

天王星にリングがあった

富田 弘 一 郎*

—第7番惑星天王星にリングがあることが全く偶然のことからわかって、1977年の天文界の最大の話題となっている。1930年の冥王星の発見に次ぐ20世紀における太陽系の一大変貌の一つであろう—

1. 天王星とその衛星

W. ハーシェルは恒星の年周視差を検出するのに都合がよい二重星のペアを探するのが主な目的で、1779年8月から口径 15.7 cm, 長さ 2.1 m の反射望遠鏡に 227 倍の倍率をかけて、8等級より明るい星をしらみつぶしに調査していた。1781年3月13日、牡牛座ζ星の近くで、他の恒星とちがう彗星か星雲のような面積をもった天体を見つけた。3日間の曇天の後、3月17日にこの天体の位置が変わったことから彗星だと判断した。

メシエン、レキセル、ボスコビッチ等は放物線軌道を決定しようとしたがうまく求まらなかった。ラランド、ボーデ等はこれが土星の外側の惑星ではないかといひ、サルロン、レキセル等が円軌道の計算に手を付け、ハーシエルの3月17日、グリーンズ天文台のマスケリンの5月11日の観測を使って半径 18.93 天文単位の内軌道をレキセルが計算した。ボスコビッチ、メシエン等が楕円軌道を計算し、土星の外側の惑星であることが確立した。

ハーシエルはこの功によって英国王立協会からコプレーメダルを受け会員に推された。彼はこの星をパトロンとなった英国王ジョージ3世にささげる意味で GEORGIUM SIDUS と名付けた。この名は英国国民以外には受け入れられず、ボーデの提唱になる URANUS が一般に用いられるようになった。JUPITER の父が SATURN でありその父が URANUS であって、第七惑星としてうってつけの名称である。イギリスではかたくなに“ジョージャ星”を用い、英暦 Nautical Almanac でも 1850 年版までこの名称を使っていた。天王星のマークとしてはハーシエルの頭文字が入っているラランドの提案した ♅ がよく用いられる。また、時には ♁ を使うことがある。

ハーシエルは当時の金属反射鏡の反射率の悪さを軽減するために、主鏡を僅か傾けて副鏡を使わないいわゆるハーシエル式反射望遠鏡を 1787 年に製作した。彼はこのフロントビュー式反射鏡で天王星の外側の二つの衛星を発見する。また、その他にもいくつかの衛星らしい微

光星を天王星のまわりに観測し、1892年にはリングが本体をとりまいているのを見付ける。しかし、後に彼はこれは望遠鏡の不完全さのための幻惑であったと考えた。

ハーシエルの観測した衛星は結局はじめの2個だけが確認されているが、本体の扁率と衛星軌道が逆行でしかも大きく傾いていることを指摘する。

1847年ごろラッセルはハーシエルの衛星とは別のものを観測したらしいが、1851年に確実な内側の二衛星を発見した。その後で、J. ハーシエルの提案により、内側からアリエル、ウンブリエル、チタニヤ、オベロンと名前がつけられる。これらの衛星軌道面は天王星の赤道面と一致していて、その公転軌道面とは 98 度も傾いている。後に 1948 年、カイパーは一番内側の衛星ミランダを発見した。また、1948 年と 1950 年にマクドナルド天文台の 210 cm 反射で天王星を中心とする 35 分角以内には 20 等より明るい衛星がないことを確かめた。

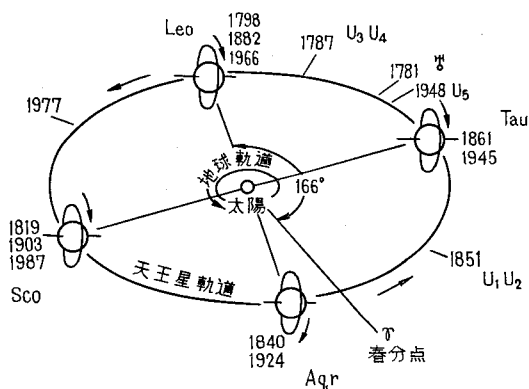


図1 天王星とその衛星の運動。衛星の発見年も示した。

5つの衛星の平均運動を内側から n_5, n_1, n_2, n_3, n_4 とすると

$$n_5 - 3n_1 + 2n_2 = 0.079$$

$$n_1 - n_2 - 2n_3 + n_4 = 0.0034$$

という関係がある。上式は木星のガリレオ衛星と同じ関係に相当する。衛星の軌道面の昇交点は 166° であるから、天王星が獅子座の方向に見える時は衛星は見かけ上、北から南へ一直線に動くように見える。これは 1882 年、1966 年であった。天王星の公転周期の 4 分の 1 にあたる 21 年前には天王星は牡牛座にいて、その時は衛星の運動は時計まわりの同心円を描く。またその 21 年前は、水瓶座で衛星は直線上を南から北へ、その 21 年前はさ

