

VLBI による太陽風プラズマの観測

清水 義行・徳丸 宗利・小島 正宜
名古屋大学太陽地球環境研究所

1 はじめに

太陽風物理学における未解決な問題点の一つは、太陽風の加速メカニズムである。最近の研究により、高速太陽風の加速はそれまでのモデルとは異なり、およそ 10 太陽半径で加速が終了していることが明らかとなった [Grall *et al.*,1996]。したがって、太陽風の加速メカニズムを探るためには 10 太陽半径以内の太陽風プラズマの状態を知ることが重要である。しかしながら、このような太陽近傍領域は探査機の到達し得ない領域であり、遠隔測定に頼らざるを得ない。天体電波のシンチレーションを用いた太陽風の測定は、太陽風近傍領域を探ることのできる有効な遠隔測定の手段であり、これまでにさまざまな観測が試みられてきた [Spangler and Sakurai,1995; Grall *et al.*,1997 など]。

電波シンチレーション法では、観測周波数が高いほど、より太陽近くが観測できる。これは、電波の位相ゆらぎ $\delta\phi$ が太陽風の電子密度ゆらぎ δn_e によって起こるため、その関係は次のように表される。

$$\delta\phi = r_e \lambda \int_0^{+\infty} \delta n_e ds \quad (1)$$

ここで、 r_e は古典電子半径、 λ は観測波長、 s は視線である。式 (1) より、波長が短いほど、 δn_e が小さいほど $\delta\phi$ は小さくなり、太陽近傍の δn_e が大きい所でも $\delta\phi$ は飽和を生じないことがわかる。今回、我々は JNET を用いて 22GHz の電波シンチレーションにより太陽風観測を行った。22GHz はこれまで実施された電波シンチレーション観測の中でも最高の周波数にあたり、2 太陽半径まで観測が可能となる。ここでは、JNET による太陽風観測によって得られた結果について述べる。

2 観測の原理

電波源固有の構造を反映した visibility を $V_0(\mathbf{r})$ 、太陽風による変調を受けた visibility を $V(\mathbf{r})$ とすると、mutual coherence function $\Gamma(\mathbf{r})$ は

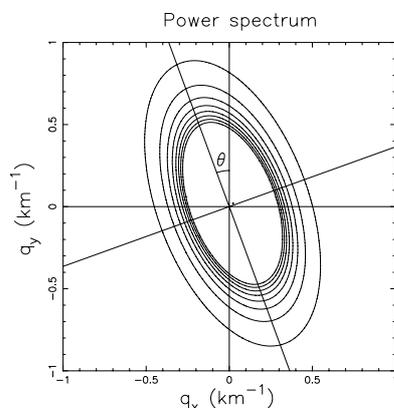
$$\Gamma(\mathbf{r}) = \frac{V(\mathbf{r})}{V_0(\mathbf{r})} \quad (2)$$

である。この $\Gamma(\mathbf{r})$ は phase structure function $D_\phi(\mathbf{r})$ を通じて電子密度ゆらぎのパワースペクトル $P_{\delta n_e}(\mathbf{q})$ と関連づけられる。

$$\Gamma(\mathbf{r}) = \exp\left(-\frac{1}{2}D_\phi(\mathbf{r})\right) \quad (3)$$

$$D_\phi(\mathbf{r}) = 4\pi r_e^2 \lambda^2 \int_0^{+\infty} ds \iint_{-\infty}^{+\infty} (1 - \cos(\mathbf{r} \cdot \mathbf{q})) P_{\delta n_e}(\mathbf{q}) d\mathbf{q} \quad (4)$$

$P_{\delta n_e}(\mathbf{q})$ はこれまでの研究から指数型であること、また電子密度ゆらぎの構造が磁力線方向に引き延ばされていることが知られている。[Coles, *et al.*,1991; Armstrong, *et al.*,1990] 即ち、 $P_{\delta n_e}(\mathbf{q})$ は式 (5) のように表すことができる。これを図示したものが図 1 である。



$$P_{\delta n_e}(\mathbf{q}) = C_N \left(q_x'^2 + \frac{1}{A^2} q_y'^2 \right)^{-\frac{\alpha}{2}} \quad (5)$$

$$\begin{cases} q_x' = q_x \cos \theta + q_y \sin \theta \\ q_y' = -q_x \sin \theta + q_y \cos \theta \end{cases}$$

図 1.: 電子密度ゆらぎのパワースペクトルのモデル。

ここで、 q_x 軸は太陽中心から電波源への radial 方向、 q_y 軸はそれに直交する方向にとる。また、 C_N はゆらぎのレベルを表す量であり、 A は長軸と短軸の比 (軸比)、 α はベキ指数、 θ は x 軸と楕円の長軸のなす角である。図 1 では $A = 2$ 、 $\theta = 20^\circ$ としている。以上から、観測によって $\Gamma(\mathbf{r})$ を求め $P_{\delta n_e}(\mathbf{q})$ の諸パラメータを決定する。

