

충돌이온화평형 상태에서 [O I]  $\lambda 6300$ 과  $H\alpha$ 의 세기비  
**INTENSITY RATIO OF [O I]  $\lambda 6300$  AND  $H\alpha$  IN COLLISIONAL  
 IONIZATION EQUILIBRIUM**

선광일, 이대희  
 한국천문연구원

KWANG-IL SEON AND DAE-HEE LEE

Korea Astronomy Observatory, Daejeon, 305-348, Korea

*E-mail: kiseon@kao.re.kr*

(Received November 29, 2004; Accepted December 10, 2004)

**ABSTRACT**

In this paper, the intensity ratio of [O I]  $\lambda 6300$  and  $H\alpha$  lines, which plays an important role in the study of warm (or diffuse) ionized interstellar medium, is calculated assuming collisional ionization equilibrium (or coronal equilibrium). The calculated ratio is compared with the previous works, and with the observations, obtained by Reynolds (1989) and Reynolds et al. (1998) with the Wisconsin  $H\alpha$  Mapper facility, toward the directions that sample the faint interstellar emission-line background. The comparison confirms that most of the  $H\alpha$  originates from nearly fully ionized regions along the lines of sight rather than from partially ionized H I clouds or layers of H II on the surfaces of H I clouds.

*Keywords:* interstellar medium, atomic processes and interactions

**1. 서론**

천체플라즈마와 같이 밀도가 낮은 기체의 물리적 특성을 이해함에 있어서 충돌이온화평형(collisional ionization equilibrium, coronal equilibrium) 상태는 가장 기본이 되는 개념이다. House (1964)가 처음으로 충돌이온화평형 상태에서 온도에 따른 이온함량비(ionic abundance fractions)를 계산한 이후로, 전자와의 충돌에 의한 이온화율 및 재결합율이 새롭게 갱신될 때마다 더 정밀한 계산이 수행되어왔다.

충돌이온화평형 상태에서의 이온함량비는 Chianti (Dere et al. 1997, Young et al. 2003) 또는 APEC/APED (Smith et al. 2001) 등의 플라즈마 스펙트럼 합성(synthetic) 프로그램에서 매우 유용하게 사용된다. 최근에는 Arnaud & Rothenflug (1985)과 Arnaud & Raymond (1992)가 계산한 결과 또는 Mazzotta et al. (1998)가 계산한 결과가 주로 사용된다.

한편, Field & Steigman (1971)은 우주선(cosmic ray)에 의한 이온화와 전자에 의한 복사재결합(radiative recombination), 그리고 수소와의 전하교환(charge exchange, or transfer)을 고려하여 약 10,000 K 이하의 성간물질에서

산소의 이온화평형 상태를 연구하였다. 그들은 약 1,000 K 이상의 온도에서는 전하교환이 가장 중요하게 되어 산소의 이온화정도(degree of ionization)는 순전히 수소의 이온화정도에 의해서 결정됨을 보였다.

Weisheit (1977)는 Field & Steigman (1971)의 결과를 이용하여 성간물질에서 [O I]  $\lambda 6300$  방출선과  $H\alpha$ 의 세기비(intensity ratio)가 온도 및 이온화정도에 매우 민감함을 보였으며 이를 이용하여 중온성간물질(warm interstellar medium)의 온도 및 수소의 이온화정도를 진단(diagnostics)할 수 있음을 보였다. 또한 Reynolds (1989)와 Reynolds et al. (1998)은 Weisheit (1977)와 동일한 방법으로 소위 Reynolds Layer라고 불리는 중온성간물질(warm or diffuse ionized interstellar medium)의 특성을 연구하였다.

이 논문에서는 Field & Steigman (1971)와 달리 전자와의 충돌에 의한 이온화 및 재결합, 그리고 수소와의 전하교환을 고려한 충돌이온화평형 상태에서 [O I]  $\lambda 6300$ 와  $H\alpha$ 의 세기비를 계산하였다. 또한, 계산된 결과와 Reynolds layer로부터 관측된 결과와 비교하여 Reynolds layer로부터 관측된  $H\alpha$ 는 부분적으로 이온화된 H I 영역으로 방출되기 보다는 거의 완전히 이온화된 영역으로부터

터 방출된다는 것을 확인하였다.

