

惑星探査機を用いた電波物理実験

水野英一・河島信樹

(1987 年 12 月 25 日受理)

RADIO SCIENCE EXPERIMENT USING SPACECRAFTS

By

Ei-ichi MIZUNO and Nobuki KAWASHIMA

Abstract: Microwave tracking radio wave transmitted from planetary exploration spacecrafts to the earth has been used to study solar corona plasma, planetary atmosphere, rings etc. and to verify the general relativity. Because such kind of studies take advantage of spacecraft's occultation by plasma, atmosphere, rings, etc., they are called occultation observation. In occultation observation, what is observed (and recorded) is basically the voltage of received microwave from a spacecraft through the region of interest, hence various kind of mathematical technique or physical hypothesis are needed to derive physical quantities such as temperature of atmosphere, ring thickness, plasma density. This paper summarizes how such kind of data have been taken and what kind of physical or mathematical theory have been used in occultation observation, and also refer to ISAS activities of "SUISEI" solar occultation observation which was done in July 1987 and Voyager 2 Neptune/Triton occultation observation scheduled on August 25 1989 as an international collaboration program with NASA.

概 要

通常は地球ステーションと惑星探査機間の情報のやりとりのために使うマイクロ波が、太陽コロナ、惑星大気、リング、重力物理学の検証などの研究のために用いられてきた。この種の観測は、惑星探査機がこれらプラズマ、大気、リングなどに occultation を受けるこ

とを利用しているのが occultation 観測と呼ばれる。Occultation 観測において、観測(そして記録)される量は基本的には惑星探査機から発射されて、興味ある領域を通ってきたマイクロ波の電圧だけである。従って得られたデータから知りたい物理量(例えば大気の種類、リングの厚さ、プラズマ密度など)を求めるには、なんらかの数学的手法と物理的な仮定が必要である。この論文ではこの種のデータ取得がいかに行われてきたか、また物理的、数学的手法について紹介するとともに 1987 年 7 月の『すいせい』 occultation 観測結果、また 1989 年 8 月に NASA との共同研究が予定されているボイジャー 2 の海王星/Triton occultation 観測についても触れる。

1. はじめに

惑星探査機を用いて宇宙を探索する方法には大きく分けて 2 つある。1 つは探査機に積載されたプローブ類を用いて直接観測する方法であり、最近の日本の例では『すいせい』『さきがけ』によるハレー探査があげられる。もう 1 つは探査機と地球との間でやりとりする電波を用いて間接的に観測する方法であり、電波が太陽コロナ中を通ってくる場合を利用した太陽コロナの観測や、金星大気や土星リング中を通ってくる場合や土星リングの観測、太陽の重力場を利用した一般相対論の検証実験などがある(表 1)。これら 2 つのうち、本論文で取り扱うのは後者である。

惑星探査機からの電波を用いた occultation 観測は 1960 年代における、惑星探査機を用いた惑星ミッションと共に始まり、Mariner, Pioneer, Helios, Viking, Voyager などの惑星探査機を用いて数々の観測が行われてきた。それらを coronal occultation と惑星 occultation に分けてまとめたのが表 2 と表 3 である。表には論文などに結果が発表された、主なもののしか含まれていないが、実際はそれ以外にも数々の観測が行われている。

間接観測を直接観測と比較した場合、次の様な大きな特徴がある：

- ① 惑星探査機が直接行けない所、例えば太陽近傍や惑星大気中なども、電波さえ通って来れば、電波の周波数、位相、振幅、偏光面の回転角の変化量、あるいは周波数スペクトルの変化などの形で情報が得られる。
- ② それら得られる物理量はすべて ray path に沿った物理量の積分量となるので、本来求めたい物理量を知るにはなんらかの仮定と計算が必要である。

従って、データ解析の手法は複雑になるのが普通であるが、データさえ正確であれば、例えばリングの厚さや大気温度のプロファイルなどの物理量を推定することができる。

2. 原理及びシステム

2-1. データ取得システム

通常、惑星探査機と地球の間の電波のやりとりは、惑星探査機が取得したデータや船内の状態に関する情報、あるいはコマンドなどを送るためにキャリアに変調をかけて行われる(変調モード)。しかしさきに述べたように電波の周波数、位相、振幅、偏光面の回転角、

表 1 惑星探査機のトラッキング電波の強度, 周波数, 群速度の変化などを計測して天体の大気, プラズマ, リング, 磁場, 重力, などの物理を探索する方法.

太 陽	
重力場 (一般相対論の検証)	
屈折	γ (β と共に PPN パラメータ)
伝播速度の遅れ	γ
近日点の移動	γ, β
青方 (赤方) 変移	γ
太陽プラズマ	
伝播速度の変化	プラズマ密度分布
Scintillation の観測	擾乱/乱流、移動速度
Spectral Broadening	
Angular Broadening	
Doppler Scintillation	
Intensity Scintillation	
複数レイパスの相関	移動速度
偏光面の回転	磁場
惑 星	
中性大気	
周波数、強度の摂動	密度・圧力・温度分布、組成 (緯度による違い.....惑星の形状(oblateness))
Scintillation の観測	小規模構造、gravity wave
プラズマ (電離層)	
屈折、2 波の位相変化の差	プラズマ密度分布
Scintillation の観測	乱流、磁場
リング	
減衰プロファイル	リングの存在、厚さ
周波数の広がり	粒子サイズ、粒子質量分布
重力場 (一般相対論の検証)	
赤方変移	γ
惑星間空間	
重力場	
Doppler 周波数のゆらぎ	重力波の検出

表2 これまでの行われた主な Coronal Occultation 観測. #印は観測の行われた年を, また周波数は使用されたキャリアの周波数を表す. ただし『さきがけ』, 『ジオット』は予定.

	Pioneer						Mariner					Helios		Vik- ing	Vene- ra 10	Mars 2	Voyager		Sui- sei	Saki- gake	Gio- tto
	6	7	8	9	10	11	5	6	7	9	10	1	2				1	2			
Freq-																					
49.8 M	*	*	*	*			*														
423 M	*	*	*	*																	
928 M															*						
1000 M																*					
S						*	*		*	*	*	*	*	*			*	*	*	*	*
2784 M															*						
X											*			*			*	*			*
1962																					
3																					
4																					
5				#																	
6	#	#		#																	
7		#		#																	
8	#		#	#			#														
9				#			#														
1970	#			#			#	#													
1				#			#														
2									#												
3																					
4										#						#					
5					#	#						#									
6													#	#	#						
7														#							
8														#			#				
9																	#	#			
1980																					
1																					
2																					
3																					
4																					
5																					
6																					
7																			#		
8																				#	#
9																					

表 3 これまでの行われた主な惑星 Occultation 観測. 1989 年 8 月には Voager 2 が海王星, トリトン Occultation を起こす予定. また Pioneer Venus は現在でも定期的に金星 Occultation を起こしている.

Year	Pioneer		Pioneer Venus	Mariner			Viking Mars Orbiter	Venera		Voyager	
	10	11		5	9	10		9	10	1	2
1967				Venus							
8											
9											
1970											
1					Mars						
2											
3											
4	Jupiter	Jupiter				Venus					
5								Venus	Venus		
6							Mars				
7							Mars				
8											
9		Saturn	Venus							Jupiter	Jupiter
1980			Venus							Saturn	
1			Venus								Saturn
2			Venus								
3											
4											
5											
6											Uranus
7											
8											
9											Neptune

あるいは周波数スペクトル形などの形で情報を得るこの種の観測では, もとの電波は無変調 (ビーコンモード) である方が望ましい. また電波の受信に関しても, 通常は周波数, 位相を自動追尾する PLL, 振幅を一定に保つ AGC を用いた Closed Loop 受信機を用いるが, それでは周波数, 振幅, 位相情報などが失われてしまうので PLL, AGC ループをすべて切断した Open Loop 受信機が望ましい. 図 1 は 1987 年 7 月～8 月にかけて行われた『すいせい』の coronal occultation 観測時の受信システムの概略図であるが, そこで行っていることは

- ① 『すいせい』とやりとりする電波の周波数である S バンド帯からデータレコーダに記録できるビデオ帯 (1～9 kHz) に周波数変換する
- ② 増幅 (DC amplifier)
- ③ 周波数フィルタリング (Video 帯 Band Pass Filter)

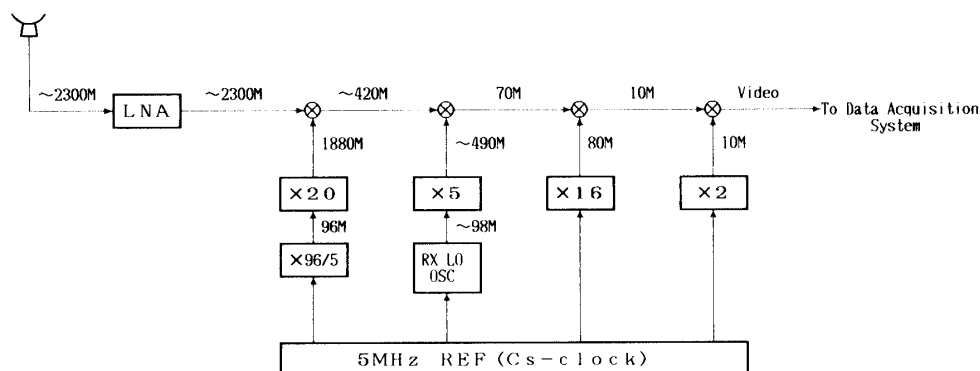


図1 『すいせい』観測時の受信システムのブロック図(概略図)。
多くのフィルタ、アンプ類は省略されている。アンテナからのSバンド(～2300 MHz)の信号はLNA (Low Noise Amplifier)で増幅された後、4段の周波数変換を経てVideo帯(1～9 kHz)へ落とされる。軌道ドップラの補正は軌道予測データに基づいて、図のRX LO OSC(計算機で発振周波数を制御されたシンセサイザ)によって行われ、出力Video周波数が一定になるようにコントロールしている。Video信号は図2のData Acquisition Systemによって記録される。

