

URANO

di Federico Tosi

Associazione Reggiana di Astronomia (A.R.A.)

Sommario

<i>§I) STORIA</i>	3
<i>§II) CARATTERISTICHE ORBITALI E DINAMICHE</i>	8
<i>§III) L'OSSERVAZIONE TELESCOPICA DEL PIANETA</i>	10
<i>§IV) L'ATMOSFERA</i>	12
<i>§V) LE OSSERVAZIONI DEL TELESCOPIO SPAZIALE</i>	17
<i>§VI) IL CAMPO MAGNETICO</i>	19
<i>§VII) GLI ANELLI</i>	21
<i>§VIII) I SATELLITI DI URANO</i>	25
- OBERON	27
- TITANIA	27
- UMBRIEL	28
- ARIEL	29
- MIRANDA	29
- LE LUNE MINORI	31
<i>§IX) ESPLORAZIONE SPAZIALE</i>	34
<i>§X) OSSERVAZIONI AMATORIALI</i>	37
<i>PARAMETRI ORBITALI E FISICI DI URANO</i>	40
<i>TABELLA RIASSUNTIVA DEGLI ANELLI DI URANO</i>	40
<i>TABELLA RIASSUNTIVA DEI SATELLITI DI URANO</i>	41
<i>BIBLIOGRAFIA</i>	42

STORIA

A partire dal 1780 circa, l'astronomia formulò nuovi formidabili programmi. Uno di questi era la meccanica celeste, finalmente distinta dalla meccanica generale; un altro era l'esplorazione delle profondità cosmiche per mezzo di grandi telescopi. Quest'ultimo si deve soprattutto all'attività di un musicista inglese di origine tedesca, Friedrich Wilhelm (detto William) Herschel, convertito all'astronomia. Fu lui a scoprire Urano, il settimo pianeta del Sistema Solare, e la storia di questa scoperta in un certo senso non può prescindere dalla biografia di questo grande astronomo del passato.

Nato ad Hannover il 15 novembre 1738, egli non aveva posseduto alcuna nozione di astronomia fino all'età di circa 35 anni. Suo padre Isaak era maestro di musica e direttore della banda militare dell'esercito hannoverese, di cui il giovane Wilhelm, destinato alla professione del genitore, entrò a far parte come oboista quando aveva solo 14 anni. Nel 1756 il reggimento fu trasferito per alcuni mesi dal continente all'Inghilterra, nel Kent; qui Wilhelm imparò in fretta la lingua. A quell'epoca l'Hannover apparteneva alla corona inglese, e il suo piccolo esercito, combattendo proprio a fianco degli inglesi nella guerra dei Sette Anni, fu sconfitto dai francesi a Hastenbeck il 26 luglio 1757. Anche Herschel fu coinvolto in quella battaglia: non fu ferito ma, dopo aver passato la notte in un fosso, decise di disertare e in qualche modo, assieme al fratello maggiore Jakob, riuscì ad imbarcarsi per l'Inghilterra, dove si stabilì inizialmente a Londra progettando di fare carriera come musicista. Per otto anni visse stentatamente, insegnando musica e spostandosi da Londra a Richmond e poi a Leeds, ma nel 1765 venne nominato organista ad Halifax e l'anno seguente fu chiamato a Bath per lo stesso incarico.

In quegli anni Bath, splendida cittadina specchiata nell'Avon, era uno dei più vivaci centri culturali e mondani del Regno, una vetrina di straordinaria eleganza per le persone desiderose di mostrare e mettere alla prova il proprio talento artistico. Sul finire del 1766 Herschel si trasferì dunque a Bath, pronto a dedicarsi all'organo che nel giro di alcuni mesi sarebbe stato installato nella nuova *Octagonal Chapel*. Là sarebbe rimasto per 15 anni, continuando a suonare, dirigere e comporre musica per la locale orchestra. A noi, comunque, Herschel non è tanto noto per i suoi meriti di musicista, nonostante le 18 sinfonie e le decine di *sonate*, *concerti* e *solo*. Ben legata a questa attività artistica dal filo conduttore dell'armonia, si sviluppò in lui un'altra grande passione, l'altra arte della sua vita, e quella che lo avrebbe consegnato alla storia dell'astronomia.

