 존재를 확신하게 되었다. 이런 결과와 초신성의 분광선으로부터 화학 원소가 천체마다 다를 수 있다고 1941 AAS 학회에서 제안 발표하고 이에 대한 증거를 초신성 관측 자료등에서 찾고자 하였으나 당시의 저분산 분광 관측 기술이 이를 뒷받침하지 못하였다. 이러한 노력은 당시에 M33의 중심에 있는 WR stars와 HII region에까지 확장되었고, [OII]3727/29 선이 천체의 수 밀도를 암시한다는

것도 1940년대에 알게 되었다.

가스성운의 분광선은 별과는 매우 다르며, 이것의 가장 대표적인 예가 초록색 파장의 4959Å 과 5007Å 에서의 강한 방출선이다. 처음에는 이 방출선이 우리가 알지 못하는 미지의 원소에서 비롯된다고 여겼고, nebulium이라고 명명하였다. 이러한 가스 성운 또는 행성상 성운에서 관측되는 수소 방출선의 에너지원 (primary excitation mechanism)은 바닥상태 (ground level)에서부터 이온화 되어진 후, 이어지는 모든 상태로 재결합 (recombination)이다. 1926년경 Zanstra는 가스성운의 내부에 있는 별에서 나온 Lyman 한계 (limit)에 이르는 자외선 광자가 별 주위의 성운 가스를 이온화시키는 근원이라고 제안하였다. 이러한 제안은 가스의 상태로부터 중심별의 온도를 알 수 있는 단서를 제공하고, 가시광 영역에서 관측되는 성운의 Balmer선으로부터 Zanstra는 행성상 성운의 중심에 있는 별의 온도가 당시 관측되는 어떠한 별보다 높음을 알 수 있었다. 이러한 노력으로 관측의 정밀도가 높아짐에 따라 이론적인 계산도 세밀해져 갔다 (Baker & Menzel 1938).

위에서 언급한 초록색의 4959Å 과 5007Å 선은 Russell과 Bowen (1927) 등에 의해 일반 항성과는 아주 다른 조건에서 생성되는 다른 원소가 아닌 O^{++} 의 금지선 ($p^3: {}^1D_2 - {}^3P_1; {}^1D_2 - {}^3P_2$)과 연관됨이 밝혀졌다. 하지만 H, He의 방출선과는 달리, 성운에서 성운으로 대상이 변함에 따라 어떤 규칙성을 쉽게 부여할 수 없었다. 이러한 금지선을 내게 하는 에너지 준위는 허용된 경로를 통해서 도달하기에는 너무 높지만, 금지된 경로를 통해서 바닥 상태에서부터 불과 2.5에서 5 eV이다. 많은 금지선들이 Menzel나 Boyce 또는 Payne등에 의해 밝혀지고, Menzel등 (1938)은 위에서 언급한 Zanstra의 방법으로 별의 UV 광자와 성운가스의 이온화 상태에 관한 이론적인 계산을 더욱 세밀하게 진전시키는 작업을 하였다. 수소나 헬륨에 비해 1만분의 1 만큼 적은 양의 산소와 질소를 포함시켜 성운의 온도를 계산하면, 처음의 경우 60 000 K에 이르는 반면, 이 계산에 미세량의 중원소를 포함시키면 결코 가스 상태의 온도가 20 000 K를 넘지 않는다는 중요한 결과를 얻게 되었다 (Menzel & Aller 1941). 이는 방출선 분광 연구에 중요한 의미를 가지는데, 연구 대상 천체가 가스성운이든, 공생별이든, 초신성 잔해이든, 나선 은하이든, 활동은하핵 (AGN-NLR region)이든 20 000 K 가 넘지 않으리라는 점을 염두해두고, 방출선이 나온 근원이 광이온화 (photoionization), 광분해 (photo-dissociation region, PDR), 충격파 에너지화 (shock heating), 자기장 에너지화 (synchrotron radiation)등이라는 것을 기반으로 대상 천체를 음미해 볼 가치가 있다.

위의 이론적인 접근을 진전시키기 위해서는 금지선의 역할 (collisional excitation of forbidden lines)을 정확히 계산해야 하는데, 이에 대한 양자역학의 계산이 1930년대

말에서 1940년대에 활발히 이루어져 천문학에 도입되었다. 이러한 계산치는 관측치와의 비교에 의해 점차 정량화 되었지만, 전하교환 (charge exchange)등이 포함되지 않는 등 여전히 갈길이 멀었다. 분광 관측의 측면에서 보면, 1950년도에 이르러 5007, 4959, 4851의 강한 분광선 자료는 광전 측광 (photo-electric photometry)으로 얻을 수 있지만, 약한 세기의 $\lambda 4363$ 등의 선들에 대한 관측은 여전히 사진관측 (photographic photometry)에 의존하고 있었다. 50년대 후반에 들어서야 비로소 분광 스캐너 (spectrum scanner)가 개발되었고, 그결과로 정확한 전자 온도를 관측치로부터 얻을 수 있게 되었다. 이러한 관측은 1980년 초까지도 ITS (image tube scanner)로 Lick 천문대에서 계속되었는데, 파장 분해능이 $\sim 2-3\text{\AA}$ 인 이것으로는 [OII]3726/3729등과 같이 성운의 밀도를 아는데 중요한 선들을 분리할 수 없었다. 따라서 천체의 물리적 조건, 즉 전자 수 밀도 및 온도를 결정하는데 중요한 선들을 분리하기 위해서 ITS를 넘어서 새로운 분광기가 필요하게 되었다.

항성의 대기 모델 연구와는 달리 성운 모델은 좀더 어려운데, 그 이유는 항성 대기의 경우, 관측된 몇개의 흡수선에서 등가폭과 온도 등을 결정하여 나머지 모든 선에 대하여 쉽게 적용할 수 있지만 (thermodynamic equilibrium), 이에 반해 성운의 경우, 모든 방출선 (forbidden lines)에 각기 다른 상수 (excitation mechanism)를 적용해야 하고, 대상 천체가 점광원이 아니므로 복사 전달 과정의 처리가 복잡하기 때문이다. 이러한 성운의 플라즈마 가스는 열적인 평형상태에서 멀지만, 가스속에 전자의 속도 분산이 Maxwellian이라는 가정에서 출발한다 (Bohm & Aller 1947). $10\ 000/\text{cm}^3$ 의 조건에서 이온화된 수소 원자가 전자를 포획하는데 10년이 걸리는 반면에 (recombination time), 전자와 이온의 비탄성 충돌은 1개월에 1번, 전자끼리의 충돌은 매초에 1번의 빈도이다. 이러한 전자의 Maxwellian분포는 전자와 충돌하는 이온화된 원자들에 의한 냉각을 일으키는 데, 수소에 비해 1만분의 1 정도인 중원소의 냉각효과가 수소와 헬륨의 재결합 방출선에 비해 10배가 강함을 알았다.

이러한 가스 상태의 천체를 관측하여, 그 분광 자료로부터 화학원소 함량을 구하는 방법은 1940년도 중반에 Menzel나 Baker 또는 Aller등이 구한 방법과 동일하다. 다른 점은 원자상수, 충돌 강도 (Ω)와 전이 확률 (A)에 대한 좀더 나은 계산값이 있다는 점이다. 성운 형태의 천체를 연구하는 데는 또한 이론적인 수치 모델의 진전이 필요한데 이것은 컴퓨터의 발전으로 가능하게 되었다.

3. 모델 및 원자 상수 개선 작업

AGN이나, HII region, 가스 성운, 행성상 성운은 중심의 열원 (far-UV heating source)과 주위를 감싸는 가스에 의해 발광하는 구름 (nebulous clouds)을 형성한다. 따라서

이것에 의해 항성에서와 같은 모델을 만들 수 있다. 이러한 가스성운 및 AGN에 대한 광이온 모델의 역사는 이미 약 30년이 넘었다. 항성의 경우, 점광원으로 관측되고 구대층인 항성대기 층이 아주 얇기 때문에, plane-parallel 등의 가정을 통해 비교적 쉽게 할 수 있다. 그와 달리 위에서 언급한 방출선천체는 확장된 천체 (extended objects)이므로 이론적인 모델을 만드는 작업이 상대적으로 어렵다.