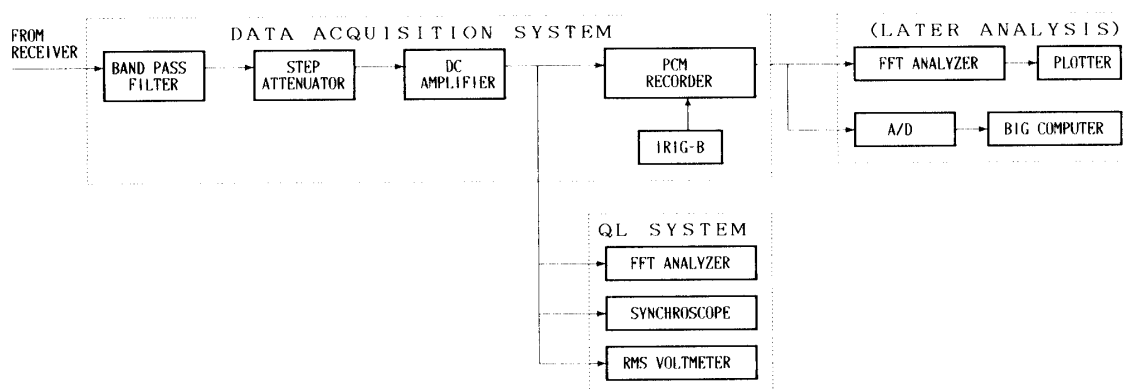


図2 『すいせい』観測時のデータ保存、解析システム(概略図)。
受信系(図1)からの信号はフィルタ(1～9 kHz)、アッテネータ(0～81 dB, 1 dB 刻み)、DC アンプを経た後、あとの解析のためPCMレコーダに記録される。クイックルックシステムとしては、キャリア周波数確認のためのFFTアナライザ、信号レベル確認のためのシンクロスコープ、RMS ボルトメータを用いている。VHS ビデオテープに記録されたデータは後で解析される。これにはQLで使ったFFTによるものと、A/Dした後大型計算機内で行う2つの方法がある。

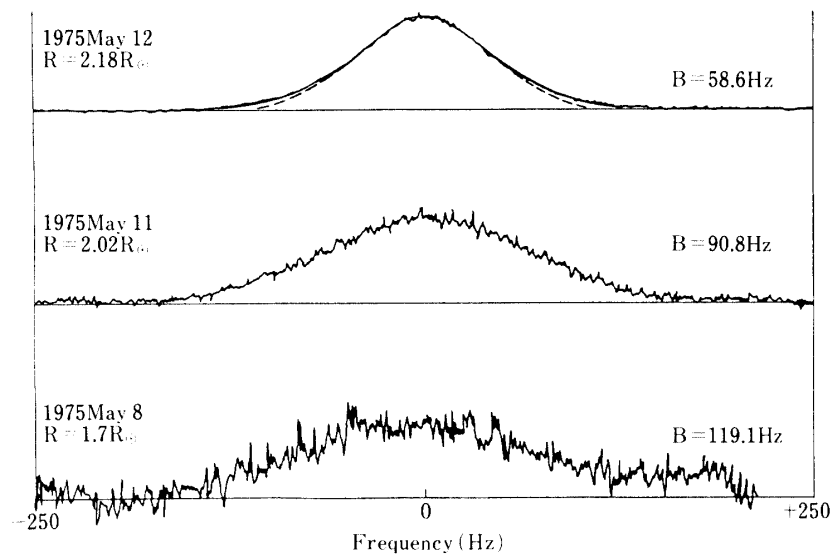


図 3 Solar Corona による Herios 1 S-Band キャリアの spectral broadening [b]. 横軸はキャリアの中心に対する相対的な周波数(スパン: 500 Hz), 縦軸はノイズ分を差し引いたパワーを示す. 上から順に, ray path と太陽中心との距離は 2.18 Rs, 2.02 Rs, 1.7 Rs (Rs: 太陽半径) で e^{-1} に対する片側半幅はそれぞれ 58.6 Hz, 90.8 Hz, 119.1 Hz である.

④ データ記録 (PCM レコーダ)

であり, PLL, AGC を使わない Open Loop 受信機である.

ここではデータ記録は PCM レコーダによって VHS のビデオテープに記録されたが, 取得後, 図 2 に示す様に A/D 変換して大型計算機の MSS 内に保存され解析された他, データ取得時に QL 用としても使用した FFT アナライザによっても解析された.

Open Loop 受信機でデータを取得する場合, 受信周波数帯域幅をどう決めるかが非常に重要な問題である. 受信周波数帯域幅はなるべく小さい方がデータ記録及び後のデータ解析の上で有利であるが, 一方, 地球と探査機の相対速度はたえず変化しているので, 小さな帯域幅に信号をとらえておくには精度良いドップラ変化予測によって受信機のローカル周波数(図 1 の RX LO OSC に相当)を振ってやり, 出力の周波数をなるべく一定にする必要がある. 一方, 観測によつては本来 δ -関数的であるはずのキャリアのスペクトルが広がってしまう場合がある. その大きさは, 太陽の coronal occultation の場合シンチレーションによる spectral broadening により最大で ~ 1 kHz(図 3), 惑星 occultation ではリングの散乱による広がり ~ 10 kHz(図 4), 大気による屈折による Doppler 周波数の変化が数 kHz である(この効果は前もって Doppler 予測に含むのが普通である). 軌道 Doppler 周波数の予測精度は通常これらスペクトルの広がり比べて小さいので, 受信帯域幅は期待されるスペクトルの広がりはずれによって決まる. 惑星の種類や軌道によって異なるが,

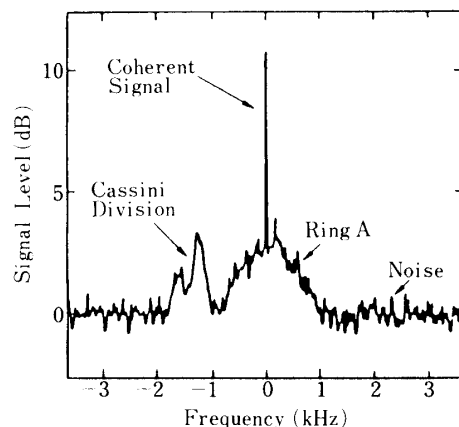


図4 土星のリング粒子に散乱された Voyager X-Band キャリアのパワースペクトラム [a]。横軸はキャリアに対する相対的な周波数、縦軸はノイズを差し引いたパワーを示す。0Hz のスプリアスは、散乱されずに通り抜けてきたキャリアを表し、 $-2 \sim -1$ kHz の部分は Cassini Division で、 $-1 \sim +1$ kHz は Ring A で、それぞれ散乱されてきたキャリアを表している。

安全性も含めて、惑星 occultation の場合で数十 kHz, coronal occultation の場合で数 kHz くらいにとるのが普通である。

2-2. 惑星探査機の Solar Coronal Occultation を利用した観測

Coronal occultation を利用した観測は当然太陽プラズマの観測をターゲットとしているが、それはプラズマの存在が電磁波の伝搬速度を

$$\Delta v_p \doteq c \cdot f_p^2 / (2f^2) \quad (2.1)$$

だけ変化させる（位相変調と同値である）ために起こる様々な現象によっている。ここで v_p は電磁波の位相速度、 c は真空中の光速、 f_p はプラズマ周波数である。

惑星探査機から発射された coherent な電波は途中、太陽プラズマによって位相変調を受けた後、地球に届くまでの間に干渉を起こす。従って地球でこの電波を観測すると位相及び振幅変調を受けたものとなる。この干渉パターンはプラズマ irregularity の形に対応しており、それらの移動と共に干渉パターンも地球を掃引して移動していくと考えられる。従って地上で惑星探査機からの電波を観測するとその位相と振幅が時間変化、つまりシンチレーションしているように見える。これらはそれぞれ intensity scintillation, phase scintillation と呼ばれる。

図5は典型的な intensity scintillation 及び phase scintillation のパワースペクトラムである。これらのスペクトルに太陽プラズマに関する2種類の情報が含まれている。ひとつはその傾きである。いま、プラズマの密度変動のスペクトル $P_N(\mathbf{x})$ (\mathbf{x} : 空間波数ベクトル) を