Grazie al nuovo incarico, infatti, le risorse economiche di Herschel, un po' migliorate, lo condussero ad istruirsi acquistando libri delle più diverse materie. Egli era incuriosito in modo particolare dalle scienze, dalla matematica, dalla filosofia e dalle lingue straniere. Ebbe occasione di avvicinarsi all'astronomia leggendo *Astronomy* di James Ferguson, un libro di divulgazione delle teorie di Newton che lo appassionò al punto da fargli noleggiare, nel 1773, il primo telescopio. Pare che questo fosse un riflettore Gregory, ma era troppo piccolo e non lo soddisfaceva. D'altra parte, strumenti di dimensioni maggiori con buone ottiche erano troppo cari per la sua tasca, quindi cominciò ad assemblare telescopi da sé, sia rifrattori che riflettori, utilizzandoli proficuamente per osservare il cielo. Negli otto anni successivi condusse una doppia vita, suonando di giorno e costruendo specchi e montature di sera. Aiutato dalla sorella minore Karoline Lucretia (1750-1848), che era venuta a vivere con lui a Bath dopo la morte del padre, Herschel cominciò più serie di osservazioni sistematiche della volta celeste, dedicando alla sua passione ogni momento libero. Si era proposto di passare in rassegna il cielo con lo scopo principale di scoprire e catalogare stelle doppie, cioè quelle coppie di stelle che il telescopio mostra vicinissime tra loro perché legate dalla mutua gravità (quindi fisicamente vicine) o perché solo prospetticamente tali. Per questo fine egli voleva dotarsi del massimo potere d'ingrandimento e della massima capacità di risolvere e scorgere i dettagli deboli, e solo i telescopi riflettori, secondo lo schema progettato da Newton, potevano essere costruiti in dimensioni tanto grandi da soddisfare questa sua esigenza. Bisogna peraltro ricordare che gli specchi utilizzati per i telescopi dell'epoca erano metallici, realizzati su un

supporto formato da una lega speciale, detta “*speculum*”, comprendente rame e stagno. Appena agli inizi della sua carriera, un primo esemplare fu così dotato di uno specchio di 15,7 cm di apertura e 2,13 metri di lunghezza focale, dimensioni assai piccole o comunque normali per gli standard attuali, ma ragguardevoli nella seconda metà del Settecento. Lo strumento, come tutti quelli da lui costruiti successivamente, era di buona qualità ottica.

Nel 1776, dunque, Herschel iniziò una sistematica esplorazione degli oggetti visibili al telescopio. Puntato su Marte, rivelò subito che il pianeta aveva calotte polari di colore bianco e William interpretò correttamente il fenomeno spiegandolo con la presenza di ghiaccio. Una sera, mentre stava osservando con il telescopio nella strada antistante la sua casa, un passante gli chiese di poter dare un’occhiata alla Luna: il giorno dopo quell’uomo tornò e si presentò come il Dr. William Watson, fondatore di un’associazione filosofica di Bath nonché membro della *Royal Society*, il principale consesso degli scienziati inglesi. Watson fu colui che presentò alla *Society* il primo lavoro astronomico di Herschel, la misurazione delle altezze di un centinaio di monti lunari, che egli aveva compiuto tra il 1779 e il 1781. Ma il giorno, anzi la notte che cambiò per sempre la vita di William Herschel, fu quella del 13 marzo 1781.