30년전에 처음 시작된 모델은 수 종류의 중원소 냉각만을 고려한 모델 작업이었고, 온도를 결정하는 수준에서 크게 벗어나지 않았다 (Goodson, 1967). 또한 여러 사람에게 의해 모델이 독자적으로 만들어지고, Flower (1968), Harrington (1967, 1968) 등에 의한 독립적인 코드가 당시에 있었으며 이것으로 이온화 상태를 연구하였다.

이러한 모델 작업은 관측 자료와 비교되기 시작했으나 (1967-1980), 낮은 이온화 상태에서 나오는 분광선이 너무 약해서 이러한 비교는 많은 문제점을 포함하고 있었다. 현재 이 점에 대한 해결은 중원소의 이온화 준위에 영향을 미치는 중성수소와 전하 교환 (charge exchange), 쌍전자 결합의 영향 (di-electronic recombination decrease) 등을 고려함으로써 가능하며, 그결과 고이온화 천체에서 강하게 관측되는 [N II], [O II], [O I] 등에 어느 정도 근접한 예측값을 제공하게 되었다. 이러한 선이 모델 이론에 의해 맞출 수 없는 경우, 다음의 가정으로 HII와 HI 영역이 만나는 지점에서의 충격파에 의한 영향 (shock heating)을 고려한다.

IUE 관측이 시작되어 새로운 UV 자료가 생성되기 시작한 1980년대 초반에, IUE자료는 중심별의 continuum flux와 UV 분광선에 대한 새로운 지식을 가져다 주었다. 행성상 성운, 공생별, 근접 Seyfert 은하가 IUE위성으로 관측되었고, IUE 10×23" oval 슬릿 자료는 가시광 영역에서 전혀 단서를 얻을 수 없었던 탄소 원소비와 중심별을 이해하는데 아주 중요한 역할을 하였다. UV 자료가 존재함으로써 모델을 만드는 작업은 시행착오의 방식을 벗어나, UV 자료에 의해 상세화되고 좀더 세련되어진 이론적인 모델 연구가 가능하게 되었다.

이러한 각자의 노력이 어느 정도의 표준 모델을 확립해 나가고 있었을때, 모델 작업의 획기적인 전기가 1985년 7월 프랑스 Mudon에서 열린 모델 workshop에서 마련되었다 (Pequignot, 1986). 이 워크샵에서 AGN, HII regions, Planetary Nebula에 적용되는 모델에 동일한 입력값을 주는 경우, 과연 같은 수치의 전자온도, 선세기를 예측할 수 있는지 비교하였다. 행성상 성운의 경우가 가장 많은 12 그룹이 참여하였고, 각 천체에 대한 서로의 결과를 비교하였지만 일치할 보지 못했다. 워크샵이 끝난후 5 그룹이 각자의 나라로 돌아간 후 모델 코드를 개선하여 결과를 다시 보냈고, 비로소 표준화가 적어도 5 그룹에 한해서 이루어졌다. Workshop 이후 교정된 결과는 workshop 당시 Harrington이 제시한 예측값에 근접하고 있으며, 이러

한 표준화 과정을 통해서 나중에 많은 사람들이 공동으로 사용하게 된 것들이 있는데 그 중 하나가 바로 Ferland의 Cloudy code이다.

행성상 성운에 구체적으로 적용되었던 모델연구를 예를 들어 모델 연구의 문제점을 살펴보기로 한다. Adam과 Koppen (1985)은 NGC 4361과 NGC 1535에 대한 모델 연구를 하였는데, Mendez 등 (1981) 과 Mihalas (1978)의 항성대기 연구로 계산된 중심별의 flux와 gravity를 사용하였다. NGC 4361에는 좋은 결과를 얻을 수 있었으나, NGC 1535는 중심별의 flux가 54.4eV 보다 높은 파장 영역에서 1000 배 이상이어야 함을 알았다. Aller 등 (1987)은 Magellan 성운의 12개 행성상 성운을 연구하는데 Husfeld 등 (1984)이 계산한 NLTE연구 결과를 사용하였지만 여러 문제에 직면해야 했다. 이는 중심별에 대한 정확한 정보가 중요함을 보여주는 결과이다.

Clegg 등 (1987)은 행성상 성운의 밀도값을 동일한 것으로 사용하는 것이 아니라, 거리마다 달라지도록 emission measure를 이용해 구한 후 NGC 3918의 모델에 적용하여 분광 관측 자료를 연구하였다. 여기서 또한 양극 방향의 cone 모양의 물질 분포, 적도의 반지 형태의 물질 분포를 가정하여 두 경우에 대한 광학적 투명도를 다르게 선택하였다. 이러한 노력은, 유체역학코드에 의한 연구 천체의 기하학적 모습이 당연히 모델에 반영되어야 하는 필요성에 의한 선택이다. 하지만, 이러한 시도는 결국 서로 다른 모델 계산을 진행한후 결과를 합하는 수준으로, 기하학적인 모습을 반영한 새로운 모델 방법을 위한 시험과정이라 할 수 있다.

AGN이나 HII regions을 연구하는 경우 위에서 언급한 중심의 에너지원과 수밀도의 분포, 기하학적인 모습이 모두 고려되어야 한다. 물론 AGN의 경우 중심의 에너지원은 블랙홀과 연관된 고에너지원이고, HII region의 경우는 중심에 여러개의 O형의 별이 존재해야 하고, 그 규모와 밀도가 다르다는 점을 염두에 두어야 하지만, 모델을 만드는 근본원리는 동일하다. Ferland는 1985년의 workshop 당시의 모델을 더욱 확장하여, AGN의 NLR 및 BLR의 분광선, 분자운의 연구에 적용하는 Cloudy를 여러 사람들과 만들어 많은 연구원들에게 제공하고 있다. 이러한 모델은 모두 plane-parallel 이거나 구대칭인데 (1D-code), 그와 달리 타원이나 반지형 (torus)천체의 연구에 적합한 기하학적인 구조를 고려할 수 있는 Nebula 모델이 (Hyung 1994, 2D-code) 완성되어 행성상 성운의 고분산 분광 연구에 본격적으로 사용되고 있다.

1980년대 후반 매우 뜨거운 중심별에 대한 새로운 항성대기 모델이 출현하였고 (Hubeny 1988), 원자상수의 개선작업이 꾸준히 진행되어 모델 연구는 더욱 진전을 가져오게 되었다 (Hyung et al. 1994, Hyung & Aller 1996, 1997a, 1997b). 행성상 성운이 우리에게 가까이 있고 관측이 아주 자세히 이루어지므로, 원자 상수의 계산치는 행

성상 성운과 비교된 후 결정될 수 있다. 이러한 원자상수의 개선 작업들에 관하여, 금지선은 Belfast의 Queen 대학의 Keenan과 UCLA의 Aller, Hyung등에 의해 진행되어 왔고, 재결합 분광선에 대한 것은 U. of College London의 학자에 의해 시도되고 있다. Keenan등에 의해 [S II], [O II], [Cl III], [Ar IV], [O V], [O I] (Keenan 등 1993, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999)에 대한 작업이 완성되었다. 따라서 Osterbrock의 *Astrophysics of Gaseous nebulae and Active Galactic Nuclei*에 인용된 값을 이용하여, 관측된 방출선 분광 자료로부터 은하의 온도와 수밀도를 결정하는데 세심한 주의가 필요하다.