* 東京天文台 K. Tomita:
On the ring of Uranus

そり座で反時計まわりの円運動をする。この関係を図 1 に示した。1977 年には、衛星軌道面を斜めから見ていて、衛星軌道面が大きく傾いているのが今回の“えんぺい”によるリングの発見に非常に幸いした。

2. 空中天文台 KAO

地上からの天体観測は天候に左右される。飛行機を使って雲の上にて観測しようという考えは以前からあって、皆既日食など特別な現象のときにある程度の成果をおさめている。しかし、振動による不安定さ、狭い窓ごしの観測など充分なことは望むべくもなかった。

ジェット機が発達して、地上 12 km もの高さを飛行できるようになって飛行機からの天体観測の可能性が増大した。ジェットエンジンはピストンエンジンに比べて格段に振動が少ない。

飛行機観測は他の高空観測の技術、例えば気球、ロケット、人工衛星などと比べると、搭載荷重が大きい、電源が豊富、観測者のためのよい環境、観測装置の反復使用、故障対策など有利な点がすこぶる多い。地上 12 km あたりの大気中の水蒸気の量は地上に比べて 99% も減ってしまうので、赤外線観測には申し分のない条件となる。

1965 年以來、アメリカの航空宇宙局は飛行機からの赤外天文観測の研究をはじめた。最初はコンベアー 990 型四発ジェット機にいくつかの小望遠鏡を搭載したが、次期実験機としてはもっと小さい双発のゲイツリヤージュット機に 30 cm 反射望遠鏡をのせた。しかも望遠鏡の部分を完全に外気にさらす構造とし、15 km の高空で惑星や星雲の観測をしたり、搭載設備をかえて例のジャコビニ流星雨さわぎの時にアラスカ上空を飛んだりした。

1975 年 8 月、8 年間の長い計画、設計、開発、試験の結果、新しい空中天文台が完成し、高名な惑星天文学者 G. P. カイパーを記念して Gerard P. Kuiper Airborne Observatory (KAO) と命名された。これはロッキードの C-141 型輸送機を全面的に改修したもので、91 cm 反射望遠鏡を搭載して赤外線観測を主目的としたものであるが、1976 年 4 月 8 日の火星による双子座 ε 星の掩蔽現象のとき、紫外域から可視域での測光観測にも威力を発揮した。C-141 はスターリフターと呼ばれ、全幅 48.74 m、全長 44.20 m、推力 9525 kg のエンジン 4 基を高翼の下に吊り下げ、最大積載荷重 31.7 トン、全備重量 143.6 トン、最高速度 918 km/時、12 時間をこす長い航続力をほこる輸送機である。この飛行機の機首に近い胴体に隔室があって、望遠鏡の鏡筒部が入っている。この隔室は胴体の左側に四角い開孔部があって、望遠鏡に光が入る。開孔部には一さい窓ガラス等はつけていない。開孔部の外側の前縁に多数の孔のあいたスポイラーがあって、隔室内の気流の流れを最小にする。