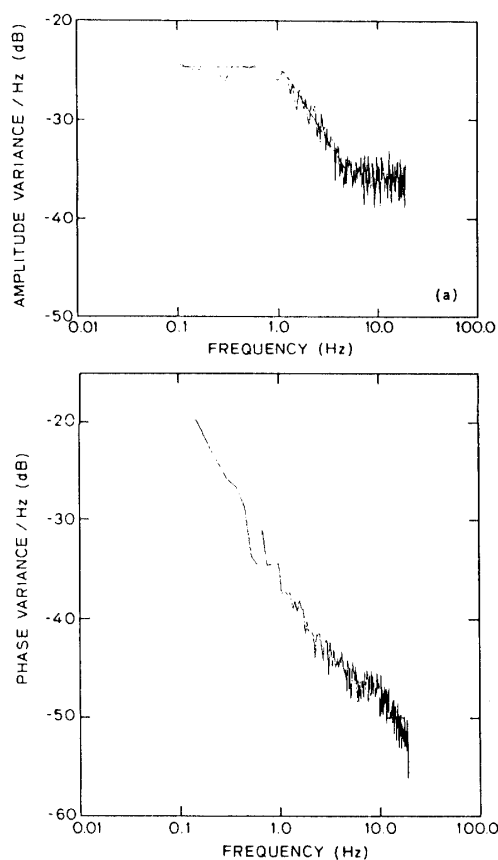


図5 Uiking S バンドダウンリンクの振幅 (上), 位相 (下) 変動のパワースペクトラム. 1976 年 12 月 29 日, solar offset=36. 4 Rs. [c]

$$P_N(\kappa) \propto |\kappa|^{-p} \quad (p: \text{spectral index}) \quad (2.2)$$

の等方的な power law の形に仮定した時に, phase, intensity 変動のパワースペクトラム $P_\phi(\nu)$, $P_A(\nu)$ (ν : 周波数) がそれぞれ

$$P_\phi(\nu) \propto \nu^{1-p} \quad (2.3)$$

$$P_A(\nu) \propto \nu^{1-p} \quad (2.4)$$

となることが知られている [d]. 従って図 5 のスペクトルの傾きから spectral index p の値が得られる. この図の場合 $p=2.63$ であった.

もうひとつの情報は振幅変動のスペクトルに見られる『曲がり』である (図 5 の上のグラフで, 1 Hz 付近に相当). Wave Optics の計算によればこの周波数は 1st Fresnel zone に相当するスケールの irregularity に対応している. このスケールは電波の波長と惑星探査機, 地球, 太陽プラズマの位置関係により決まる量なので, 『曲がり』の周波数がわかれ

ば太陽風速度の動径方向成分が推定できる。図5の場合、『曲がり』の周波数は正確には1.02 Hzで、太陽風速度の動径方向成分は229 km/sと計算された。

振幅、位相変動はキャリアにそれぞれ振幅、位相変調となってくるので、変動が激しい程キャリアの周波数スペクトルが広がってくる。これが spectral broadening と呼ばれる現象である。従って一般に ray path が太陽に近い所を通る程広がりが大きくなる。図4はその例で、solar offset が1.8 Rsの所では、 e^{-1} に対する半値幅が119.1 Hzにもなっている。この広がりには ray path が太陽から離れるにつれて急激に減少するのが普通であるので、観測されるのは一般に solar offset がおよそ20 Rs以内の所である。ただし密度の濃いプラズマ雲などが ray path を横切った場合などは広がりが大きくなるのでもっと大きな solar offset でも観測可能となる。

また、(2.2)の形の密度変動のスペクトルを仮定した場合、パワースペクトラムは

$$P(f) \propto \int_0^\infty \exp(-\tau^{p-2}) \cos[2\pi A(f-f_0)\tau] d\tau \quad (2.5)$$

の形になる[e]。Aは定数、 f_0 は中心周波数である。この式を観測で得られたスペクトルにフィットさせることによって spectral index p が求められる。図4の上図の場合 $p \approx 11/3$ (Kolmogorov) が得られた。

また、このパワースペクトラムの e^{-1} に対する片側半値幅をB、ray path 上で太陽に最も近い点の電子密度変動の分散を σ_{ne} 、同じ点での太陽風速度の ray path に垂直な成分を v とすると、近似的に

$$B \propto \sigma_{ne}^{2/(p-2)} \cdot v \quad (2.6)$$

の関係があることが導かれている[b]。この式は、 $p=11/3$ のときに半値幅が[電子密度の変動量]×[太陽風速度]に近似的に比例することを述べている。

惑星探査機から発射された電波が、途中プラズマによって乱されるために、地球から惑星探査機を見ると点ではなく、角度的な広がりを持って見える。これが angular broadening と呼ばれる現象である。この広がりも ray path が太陽に近づくと急激に大きくなる。単一のパラボラアンテナでは角度的な広がりを測るのが難しいので観測例は極めて少ないが、1975年5月8日の Helios 1 の観測では e^{-1} にたいする半値幅として4.41分という値が得られている(solar offset=1.7 Rs)。これはその広がり角がSバンドに対するアンテナ受信角0.13度を上回ったために起こったキャリアパワーの減少のために観測されたものであった。また、angular broadening がプラズマ密度のみに依存するのに対して spectral broadening がプラズマ密度とその移動速度に依存するので両者の同時観測によって太陽風速度が求められる。この Helios 1 の観測の場合、spectral broadening も同時に観測されており、太陽風速度24 km/sという値が得られている[b]。

その他の現象

この種の観測では他に偏波面の回転角を測ることによる Faraday rotation の観測、電波伝搬時間の遅れ(群速度の変化)を測ることによるプラズマ密度プロファイルの測定及び

一般相対性理論の検証(γ 測定)などがあげられる。ただし偏波面の回転角の測定のためには電波が直線偏波成分を持っていなければならない。また時間遅れの測定にはレンジングが必要である。従ってこれまで述べてきた、無変調モードによる観測とは両立しない。

2-3. 惑星探査機の惑星 occultation を利用した観測

惑星探査機の惑星 occultation を利用した観測の観測対象としては惑星大気、リングに大きく分けられる。

惑星大気

これは、惑星大気を通過してきたダウンリンク・キャリアの周波数のずれ、及び振幅(パワー)の変化を解析することによって行なわれる。

惑星大気には中性気体と電離気体がある。太陽風の観測には後者のみを考慮すればよいが惑星大気の場合は前者が主要となってくることが多い。ここでは両者について考えてみる。

① 電離気体

(2.1) 式からわかるように、プラズマの存在は屈折率を変化させる。ただし周波数依存性があるので周波数の異なる 2 波を使えば分離できる。ただし S/X 両バンドの raypath