위의 작업중 [S II]의 경우를 소개하고자 한다. [S II] 이온은 바닥상태의 $3s^2 3p^3$ 에 3개의 LS 양자 상태, 즉 4S , 2D , 2P 가 있는데, 이 미세상태 (fine structure splitting)를 포함하면, 5개 준위가 존재한다. 이 5개 준위의 에너지는 이미 Martin 등 (1990)이 구한 값을 이용하고, Keenan 등 (1993)이 구한 Einstein A-값과 [S II]의 충돌 상수를 계산함으로써 여러 방출선이 어떠한 물리량을 알려줄 수 있는지 조사할 수 있다. 이러한 계산을 종합하여 방출선 세기의 상대적 비가, 행성상 성운의 경우 ($T_e = 5000 - 20000$ K; $N_e = 10 - 10^5 \text{ cm}^{-3}$)에 물리적 조건이 변함에 따라 어떻게 예측되는지를 계산하였다. 높은 에너지 준위에 있는 $3s3p^4$ 상태는 $3s^2 3p^3$ 로 전이 되는 동안 무시할 수 있는 세기인 반면에, 다음의 전이는 큰 물리적 의미를 가지고 있음을 알게 된다.

$$R_1 = I(3s^2 3p^3 \ ^4S - 3s^2 3p^3 \ ^2D_{5/2}) / I(3s^2 3p^3 \ ^4S - 3s^2 3p^3 \ ^2D_{3/2})$$

$$= I(6717 \text{ \AA}) / I(6730 \text{ \AA})$$

의 값과

오로라와 Nebula 전이의

$$R_3 = I(3s^2 3p^3 \ ^4S - 3s^2 3p^3 \ ^2P_{1/2,3/2}) / I(3s^2 3p^3 \ ^4S - 3s^2 3p^3 \ ^2D_{3/2,5/2})$$

$$= I(4068 + 4076 \text{ \AA}) / I(6717 + 6730 \text{ \AA})$$

와

$$R_2 = I(4068 \text{ \AA}) / I(6717 + 6730 \text{ \AA}) \text{ 와 } R_1$$

를 비교함으로써 온도와 수밀도를 결정하는데 중요한 단서를 얻게 되었다.

이러한 분광선을 연구하는데 물론 고분산이 아닌 중분산 분광자료의 경우, 산소의 재결합선 O II 4070, 4072, 4079 Å 선과 겹칠 수 있으므로 고분산 분광 관측이 선행되어야 한다 (Hyung, Aller & Feibelman 1994). 그림 1로부터 관측값과 R_1/R_2 의 관계를 이용하여, 관측된 가스성운의 온도와 밀도가 결정됨을 쉽게 알 수 있을 것이다.

위의 원자상수 개선작업과 중심 극자외선에 대한 연구 결과를 종합하여 완성한 모델은 비로소 행성상 성운과 H II region은 물론 AGN등의 연구에 활용될 수 있을 것이다. 이러한 모델 작업은 중심의 에너지원에 의한 이온화 외에도

충격파, 화학원소비, 대상 천체의 기하학적 모습에 따라, 더욱 예측을 어렵게 한다. 원자 물리상수를 끊임없이 개선하고 있지만, 모든 상수가 다 개선된 것은 아니다. 수소와 헬륨의 재결합 방출선에 관한 연구는 비교적 잘 된 반면, 중원소, C, N, O, 에 대한 재결합 방출선에 관한 연구는 전혀 진전을 보고 있지 않다.

4. 고분산 분광기 - 방출선 연구

4.1. CCD와 에셀 분광기

이미 언급한 천체의 물리적 조건, 즉 전자 수 밀도 및 온도를 결정하는데 중요한 선들을 분리하기 위해서 ITS를 넘어서 새로운 분광기가 필요하게 되었다. 고분산 분광 관측이 직접적으로 유용한 분야는 물론, 우리 은하와 Magellanic Clouds의 차가운 별이나 성단의 화학 원소비, 별의 종족, 운동학 (abundance and kinematics) 등에 관한 연구를 연상시킨다. 오래전의 고분산 연구는 가깝고 밝은 별에 국한되었고, 이러한 연구는 1950년대 초반부터 HR도와 연관되어 활발히 진행되었다. 이 시기에 이미 Bowen (1952)에 의해 200-inch Hale 망원경에 당시에는 전혀 새로운 Coude 고분산 분광기 신기술이 이미 사용되고 있었다. Coude의 긴 초점을 이용한 이 분광기의 분해능 (resolving power, $R = \lambda/d\lambda$)은 40000 ~ 80000이었지만, 이러한 분산을 얻기 위해서는 하루밤 동안 내내 노출하는 경우, $m_v = 7.5$ 의 천체를 가가스로 연구할 수 있는 것으로 평가되었다 ($S/N < 100$). 여기서 언급해야 할 고분산 분광기가 에셀 분광기인데, 에셀은 당시에는 사진 건판 (photographic photometry)을 사용하던 시기므로 많은 수의 휘어진 에셀 분광선들을 추적하여 분석할 방법 (tracing the curved orders and solving the blazing function)이 없었다. 이러한 문제가 CCD의 등장과 함께 컴퓨터를 이용하여 해결될 수 있었고, 3600-10000Å 까지 모든 분광선을 한번의 노출에 의해 관측될 수 있는 에셀 고분산 시대가 열렸다. 그 시작을 Lick 천문대, AAO 등에서 찾을 수 있는데, UC, SantaCruz의 Steven Vogt는 에셀 격자와 프리즘을 조합시켜, 각각의 에셀 선들이 거의 등간격인 Hamilton Echelle spectrograph (HES)을 만들어 1986년부터 연구에 본격적으로 활용할 수 있었다. 이 부류의 고분산 분광기는 고분산 분광을 하면서도 관측 한계등급을 2-4m급 망원경에서 4에서 6등급 정도까지 향상시켰다 (Vogt 1987; McCarthy et al. 1993).

Lick 천문대 HES의 탁월한 효능은 15년이 지난 지금까지도 3m shane 망원경에 이용되는 기기 중 가장 많이 사용되고 있음을 상기하면 증명되는데, 보현산 천문대 고분산 분광기 사업의 모체가 되고 있다. HES는 Coude 초점 방식으로 조그마한 분광기가 아니라, 분광실을 전부 이용하여 분광하고 있다. Caltech의 McCarthy는 McDonald 천문대의 2.1m 망원경 HES와 같은 에셀 격자와 프리즘을 조합한 Sandiford cassegrain 분광기를 만드는데, 효율이

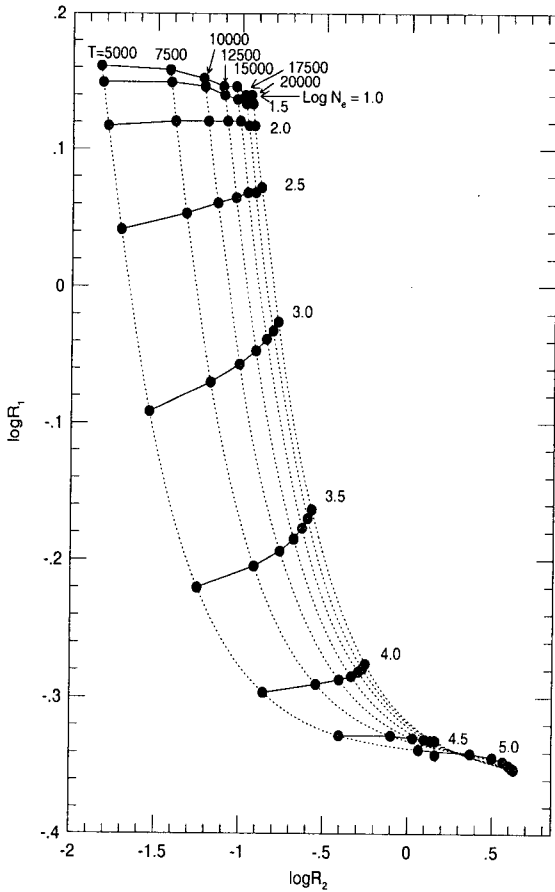


그림 1.—이론적 계산에 근거한 [S II]의 온도 diagnostics. $T_e = 5000 \sim 20000$ K의 범위내에서 2500 K 씩 증가하는 값으로 주어진 전자 온도와 전자 수밀도, $\log N_e = 1.0 \sim 5.0$ dex의 범위에서 0.5 dex 씩 증가하는 grid를 그렸음.

HES보다 개선되었다. 단순한 수치로 따지면, 2.2m 망원경 + Sandiford 분광기가 3 m + HES보다 높은 효율이 나온다. 하지만 Sandiford 분광기는 ghost image를 제거하지 못해서 문제점을 가지고 있는 기기가 되었다.