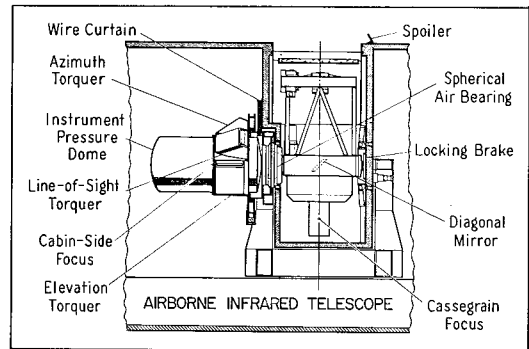


図 2

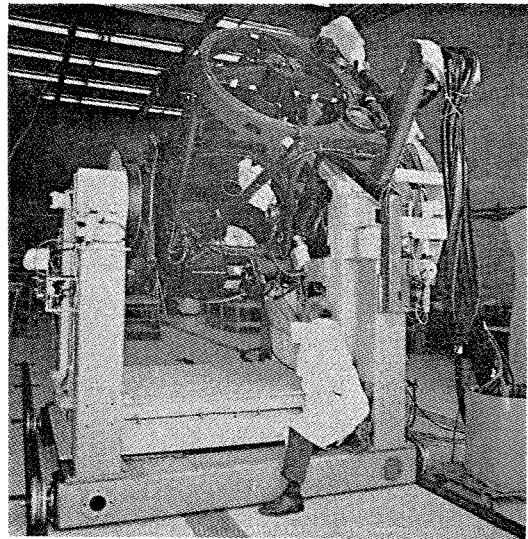


図 3

望遠鏡は飛行機の進行方向と直角に左舷を向いていて、高度角は 35 度から 75 度まで、方位は ± 4 度まで指向をかえることができる。

主鏡は直径 91 cm、口径比 2 のパラボラで鏡材はサーベットである。副鏡は 2 枚用意してあって、合成口径比が 13.5 と 16 である。前者は主鏡の中央穴の下のカセグレン焦点で使うが、後者は 45 度の平面鏡を加えて、光路を直角にまげ、後述の望遠鏡支持軸を通して隔室の外側、つまり機体の内部に焦点を結ぶ。鏡筒の主構造体はインバーで作り、温度変化に耐えるようになっている。他の赤外望遠鏡と同じように、副鏡は振動するようになっていて、背景光をキャンセルしながら測定ができる。

望遠鏡の支持方法は飛行機の微振動を除くために、極めて特殊な構造を採用している。全体の構成は鏡筒部、駆動及び測定装置部と支持架台の 3 部に分かれている。鏡筒部と装置部は一体になっていて、重心のところに直径 41 cm のインバーの球形ベアリングがある。球形ベアリングの外周部は支持架台の枠の上ののっけて、支

持架台自身は4個の空気入り防振装置を介して飛行機の機体に固定してある。胴体を切りぬいた隔室の部分には望遠鏡の鏡筒部だけが入っていて、空気ベアリングの部分が気密室の隔壁の部分に配置されているから、駆動及び測定装置の部分は与圧室の中に出っ張っていることになる。与圧室は2800mの高山と同じ気圧になっていて、乗組みの天文学者達は普通の服装で作業ができる。

球形ベアリングの部分には19気圧がかかっている、僅か0.018mmの隙間で鏡筒部と装置部を支えている。球状ベアリングの中央には、45度の平面鏡で折りまげられた光線が通過する穴がある。この折曲げ焦点部は測定装置の取付板があって、研究目的によっていろいろな装置を交換取付けることができる。カセグレン焦点部は主としてマルチチャンネル光度計があって、検出素子は液体ヘリウムで冷却する。そのほかマイケルソン干渉計やファブリペロー分光計等も用意されている。

KAOで観測可能な波長域は3000オングストロームから1mmまでのすべての波長である。

望遠鏡を目的天体に精密に指向し追尾するために次の4種類の装置が備えられている。

1. 飛行機の自動操縦装置はピッチングとヨーイングを $\pm 1/4$ 度以内に、ローリングを $\pm 1/2$ 度以内におさえる。ピッチは機首の上下動、ヨーは左右動、ロールは機軸についての回転動である。自動操縦装置のジャイロに疑似信号を入れて、天体の日周運動を補償されるために1分間に0.2度というゆっくりした動きで機首をふるることができる。

2. 球形ベアリングの部分に3軸(方位軸、高度軸、視準軸)に分けた慣性安定装置がある。

3. この慣性装置の規準板に各軸用の3個のガスベアリング付きのジャイロがあり、誤差信号がでる。誤差信号は3個の分割された直流トルクモーターに供給される。各々のトルクモーターの固定子は機体に固定された支持架台につき、回転子は望遠鏡についていて、1分間に15度の高速で動かすことができる。

4. 最終的には2星を使った数値化追尾装置がある。これは口径15cm、口径比10の屈折望遠鏡と低照度TVカメラ、HP2108電子計算機と追尾電子装置を組み合わせたもので、TVカメラの視野は 30×40 分角、13等星が検出可能である。ガイドは直接とオフセットの双方ができ、10等星2個を使って同時に追尾し望遠鏡の視準軸も補正できて、平均の気流状態で2秒角の追尾が可能である。もっと明るい星ならばもっと精度のよい追尾ができる。