Quella sera egli si trovava ancora nei pressi della sua abitazione; con il telescopio di 15,7 cm di diametro stava vagabondando al confine tra le costellazioni zodiacali del Toro e dei Gemelli alla ricerca di stelle doppie, quando scorse un corpo celeste di magnitudine apparente 5,6 e di dimensioni leggermente maggiori rispetto alle immagini stellari, non segnato sulle cartine di cui disponeva. Ecco ciò che scrisse in proposito in un articolo dal titolo assai poco pretenzioso: *Account of a comet* (“Resoconto su una cometa”), letto dallo stesso Watson il 26 aprile seguente nel corso di una seduta alla Royal Society:

«[...] Martedì 13 marzo 1781, tra le dieci e le undici di sera, mentre stavo esaminando le piccole stelle in vicinanza di H Geminorum, ne scorsi una che appariva visibilmente più grande delle altre. Colpito dall’insolita grandezza, la confrontai con H Geminorum e con la piccola stella nel quartile tra Auriga e Gemelli e, trovandola tanto più grande di ognuna di esse, sospettai che fosse una cometa. L’ingrandimento che usavo quando vidi per la prima volta la cometa era 227. Sapevo per esperienza che i diametri delle stelle fisse non erano proporzionalmente ingranditi, sotto forti ingrandimenti, come lo sono i pianeti, perciò feci uso degli ingrandimenti, come doveva essere nell’ipotesi che non fosse una stella fissa. Il seguito mi ha mostrato che la mia ipotesi era ben fondata. Inserii gli ingrandimenti 460 e 932 e trovai che il suo diametro aumentava proporzionalmente, [...] mentre quelli delle stelle non si crescevano di tale rapporto. Per di più la cometa, ingrandita forse più di quanto la sua luminosità concedesse, sembrava diffusa e mal definita, mentre le stelle conservavano la loro lucentezza e nitidezza che dopo migliaia di osservazioni sapevo di dovermi aspettare...»*

* La stella H Geminorum è nella numerazione di Flamsteed la 1 Gem, di magnitudine visuale 4,1, mentre l’altra stella citata è la 132 Tauri, di magnitudine 4,8.

Un ulteriore indizio sulla natura dell’oggetto emerse durante le notti successive, quando egli notò che questo si muoveva lentamente attraverso lo sfondo delle stelle distanti. Evidentemente non si trattava di una stella, né di una nebulosa, bensì doveva appartenere al Sistema Solare. Herschel non pensò neanche per un istante di avere scoperto un nuovo pianeta, non perché mancasse d’immaginazione, ma perché nessun pianeta era mai stato scoperto in tempi storici, e tutti davano per scontato che nel Sistema Solare non ci fossero altri pianeti al di là di Saturno. La spiegazione più semplice era dunque che si trattasse di una cometa, quantunque molto strana e diversa da tutte quelle osservate sino a quel momento, non presentando alcuna nebulosità circostante, chioma e coda.

In realtà, già da qualche decennio si stava facendo strada, in campo filosofico e scientifico, l’idea che i pianeti conosciuti e visibili a occhio nudo non coincidessero con tutti quelli effettivamente

esistenti: eventuali corpi orbitanti in prossimità del Sole sarebbero stati facilmente nascosti dalla luminosità dell'astro, mentre oggetti molto distanti sarebbero stati raggiunti da una quantità di luce assai scarsa, eludendo le osservazioni. Per di più, una relazione empirica pubblicata nella sua forma classica nel 1772 e nota col nome di *legge di Titius-Bode* voleva dimostrare che i valori dei semiassi maggiori delle orbite planetarie, calcolati in Unità Astronomiche (dove 1 UA è pari alla distanza media Terra-Sole), non erano casuali, ma, forse in virtù di una sorta di “celeste armonia”, seguivano una precisa successione matematica, sintetizzabile nella formula:

$$d_n = 0,4 + 0,3 \times 2^n$$

con $n = -\infty, 0, 1, 2, 4, 5$, corrispondenti a Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove e Saturno. La legge mostrava un'evidente imperfezione in corrispondenza del valore $n = 3$, dacché nessun pianeta era mai stato scoperto fino a quel momento nello spazio compreso tra le orbite di Marte e Giove, e del resto, appunto, non si conoscevano altri corpi oltre Saturno che soddisfacessero tale formula per valori $n > 5$.