4.2. 보현산 고분산 분광기 개념설계

보현산 천문대 분광기로 우리는 처음, 위의 HES와 Sandiford 분광기를 검토해 보았다. 하지만, 보현산 분광기에는 Nasmyth등의 다른 초점이 갖추어져 있지 않았고, cassegrain 초점을 이용하기에도 Sandiford 분광기 정도의 무게를 지탱할 수 없는 빈약한 설계로 만들어져 있음을 알게 되었다. UC, Santa Cruz의 Vogt 교수와 McCarthy를 접촉하여 좀더 구체적으로 연구를 진행하면서, Vogt의 제안에 따라 1.8m 망원경의 f/8 초점에서 광섬유(fiber)를 이용하여 빛을 분광실로 유도하는 Dual-White pupil 방식의

분광기를 대안으로 생각하기에 이르렀다.

Dual-white Pupil의 원리의 시초는 Barranne (1972)에서 찾을 수 있고, 그 발전적 변형은 McDonald 천문대 2.7 m 망원경에 이용되고 있는 Tull 등 (1995)의 고분산 에셀 White-Pupil Spectrometer에서 자세히 설명되고 있다. 이러한 Dual-white pupil 방식을 이용한 분광기로 ESO에 있는 Hans Dekker와 Bernard Delabre등에 의해 연구가 진행된 a) 이태리의 TNG (Telescopio Nazionale Galileo) 망원경용 고분산 분광기 (Gratton et al. 1997), b) ESO에 의해 VLT에 쓰이고 있는 UVES (UV-Visual Echelle 분광기, Dekker et al. 1992), c) Tull 교수가 제작한 HET HRS (Hobby-Eberly Telescope High Resolution Spectrograph) 분광기 등은 당시 이미 적용되기 시작한 고분산 분광기 설계의 새로운 모범이었다. 처음 보현산 고분산 분광기를 위해 이용된 카메라의 설계는 Vogt가 제작한 Keck 10 m 망원경의 HIRES에 부착된 카메라와 크기만 다를 뿐 기본 형태가 동일하였다. 이 HIRES 스타일 카메라는, 3000 Å에서 20000 Å까지 색수차가 생기지 않도록 설계되어 있는데, Hubble의 NICMOS, Paloma의 분광기 등 많은 곳의 카메라 설계 경험이 있는 UC, Santa Cruz의 Epps 교수의 작품이다. 이 카메라의 특징은 색수차의 교정을 위해 두 개의 특수 볼록 렌즈를 거쳐 투과된 빛이 오목 Spherical Mirror에 반사되어 lens와 Spherical Mirror사이의 CCD에 상이 맺히도록 되어있다. 따라서 Dewar가 Mirror에 도달되는 일부분의 빛을 가린다. HIRES에 쓰이는 Spherical Mirror는 Dewar에 비해 상대적으로 크기 때문에 문제가 되지 않지만, 보현산 천문대의 경우는 200 mm 정도의 collimating beam을 고려하고 있기 때문에 C-CD Dewar 의해 상당히 많은 부분의 빛이 가리게 된다. 따라서 CCD Dewar를 중심 축에서 멀어지게 배치하고, 비축방식 (off-axis)을 고려하였었다.

여기서 우리가 에셀 분광기 설계를 선택하게 된 여러 사항에 대해 요약한다.

에셀 격자: 일반적으로 얻고자 하는 파장별 최대 분해능 (resolving power)은 $R \sim 110 d(\text{mm}) \tan i$ 로 주어진다. 여기서 d는 조준광 (collimating beam)의 직경 크기며, i는 에셀의 블레이징 각도 (blazing angle)로, 최대 분해능은 a) $\tan i$ 와 b) 조준광의 직경에 의해 결정됨을 알 수 있다. $\tan i$ 가 큰 경우 고분산을 가능케 해주는데, 현재 기술상의 진보로 $\tan i = 4.0$ 까지 제작이 가능하며 이를 R-4 Echelle이라 한다. VLT의 UVES에 이미 제작되어 사용되기 시작했지만, Lick 천문대의 HES, Subaru의 HDS, Keck의 HIRES의 최첨단 분광기에는 사용되지 못하는 최첨단 격자이다. 1998년 분광전문 9.2m 대형 망원경인 HET의 HRS에도 쓰이고 있으며, 2000년부터 가동된 VLT의 UVES에도 쓰이고 있다. R4 격자를 사용함으로써 조준광의 크기를 줄일 수 있고, 따라서 camera를 비롯한 분광기의 규모를 줄이는 효과를 가져오지만 R4 격자

의 비용은 R-2.7등에 비해서 비용이 아주 높다.

참고로 HIRES나 이를 모방하여 제작한 Subaru HDS는 R-2.7 Echelle을 사용하며 Hamilton Echelle 분광기는 R-2 Echelle을 사용한다. R-4 Echelle은 100 mm 조준광에는 4" × 16" 크기가 필요하며 가격은 27K USD 이다. 200 mm 나 150 mm beam에 쓰일 8" × 32" 에셀과 동일한 McDonald 천문대의 Tull이 180-200K USD이다. 우리는 조준광을 150 mm로 예상하고 이러한 Echelle의 가격을 알아보았는데 주문제작을 해야하므로 가격은 오히려 높은 가격인 320K USD 임을 알았다. 따라서 8" × 32"의 Echelle을 사용하여 조준광이 150 mm인 분광기를 설계하고자 하였는데, 나중에 FEROS의 분광기에서 136 mm의 분광기가 제작됨을 알고 이에 준하는 분광기를 설계하는 과정에서 비용의 절감을 위해 136 mm의 분광기로 설계가 확정되게 되었다.

에셀 차수 분리: 저중분산 분광기와는 달리 에셀 격자를 이용한 고분산 분광은 높은 차수에서 분광을 하며 분광선이 CCD 평면에 2차원 상으로 겹쳐서 배열되는데, 이러한 차수를 분리하는 방법에 따라서 에셀 차수 사이의 간격이 달라진다. 차수 사이가 넓은 경우 광섬유의 개수를 늘려서 sky background등을 동시에 관측할 수 있다. 이러한 작업을 위해서 차수의 간격이 최소한 8초각 이상 되어야 한다. 차수를 분리하는데는 일반 격자나 프리즘을 사용할 수 있는데, 일반 격자방식의 차수 분리 (cross-disperser)를 쓸 경우 전 파장 (3727 - 9000Å)을 관측하기 위해서 두 번의 노출이 필요하다. 차수 사이를 더욱 넓혀서 많은 정보를 담고자 하는 경우 (예, 20초각 차수 분리)에는 3개 이상의 격자가 필요하다. 단파장과 장파장 모두에 대하여 연구를 할 수 있게 하는 데는 최소한 두 개의 차수 분리 격자가 필요하다. 프리즘을 차수 분리로 쓸 경우, 서로 이웃하는 차수가 겹치는 것을 막기 위해서는 한면이 400 mm 가량 되는 두 개 이상의 prism을 사용해야 하므로 4200 Å 이하의 단파장 빛이 통과하기가 어려우며 10 arcsecs 이상의 차수 분리는 사실상 어렵다. 우리는 처음에 격자를 사용하여 차수의 간격을 넓혀 다양한 연구를 생각하였지만, 이후에 FEROS 분광기 설계를 참조하는 과정에서 단 한번의 노출로 전파장을 관측할 수 있는 프리즘을 선택하기로 하였다.

광섬유: 광섬유를 이용할 경우 부경을 f/15 나 f/8에서 선택해야 했다. 고분산 분광기, 특히 카메라 설계를 쉽게 하기 위해서는 f/15를 사용할 수 있는데, Epps의 도움으로 Vogt가 f/8의 빛을 사용하여 분광하도록 설계를 시작하였다. 그 이유는 쿠데 초점에서 사용되는 것과 같이 초점비가 느린 빛은 광섬유(fiber)에 사용이 불가능하므로 해결책으로 microlens coupler를 사용하여 초점비를 f/5와 같은 값으로 바꿔 주어야 한다. 가령, Palomar 천문대의 5 m 망원경에 이용되고 있는 광섬유 에셀 분광기의 경우 (Libbrecht & Peri 1995) R2 Echelle과 quasi-Littrow의 광학설계를 사용하여 f/3의 prime focus에서 광섬유를 두

고 분광기로 유도하여 분광하고 있다. 또한 보현산 고분산 분광기의 경우도 f/15나 f/8의 빛을 광섬유에 유도하기 전에 f/3-6으로 변환시킨후 다시 카메라 설계를 용이하게 하기 위해서 광섬유에서 나온 빛을 f/15등으로 변환시켜야 한다. Harvard의 Dan Fabricant가 여러 자료와 의견을 제시해 변환과정에서 손실된 빛의 양과 복잡함을 피하고, f/8을 microlens등을 사용하지 않음으로서 80% 투과율을 유지하도록 설계를 추진하였다. 물론 f/8에 맞는 카메라를 설계하는 것은 상대적으로 매우 어렵다. 이는 카메라 설계에 가장 경험이 많은 EPPS의 도움을 받으리라는 가정하에 주어진 행복한 선택이었다.

