

## 행성간 공간 섬광을 이용한 태양풍 연구에 대한 간단한 고찰\*

김수용, 명노훈  
한국과학기술대학

최용석, 김현구, 김두환  
천문우주과학연구소

(1988년 10월 25일 받음; 1988년 11월 12일 수리)

## An Overview of Interplanetary Scintillation Method for Studying Solar Wind Physics\*

S. Y. Kim, N. H. Myung  
Korea Institute of Technology

and

Y. S. Choi, H. K. Kim, and T. H. Kim  
Institute of Space Science and Astronomy

(Received October 25, 1988; Accepted November 12, 1988)

### Abstract

Interplanetary scintillation is the fluctuation produced in the apparent brightness of a radio source, due to refractive effects in the turbulent solar wind flowing from the sun. If this medium is illuminated coherently, analysis of the spatial and temporal properties of the radiation reaching the earth allows the stochastic properties of the medium to be understood. Here, a brief review of method of interplanetary scintillation to study solar wind behavior will be introduced.

### 초 록

한 전파원으로부터 발생하는 전자파가 태양풍 내의 플라즈마 요동에 따른 굴절 효과 때문에 매질 내에서 교란을 받는다. 이 논문에서는 지상 관측을 통하여 이러한 교란인 행성간 공간

---

\* 이 연구는 과학기술처 특정연구비, 과학재단연구비 및 과학기술대학 기본연구비의 지원을 받았음.

섭광을 측정하여 지구와 태양 사이의 행성간 공간에서 일어나는 태양풍 활동을 조사하려는 연구의 이론을 제시할 것이다.

## 1. 서 론

코로나와 마찬가지로 태양풍은 매우 밀도가 낮은 플라즈마, 즉 전리된 기체로 주로 양성자와 전자로 구성되어 있다.<sup>1,2,3</sup> 이 바람은 일정한 속력을 가지고 태양으로부터 팽창하여 나가며 태양으로부터의 거리의 자승에 반비례하면서 밀도가 감소한다. 지구궤도에서는 밀도가 약 10개/cm<sup>3</sup> 이고 목성에서는 약 0.4개/cm<sup>3</sup>이다. 태양풍은 팽창함에 따라서 냉각되므로 태양풍의 온도가 지구 근처에서 10만도 정도로 떨어지게 된다. 이 온도에서의 가스 중의 음속은 약 50 km/sec이다. 그러나 지구 궤도상의 태양풍의 속력은 약 450 km/sec이므로 이 바람의 평균속력은 음속의 9배가 된다. 현대 우주과학의 태양풍 연구분야는 태양-지구의 상호관계 연구분야에서 매우 중요한 역할을 한다.

인공위성에 의한 관측에 의하면 태양풍 내의 매우 약한 자기장의 흔적이 보인다. 실제로 지구 궤도 부근에서의 자기장의 평균치는  $1 \times 10^{-4}$  gauss이다. 지자기의 극 부근에서는 0.6 gauss이다. 태양풍 내부에서의 파동이 생성되는 이유를 이해하기 위하여는 태양풍을 압축된 유체로 생각하는 것이 좋다. 태양풍과 같은 희박한 가스를 유체로 보고 내부의 복잡한 입자의 동력학적 process를 무시해도 좋다. 실제로 지구 궤도 부근에서의 태양풍의 밀도가 낮아 태양풍 내부의 양성자 1개는 평균적으로 2~3일 사이에 한 번 정도 다른 양성자와 충돌하게 된다. 행성간 공간 중의 약한 자기장의 존재 아래 일어나는 본질적인 불안정성이 이러한 자기유체적 성질(magnetohydrodynamic property)에 의하여 이해될 수 있다.

지구 궤도 부근에서의 인공위성에 의한 관측은 태양풍의 속력, 밀도와 압력의 중요한 변동이 있는 특징적인 pattern을 보여 주었다. 이러한 관측으로부터 태양풍의 유속 분포를 알 수 있다. 태양풍이 날아가는 앞 부분에서는 태양풍의 유속이 빠르며 후미에는 유속이 점차 느려지며 입자 밀도가 낮아진다.

한편, 오래 전부터 인공위성에 의한 직접적, 국소적 또는 일시적 관측에 비하여 계속적이며 간접적인 측정방법으로 행성간 공간 섭광을 이용한 실험 방법을 통하여 행성간 공간 내에서 일어나는 플라즈마 기상(plasma weather)을 연구하고 있다. 이러한 연구 방법은 인공 천체로는 측정 불가능한 행성간 공간의 영역, 예를 들면 태양 근처와 고위도 지역의 태양풍을 관측할 때 매우 유효하며 비교적 설치하기가 싸게 든다. 이 논문에서는 행성간 공간 섭광의 이론을 간단하게 언급할 것이다.