Herschel sapeva bene che in caso di nuove scoperte era necessario informare la comunità astronomica al più presto, per garantirsi il titolo di scopritore ufficiale. Così scrisse subito al professor Thomas Hornsby, direttore dell'Osservatorio di Oxford con il quale aveva scambiato qualche lettera in passato, e all'astronomo reale di Greenwich, Nevil Maskelyne, che aveva conosciuto personalmente alcuni anni prima grazie a Watson. Maskelyne suggerì per primo l'idea che si trattasse di un nuovo pianeta, mentre lo stesso Herschel e Hornsby erano ancora convinti di trovarsi davanti a una cometa. Per dirimere la questione occorreva calcolare l'orbita: impresa non banale, in quanto l'oggetto era stato osservato per breve tempo e le misure di posizione acquisite non consentivano di stabilire con certezza il tipo di traiettoria descritta (parabolica, circolare o ellittica). Herschel provò per primo, ma i suoi calcoli non erano abbastanza precisi, così decise di rendere pubbliche le osservazioni sottoponendo il problema a persone più competenti. Il matematico e astronomo di origine finlandese Anders Johann Lexell, in servizio presso l'Osservatorio di San Pietroburgo, affrontò i calcoli accertando che il nuovo corpo celeste si trovava a una distanza doppia di quella del più lontano pianeta conosciuto, Saturno, descrivendo un'orbita quasi perfettamente circolare; un risultato confermato in seguito anche da altri matematici, tra cui l'italiano Barnaba Oriani direttore della Specola di Brera. La sua vera natura fu chiarita a partire dal maggio 1781: si trattava proprio di un nuovo pianeta, un pianeta che per giunta si accordava bene con la legge di Titius-Bode per $n = 6$.

Come è facile intuire, la scoperta di un settimo pianeta ebbe profonde conseguenze non solo in campo astronomico. Dopo oltre seimila anni, una delle roccaforti dell'astronomia classica, la convinzione dell'esistenza di sei soli pianeti, era stata scardinata portandosene dietro altre; una volta di più l'osservazione aveva mostrato la sua superiorità rispetto alle speculazioni filosofiche. La scoperta di un nuovo pianeta inevitabilmente ebbe una vasta eco anche al di fuori della ristretta comunità scientifica, e il carisma della figura di Herschel contribuì non poco ad aumentarne la risonanza: il fatto che lo scopritore fosse un musicista, educato al di fuori degli ambienti accademici; il fatto che, insoddisfatto degli strumenti dell'epoca, avesse deciso di costruirseli da solo e avesse finito col farli meglio di chiunque altro dei suoi contemporanei, e che poi li avesse anche usati per effettuare osservazioni mai osate da altri, non poteva non affascinare la gente comune. Fu così che l'Europa intera si appassionò a questa scoperta.

Herschel volle dedicare il nuovo pianeta al re d'Inghilterra Giorgio III, protettore delle arti e delle scienze, proponendo di chiamarlo *Georgium Sidus* (“stella di Giorgio”) o, in inglese, *Georgian Planet*. Il nome *Urano*, che nella mitologia greca rappresenta la personificazione del cielo stellato, il padre dei titani (tra cui Crono, ovvero Saturno) e dei ciclopi, nonché il primo sovrano dell'Olimpo, fu suggerito dall'astronomo tedesco Bode nel 1784, ma fu unanimemente accettato

solo dopo diverse decadi: per molti anni la designazione più comune restò quella di “pianeta Herschel”, un uso che sopravvisse addirittura fino all’inizio del XX secolo.