3 観測

JNET を用いた太陽風観測は 1997/12/15、1997/12/23 および 1998/1/8 に行われた。図 2 は観測日ごとの太陽と水メーザ源との位置関係を示している。

1997/12/23 は水メーザ源が太陽に近づくので、この日に観測した visibility が $V(\mathbf{r})$ を与える。一方、1997/12/15 および 1998/1/8 では太陽と水メーザ源との距離は大きく開いているので、太陽風の影響が無視でき、この両日に観測した visibility が $V_0(\mathbf{r})$ となる。観測に用いた 2 つの水メーザ源は 1997/12/23 には、ともに太陽から $5 R_\odot$ に位置しているが、VX Sgr は太陽の北極上空付近に、W28(A2) は赤道面付近に位置している。したがって、太陽風の諸パラメータの緯度による違いが観測できることが期待される。

観測は 1 つの水メーザごとに約 15 分間のスキャンをとり、標準電波源とあわせて 3 つの電波源を順番に観測するというスケジュールになっている。これによって、それぞれの水メーザ源に対して幅広く uv 平面をカバーすることができている。

4 結果

この観測は、各々の日に約 8 時間 (野辺山は 4 時間) のマシンタイムをあてて行われた。第一回目の 1997 年 12 月 15 日の観測は、鹿島局の LO が不安定であったことが観測開始

後に判明した。結局、鹿島局が正常になったのは観測開始後 5 時間後である。その他の 3 局については、問題なく順調に観測が行われた。

つづく第二回目の 1997 年 12 月 23 日の観測は、4 局とも順調で、すべての予定時間を通して観測することができた。第三回目の 1998 年 1 月 8 日の観測は、異例の大雪のため、野辺山局が観測開始後 1 時間ほどで観測ストップとなった。その他の 3 局については、問題なく順調に観測が行われた。

解析結果に入る前に、予測される結果についての議論を行う。図 3 は $\Gamma(r)$ と r との関係を示したものである。特徴としては、

- 太陽風によるシンチレーションのために、Visibility が低下するので、 $\gamma(r)$ は上限値が 1 で押えられる。
- 基線が長くなるほど (大きなスケールほど) 太陽風の電子密度ゆらぎの構造に相関がなくなり、visibility が著しく低下、 $\Gamma(r)$ は急速に 0 に近づく。
- 軸比が 1 でない場合には、 $\Gamma(r)$ は単調減少とはならず、不規則な分布をするようになる。また、 θ の値が異なっても同様である。

などが挙げられる。

最後に、図 4 に観測データの解析結果を示す。予測と異なって、 $\Gamma(r)$ は上限値を 1 で押えられていない。これは、観測の期間がかなりあいていたために大気の状態 (天候、水蒸気量、..)、アンテナの状態などが変化してしまったために、アンテナのゲインが一定でなかったことによるものと思われる。しかしながら、基線長とともに $\Gamma(r)$ が減少するという傾向はみることができる。また、データのばらつきは軸比によるものであることも考えられる。今後はこれらのデータから、軸比などのパラメータを求め、太陽風の状態について議論したい。また、過去の観測結果との比較から、太陽活動との関連性についての考察もおこなっていく方針である。

References

- R.R.Grall, W.A.Coles, M.T.Klinglesmith, A.R.Breen, P.J.S.Williams, Jussi Markkanen & Ruth Esser, *Nature* **379**, 429-431, 1996
- T.Sakurai & S.R.Spangler, *J. Geophys. Res.*, **97**, 17,141-17,151, 1992
- W.A.Coles, W.Liu, J.K.Harmon & C.L.Martin, *J. Geophys. Res.*, **96**, 1745-1755, 1991
- J.W.Armstrong, W.A.Coles, M.Kojima & B.J.Rickett, *Ap.J.*, **358**, 685-692, 1990
- R.R.Grall, W.A.Coles, S.R.Spangler, T.Sakurai & J.K.Harmon, *J. Geophys. Res.*, **102**, 263-273, 1997