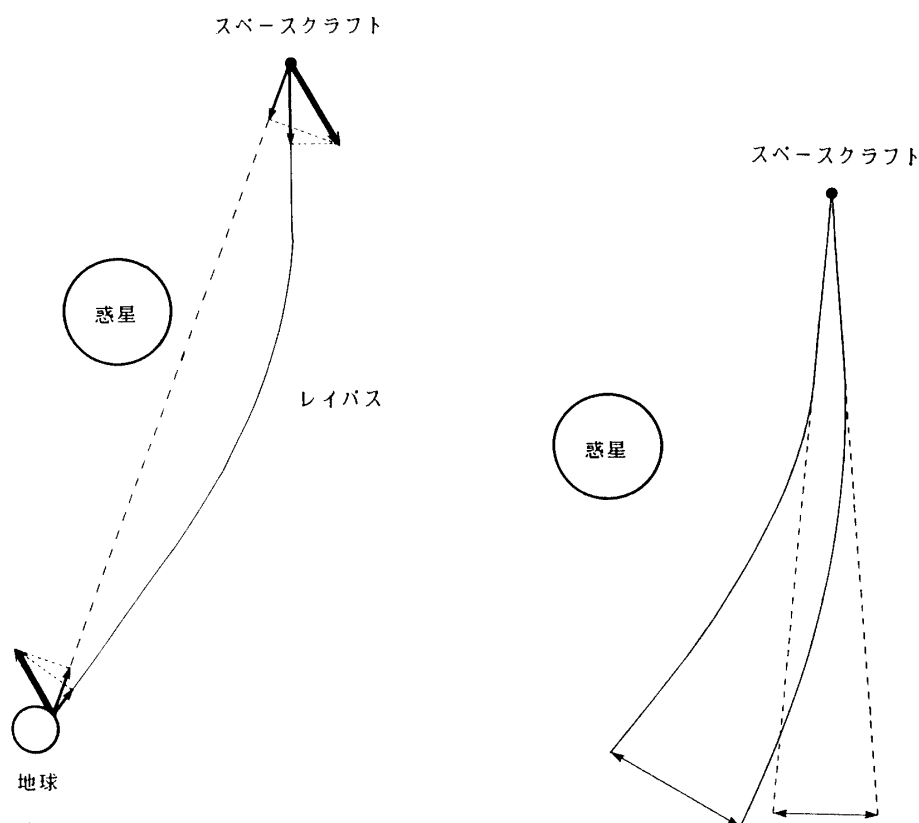


図 6 屈折による Doppler 周波数の変化 (概念図)。

Ray path の直線からのずれのために ray path への速度射影成分が変化する。

図 7 屈折率勾配の存在によるビームの発散 (概念図)。

のずれを考慮してやらなければならない。

② 中性気体

これも屈折率を変化させるが周波数依存性はない。この屈折率の高度プロファイルは惑

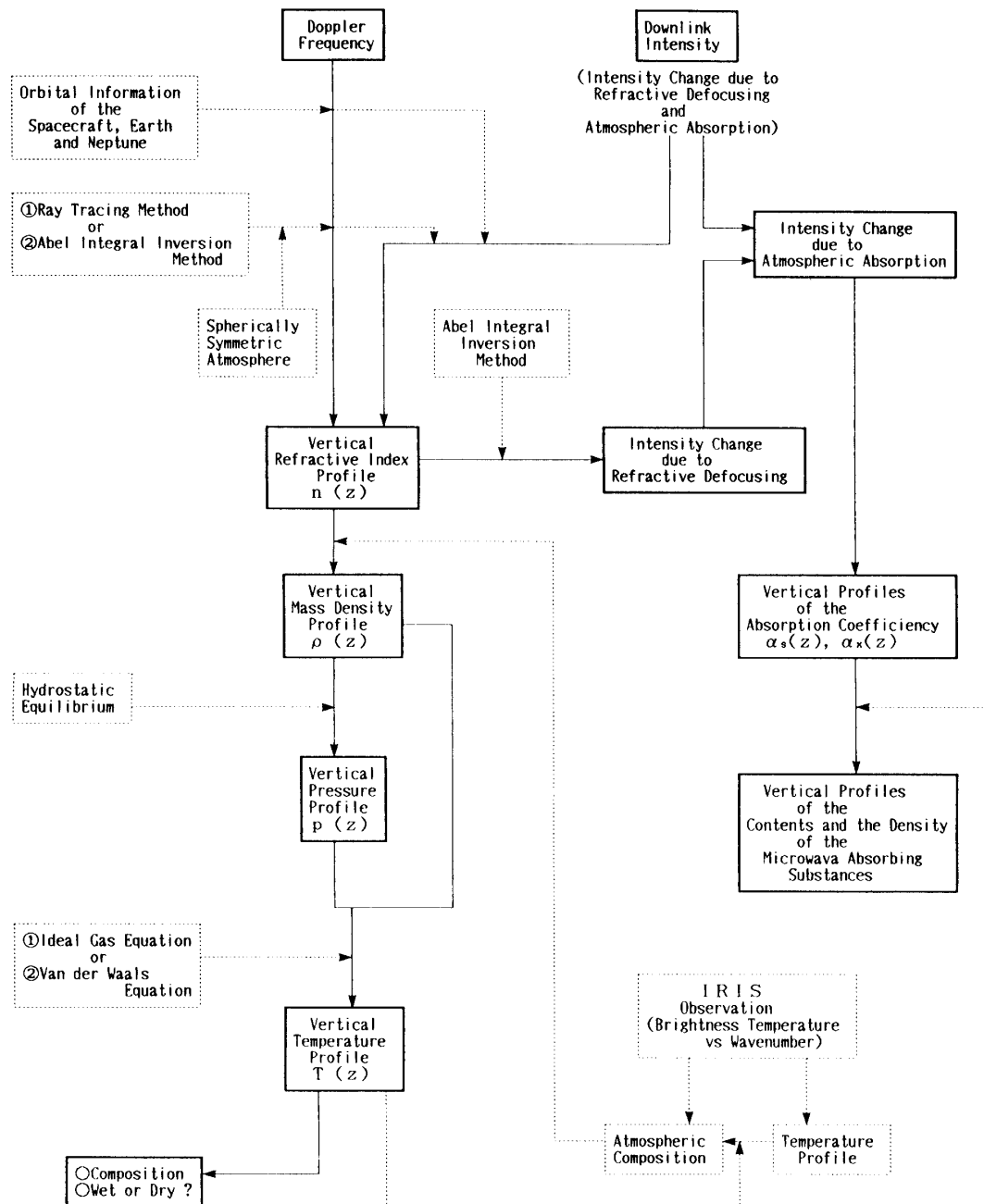


図8 得られた振幅, 周波数から大気に関する情報が得られるまで。実線の箱は観測量, あるいは大気に関する物理量, また点線の箱は仮定, あるいは他の観測 (例えば赤外線など) によるデータを表している。図9についても同様。

星探査機の軌道 6 要素が既知であれば、大気分布を球対称と仮定して、Abel 積分変換などの手法によって、Doppler 周波数の変化及び振幅の変化から独立に求めることができる [k]。前者は屈折による ray path のずれのために起こる Doppler 射影成分の変化(図 6),

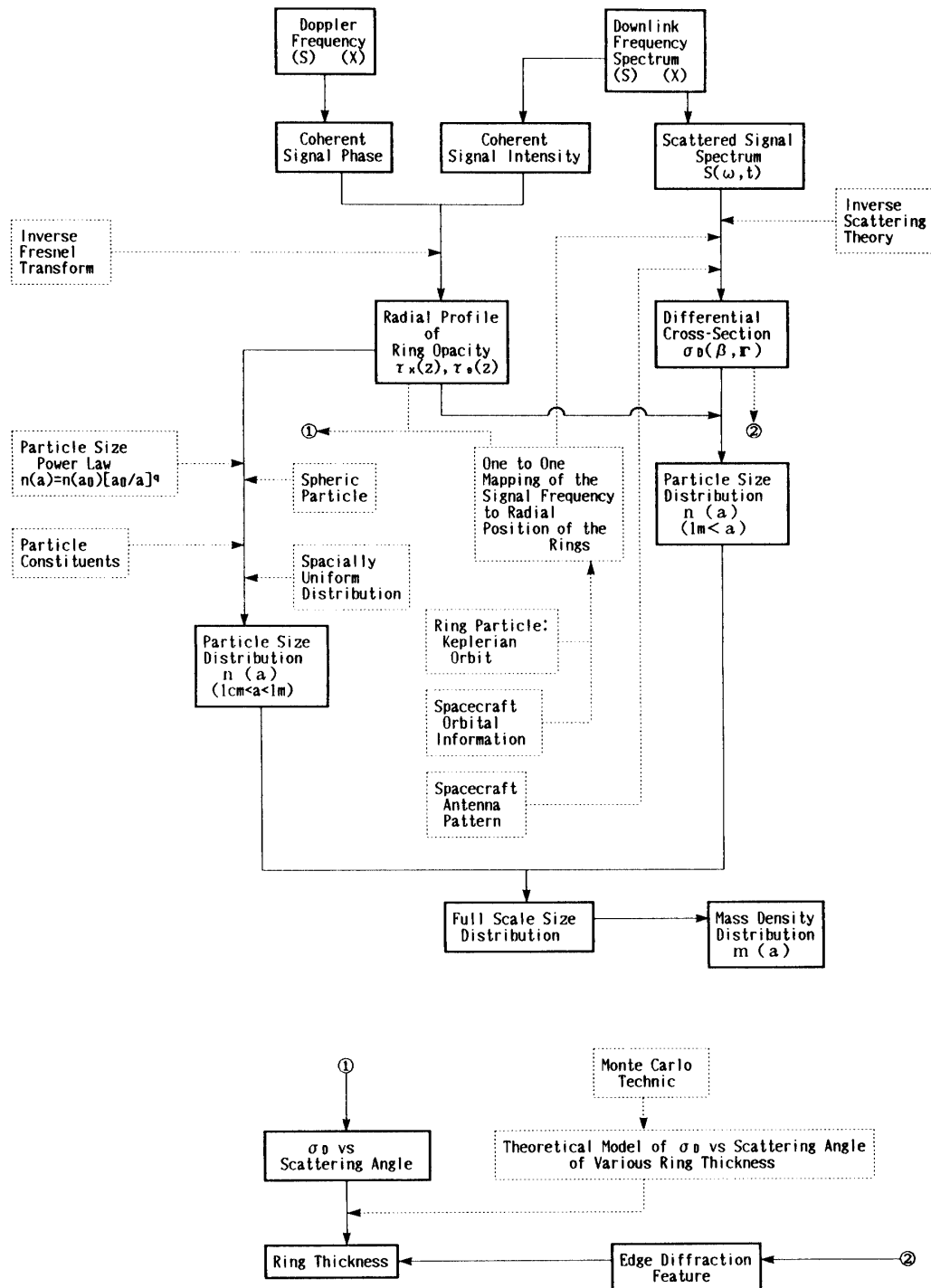


図 9 得られた振幅、周波数などからリングに関する情報が得られるまで。

後者は屈折率の勾配によるビームの発散 (defocusing) あるいは収束 (focusing) による (図 7)。

振幅の方はこの他にある種の気体 (例えば H_2SO_4 , H_2O など) によるマイクロ波の吸収により変化するが, こちらの方の効果は周波数から求められる屈折率プロファイルを使って分離することができる [1][m]。

屈折率 $\mu(r)$ がわかれば, 赤外線観測などによって観測されている大気成分を使って大気密度 $\rho(r)$ が推定できる。ここで大気が静水平衡にあると仮定すれば大気圧 $p(r)$ が推定できる。さらに理想気体の仮定 ($p = \rho k T / m$) のもとで気温 $T(r)$ が求まる。図 8 は, これらの物理量が求まって行く順序をまとめたブロック図である。

リング

惑星探査機からの電波がリング中を通過してくると一般に図 4 のようなスペクトルが得られる。このようなスペクトルを解析することによってリングに関する様々な情報を得ることができる。図 9 は様々な物理量が得られまでの過程を示したブロック図である。

図で実線の箱は物理量, 観測量を, 点線の箱は他の観測による情報などを表している。スペクトルはまず, リング粒子に散乱されていない coherent な成分 (図 4 で 0 Hz にあたる spurious に相当) と coherent でない成分に分けられる。Coherent でない成分は散乱されて進行方向が変わっているので coherent な成分と周波数的にずれている。Coherent な成分からはリングの opacity の動径方向の分布が推定され [n][ao], 散乱成分の情報を含めればリング粒子のサイズ分布 [aa][ab][ac], リングの厚さ [ad] などを推定することができる。