카메라: 분광선이 모든 파장 영역에 무관하게 CCD 정면에 색수차 없는 상을 맺기 위해서는 카메라가 제대로 설계되어야 한다. Keck의 HIRES의 경우 카메라는 위에서 이미 언급했다. Robert G. Tull에 의해 제작되고 있는 HET의 광섬유 분광기인 HRS의 경우도 Epps가 설계를 하였다. Epps에 의하면, HET HRS의 광섬유에서 나온 f/10의 빛은 FRD (focal ratio degradation)가 미치는 ghost images나 pupil의 출현을 방지하기 위해서 카메라에 세심한 주의를 기울여 설계되었다. 이것은 Tull과 McCarthy등이 McDonald 천문대의 여러 분광기에서 미처 고려하지 못해 겪고 있는 결점들을 극복하려는 노력에서 비롯되었다. HET의 HRS의 경우, 4200Å 이하의 빛을 효율적으로 사용할 수 없는 반면, 우리는 3700Å 까지 관측이 가능하도록 Vogt를 설득하여 Epps의 도움으로 완성하였다. 우리는 방출선 분광 연구에서 중요한 의미를 갖는 [OII] 3727/29에 대한 관측을 가능하게 하여, 여러 분광연구에 도움이 되도록 하였다.

4.3. 분광기 효율

위에서 언급한 개념과 원리에 근거해 제작될 보현산 천문대 광섬유 에셀 고분산 분광기 (BOES)의 특성을 살펴보기로 한다. 고전적으로 분광을 하기 위해선 빛을 슬릿을 통해 분광기로 보내고 분광기 안에서 분산시켜 분광(spectrum)을 얻는데, 슬릿의 폭을 크게하면 빛의 손실이 줄어드는 반면 분해능은 떨어지게 된다. 분광기의 분해능과 슬릿폭의 곱 ($R \times S$)을 throughput 라하며 이것은 다음의 관계식으로 표현된다.

$$R \cdot S = W m \lambda / a \cdot D \quad (1)$$

여기서 R은 분해능($\lambda/\Delta\lambda$), S는 슬릿폭, W는 입사광이 에셀 격자에 닿는 직경, m은 에셀 차수, λ 는 파장, a는 에셀 홈 사이 거리, D는 망원경의 직경이다. α 를 입사각, β 를 회절각이라 하면, 빛의 반사 효율이 최대가 되는 Littrow mounting ($\alpha = \beta = \theta$, blaze angle)일 때 $m\lambda/a = 2\sin\theta$ 로 되고, W는 조준광의 직경 (d) 과 입사각(α) 사이의 관계에 의해서, $W = d/\cos\alpha$ 이므로 throughput은 다

음과 같이 된다.

$$R \cdot S = 2 d \tan\theta / D \quad (2)$$

분광 관측이 비점광원 (extended source)에 적용될 경우, Lick 천문대 3 m 망원경에 적용되고 있는 HES 분광기를 보현산 천문대 dual-white pupil 분광기가 능가할 수 있는 이유가 바로 위의 식에서 망원경의 구경이 분모에 위치하는 데서 연유된다. 또한 θ 가 크면 클수록 R·S는 커져 그만큼 분해능과 빛의 효율에서 이득을 보게 되는데, 이것은 에셀 격자의 제작기술에 연관되므로 15년전 당시의 기술에서 가능한 R2 (= $\tan\theta = 2$) 에셀 격자보다 현재의 기술이 가능한 R4를 쓸 경우 효율이 두 배로 증가함을 알 수 있다. 1.8 m 망원경 (D = 1,800 mm) 의 경우 R-4를 사용하므로, d = 136 mm 조준광 일때는

$$R \cdot S \simeq 166\,000 \text{arcsecs} \quad (3)$$

가 되어, 우리는 상대적으로 작은 망원경의 직경인 1.8 m 를 역으로 이용하여 높은 throughput (RS)를 얻을 수 있게 된다.

에셀에서 반사되는 빛의 효율 (Q) 은 자체의 반사율 (eff)과 에셀에 입사, 굴절하는 빛의 각도가 blaze angle에 어떠한 값을 가지는가 (ρ) 에 따라 결정된다. Dual-white pupil optical design에서 이용하고 있는 준 littrow의 경우에서 빛을 분산하는것이 Keck 천문대의 HIRES나 Lick 천문대 HES 분광기의 설계에서 오는 경우에 비해 효율을 더 증가시킨다. 분광기의 빛에 대한 효율을 아래와 같은 간단한 수식으로 점검할 수 있는데,

$$Q = \text{eff} \times \rho = 70\%(\text{bare} - \text{aluminum}) \times \rho \quad (4)$$

여기서 $\rho = E(\theta) / E(\theta=0^\circ) = \cos\alpha / \cos\theta \cos\beta$ 이다. HIRES 경우, $\theta = 5^\circ$ 이고 $\rho = 0.6$ 이다. 그리고 HES 분광기는 $\theta = 5.5^\circ$ 이며 $\rho = 0.68$ 이다. 한편, 보현산 고분산 분광기는 $\theta = 0.8^\circ$ 이고 $\rho = 1$ 에 가까워서 효율이 32 - 40% 높아지게 되어 CCD의 선택에 따라 Lick 천문대의 3m 망원경의 성능을 능가할 수 있음을 알 수 있다.

4.4. 비점광원의 방출선 연구

이온화된 가스 영역에서는 물질이 응집되어 별이 탄생되기도 하고, 별의 죽음으로 분출되는 물질이 성간 물질과 충돌하며 또한 성간 물질에 에너지를 공급한다. 이러한 영역에서 생성되는 성운의 방출선 분광선이 diagnostic line을 통해 아주 중요한 단서를 제공함은 이미 언급하였다. 행성상 성운이나 윈드를 내고 있는 별, 즉 공생별, 무거운 post-AGB 별과 주위에 있는 가스의 분광 관측은 천체의 질량 유실율, 에너지 원, 성간의 화학원소 증가에 대한 단서를

제공한다. 따라서 1) OB 별 주위의 셀과 H II regions에서의 항성풍 또는 초신성과 성간 물질간의 충돌 그리고, 2) 슈퍼 셀, chimneys, winds의 형성 및 진화가 거대 구조를 지배하는데 이에 대한 연구는 고분산 분광을 통해 진행할 수 있다. 또한 이러한 연구는 에셀 분광기 크로스 디스퍼서 위치에 거울을 놓고 필터를 이용하여 단 하나의 에셀 order를 분리하여 수행되기도 한다.

고분산을 유지하면서 많은 양의 광량을 얻고자 하는 경우, 위에서 언급한 큰 슬릿을 넓힘으로서 가능하다. 식 (2)의 원리에 의하여, 행성상 성운, SNR, AGN등의 연구에 구경이 비교적 작은 보현산 1.8m 망원경이 큰 throughput을 가져 유리한 연구 결과를 얻을 수 있다. 하지만 항성이나 먼 곳에 있는 점광원 연구 대상의 천체는 망원경의 구경에 지배를 받는다. 따라서 연구 대상을 수십 초에서 수 분 각도의 크기인 행성상 성운, 초신성 잔해, H II regions, 은하와 같은 천체로 선정하여 그 연구를 수행하면 경쟁력을 확보할 수 있으리라 믿는다.

모든 천체의 연구에 고분산이 다 필요한 것은 아니지만, 방출선이 조밀하여 서로 겹치는 것을 피하고 (그림 2 참조), 천체의 시선속도를 세밀히 측정하고자 하거나 자세한 선율곡을 얻고자 하면, 고분산 분광 관측이 반드시 수행되어야 할 것이다. 여기서 간단히 비점광원 천체의 방출선 분광분야를 간단히 요약해 보기로 한다. 아래의 많은 부분이 최근 고분산 분광기 연구모임에서 발표된 문헌을 중심으로 요약된 것으로 자세한 인용을 생략함을 밝힌다.