The Position of the sun and the vapor masers

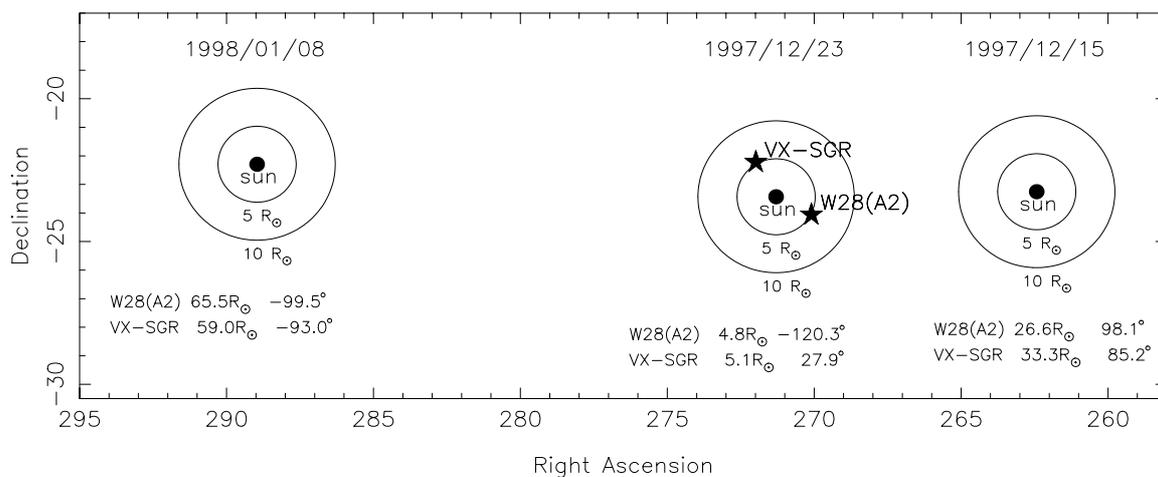


図 2.: 観測日における太陽と水メーザ源との見かけの位置関係

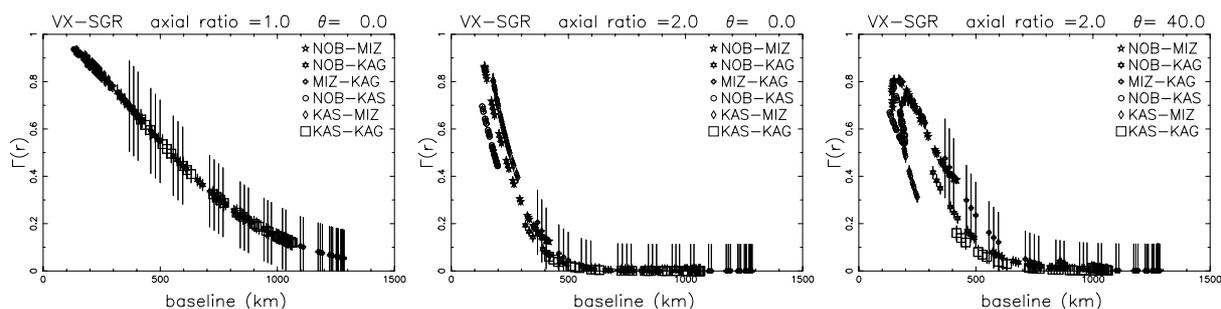


図 3.: 予想される観測結果。左から順に ($A = 1.0, \theta = 0.0^\circ$)、($A = 2.0, \theta = 0.0^\circ$)、($A = 2.0, \theta = 40.0^\circ$) の場合である

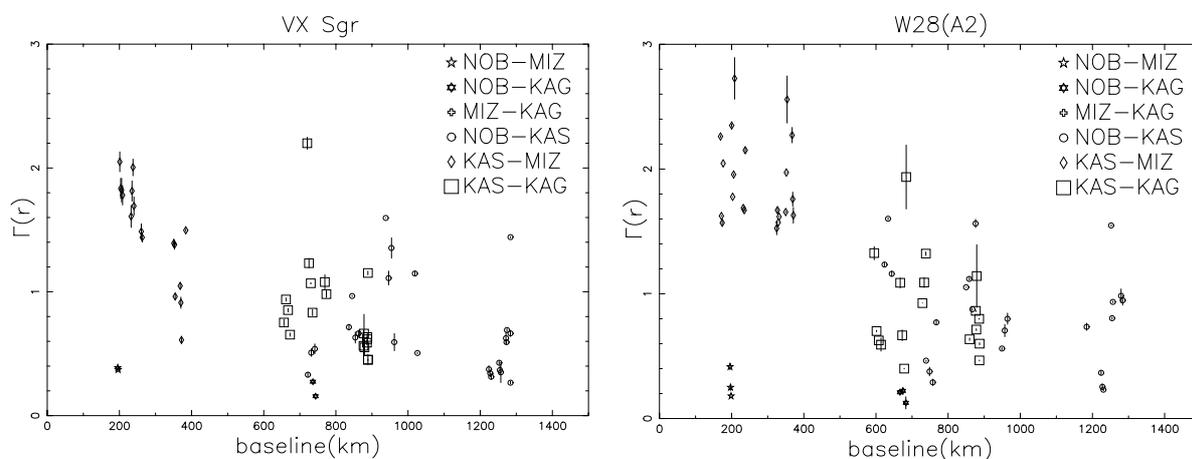


図 4.: 解析の結果。左は VX Sgr、右は W28(A2) である。