2. 행성간 공간 섭광(Interplanetary Scintillation ; IPS)

지구와 태양 사이를 날아가는 태양풍의 교란에 의한 굴절효과에 의하여 전파원으로부터 발생된 전자파가 행성간 공간에서 산란되는데, 이것을 행성간 공간 섭광이라고 부른다. 태양풍 내부에서 전자밀도의 turbulent fluctuation이 일어나므로 태양풍은 마치 random-phase medium으로 행동하게 된다. 만일 전파원인 point radiation source로부터 발생된 전자기파가 태양풍 매질을 지날 때 coherent 하게 산란되면 지구표면에서 관측되는 산란된 전자기파(scattered radiation)의 시공간적 변화를 이용하여 매질의 stochastic 성질을 분석할 수 있다.<sup>4,5</sup> 반대로 매질의 굴절률을 정확히 알면, 지표면에서 관측되는 radiation field를 이용하여 전파원의 구조를 밝힐 수 있다. 플라즈마 내부에서 일어나는 위상차는 파장에 비해하므로 IPS현상 자체를 비교적 긴 파장 영역에서 쉽게 볼 수 있다.

태양풍의 매질의 두께가 L이고 평균 플라즈마 난류의 크기가 a이며 굴절률이 평균 굴절률값  $n_0$  ( $\approx 1$ )의 근처에서  $\Delta n$  정도 변한다고 가정하자. 전파가 두께 L을 통과할 때 받는 위상차의 rms 값<sup>6</sup>,  $(\Delta\phi^2)^{\frac{1}{2}}$ 는  $L \gg a \gg \lambda$ 이면

$$(\Delta\phi^2)^{\frac{1}{2}} = 2\pi(\Delta n^2)^{\frac{1}{2}} (a/\lambda) (L/a)^{\frac{1}{2}} = 2\pi(\Delta n^2)^{\frac{1}{2}} (aL)^{\frac{1}{2}}/\lambda \dots\dots\dots (1)$$

이 된다. 한편, power의 변화치인  $(\Delta I^2)^{\frac{1}{2}}$ 는  $(\Delta\phi^2)^{\frac{1}{2}}$ 이 작을 때 이 양에 비례한다.<sup>7</sup> 따라서

$$(\Delta I^2)^{\frac{1}{2}} \propto 2\pi(\Delta n^2)^{\frac{1}{2}} (aL)^{\frac{1}{2}}/\lambda \dots\dots\dots (2)$$

(2)식의  $\lambda$ 에 대한 의존성은 플라즈마와 대기의 경우 각각 서로 다른 성질을 보여 준다. 대기의 경우  $\Delta n^2$ 이 파장에 관계 없으므로  $(\Delta I^2)^{\frac{1}{2}} \sim 1/\lambda$ 이기 때문에 전파원 관측에서 일어나는 scintillation에 의한 잡음은 파장이 짧을수록 커진다. 한편, 플라즈마의 경우 분산식은

$$(n_0 + \Delta n)^2 = 1 - \omega_p^2 / \{\omega(\omega - \omega_c)\}$$

이 되며  $\omega_p$ 와  $\omega_c$ 는 각각 전자의 플라즈마 주파수 및 사이클로트론 주파수이며  $\omega$ 는 전파의 진동수이다. 태양풍 내부에서는 자기장이 대체로  $10^{-4}$  gauss 이므로  $\omega_c$ 는  $10^4$  Hz 이고 m 또는 cm 파장영역에서는 무시할 수 있으므로

$$(\Delta n^2)^{\frac{1}{2}} = 2 \left( \frac{\omega_{po}^2}{\omega^2} \right) \frac{(\Delta N^2)^{\frac{1}{2}}}{N_0}$$

이 된다. 여기서  $N_0$ 와  $\overline{\Delta N}$ 은 각각 태양풍 내부의 평균밀도 및 밀도의 변화이다. 그러므로  $(\overline{\Delta N}^2)^{\frac{1}{2}}$ 은 파장에 비례하게 되며 따라서 대기의 경우와는 반대로 파장이 길수록 scintillation의 강도는 커지게 된다.