행성상 성운, WR 별, 공생별: 행성상 성운의 에셀 분광 연구는 별이 잃어가는 물질의 운동학과 진화를 추적하는데 중요한 수단이다. 행성상 성운은 다중 셀을 가지고 있기도 하는데, 이는 시간을 두고 발생하는 별 진화의 현상에 대한 단서이므로 고분산 분광 관측을 통해 각 셀의 특성을 자세히 분석할 수 있다. 마찬가지로의 연구가 WR 별에도 적용될 수 있다. WR별은 P Cygni 선이 보이는데, 항성풍의 속도가 행성상 성운에 비해 강하다. NGC 6888의 고분산 분광선은 두 개의 분명한 운동 성분을 보이는데, 각각의 자료 분석이 He-rich와 N-rich의 화학적 특성을 보인다 (Marston & Meaburn 1988). 또한 WR 형의 중심별을 가진 행성상 성운 NGC 6543의 경우는 He의 성분이 셀에 따라 차이가 나고 있다 (Hyung 등 2000). 공생별은 M형 거성별의 흡수선과 He II 4686의 강한 분광선이 관측되는 쌍성의 천체로 생각되어지는 경우이다. 주기가 2년 정도이고 수 AU 거리에서 두 별이 돌고 있는 것으로 여겨지는데, 가끔 격변을 하기도 하여 분광 연구에 흥미있는 천체이다. 고분산 분광 관측으로 분광선을 자세히 연구할 수 있는 천체이다.

초신성 및 그 잔해: 초신성은 아주 빠른 속도로 팽창되고 성간 물질과 충돌하여 성간 물질을 가열하며 충격파의 영향을 받은 물질에서 나오는 복사는 주변의 물질을 이온화시키게 된다. 초신성 폭발후 물질은 수천 km/s의 속도

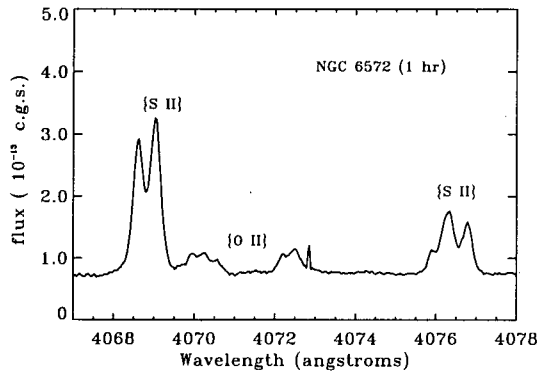


그림 2.—행성상 성운 NGC 6572의 고분산 분광선. 고분산 관측을 통해 [S II] 4068.6, 4076.35 분광선이 주위의 [O II] 4070/4072선과 분명히 분리됨을 알 수 있다 (Hyung, Aller, & Feibelman 1999).

로 팽창되지만 충격과 첨단부가 지난 뒤의 물질에서는 아주 좁은 폭의 중성 원소에서 나오는 분광선이 존재하는데, 그 온도는 매우 낮을 것으로 생각되었다. 그러나 이러한 기대와는 달리 고분산 분광 자료의 분석에 의해서 30 000 - 50 000 K로 밝혀졌다 (Smith 등 1994). 이것은 충격과 면에서 가속이 된 CR에 의해 가열되었을 가능성이 있다. 또한 고분산 분광 관측을 통해서, 밀도가 낮은 성간 물질에서 자기장의 영향으로 생성된 비충돌 충격과 경계면 (collisionless shock fronts)을 연구할 수 있다. Cygnus loop에서 같은 오래된 초신성 잔해의 연구에 의하면 이것은 복사에 의한 충격과 경계면 (radiative shock fronts)을 가졌으며 이로 인해 필라멘트처럼 분산된 구조를 보여준다 (Hester 1987).

수퍼 셀의 기원 및 역학적 진화: 셀, 수퍼셀, arches, worms, 빠른 속도로 움직이는 성간 구름은 크기가 수 kpc인데, 이러한 구조를 유지하기 위해서는 많은 양의 에너지원이 전제되어야 한다. 현재 이러한 구조를 가능하게 하는 원인으로 연속적인 초신성의 생성과 연관되었다고 믿고 있는데, 우리는 하 2번째 4분원에 놓인 한 성간 구름 (intermediate Velocity Arch)은, 은하 원반의 1.2 kpc 위에 위치하고 있으며 (Kuntz & Danly 1992), 이 천체에 연관된 에너지는 약 10^{53} erg로 30 Doradus에 버금가는 에너지 천체이다. 이러한 구조를 연구하기 위해서 고분산 분광 관측으로 성간 흡수선을 얻고 이를 분석하여, 거리와 운동에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이러한 노력을 통해서 별이 생성되는 지역을 연구하고, 위에서 언급한 에너지원을 추

정하여 타당한 이론을 만들 수 있을 것이다.

Seyfert 은하 및 활동은하핵: Seyfert 은하의 방출선의 윤곽에 따라 Seyfert 1 과 Seyfert 2로 분류된다. Seyfert 2의 경우, $H\alpha$ 같은 허용선과 [OIII] 같은 금지선 모두 그 선폭 (FWHM)이 500 km/sec의 상대적으로 적은 선폭 (Narrow Emission Lines)인데, 이에 반해서 Seyfert 1의 경우는 허용선인 HeI, He II, H I 등이 5000 km/sec의 아주 넓은 선폭 (Broad Emission Lines, BL)을 가지고 있다. Seyfert 1과 2 모두, 선폭이 넓으므로 단순히 선의 세기를 연구하기 위해선 고분산 분광 관측이 필요치 않다. 가까운 Seyfert 1 은하 중에, 허용선 BL이 수 개월에서 수 년의 짧은 기간동안에 변화함을 보이는 경우가 있는데, 이를 모니터링하기 위해서 여러나라가 공동으로 분광관측을 수행하고 있다. 여기에서도 가스 성분과 마찬가지로 [OII], [O III], [N II], [Ne III], [O I], [N I], [Ne V], [Fe VII]를 관측하여 이온화 상태와 물리적 조건을 구하고, AGN에 숨어있는 블랙홀의 질량을 구하는 등의 연구를 할 수 있을 것이다. 보현산의 현재 중분산 분광기는 그간 많은 노력을 들였음에도 불구하고 설계 당시의 문제점으로 인해 이러한 작업을 하기에 성능이 적합하지 못한 기기로 판단된다. 따라서 새로운 중분산 분광기의 개발이 절실한 상황이다.

5. 고분산 분광 관측 연구 과제들

위에서 언급하지 않은 다른 여러 분야에서 고분산 분광 관측 연구가 진행될 수 있다. 여기서 그러한 예를 들어 본다.

5.1. 저온의 별과 장주기 분광 쌍성

표면 온도가 뜨거운 조기형 별들은 연구가 충분히 되었지만, 온도가 낮은 별의 연구는 상대적으로 많은 노력이 필요로 하며, 여전히 미진한 부분이 남아 있고, 활성화시켜 연구해야 할 분야이다. 광도가 매우 낮은 질량의 brown dwarfs의 탐색이 흥미로운 연구 과제로, 이를 위해 Li 을 탐색함으로써 질량이 0.06M. 이하인 별을 확인 할 수 있을 것이다. 희미한 천체를 대상으로 하는 연구이므로 8-10m 초대형 망원경의 등장과 함께 이것은 새로운 도전 영역이다. 2-3m 망원경의 집광력으로 주기가 상대적으로 긴 장주기 분광 쌍성 연구가 바로 연구를 진행할 수 있는 분야이다 (Popper, 개인서신).