3. 現在までの科学的成果

3-1. 太陽プラズマの観測

1974 年 5 月に Mariner 10 (S/X バンド 2 波) により, はじめて 2 波の位相差のシンチレーション (図 10) から $10^{-4} \leq f \leq 5 \times 10^{-1} \text{ Hz}$ ($v \approx 350 \text{ km/s}$ と仮定すると $2 \times 10^{-6} \leq \kappa \leq 10^{-3} \text{ km}^{-1}$ の空間波数に相当) の周波数領域の観測が行なわれた。その結果 $p = 11/3$ (Kolmogorov's spectrum) に近い power law が得られた (図 11)。この値は地球近傍における惑星探査機による直接観測の結果と一致するものである [aa]。

また, Voyager 1 (1979, S バンド 1 波) の phase scintillation から求められた p の値も Kolmogorov に近い値であった [ak]。これと同時に Mariner 10 で 6~24 Rs において取得された intensity scintillation のデータ (図 5 (上)) と Viking の 6~44 Rs における intensity scintillation の結果から求められた太陽風速度の値から, 15 Rs を境に内側では $v \leq 100 \text{ km/s}$, 外側では $v \geq 200 \text{ km/s}$ という値が得られ, このあたりに大きな太陽風加速領域のあることが推定された。同時に得られた spectral index p の値も同じ 15 Rs を境に内側では ~ 1.8 , 外側では ~ 2.8 と急激に変化した [c]。

Phase scintillation を周波数の変動の形で観測する手法を Doppler scintillation というが, Doppler 周波数変動の rms 値を σ_D とすれば (2.6) 式と似たような関係

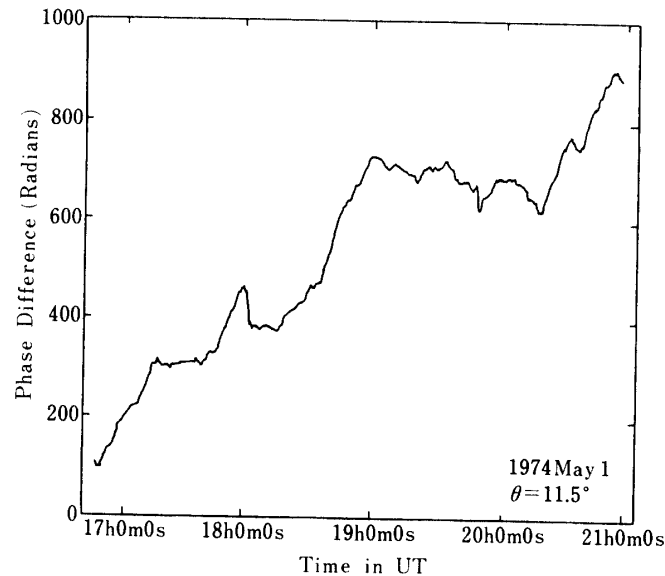


図 10 1974 年 5 月 1 日, Mariner 10 S/X 2 波の位相差の時間変化. 横軸は UT でスパンは約 4 時間, 振幅は位相差でスパンは 100 rad. この時の Mariner 10 の太陽離角は 11.5° であった [ae].

$$\sigma_D \propto \sigma_{ne} \cdot v^{(p-2)/2} \cdot R^{1/2} \quad (3.1)$$

があることが導かれている [b]. これもやはり p 値として $11/3$ (Kolmogorov) を仮定すると σ_D が [電子密度の変動量] \times [太陽風速度] に近似的に比例することを述べている. Helios 1 (1975), 2 (1976), Pioneer 10/11 (1975) の S バンド 1 波による Doppler scintillation 観測の結果 (1.7~180 Rs の黄道面の領域をカバーしている) によれば σ_D が $10 R_s \leq$ において $R^{-1.3}$ (R は ray path と太陽の距離) にほぼ比例することがわかった. σ_D が近似的に solarflux ($n_e \cdot v$) に比例するとすれば $\sigma_D \propto R^{-1.3}$ より

$$n_e \cdot v \propto R^{-1.8} \quad (3.2)$$

となり, R の指数の -2 からのずれにより太陽風が黄道面においてやや収束していることが示唆される [b].

Voyager (1979) の Doppler scintillation σ_D の観測では, Helios 1 の直接観測による太陽風速度 v と陽子密度 n_p の積 $v \cdot n_p$ と σ_D の比較が, 同じショック波が通過したと思われる時間を選んで行なわれた. その結果は図 12 に示すように非常に良くフィットし, Doppler scintillation がショック波の観測に適していることが示された [al].

Woo, et. al. (1967) は Goldstein (1969) によりすでに発表されていた Pioneer 6 (1968) の S バンド・ダウンリンクのパワースペクトラム [am] から (2.5) 式を使って $\leq 14 R_s$ でのプラズマ密度変動の spectral index p 値を得た. その結果空間周波数が $8.4 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$ より大きな所で $p=11/3$ が得られた. この結果はさきに述べた intensity/phase scintilla-

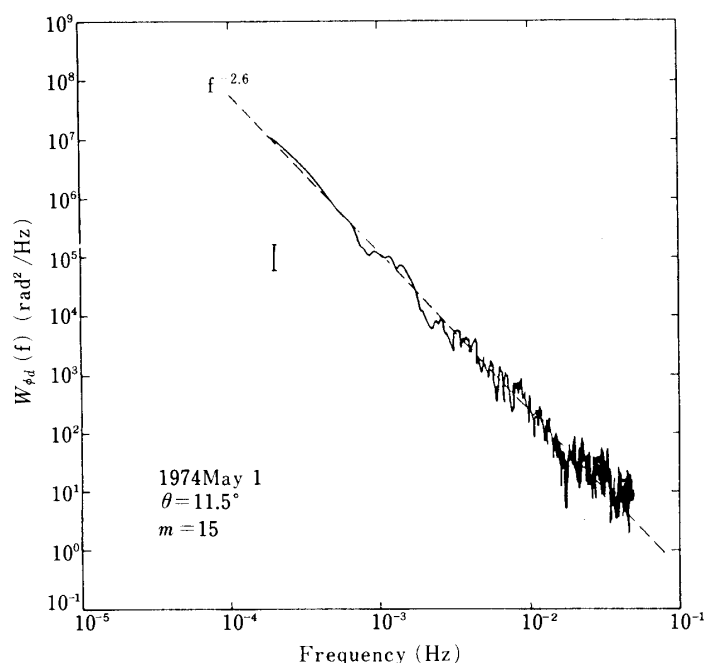


図 11 図 10 のデータのパワースペクトラム．横軸は周波数で $10^{-5} \sim 10^{-1}$ (Hz) の LOG スケール，縦軸はパワーで密度で，これも $10^{-1} \sim 10^9$ (rad^2/Hz) の LOG スケールである．周波数軸上で 15 ポイントずつ平均を行っているために精度は良くなっているが周波数分解能は落ちている．スロープの傾きは約 -2.6 で，これは $p=3.6$ に対応し，Kolmogorov の値 ($p=11/3$) に近い．[ae]

tions 観測や惑星探査機の直接観測，IPS (interplanetary scintillations) によって得られた，太陽から遠く離れた所での p の値と一致するものである．スペクトルは，太陽活動に伴いその幅は変化した形が (p の値) は不変だった[ae]．

Helios 1 (1975), 2 (1967) の S バンド 1 波による spectral broadening の観測においては，太陽活動が極小期でたつたことと軌道がちょうど黄道面内にあったことにより，太陽イベントや緯度による効果は考慮しなくてよいという，都合のよい観測が行なえた．それぞれ 20 分間積分の 500 Hz 幅のスペクトラムが最接近で 1.7 Rs まで取得され (図 3)，この結果から得られた spectral index はやはり $p=11/3$ であった．

また，同じ Helios 1 (1977) の観測において $R=1.7$ Rs と 5.02 Rs におけるパワー (パワースペクトラムを積分した量) とシステム雑音温度の比較により，この間に SNR が 4.52 dB 減少していることがわかった．これは angular broadening の角がアンテナ受信角 θ_{BW} を上回ったためと思われる． $\theta_{BW}=0^{\circ}08475$ であることから e^{-1} に対する角半値幅として $\theta_{AB}=4'41$ と計算された．これは惑星探査機の電波の angular broadening の初観測であった．この結果と spectral broadening の結果から，2-2 で述べたように太陽風速度を求めることができる．その結果として $v=24$ km/s (1.7 Rs) が得られた (精度 2~2.5 倍)．こ

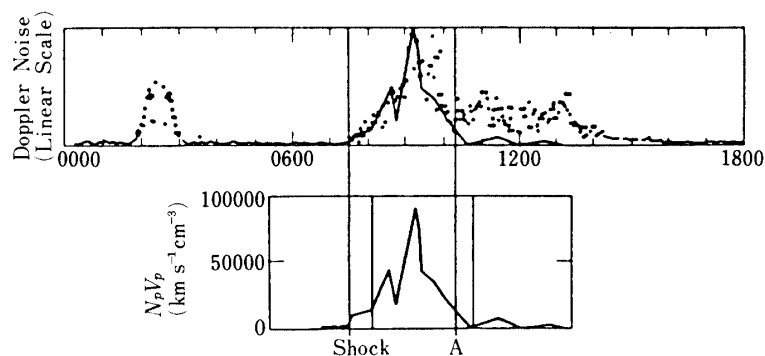


図 12 下段は Helios 1 により(直接)計測された Proton 密度 N_P と Proton 速度 V_P から計算された $N_P \cdot V_P$ の時間変化. 上段のプロットは Pioneer Venus Doppler scintillation の時間変化. 横軸は UT を示す. [al]