## 2. 충돌이온화평형 상태

천체물리에서 전하교환의 중요성은 Chamberlain (1956)에 의해 처음으로 언급되었으며, Field & Steigman (1971)은 성간물질의 이온화상태에서 전하교환이 중요함을 보였다. 특히, 산소의 경우 수소와 이온화에너지가 거의 비슷하기 때문에 (Dopita & Sutherland 2003 참조) 온도가 1,000 K 이상일 때 우주선에 의한 이온화율과 복사재결합율이 전하교환율과 비교하여 작기 때문에  $N(O^+)/N(O^0) = (8/9)N(H^+)/N(H^0)$ 을 만족함을 보였다(Osterbrock 1989 참조). 이때  $N(X^{i+})$ 는 원소  $X$ 의  $i$ 번째 이온  $X^{i+}$ 의 밀도를 의미한다.

한편, 충돌이온화평형 상태에서는 보통 수소와의 충돌에 의한 전하교환을 고려하지 않는 경우가 많다. 따라서 선광일 (2004)은 탄소, 질소 및 산소에 대하여 전하교환을 고려하여 충돌이온화평형 상태에서의 이온함량비를 계산하였다. 이때, 직접이온화(direct ionization)율, 들뜸자동이온화(excitation autoionization)율, 복사재결합(radiative recombination)율 및 이전자성재결합(dielectronic recombination)율은 Mazzotta et al. (1998)과 동일한 값을 사용하였으며, 전하교환율은 Kingdon & Ferland (1996)이 정리한 값을 이용하였다. 이 논문에서는 선광일 (2004)에서 계산한 이온함량비를 그대로 이용하였다.

## 3. [O II] $\lambda 6300$ 와 $H\alpha$ 의 세기비

[O I]  $\lambda 6300$  방출선은 바닥상태  $^3P_2$ 에 있던 중성산소가 전자와 충돌하여  $^1D_2$ 상태로 들떴다가 다시 바닥상태로 천이하면서 방출된다.  $H\alpha$ 는  $H^+$ 가 전자와 재결합하여 중성수소가 되면서 방출된다. 따라서 [O I]  $\lambda 6300$ 의 세기는  $N(O^0)$ 에 비례하며  $H\alpha$ 의 세기는  $N(H^+)$ 에 비례한다. 그러므로 [O I]  $\lambda 6300$ 과  $H\alpha$ 의 세기비는  $N(O^0)/N(H^+)$ 에 비례한다.

그림 1은 충돌이온화평형 상태에서 계산된 온도에 따른 이온함량비  $N(O^0)/N(O)$ 와  $N(H^+)/N(H)$ 의 변화를 보여준다. 이를 이용하여  $N(O^0)/N(H^+)$ 의 계산한 결과는 그림 2와 같다. 그림 1과 2에서 실선은 전하교환을 고려한 경우이며 점선은 전하교환을 고려하지 않은 경우이다. 그림에서 볼 수 있듯이 충돌이온화평형 상태에서도  $N(O^0)/N(H^+)$ 는 온도에 따라 많은 변화를 보여주고 있으며 따라서 온도를 구하기 위한 진단 도구로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

[O I]  $\lambda 6300$ 의 방출율(emissivity)은 다음과 같다

(Osterbrock 1989).

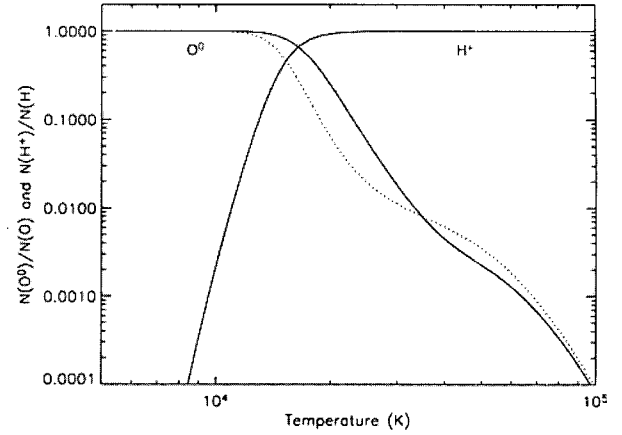


그림 1.- 온도에 따른 중성산소와 수소이온의 이온함량비의 변화. 실선은 전하교환을 포함한 경우이며, 점선은 전하교환을 포함하지 않은 경우이다.