視野の同定のため口径15cmで12度から3度の視野が得られるズームレンズ付きの補助望遠鏡にTVカメラがついている。搭載電子計算機はSAOカタログの

テープから補助望遠鏡と主望遠鏡の視野と同じスケールで星図をモニタテレビの上に書き出すので、飛行機の中での悪条件下でも目的星を探しあてることができる。91cmの主望遠鏡の焦点面は直径7分角で16等星がファイバー光学系を通して接眼部につけたTVカメラを通して見える。この部分はADAMS(Airborne Data Acquisition and Management Systemの略)と呼ばれ、リアルタイムでデータ処理や整約や飛行経路を記録する。

KAOのマシントイムは85%を米国内の大学からの客員研究員に、10%をNASAとその他の政府機関に、残りの5%を外国の研究者に提供している。今回の天王星のえんぺいに際してはコーネル大学のエリオット、ダンハム、ミンクが搭乗した。

3. 3月10日の“えんぺい”現象

イギリスの天文月報に相当するJ. B. A. A. (Journal of the British Astronomical Association)の1973年5月号にグリニッジ天文台のG. E. テーラーは1977年3月10日に天王星が天秤座の8.8等星B. D. $-14^{\circ} 3996 =$ SAO 158687を“えんぺい”するという予報を発表した。

惑星による恒星の“えんぺい”現象は非常に珍らしい。視直径が40秒もある木星ですら、最近30年間に牡羊座 σ (1952年11月20日)、さそり座 β (1971年5月14日)の2星しか“えんぺい”していない。天王星、海王星になると視直径が小さいうえに、視運動も小さいので機会が更に少なくなる。

海王星は1968年4月8日、B. D. $-17^{\circ} 4388$ という天秤座の7.8等星を“えんぺい”した。その時は、幸い岡山、堂平、サイデングスプリング、ストロムロ山で晴天に恵まれ、良質な光電測光のデータが得られた。この結果から海王星の視直径の改良が行なわれ、扁率についても新しい数値が得られて「理科年表」では1970年版からこの値を採用するようになった。

また、1952年の木星による牡羊座 σ 星の“えんぺい”の時に、恒星は一瞬間に見えかくれするのではなく、数回以上の減光・増光をくりかえす過程をたどることが観測されていたが、海王星の時も同様な現象が認められた。

これは惑星を包む大気の層を通った恒星の光を観測するためであることは明らかで、惑星の上層大気の性質を知る手がかりを与えるもので重要な観測データである。

テーラーによる天王星の“えんぺい”の予報はイルクーック、京都、インドのナイニタル、オーストラリアのバース、南阿のヨハネスブルグ等の各地での潜入、出現の時刻を与えたもので、天王星の半径としては大気の厚みを考慮して27,000kmを採用した。それによるとインド洋が一番条件がよく日本では潜入しか見られない予定であった。星と天王星の相対位置は ± 1 秒の誤差が見込

まれるので、予報時刻は ±20 分の精度だと考えられた。また、ミランダを除く 4 個の衛星による“えんぺい”は起らないことも予報した。

この星は実視等級 8.8 等、分光型は K5 で天王星の等級 5.3 等と比べて光度差が大きい。しかも月令 21 の月が東側 17 度の天空にあって観測条件は必ずしもよいものではなかった。

ローエル天文台とアリゾナ大学月惑星研究所は大規模な観測計画を立て、R. W. カールソンは赤外用のホトメーターを持って来日したいとの申し入れがあり、岡山の観測プログラムにこれを組み込んだ。インドネシアのレンバン、オーストラリアのバース、南アフリカのケープ等の各天文台にも別働隊を派遣する予定であった。

一方、予報時刻の精度を向上させるための両天体の相対位置の観測が各天文台で試みられた。子午環による観測が 1976 年秋に東京とワシントンで実施された。

また、1977 年 1 月 25 日ごろ、順行していく天王星が問題の星の僅か 0.8 分角南側を通過した。天王星はその 2 月 15 日に留となり、逆行に移って 3 月 10 日にこの星を“えんぺい”することになる。1 月下旬の接近時に USNO (米海軍天文台) のフラグスタフ観測所やシドニー、バース等の天文台で写真観測が行なわれた。

USNO フラグスタフには位置天文専用で作られた 155 cm 反射がある。3 夜にわたる 12 枚の写真乾板が得られ、ローエル天文台で整約し、米曆に使われている天王星の赤緯は南へ 0.2 秒角変更した方がよく、また問題の星のカタログの位置は北へ 1.2 秒の補正を入れる必要があることがわかった。両天体の赤緯の相対的な差はテラーの予報に使ったものより 1.44 秒大きくなり、赤経については殆んど補正が不要という結果となった。