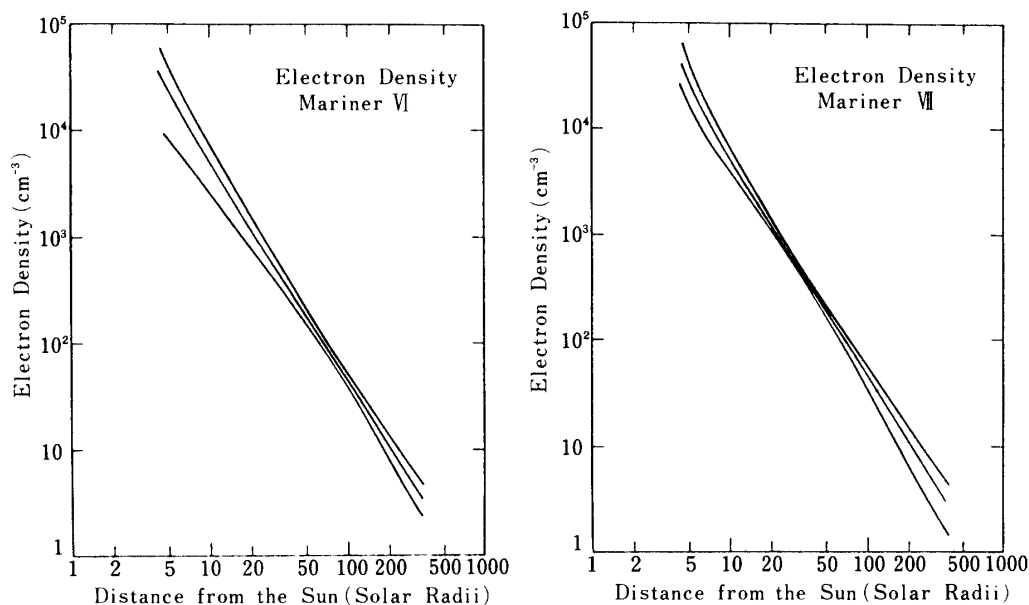


図 13 左は Mariner 6, 右は Mariner 7 の, それぞれ観測により得られた, 太陽のまわりの電子密度プロファイル. いずれも横軸は太陽からの距離 (LOG スケール, 太陽半径単位), 縦軸は電子密度 (LOG スケール, cm^{-3}). 3 本の曲線のうち上下はそれぞれ $\pm 1\sigma$ の誤差を表している.

れは太陽近傍の太陽風速度であり, 貴重なデータである. より高精度に angular broadening を測定するには複数個アンテナによる同時観測が必要である [b].

その他

電波伝搬時間の遅延の測定により太陽のまわりのプラズマ密度分布のプロファイル及び PPN パラメータ γ の測定がなされてきたが, PPN パラメータ γ に関しては Viking Mars

Orbiter/Lander を用いた観測によって

$$\gamma^* = 1 \pm 0.001 \quad (3.3)$$

$$(\gamma^* = (1 + \gamma)/2)$$

という、今までの所最高精度の結果が得られている[an]。プラズマ密度の方は Pioneer 7/9, Viking, Mariner 6/7, Helios などの観測によって求められてきた。代表的なものとして Mariner 6/7 (1970) の観測では 5~100 Rs におけるデータから推定したものがある。図 13 に示すが、10 Rs より外では太陽からの距離に対してほぼ正確に 2 乗で減少することがわかる。このことは (5Rs < R において) 太陽プラズマが外部に向かって等速で流出するとする単純なモデルに合う。またこの結果から 1 AU における電子密度を推定すると、 $9 \pm 3 \text{ cm}^{-3}$ となった[bo]。

『すいせい』による観測

1987 年 7 月に『すいせい』が太陽 occultation を起こした。図 14 はその時の『すいせい』の軌道図である。この観測は S バンド 1 波で行われたが、spectral broadening が観測された。図 15, 16 に示すのは FFT アナライザで見たそれぞれ ingress, egress における『すい

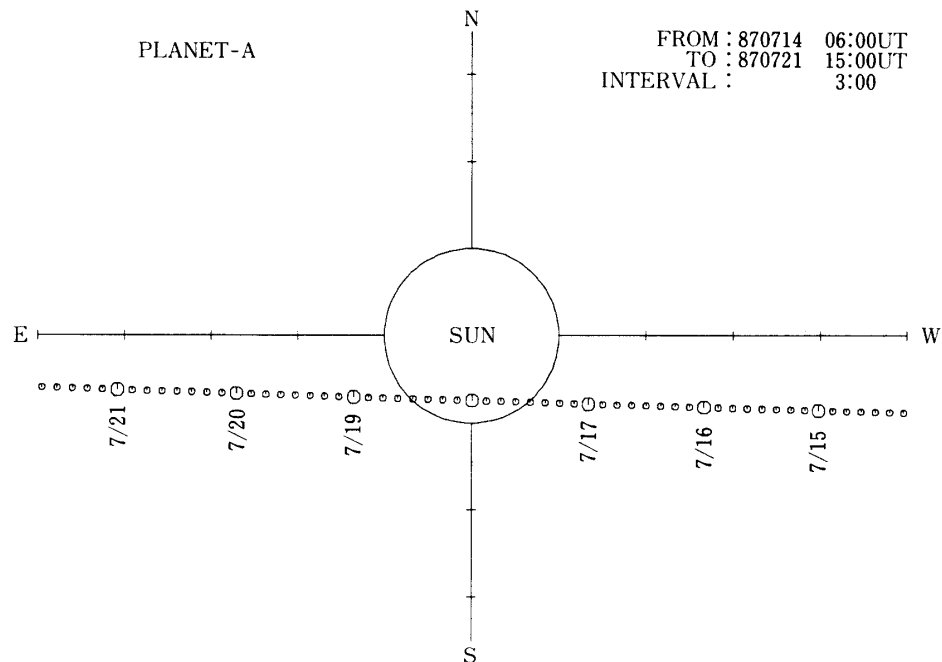


図 14 1987 年 7 月 14 日 6:00 UT ~ 7 月 21 日 15:00 UT にかけて地球から見た『すいせい』の軌道。日付はそれぞれ 0:00 UT の『すいせい』の位置を示している。太陽は実際の大きさを表し、横軸は黄道面を表している。Occultation は 7 月 17 日 12:00 UT ~ 7 月 18 日 12:00 UT にかけて起こった。

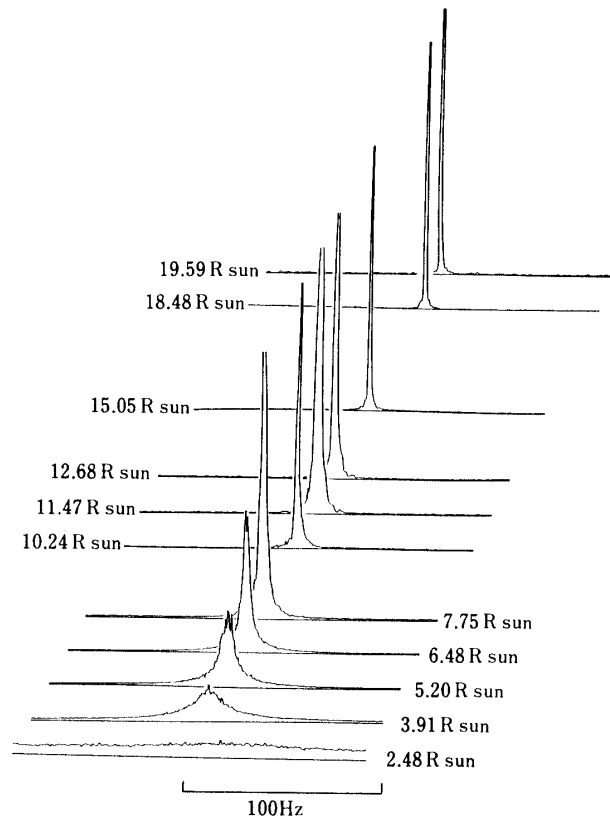


図 15 『すいせい』の S バンドキャリアのパワースペクトラム (FFT アナライザにより取得) の変化 (ingress). 数字は solar offset (太陽半径単位) を表す。横軸は周波数, 縦軸はパワーでいずれもリニアスケールである。

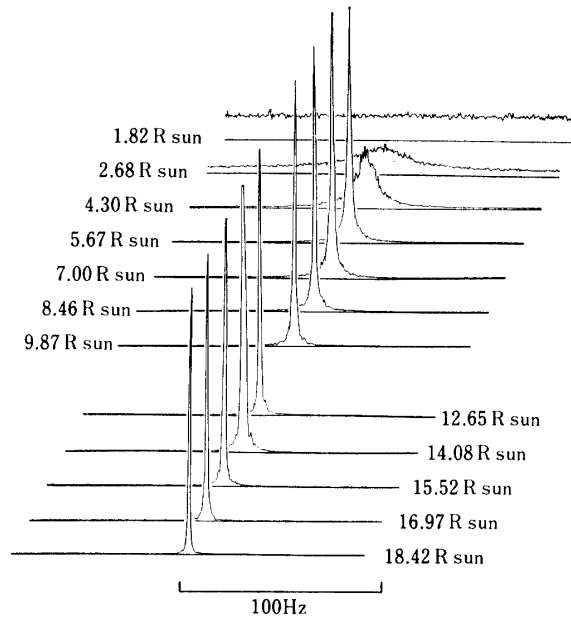


図 16 図 15 と同様 (egress).