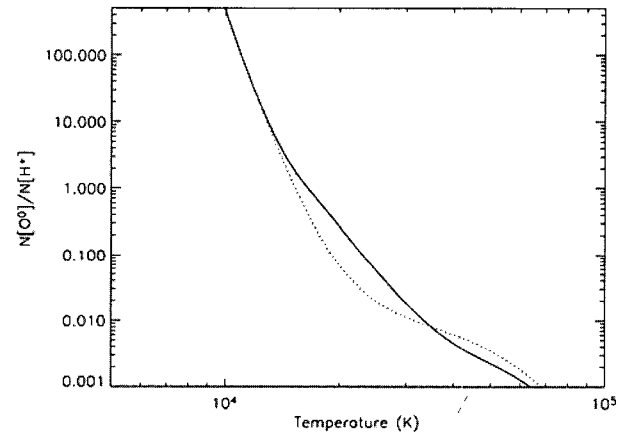


그림 2.- 온도에 따른  $N(O^0)/N(H^+)$ 의 변화. 실선은 전하교환을 포함한 경우이며, 점선은 전하교환을 포함하지 않은 경우이다.

$$\epsilon(\lambda 6300) = 5.3 \times 10^{-9} \frac{\Omega(T)}{(T/10^4)^{1/2}} \times \exp\left[-\frac{2:284}{(T/10^4)}\right] N(O^0) N_e (\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}). \quad (1)$$

이때,  $N_e$ 는 전자의 밀도이며, 중성산소의 충돌세기(collision strength)  $\Omega(T)$ 는 Berrington & Burke (1981)의 데이터를 Péquignot (1990)이 공식화한 결과를 이용하면 다음과 같다.

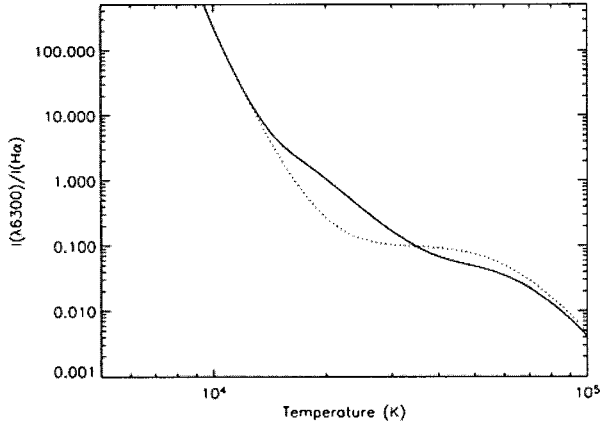


그림 3.- 온도에 따른  $I(\lambda 6300)/I(H\alpha)$ 의 변화. 실선은 전하교환을 포함한 경우이며, 점선은 전하교환을 포함하지 않은 경우이다.

$$\Omega(T) = 0.428 \frac{(T/10^4)^{1.43}}{1 + 0.605(T/10^4)^{1.105}} \quad (2)$$

재결합선  $H\alpha$ 의 방출율(emissivity)는 Martin (1988)에 의하면 다음과 같다.

$$\epsilon(H\alpha) = 1.17 \times 10^{-13} (T/10^4)^{-0.924} N(H^+) N_e \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}. \quad (3)$$

따라서 [O I]  $\lambda 6300$  방출선의 세기  $I(\lambda 6300)$ 와  $H\alpha$ 의 세기  $I(H\alpha)$ 의 비는 다음이 구해진다.

$$\begin{aligned} \frac{I(\lambda 6300)}{I(H\alpha)} &= \frac{\epsilon(\lambda 6300)}{\epsilon(H\alpha)} \\ &= 2.74 \times 10^4 \frac{N(O^0)}{N(H^+)} \\ &\times \frac{(T/10^4)^{1.854}}{1 + 0.605(T/10^4)^{1.105}} \exp\left[-\frac{2.284}{(T/10^4)}\right]. \end{aligned} \quad (4)$$

산소의 함량비는 Cardelli & Meyer (1997)로부터  $3.0 \times 10^{-4}$ 로 가정하여  $I(\lambda 6300)/I(H\alpha)$ 를 계산하면 그림 3과 같다. 그림으로부터 온도에 따라 두 방출선의 비가 급격하게 변함을 볼 수 있다.

Reynolds layer라고 불리는 중온성간물질의 관측결과와 비교하기 위해 표 1에 Reynolds (1989)과 Reynolds et al. (1998)의 관측결과를 나타내었다. 표로부터  $I(\lambda 6300)/I(H\alpha)$ 의 값이 약 0.04 이하임을 알 수 있으며, 그림 3으로부터 0.04의 비를 갖기 위해서는 약 55,000 K의 온도를 가져야하며, 0.02의 비를 갖기 위해서는 약

표 1.- 중온성간물질의 관측자료.