これは子午環観測の結果ともよく一致し、新しい“えんぺい”予報が計算され、北半球ではこの現象は全く見られないことが判った。北限界線はオーストラリアの南端とマダガスカル島を結ぶ線となり、地上からの観測条件は全く悪いものとなった。天王星の直径の不確かさを考えて、ローエルからの各地への遠征隊の派遣はバースを除いてとりやめとなった。岡山の観測をキャンセルするという電報が到着したのは 2 月 9 日である。

東京天文台では岡山とは別に堂平の 91 cm と、内の浦の東大宇宙研の 60 cm 反射による観測計画があったが見送ることになった。ただ堂平だけは一応のモニター観測を試みることにした。当日の堂平は快晴であった。前半夜から観測をつづけていた変光星観測グループから 91 cm 反射望遠鏡の引きつぎを受けたのは 29 時 (11 日午前 5 時) であった。天王星は二重星のように分離して見えていたが、間もなく低空になるとともに薄明も明るくなり分離できなくなった。観測は黄色フィルターをつけ

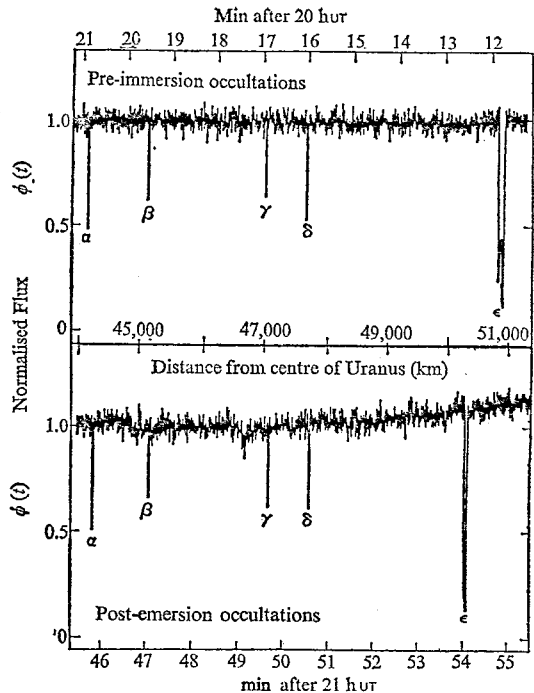


図 4

た V 等級で視野絞りは直径 2 mm を使用し連続的に明るさを記録した。途中で数回、記録計のペンが変な動きを示したので望遠鏡の追尾の不良かとチェックをした。

そうこうするうちに薄明で空が明るくなり、記録紙のペンも明るい方に片よりすぎる。測光機の感度を下げても記録が無理になった 29 時 50 分に観測を中止した。天王星は予想通り恒星を“えんぺい”しなかったらしいので記録紙はそのまま機の引出しにしまってしまった。

4. 環の発見

3 月 12 日朝の TV ニュースは、ローエル天文台で天王星に 100 個以上の衛星を発見したと報じた。すぐにこの“えんぺい”現象と関連すると判ったが、国際天文連合回報 (IAUC) は天王星のベルトの存在を報じた。それによれば、印度洋南部の 12.3 km を飛んだ KAO は天王星による“えんぺい”を 25 分間にわたって観測したと、その前後 30 分ぐらいに 5 回の星の短時間の減光を記録したこと、バース天文台では天王星の“えんぺい”は起らなかったが、同じような短時間減光が数回記録されたこと、インドのカバルー天文台では 1 回だけが短時間減光が観測され未知の衛星によるものだろうと報告されたこと、ローエル天文台からの通知により記録をしらべ直したケープ天文台でも 6 回ばかりの減光が記録されていること、等の画期的な出来事であり、併せて各観測者は記録を見直すように附記されていた。