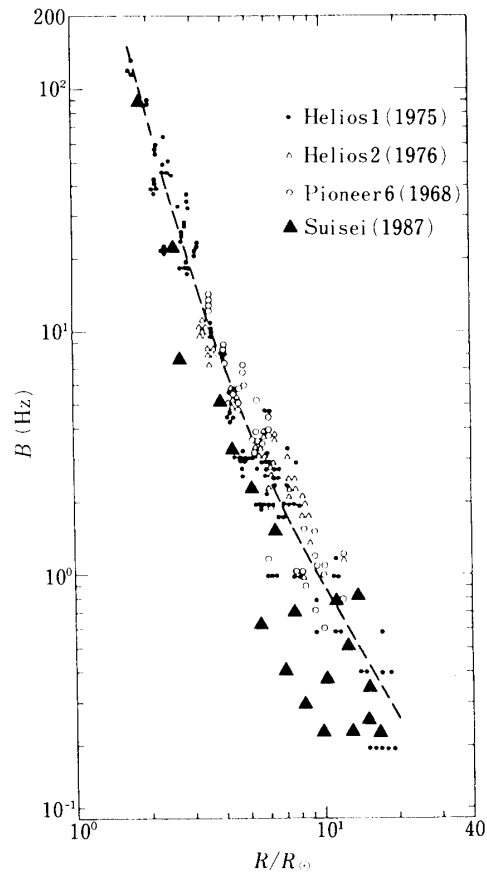


図 17 Helios 1 (1975), Helios 2 (1976), Pioneer 6 (1968) で得られたスペクトルの広がり (spectral broadening) のデータ [b] に今回の『すいせい』のデータをプロットしたもの。▲印は『すいせい』を示す。横軸：solar offset, 縦軸：スペクトルの e^{-1} に対する片側半値幅 (いずれも LOG スケール) をそれぞれ示す。

せい』ダウンリンク・キャリアのパワースペクトラムの変化である。2つの図で共通して言えることはスペクトルの幅が $(n_e \cdot v)$ に近似的に比例することから想像されたとおりに solar offset が小さくなる程スペクトルが広がっていることと、太陽に極く近い所で急にノズルレベルが上昇していることである。今回の観測による spectral broadening を過去観測に対比させたものが図 17 であるが、今回の観測は全体的に過去の観測に較べてやや広がりが小さいものの大体の傾向は一致していることがわかる。

3-2. 惑星の観測

金星

金星はその地球からの近さ及び内惑星でいるということから太陽系惑星の中でもはやくから惑星探査機が探査した惑星である。さらにその濃密な大気存在から、はやくからその大気の occultation 観測が行なわれ、気圧、密度、温度プロファイルなど様々な有益なデ

ータが得られてきた。

Mariner 5 (1967) による観測で 423.3 MHz 及び 229 MHz (S バンド) の 2 波を使って金星大気の屈折率, 分子数密度, 気圧, 温度, そして電波の大気吸収率の高度依存性が推定された。高度は 35 km~90 km をカバーしたが, その結果昼側と夜側で得られた結果は非常に似通っていた。90 km 以上では観測にかかるだけの中性ガスはなく, 35 km 以下では ray path の曲率半径が金星半径程度となり, 強い発散 (defocusing) のためにシグナルは消えた。80 km~60 km において観測された平均温度勾配は 4°K/km , 60~50 km においては 10°K/km で, これは乾燥断熱 CO_2 の温度勾配にほぼ等しいものである。50 km より上で吸収 (absorption) は観測されなかったが 35~50 km においては S バンドは $4 \times 10^{-3}\text{dB/km}$ の吸収を受けた。吸収物質の屈折率への寄与を無視すれば 45~50 km の所に温度勾配の極小域が存在すると思われ, これより下の領域では高度が減少するに従って気温は上昇し, 観測可能最下点付近では 500 K となった[k]。

Mariner 10 (1974) による観測では, S/X バンド 2 波を使った金星の観測が行われた。S-バンド closed-loop Doppler データを用いた大気温度の観測では高度 56, 58, 61, 63 km において温度の逆転が見られた。この温度プロファイルは, データが取得された緯度及び太陽天頂角 (太陽-惑星中心-観測ポイントのなす角, SZA) は異なるものの, Mariner 5 で得られたものと非常に似ていた。また plasmopause の存在は確認されなかった[ba]。S/X 2 波の intensity の観測による電波の大気吸収 (absorption) の観測では S/X バンドの大気吸収率の違いを利用してマイクロ波吸収物質の組成が求められた。それらによれば $75 \pm 25\%$ の硫酸水に対応する吸収が観測された。吸収のピークは高度 68, 60, 48 km の 3 か所に見られ, 硫酸濃度を 75 % とすると 68 km のピークに対応する硫酸密度は 0.08g/m^3 であった。最も吸収の大きいのは 48 km のピークで硫酸密度は 1.1g/m^3 であり, 中間の 60 km の部分の S/X 両波の吸収率は吸収物質を硫酸-水とした仮定に合わなかった[m]。

Pioneer Venus Orbiter (1978~1981) の観測では S/X バンドの 2 波を使って金星大気の観測を行なった。緯度 $81^{\circ} \sim 88^{\circ}$, SZA (Solar Zenith Angle) : $85^{\circ} \sim 92^{\circ}$ における電離層の観測においては電子密度の高度依存性が求められ, その中で ionopause の高度が 300 km~700 km の範囲で日変化することがわかった。これは太陽風の状態の日変化に影響されているためと思われる。また電子密度プロファイルは, 電離層 (密度) のピークでは O_2^+ イオンが主でそれより上では O^+ が主であるとする金星電離層モデルとよく合った[bb]。緯度 $-68^{\circ} \sim 88^{\circ}$, SZA : $8^{\circ} \sim 168^{\circ}$ における大気温度の観測では, 対流圏, 成層圏ともにそれらの温度構造は緯度のみに依存し太陽輻射の状態にはほとんど依存しなかった。特に北極圏 (北緯 $55^{\circ} \sim 77^{\circ}$) においては温度逆転現象や対流圏高度の上昇が観測された[bc]。

火 星

Mariner 9 Mars Orbiter (1971) は, S バンド 1 波を使い火星大気 occultation 観測を行なった。取得されたデータは 160 個に及んだ。観測を行なった時期はちょうど火星全域にわたる塵の嵐が起こっていたときで, 赤外から紫外にかけて不透明となったが S バンド域においては影響はなかった。しかし塵の嵐の影響によると思われる温度プロファイルの

変化は観測された。観測された地表気圧は赤道域で平均 4.95 mb, 緯度 65° では 7.2~10.3 mb であった。地表気圧から計算された地表高度は赤道域で平均 2.7 km, 緯度 65° で平均 -2.6 km で、このことにより火星の物理的形状は、その重力ポテンシャルより推定される形状よりも扁平であることが推測された。この結果はえんぺい時刻と惑星探査機の軌道データから求められた火星半径の値とともに火星形状決定に使用された[bd]。

また昼側での電離層の観測では SZA : 56°~47° において $1.5\sim1.7\times10^5$ el/cm³ (高度 140~134 km) の電子密度のピークを持ち、このピーク密度と、地球で観測された solar flux の間には相関が見られた[be]。

昼側における温度の観測 (大気が 100 % CO₂ の組成として計算された) では平均で -2.3° K/km の温度勾配の値が得られた。これは Stone のモデルにより計算された値とはだいたい一致した[bk]。

木星

Pioneer 10/11 (1974) を用いた観測では、S バンド 1 波を使い初めて木星およびその衛星 Io の occultation 観測を行なった。データ取得は closed-loop 受信機と open-loop 受信機を平行して使用したが、木星大気中では、Doppler 周波数の速い変化のために closed-loop による受信は行えなかった。open-loop 受信機によるデータは 16 KHz の帯域幅を持ち最終的には A/D 変換され 300 Hz のバンドパスフィルターにかけられた後、Digital-PLL により Doppler 周波数及び振幅のデータに変換された。データ解析により Io における大気存在が確認された他、木星大気の 500 mb 域で 400° K の温度が観測された (温度は大気組成として、H₂ : 85 %, He : 15 % の仮定のもとで計算された)。これは、地球からの木星のスペクトル解析や Pioneer 10 の赤外線観測により観測された温度である 150° K よりはるかに高いものである。

また、異なる緯度における圧力の高度変化のプロファイルから求められた木星の形状として、1 mb 部分の形状では赤道半径が $71,610\pm6$ km, 極半径が $66,958\pm4$ km また 160 mb 部分の形状では赤道半径が $71,496\pm6$ km, 極半径が $66,812\pm4$ km という値が得られた。このデータと Mariner 10 の軌道天体力学的な解析による J_2, J_3 の値より木星の自転周期として 1 mb 域で 9 時間 55 分 46 秒 \pm 1 分, 160 mb 域で 9 時間 50 分 30.4 秒 \pm 1 分という値が得られた[bl][bm][bn]。

さらに S バンド 1 波を使って電離層のシンチレーション観測も行なわれ、intensity のパワースペクトルが得られた他、spectral broadening が観測された。これは惑星大気の spectral broadening 観測としてははじめての例である[co]。