Direction	$I(\lambda 6300)/I(H\alpha)$	Reference
114°, 0°	0.020±0.003	1
130°, 0°	0.028±0.009	1
130°, -7°.5	< 0.012	2
	0.044±0.011	1
NGC 7000	0.0033±0.0003	1

<sup>1</sup>Reynolds et al. (1998), <sup>2</sup>Reynolds (1989).

71,000 K의 온도를 가져야 함을 알 수 있다. 따라서 만약, 중온성간물질이 충돌이온평형 상태에 있다면 관측치를 설명하기 위해서는 일반적으로 받아들여지고 온도 (6,000 ~10,000 K)에 비해 매우 높은 온도를 얻게 된다. 이는 중온성간물질은 충돌이온평형만으로는 설명할 수 없다는 것을 의미한다.

따라서 Weisheit (1971), 그리고 Reynolds (1989)와 Reynolds et al. (1998)의 논의를 따르기 위해 중성산소와 수소이온의 비  $N(O^0)/N(H^+)$ 를 다음과 같이 표현하자.

$$\frac{N(O^0)}{N(H^+)} = \frac{N(O)}{N(H)} \left[ \frac{1 + N(H^0)/N(H^+)}{1 + \xi N(H^+)/N(H^0)} \right]. \quad (5)$$

이때,  $\xi(T)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\xi = \frac{N(O^+)/N(O^0)}{N(H^+)/N(H^0)}. \quad (6)$$

Weisheit (1971)은 중온성간물질이 광이온화(photoionization) 환경아래에 놓여있으므로 [O I]  $\lambda 6300$  방출선은 주로 중성지역에서 방출되고  $H\alpha$ 는 광이온화된 H II 영역에서 방출될 것이라고 말하고 있다. 따라서 식 (5)에서 수소의 이온화정도  $N(H^+)/N(H^0)$ 는 [O I]  $\lambda 6300$  방출선이 방출되는 지역의 온도  $T$ 와는 무관하거나 거의 독립적으로 생각할 수 있게 된다. Reynolds (1989)와 Reynolds et al. (1998)은 Weisheit (1971)과 동일한 방법으로 Field & Stigman (1971)으로부터 얻어진  $\xi(T) = 8/9$ 을 식(5)에 대입하여, [O I]  $\lambda 6300$  방출선이 방출되는 영역의 온도가 약 6,000-10,000 K이라고 가정하고 관측으로 얻어진  $I(\lambda 6300)/I(H\alpha)$  세기비를 설명하기 위해 수소의 이온화정도가 매우 높아야 함을 보였다.

여기서는  $\xi(T)$ 을 이 논문에서 계산한 결과를 이용하여 중온성간물질의 관측결과와 비교하였다. 그림 4에서 실선과 점선은 여기서 구한 결과로써, 실선은 전하교환을 고려한 경우이고, 점선은 전하교환을 고려하지 않은 경우

이다. 점패선은 이 전의 연구와 같이  $\xi(T)=8/9$ 을 가정하고 계산한 경우이다. 그림으로부터 온도가 높아질수록 여기서 계산한 결과와 이전의 연구결과와 차이가 벌어짐을 볼 수 있다. 또한, 동일한 온도와 동일한  $I(\lambda 6300)/I(H\alpha)$  세기비에 대하여 이 논문에서 계산한 결과로부터 얻어지는 수소의 이온화율의 더 높아짐을 볼 수 있다.

그림 4에서 온도가 10,000 K일 때  $I(\lambda 6300)/I(H\alpha)$ 가 0.02가 되기 위해서는 이전과 같이 충돌이온화를 고려하지 않은 경우는  $N(H^+)/N(H^0)$ 값이 약 30이어야 하지만, 이 논문의 결과를 이용하면 약 70이어야 함을 볼 수 있다. 즉, 이 논문에서와 같이 충돌 이온화를 고려한 경우에는 수소의 이온화정도가 더 높아야 중온성간물질의 관측결과를 설명할 수 있음을 알 수 있다.