지표면에서 관측되는 섬광에 의한 회절무늬(diffraction pattern)의 공간 주파수 스펙트럼을  $G(k_x, k_y)$ 이라 하고 이것이 태양풍과 같이 속력  $v_0$ 로 x 방향으로 진행한다고 하면 scintillation의 power spectrum은  $P(f)$ 는

$$P(f) = \frac{v_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk_y G(k_x = \frac{2\pi f}{v_0}, k_y)$$

한편, 태양풍속의 전자밀도의 공간 주파수 스펙트럼을  $G_s(k_x, k_y)$ 이라 가정하면 회절효과를 가미시켜

$$G(\vec{k}) = G_s(k_x, k_y) F(\vec{k}), \quad k^2 = k_x^2 + k_y^2$$

으로 표시된다. Multiple scattering effect를 무시한 Tatarskii의 이론<sup>7,8</sup>에 의하면

$$F(k) = \int_0^{\infty} dz \overline{\Delta n^2}(z) \sin^2\left(\frac{k^2 z}{2q}\right)$$

로 표시된다.  $z$ 는 지표면으로부터의 높이이며,  $q$ 는 파수(wave number)이다. 만일,  $G_N(k) = \{1 + (ak_x^2 + 2qk_x k_y + bk_y^2)\}^{-\alpha}$ 이라 하면  $f \geq 0.2\text{Hz}$  범위에서

$$P(f) \propto f^{-2\alpha+1}$$

이 되어 spectrum index  $\alpha$ 에 의존하게 된다.<sup>6</sup> 만일 single antenna를 이용하여 관측하게 되면 섬광의 강도만을 측정할 수 있는 반면에 두 개 이상의 안테나를 설치하게 되면 난류의 비등방성에 관한 측비  $b/a$ 를 구할 수 있으므로 태양풍 내에서 일어나는 난류의 구조를 알 수 있다.

### 3. 결 론

인공위성에 의한 태양풍 직접 관측은 temporary 및 local 측정이며 고도의 분해능을 가진 반면에 IPS 지상 관측은 인공위성을 이용한 관측의 상보성을 가지며 space probe에 의한 불가능한 영역의 관측뿐만 아니라 장기간의 정상 관측과 함께 간섭계를 이용한 난류의 2~3 차원

구조를 밝힐 수 있는 장점이 있다.

크기  $a$ 의 density fluctuation에 의하여 산란된 산란파가 간섭하여 scintillation을 일으키려면 다음의 Fresnel Scale  $L$ 이 필요하다.

$$L = 2\pi a^2 / \lambda$$

만일 파장  $\lambda = 1$  m, 거리 = 1AU의 전형적인 태양풍 관측의 경우를 고려하여 보면 Fresnel scale  $a$ 는 155km이 되며 이것을 태양풍의 평균 속도 400 km/s으로 나누면 태양풍에 의한 scintillation의 평균적인 time scale은 0.38초가 된다.

한편, 시직경  $\theta$ 인 전파원에 의한 scintillation의 경우 산란체로부터 거리  $L$ 이 되는 장소에  $\delta = L\theta$ 의 상이 생긴다. 거리  $L$ 이 비교적 커지면 이에 따라서 전파원의 시직경  $\theta$ 는 작아져야만 한다. 시직경이 0.1 초 이하의 Quasi Stellar Object (QSO)로 태양풍의 섬광 연구를 할 수 있게 된다. 1990년대 초 태양 흑점이 나타나는 전성기가 되면 태양 플레어가 갑자기 많이 발생되며, 이것이 태양 근처에서 여러 가지 mechanism을 통하여 가속되게 된다. 가속 영역에서 가속되는 양상 및 정도를 규명하는 실험을 앞으로 준비하는 것이 현 시점에서 매우 의미 있는 일이다.

### 참고문헌

1. Gosling, J. T., Hundhausen, A. J. and Bame, S. J. 1976, *J. Geophys. Res.*, **81**, 2111.
2. Hundhausen, A. J. 1972, *Solar Wind and Coronal Expansion*, Springer-Verlag.
3. 大林辰藏. 1979, 宇宙空間 物理學, 裳華房.
4. Hewish, A. 1951, *Proc. Roy. Soc. (London)*, A209, 81.
5. Hewish, A. 1952, *Proc. Roy. Soc. (London)*, A214, 494.
6. Washimi, H., *Private Communication*.
7. 小谷正宜, *Private Communication*.
8. Tatarskii, V. I. 1961, *Wave Propagation in a Turbulent Medium*, McGraw-Hill Co., New York.