表 1

観測地	K A O				パース				カバルー		ケープ		ナイニタル		半径計算値
	$\lambda=82^{\circ}11'E$ $\varphi=50^{\circ}20'S$		$\lambda=101^{\circ}19'E$ $\varphi=50^{\circ}21'S$		$\lambda=115^{\circ}50'24.3E$ $\varphi=31^{\circ}57'10.7S$				$\lambda=78^{\circ}49'54"E$ $\varphi=12^{\circ}34'32"N$		$\lambda=18^{\circ}28'36"E$ $\varphi=33^{\circ}56'03"S$		$\lambda=79^{\circ}27'25.6E$ $\varphi=29^{\circ}21'38.9N$		
符号	U. T.	D	U. T.	D	U. T.	D	深さ	U. T.	D	U. T.	D	U. T.	D		
ϵ	20 ^h 11 ^m 46 ^s 7 ^s		21 ^h 54 ^m 06 ^s 3 ^s		20 ^h 10 ^m 33 ^s 2	8 ^s 2	0.94~ 0.52	20 ^h 19 ^m 38 ^s	8 ^s 9	22 ^h 03 ^m 44 ^s	6 ^s			km km 51790±10, 51120±10	
δ	20 16 03 1		21 50 39 1		15 58.7	0.7	0.42	20 24 44		22 00 13		20 26 15 1		48510±30	
γ	20 16 58 1		21 49 45 1		18 44.1	1.5	0.38	20 25 44		21 59 18		20 27 19 1		47840±20	
β	20 19 34 1		21 47 06 1					20 28 43		21 56 38		20 30 25 1		45890±30	
α	20 20 55 1		21 45 52 1					20 30 14		21 55 20		20 32 01 1		44950±40	
ζ										22 07 11	8			53720	
β'					23 19.0	1.0	0.21							42810	
α'					23 42.4	0.9	0.29							42550	

堂平の記録にもそれに相当するような減光がいくつか見られるが、そのほかインドのナイニタルでも観測されていることがわかった。

KAOの観測の詳細によれば、搭載した91cm反射で3チャンネルの測光を行なった。その波長特性は次表の通りで、あらかじめ天王星とこの恒星の明るさを測ってみて、その比が大きくなる赤外部がえらばれた。冷却したRCA, C 31034 光電子増倍管を使い10ミリ秒の積分時間でホトンカウントを行なった。

チャンネル	中心波長	透過幅	星の計数/星+背景光計数
1	6190Å	80Å	0.15
2	7280	200	0.32
3	8520	210	0.42

KAOは10時37分(現地時)パース飛行場を離陸し、南西へ約5時間23分飛行し20時00分(世界時)に東に向きを変え“えんべい”経路に沿って飛んだ。天王星と恒星を46秒角の視野にとらえ、20時05分40秒から記録を開始した。図4はチャンネル2の記録の一部である。この間、雲もなく飛行は安定していて追尾も正しかった。よみとった時刻は表1の通りである。この表のうち符号は天王星本体に近いものから順に α , β , …と名付けたものである。

パース天文台での観測は61cmの惑星パトロール望遠鏡にRCA, C 31034B 光電子増倍管をつけ、KAOの第3チャンネルと同じフィルターを使った測光機でケスレーの301オペアンプで記録紙に書かせる。視野は28秒角で20時0分0秒世界時から観測を開始し、5分毎に天王星の中心合せを行なって薄明まで観測した。天王星自身の“えんべい”は起らなかったが、次のような短

時間記録が得られた。観測された時刻は表1に示した。

インドのカバルー天文台では口径102cmのカセグレン反射にEMI 9558B 光電子増倍管をつけ、ラッテン89Bフィルターを併用した。16秒角のダイヤフラムを使い、20cmガイドリング望遠鏡でモニターしていたところ8.9秒間の減光が記録され、同時に眼視的にこれが認められた。表1には後で記録を再調査して見つかった他の短時間現象も併記してある。また、ケープ、ナイニタル両天文台での観測も後での調査から知れたもので、後者の使用望遠鏡は104cm反射である。

スミソニヤン天文台のB.G. マースデンはこれらの観測データから、環が天王星の赤道面に一致しているとしてそれぞれの半径を計算した。その結果を表1の最後に記してある。この結果では一番はっきりした環 ϵ について、天王星と東側と西側で大きな不一致があり、また、パースの α , β , ケープの ζ など、他所で観測されていない環も見えている。堂平の観測は一番北に位置していて重要な筈であるが他とよく一致せず採用していない。一番内側の衛星ミランダの軌道面との関係も合せて検討しなおす余地がある。この計算値からは、これらの環はロシュの限界内にあることがわかる。

クレモラは1980年までの天王星の経路にある微光星を調査して12回の“えんべい”の予報を発表した。

また、1970年にアメリカで飛ばした気球望遠鏡ストラトスコープから撮影された天王星には環のカゲが写っているという報告がある。

地上からの直接的な観測ではこの環は検出不能である。将来の“えんべい”と衛星望遠鏡計画Space Telescopeと最近打ち上げられたボエジャー人工探査体の天王星接近による結果など楽しみが沢山あるわけである。