1979 年には Voyager 1/2 が相次いで木星 occultation を起こし、S/X 2 波を使った occultation 観測が行われた。この観測でも Pioneer 10/11 と同様にして電離層、中性大気、形状などに関する物理量観測が行われた。この観測では特に、局所的な大気の運動によると思われる、水平方向での大気密度の変動が成層圏領域で見つかった他、100 mbar 域の赤道半径及び極半径が求められた。その値はそれぞれ $71,541\pm4$ km 及び $66,896\pm4$ km で、Pioneer 10/11 による観測に非常に近い値であった[c0']。

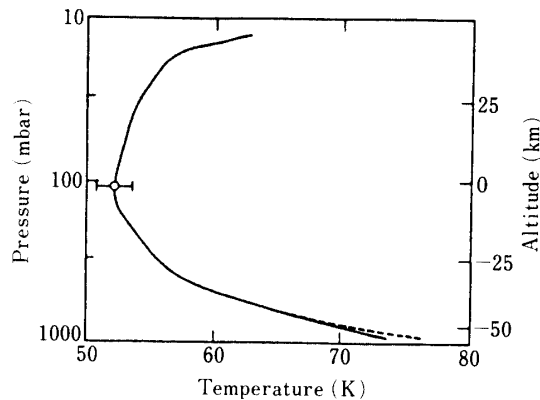


図 18 Voyager 2 S バンドキャリアの天王星大気 occultation により得られた天王星の T - p 曲線。縦軸： p (LOG スケール)，横軸： T (リニアスケール)。[cb]

土 星

Pioneer 11 は S バンド 1 波により土星大気 occultation 観測を行なった。電離層の観測では高度約 1800 km において電子密度 $11,400/\text{cm}^3$ のピークが見つかった他、高度約 1200 km においても電子密度 $9,000/\text{cm}^3$ のするどいピークが見られた。また電離層は 30,000 km の高度までおよび、高度 14,500 km (C リングの内側の端の位置に相当する) では密度 $7,000/\text{cm}^3$ のプロードなピークが見られた。一方中性大気観測は気圧 180 mb に至るまで行なわれ、気温の極小ピークが 3 つ見つかった。最大のピークは気圧 78 mb の所で $88 \pm 4^\circ \text{K}$ であった。気温プロファイル算出のために必要な大気組成のデータとしては H_2 と He を使用したが、その割合が $\text{He} : 10 \pm 4\%$ のときが赤外線観測による温度プロファイルと最もよく一致した[ca]。

またその後の Voyager 1 の土星 occultation では振幅、位相の時間変化を調べることによりリングの形状及びリングを構成する粒子のサイズなどの測定が行なわれた[n] ~ [ad]。

天王星

これまで天王星に行った惑星探査機は Voyager 2 のみである。1986 年 1 月の occultation 時の観測では、中性大気、電離層、リングの観測がなされた。大気の観測は南緯 2~7 度にかけて行われたが、温度-気圧プロファイル (図 18) が得られた。そこで tropopause が約 52°K , 100 mb の所に存在していることがわかった。また intensity scintillation により stratosphere, upper troposphere に小規模な構造が存在することが推定された。リングについては、これまでに知られていた 9 つのリングについてその構造が詳しく調べられた[cb]。

海王星

まだ海王星に行った惑星探査機はない。1989 年 8 月に Voyager 2 が海王星と Triton の occultation を起こすのでその時に NASA と宇宙科学研究所の共同観測が行われる予定

である。

4. まとめ

この種の観測の発展は衛星、送受信設備などハードウェアの発展もさることながら、得られたデータから最大限の情報を引き出すための解析技術、とくに計算機におけるソフトウェアの発展でもあった。これまでに、ひとつおりの解析手法が編み出され、各惑星、太陽プラズマについて観測、解析がなされてきたので今後興味を持たれるのは新たな惑星、あるいは衛星に惑星探査機が行くことであろう。この意味で次回の Voyager 2/海王星、Triton occultation は非常に大きく期待されるのである。さいわい宇宙科学研究所が臼田観測所の 64 m 大型アンテナを用いてこの時の観測に参加できることになったが、観測後は海王星の未知のバールが大きく剥がされることであろう。

参考文献

- [1] G. Leonard Tyler, Essam A. Marouf, Richard A. Simpson, Howard A. Zebker and von R. Eshleman: ICARUS **54** (1983), 160
- [2] Richard Woo: Astrophys. J. **219** (1978), 727
- [c] G. L. Tyler, J. F. Vesecky, M. A. Plume, H. T. Howard and A. Barnes: Astrophys. J. **249** (1981), 368
- [3] V. I. Tatarski: "The Effects of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation" (Translated from Russian), Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1971
- [4] Richard Woo, Fang-Chou Vang and Akira Ishimaru: Astrophys. J. **210** (1976), 593
- [5] Gunner Fjeldbo, Arvydas J. Kliore and Von R. Eshleman: Astron. J. **76** (1971), 123
- [6] Arvydas J. Kliore, Dan L. Cain, Gunner Fjeldbo, Boris L. Seidel, Michael J. Sykes and S. I. Rasool: ICARUS **17** (1972), 484
- [7] Arvydas J. Kliore, Charles Elachi, Indu R. Patel and Jo Bea Cimino: ICARUS **37** (1979), 51
- [8] G. Leonard Tyler, Essam A. Marouf, Richard A. Simpson, Howard A. Zebker and Von R. Eshleman: ICARUS **54** (1983), 160
- [9] Essam A. Marouf, G. Leonard Tyler and Paul A. Rosen: ICARUS **68** (1986), 120
- [10] Essam A. Marouf, G. Leonard Tyler, Howard A. Zebker, Richard A. Simpson Von R. Eshleman: ICARUS **54** (1983), 189
- [11] Howard A. Zebker, Essam A. Marouf and G. Leonard Tyler: ICARUS **64** (1985), 531

- [12] Essam A. Marouf and G. Leonard Tyler : Adv. Space Res. **5** (1985), 117
- [13] Howard A. Zebker and G. Leonard Tyler : SCIENCE **223** (1984), 396
- [14] Richard Woo, Fang-Chou Yang, Cabing W. Vip and William B. Kendall : Astrophys. J. **210** (1976), 568
- [15] A. L. Berman and A. D. Contreas : DSN Progress Report 42-48 (1978), 59
- [16] Richard Woo, J. W. Armstrong, N. R. Sheeley, Jr., R. A. Coward, M. J. Koomen, D. J. Michels and R. Schwenn : J. Geophys. Res. **90**, A 1 (1985), 154
- [17] R. M. Goldstein : SCIENCE **166** (1969), 598
- [18] N. A. Renzetti and A. L. Berman : JPL Publication 80-93 (1981) "The Deep Space Network-An Insutrument for Radio Science Research"
- [19] Duane O. Muhleman, Pasquale B. Esposito and John D. Anderson : Astrophys. J. **211** (1977), 943
- [20] H. T. Howard, G. L. Tyler, G. Fjeldbo, A. J. Kliore, G. S. Levy, D. L. Brunn, R. Dickinson, R. E. Elelson, W. L. Martin, R. B. Postal, B. Seidel, T. T. Sesplaukis, D. L. Shirley, C. T. Stelzried, D. N. Sweetnam, A. I. Zygielbaum, P. B. Esposito, J. D. Anderson, I. I. Shapiro and R. D. Reasenberg : SCIENCE **183** (1974), 1297
- [21] Thomas A. Croft : SCIENCE **203** (1979), 765
- [22] Arvydas J. Kliore and Indu R. Patel : ICARUS **52** (1982), 320
- [23] D. L. Cain, A. J. Kliore, B. L. Seidel and M. J. Sykes : ICARUS **17** (1972), 517
- [24] Arvydas J. Kliore, Dan L. Cain, Gunnar Fjeldbo, Boris L. Seidel, Michael J. Sypes and S. I. Rasool : ICARUS **17** (1972), 484
- [25] A. J. Kliore, G. Fjeldbo, B. L. Seidel, M. J. Sykes and P. M. Woiceshyn : ICARUS **78** (1973), 4331
- [26] Arvydas Kliore, Gunnar Fjeldbo, Boris L. Seidel, Tadas T. Sesplaukis, Donald W. Sweetnam and Peter M. Woiceshyn : SCIENCE **188** (1975), 474
- [27] Von R. Eshleman : SCIENCE **189** (1975), 876
- [28] W. B. Hubbard, D. M. Hunten and A. Kliore : Geophys. Res. Lett. **2** (1975), 265
- [29] Richard Woo and J. W. Armstrong : NATURE **287** (1980), 309
- [30] G.F. Lindal, G.E. Wood, G.S. Levy, J.D. Anderson, D.S. Sweetman, H.B. Hotz, B. J. Buckles, D.P. Holmes, P.E. Doms, V.R. Eshleman, G.L. Tyler and T.A. Croft : J. Geophys. Res. **86** A 10 (1981), 8721
- [31] Arvydas J. Kliore, Indu R. Patel, Gunnar F. Lindal, Donald N. Sweetnam, Henry B. Hotz, J. Hunter Waite, Jr. and Thomas R. McDonough : J. Geophys. Res. **85** A 11 (1980), 5857
- [32] G. L. Tyler, D. N. Sweetnam, J. D. Anderson, J. K. Campbell, V. R. Eshleman, D. P. Hinson, G. S. Levy, G. F. Lindal, E. A. Marouf and R. A. Simpson : SCIENCE **233** (1986), 79