5.2. 성단

성단은 그 곳까지의 거리와 구성원의 나이가 같기에, 천문학자에게 연구 시작부터 중요한 출발점을 제공해 준다. 성능이 우수한 분광기가 2-4m 망원경에 갖추어질 경우, 산개 성단의 거성까지 연구나, 구상 성단의 거성팀의 연구에 중요한 수단이 될 수 있다. 따라서 항성의 진화를 연구하는데 최적의 환경을 제공한다. 나이가 오래된 디스크 구상 성단의 연구는 질량이 적고 금속 함량이 적은 왜소 은

하 (low mass and low metallicity irregular galaxies)나 마젤란 성운과 비교연구가 될 수 있다는 점에서 흥미로운 연구 분야이다 (Brown 등 1996). 고분산 분광 관측을 통해서 $[Fe/H]$ 와 $[O/Fe]$ 를 구할 수 있다. 이러한 결과의 중요성을 간단히 요약하면, 이 원소의 기원이 별 자체의 진화의 결과인지, 성단 자체의 생성 당시 조건인지가 큰 관심사이다. 저온의 고분산 분광 관측 연구를 완전하게 하기 위해서는 물론 단파장 (blue spectra)의 분광 관측을 통해서 CNO 원소를 거성형 별들에 대한 화학 원소로 구해야 한다. 구상 성단에서의 탄소, 질소, 산소의 기올기는 여전히 연구되어야 할 분야로, 과연 O와 Na, O와 Al, N과 Na 등에 역상관 관계 (Kraft, 1994)가 존재하는가에 대한 핵 융합 반응 연구를 고분산 분광관측을 통해 수행하여야 하며 결국 이런 연구를 통해 구상 성단의 진화를 연구할 수 있다.

5.3. 외계 행성 탐색

우리 태양계의 목성과 같은 행성을 가지고 있는 항성계의 외계 행성에 관한 탐색은 이제 더 이상 낯선 일이 아니다. Lick 천문대의 경우, 3m 망원경은 물론 60cm CAT를 사용해 꾸준히 행성 탐색을 해오고 있다. 이 결과 10여년 동안 100여 대상 천체중 7개를 발견하였는데, 행성과 속주 별과의 거리는 약 2 AU 내에 있고 무게는 $M_{\text{sin}i} \sim 1 - 7 M_{J_{\text{up}}}$ 이다. 이러한 행성을 가지고 있는 속주별은, G3 V/IV, G7V 등으로 보현산 고분산 분광기를 효율적으로 사용하여 연구할 유망한 분야로 생각된다. 행성과 동반성과의 구분은 질량으로 할 수 있는데, 그 간의 Keck의 HIRES와 Lick HES/CAT의 연구 결과에 의하면, 2 AU 거리내에 있는 무게가 비교적 적은 0.5-5 $M_{J_{\text{up}}}$ 의 행성의 수가 5-50 $M_{J_{\text{up}}}$ 인 행성보다 3배가 많은 것으로 나타나고 있다. 그들의 공전 궤도는 이심률이 $e > 0.05$ 타원 궤도인 것으로 나타나, 목성같은 행성이 다른 행성에 의해 섭동을 받은 것 (Weidenschilling & Marzari 1996, Rasio & Ford 1996) 이거나, 동반성의 영향 (Holman & Wiegert 1996)이 아닌가 추측되고 있다. 또한 대다수의 탐색된 행성의 속주 별은 금속이 과다 ($[Fe/H] > 0.0$)인 것으로 밝혀졌다. BOES에도 IODINE CELL을 갖추어 이러한 연구를 대비하고 있다.

5.4. 우리 은하의 헤일로 필드 별

Li과 Be는 생성에 관한 Big Bang 핵융합 반응에서 만들어 지므로, 이를 가지고 있는 필드 별의 연구는 중요한 의미를 갖는다. 이 원소는 우주가 나이를 먹어감에 따라 은하의 CR에 의해 생성되고, 별내부에서 진행되는 proton포획 핵융합 반응에 의해 파괴됨으로서 상황이 복잡해지는데, 우리 은하 헤일로에 있는 별들 중 매우 가벼운 별들의 화학 원소인 Li과 Be의 연구는 초기 우주의 핵융합 반응 연구에 중요한 단서를 제공해주는 것으로 알려져 있다. 이 원소를 연구하기 위해서는 고분산 분광기가 3000Å 까지의 영역

을 관측할 수 있어야 하고 이러한 분광기가 Keck 천문대의 HIRES와 VLT천문대의 UVES이다.

금속이 아주 미미한 별은 초기 은하에서 생성된 별로 지금까지 사라지지 않고 있는 것으로 여겨진다. 또한 무거운 별이 진화해 Type II의 초신성으로 폭발할 때 효과적으로 생성되는 CNO 원소와 α -원소역시 초기 우주에서 생성된 주요 원소라 믿어지고 있는데, 이러한 원소생성에 관한 연구와 더불어 은하의 나이를 독자적으로 알려주는 Th 등의 연구는 고분산 분광 관측이 꼭 필요한 분야이다. 헤일로 별의 금속 함량은 $-1 \geq [Fe/H] \geq -3$ 의 범위에 있는데, 대다수의 원소는 Fe에 대해 일정한 것으로 알려져 있다 ($\Delta < 0.06\text{dex}$ for Mg/Fe, Ca/Fe, Ti/Fe; $\Delta < 0.15\text{dex}$ for O/Fe: Nissen 등 1994). 위에서 언급한 차가운 별의 분광선 연구에는 분해능 (R)이 60 000이상이어야 하는 것으로 알려져 있다. 이러한 연구는 천문학에 있어서 금광과 같은데, 고분산 분광기 뿐만 아니라 초대형 망원경 역시 필요하다. 이외에도 쌍성의 시선 속도나 궤도 요소 결정, 은하 중족의 운동학 또는 역학을 연구하는데는 고분산 분광 관측이 필수인데, 이러한 연구를 위해서 $R \sim 20\ 000$ 이 필요하다.

5.5. 성간 물질에 의한 흡수선

가스 성운과 성간 구름에 1.8m 망원경과 고분산 분광기를 활용하여 구조, 물리적 조건, 역학의 연구를 할 수 있다. 이 부분에서 지상 망원경의 역할은 우주 망원경이 필요치 않을 만큼 광학 영역에서는 유용하다. 흩어진 성간 구름 (diffuse interstellar clouds)은 별의 빛이 존재해야 보일 수 있다. 차가운 조건하에서 원자, 이온, 분자 모두 바닥상태의 조건으로 존재하는데, 이러한 상태에서 일어나는 resonance 상태의 분광선에서 나오는 폭이 좁은 흡수선을 연구함으로써 별과 우리사이에 있는 가스의 원소와 물리적 조건을 고분산 분광 관측으로서 연구할 수 있다. 이러한 연구를 통해서 이러한 투명하고 얇게 분포한 헤일로의 성간 물질이 어떤 화학적 조건에 있고, 어떻게하여 어두운 별인 은하 외부 천체로 진화하는지를 알아 볼 수 있을 것이다. 이러한 연구를 통해서 Na I, Ca II 등을 관측하게 되는데, 이런 관측은 BOES에 아주 좁은 구경의 광섬유를 갖출 경우 가능하고 200 μm 직경의 광섬유 연구에 이용되어 성공을 가져오는 경우 고려해 볼 사항이다.

5.6. 기타

1.8m 망원경과 고분산 분광기를 이용한 연구 분야는, 태양과 같은 별의 진동 (stellar oscillations or quakes)을 연구하는 asteroseismology, 거리 결정에 중요한 역할을 하는 Cepheid의 맥동 연구, 태양보다 크면서 수 시간의 주기로 맥동하는 delta-Scuti의 진폭연구, O형 및 Herbig Ae 별의 항성풍 및 자기 구조 연구, T Tauri 별의 Doppler 영상 연구 등 다양하다.

6. 결론

분광 관측 연구의 역사를 거슬러 지금까지 이루어진 연구를 더듬어 보면, 그동안 저분산, 중분산으로 해결할 수 없는 문제를 풀기 위해 새로운 기기가 개발되었음을 알 수 있다. 고분산 분광기의 개발이 어떠한 의미를 갖는지와 어떤 연구를 수행할 수 있는가에 대하여 살펴보고, 여러 의문점을 짚어 보았다.