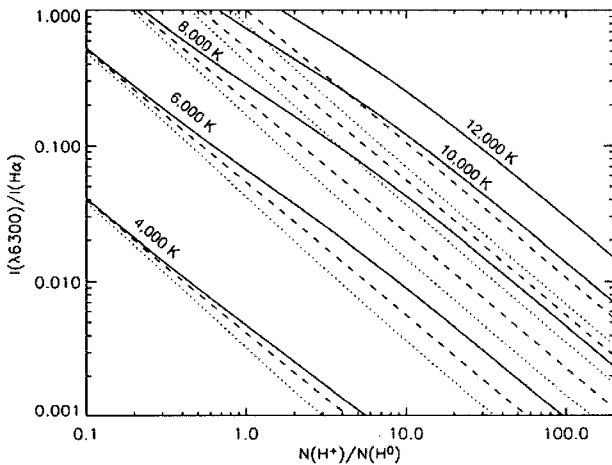


그림 4. -  $N(H^+)/N(H^0)$ 에 따른  $I(\lambda 6300)/I(H\alpha)$ 의 변화. 실선은 전하교환을 포함한 경우이며, 점선은 전하교환을 포함하지 않은 경우이다. 점패선(dashed line)은 전자와의 충돌에 의한 이온화를 고려하지 않고 계산한 Field & Stigman (1971)의 결과를 사용했을 때의 결과이다. 왼쪽에서 오른쪽으로 가면서 4,000 K, 6,000 K, 8,000 K, 10,000 K, 12,000 K의 온도에 대한 결과이다.

#### 4. 결론 및 토의

이 논문에서는 Field & Steigman (1971)와 달리 전자와의 충돌에 의한 이온화 및 재결합, 그리고 수소와의 전하교환을 고려한 충돌이온화평형 상태에서 [O I]  $\lambda 6300$ 와  $H\alpha$ 의 세기비를 계산하였다. 또한, 계산된 결과와 Reynolds layer로부터 관측된 결과와 비교하여 Reynolds layer로부터 관측된  $H\alpha$ 는 부분적으로 거의 완전히 이온화된 영역으로부터 방출된다는 것을 확인하였다.

그러나, 중온성간물질은 광이온화 환경아래에 놓여있으므로 Reynolds (1989)과 Reynolds et al. (1998)뿐만 아니라 이 논문의 방법으로는 대략적으로 수소의 이온화정도만을 알 수 있을 뿐 정확한 분석을 할 수는 없다. 다만, 이전의 연구와는 달리 전자와의 충돌에 의한 이온화를 고려하면 수소의 이온화정도가 더 높아져야 관측치를 설명할 수 있음을 알았다. 더 정밀한 분석을 위해 Domgörgen & Mathis (1994)와 같이 광이온화에 대한 연구가 요구된다. 그러나 이때도 전자와의 충돌에 의한 이온화 효과를 주의 깊게 고려해야 한다.

#### 참고 문헌

- 선광일 2004, 한국우주과학회지, 21, 343
- Arnaud, M., & Raymond, J. 1992, ApJ, 398, 394
- Arnaud, M., & Rothenflug, R. 1985, A&AS, 60, 425
- Berrington, K. A., & Burke, P. G. 1981, Planet. Space Sci., 29, 377
- Cardelli, J. A., & Meyer, D. M. 1997, ApJ, 477, L57
- Chamberlain, J. W. 1956, ApJ, 124, 390
- Dere, K. P., Landi, E., Mason, H. E., Monsignori Fossi, B. C., & Young, P. R. 1997, A&AS, 125, 149
- Domgörgen, H., & Mathis, J. S. 1994, ApJ, 428, 647
- Dopita, M. A. & Sutherland, R. S. 2003, in Astrophysics of the Diffuse Universe (Berlin: Springer), pp.118-121
- Field, G. B., & Steigman, G. 1971, ApJ, 166, 59
- Kingdon, J. B., & Ferland, G. J. 1996, ApJS, 106, 205
- Martin, P. G. 1988, ApJS, 66, 125
- Mazzotta, P., Mazzitelli, G., Colafrancesco, S., & Vittori, N. 1998, A&AS, 133, 403
- Osterbrock, D. E. 1989, Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei, (Mill Valley: University Science Books), p.43
- Péquignot, D. 1990, A&A, 231, 499
- Reynolds, R. J. 1989, ApJ, 345, 811
- Reynolds, R. J., Hausen, N. R., Tufte, S. L., & Haffner, L. M. 1998, ApJ, 494, L99
- Smith, R. K., Brickhouse, N. S., Liedahl, D. A., & Raymond, J. C. 2001, ApJ, 556, L91
- Young, P. R., Del Zanna, G., Landi, E., Dere, K. P., Mason, H. E., & Landini, M. 2003, ApJS, 144, 135
- Weisheit, J. C. 1977, ApJ, 215, 755