위에서 언급한 보현산 천문대 1.8m 가시광 광학 망원경용 BOES의 우수한 규격에 비추어 보면, 분광 천문 관측 연구를 천문학 연구의 길이 활성화될 날이 곧 열릴 것으로 믿어진다. 하지만, 국내의 가시광학분야의 분광관측 천문학자가 아주 극소수인것도 사실이다. 더우기 아직은 저분산 분광관측의 경험을 가진 천문학자가 대부분이다. 현재 서방 천문학이 활발히 진행하고 있는 분야에 눈을 돌려 그들과 같이 공동연구를 진행하고 필요성이 부각되면, 8-10m 망원경에도 눈을 돌려야 하겠다. 분광기가 미비한 시점에서 지금 당장 분광 연구를 원활히 진행할 수는 없지만, 전산망을 통해 해외 관측 자료를 수집하고 이를 분석하면서 앞으로 완성될 분광기를 이용하여 수행할 연구 계획을 착실히 세워야 할 시점이다.

BOES의 기본설계는 보현산 망원경이 서구에 비해 상대적으로 작고 기후 등 기상 조건이 크게 불리 위치에 있음에도 불구하고, 망원경의 크기나 시상의 영향을 비교적 덜 받는 분광 천문 관측 연구를 수행할 수 있게 하는 것이다. 우수한 고분산 분광 관측기기가 갖추어질 예정인데, 좀 더 시야를 넓혀 우수한 중분산분광기도 갖추어지도록 노력해야 할 것이다. 이러한 노력은 비단 천문 연구원의 임무가 아니라 대학에 있는 천문학자를 포함한 모두에게 주어진 집이다. 우수한 관측 자료를 BOES를 통해 확보하고, 국제 공동 연구를 활성화하여, 빠른 시일 내에 한국 천문학이 도약할 기회를 마련해야 한다. 좋은 분광기가 만들어졌다 해서 우수한 연구 결과가 보장되는 것은 아니다. 이러한 여건속에서 한국 천문 연구원과 CFHT와의 공동연구 과제(DeepSky21)는 아주 중요한 계기를 주고 고무적인 계기라고 여겨진다. 우리 모두 보현산 1.8m 망원경의 BOES를 이용한 각분야별 유망한 연구 방향을 알아보고 서로 모여 진지하게 토론의 장이 자주 마련되도록 노력해야 해야 할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENTS

이 연구는 일부 과학기술부 (Korea MOST)의 국책연구사업 (Star 99-2-500-00)과 한국과학재단 (KOSEF Grant No. 1999-1-113-001-5)의 지원으로 진행되었습니다.

참고문헌

Adam, J., & Koppen, J. 1985, A&A, 142,461
 Aller, L. H. 1984, in *Physics of Thermal Gaseous Nebulae*, (Reidel: Dordrecht)

Aller, L. H., Keyes, C. D., Maran, S. P., Gull, T. R., Michalitsianos, A. G., & Stecher, T. P. 1987, ApJ, 320, 159
 Aller, L. H. 1995, *Annual Review of Astron. and Astrophys.*, 33, 1
 Baker, J.G., Menzel, D. H., & Aller, L.H., 1938, ApJ, 88, 422
 Baranne, A. 1972, in *ESO/CERN Conference*, ed. S. Laustsen & A. Reiz (Geneva), p. 227
 Bohm, D., & Aller, L. H. 1947, ApJ, 105, 1
 Bowen, I. 1952 ApJ, 116, 1
 Bowen, I. 1927 PASP, 39, 295
 Brown, J. A., Wallerstei, G, Geisler, D., & Oke, J. B. 1996, AJ, 112, 1551
 Clegg, R. E. S., Harrington, J. P., Barlow, M. J., & Walsh, J. R. 1987, ApJ, 314, 551
 Dekker, H., Delabre, B, Hess, G., & Kotzłowski, H. S. 1992, *Progress in Telescope and Instrumentation Technologies*, ESO Conference (Barching: ESO), ed. by Marie-Helene Ulrich, 581
 Flower, D. R. 1968, Ap, Letters, 2, 205
 Gratton, R. G., Bonanno, G, Bhatia, R., Cavazza, A. Claudi, R. U., & Ferretti, F. 1997, SPIE, 2871, 1204
 Goodson, W.L. 1967, Z. fur Astrophys., 66, 118
 Harrington, J.P. 1967, *Model Planetary Nebulae: Electron Temperatures and Ionization Stratification* unpublished Ph. D. thesis, Ohio State University.
 Harrington, J. P. 1968, ApJ, 152, 943
 Hester, J. J. 1987, ApJ, 314, 187
 Holman, M., & Wiegert, P. 1996, AAS DPS meeting, 28, 1212
 Hubeny, I. 1988, *Computer Phys. Comm.*, 52, 103
 Husfeld, R. Kudritzki, R. P., Simon, K. P., & Clegg, R. E. S. 1984, A&A, 101, 323
 Hyung, S. 1994, ApJS, 90, 119
 Hyung, S., & Aller, L. H., 1996, MNRAS, 278, 551
 Hyung, S., & Aller, L. H., 1997a, ApJ, 491, 242
 Hyung, S., & Aller, L. H., 1997b, MNRAS, 292, 71
 Hyung, S., Aller, L. H., & Feibelman, W. A. 1999, ApJ, 514, 878
 Hyung, S. Aller, L. H., Feibelman, W. A., Lee, W. B., & de Koter, A. 2000, MNRAS, in press
 Kraft, R. P. 1994, PASP, 106, 553
 Keenan, F.P., Aller, L.H., Hyung, S., Conlon, E.S., & Warren, G.A., 1993b, ApJ, 410, 430
 Keenan, F.P., Aller, L.H., Hyung, S., & Brown, P.J.F., 1995, PASP, 107, 148
 Keenan, F. P., Aller, L. H., Bell, K. L., Hyung, S. McKenna, F. C., & Ramsbottom, C. A. 1996, MNRAS, 281, 1073

- Keenan, F. P., McKenna, F. C., Bell, K. L., Ramsbottom, C. A., Wickstead, A. W., Aller, L. H., & Hyung, S. 1997, *ApJ*, 487, 457
- Keenan, F. P., Aller, L. H., Bell, K. L., Espey, B. R., Feibelman, W. A., Hyung, S., McKenna, F. C., & Ramsbottom, C. A. B. M. 1998, *MNRAS*, 295, 683
- Keenan, F. P., Aller, L. H., Bell, K. L., Crawford, F. L., Feibelman, W. A., Hyung, S., McKenna, F. C., & McLaughlin, B. M. 1999, *MNRAS*, 304, 27
- Kuntz, K. D., & Danly, L. 1992, *PASP*, 104, 1256
- Libbrecht, K.G., & Peri, M.L. 1995, *PASP*, 107, 62
- Martin, W.C., Zalubas, R., & Musgrove, A., 1990, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 19, 821
- Marston, A. P., & Meaburn, J. 1998, *MNRAS*, 235, 391
- McCarthy, J. K., Saniford, B. A., Boyd, D., & Booth, J. 1993, *PASP*, 105, 881
- Mendez, R. H., Kudritzki, R. P., Gruschinske, J., & Simon, K. P. 1981, *A&Ap*, 101, 323
- Menzel, D. H., Aller, L. H., & Baker, J.G. 1938, *ApJ*, 88, 313
- Menzel, D. H., & Aller, L. H. 1941, *ApJ*, 94, 30
- Mihalas, D., 1978, *Stellar Atmospheres*, 2nd Edition (W.H. Freeman: San Francisco)
- Nissen, P. E., Gustafsson, B., Edvardsson, B., & Gilmore, G. E. 1994, *A&A*, 285, 440
- Osterbrock, D. E. 1989, *Astrophysics of Gaseous Nebulae & Active Galactic Nuclei*, University Science Press
- Pequignot, D., 1986, *Workshop on Model Nebulae*, (Paris: L'Observatoire de Paris)
- Rasio, F. A., & Ford, E. B. 1996, *Science*, 274, 954
- Smith, R. C., Ramond, J. C., & Laming, J. M. 1994, *ApJ*, 420, 286
- Tull, R. G., MacQueen, P.J., Sneden C., & Lambert, D.L. 1995, *PASP*, 107, 251
- Vogt, S. S. 1987, *PASP*, 99, 1214
- Weidenschilling, S. J., & Marzari F. 1996, *AAS DPS meeting*, 28, 1214
- Zanstra, H. 1926, *Phys. Rev. (2)* 27, 64