Per la scoperta del settimo pianeta, da semplice e sconosciuto dilettante Herschel giunse di colpo alla fama. Nel novembre 1781, grazie alla scoperta che estendeva i confini del Sistema Solare modificando un ordine che risaliva alla preistoria, venne premiato dalla Royal Society, che il 7 dicembre seguente lo accoglieva ufficialmente tra i suoi membri. Alla fine di maggio del 1782 fu invitato a corte e poco dopo il re, ammiratore del suo talento, lo nominò suo astronomo privato, concedendo a lui un assegno annuo di 200 sterline e a sua sorella uno di 50 sterline per assisterlo; gli fece inoltre costruire una residenza e un osservatorio personale nella contea di Berkshire alla periferia occidentale di Londra: prima a Datchet vicino a Windsor, poi, qualche anno dopo, a Slough. Ciò gli consentì di lasciare la professione di musicista per dedicarsi liberamente, con tutte le energie, alle sue ricerche ed alla costruzione di nuovi strumenti per l’osservazione.

Secondato da suo fratello Johann Alexander, valente meccanico, e dalla devota sorella, le cui ampie cognizioni in astronomia le permisero tra l’altro di scoprire otto comete, Herschel realizzò telescopi di dimensioni via via maggiori fino all’ultimo, del diametro di 48 pollici (circa 122 cm), pesante più di una tonnellata e con una lunghezza focale di 12,2 metri. Erano senza dubbio i più potenti telescopi dell’epoca, con misure che, per molto tempo, non sarebbero più state superate. A maggior merito di Herschel va ricordato che gli specchi in bronzo di questi strumenti venivano da lui personalmente fusi e lavorati otticamente, con una procedura sfibrante e ininterrotta che richiedeva fino a 18 ore di lavoro continuo. Il telescopio da 48 pollici, in particolare, vide la sua “prima luce” il 28 agosto 1789, quando Herschel lo utilizzò per osservare Saturno e in breve tempo scoprì la sesta luna del pianeta, Enceladus. Il 17 settembre seguente poi scoprì anche il settimo satellite, Mimas. Tuttavia questo grande strumento non divenne mai il suo favorito, soprattutto a causa del fatto che lo specchio andava pulito molto spesso e il tubo ottico era difficile da manovrare. Herschel preferiva così osservare con un altro telescopio da 18,8 pollici (47,7 cm), dimensioni sempre cospicue ma molto meno ingombranti: con questo strumento, tra l’altro, aveva scoperto le prime due lune di Urano, Titania e Oberon, nel 1787.

Lo stipendio annuo concesso dal re non era sufficiente per coprire le spese degli esperimenti di Herschel e i suoi frequenti viaggi a Londra, ma la fama dell’elevata qualità delle ottiche da lui prodotte divenne presto nota anche al di fuori dell’Inghilterra, così le ordinazioni dall’estero non tardarono ad arrivare. Clienti di Herschel furono, tra gli altri, il re di Spagna, il principe di Canino, la corte russa e l’imperatore d’Austria, nonché alcuni rinomati astronomi suoi colleghi. Il guadagno ottenuto dalla vendita degli strumenti gli diede quella maggiore sicurezza economica necessaria per proseguire i propri lavori.

Tornando a Urano, la cosa più strana è che, pur essendo molto debole (magnitudine media 5,7), esso è però visibile ad occhio nudo, e quindi fa meraviglia che per tanti millenni astrologi e astronomi non lo abbiano individuato, scambiandolo sempre per una stella. In effetti più tardi, analizzando i dati archiviati in vari osservatori, ci si accorse che Urano era stato osservato non meno di 22 volte tra il 1690 e il 1781 da astronomi anche di assoluto valore quali Flamsteed, Bradley, Mayer e Le Monnier, ma nessuno aveva saputo distinguerlo dalle stelle di campo, non avendo avuto a disposizione un sufficiente potere risolutivo. La prima osservazione documentata risale appunto al 1690, quando il primo direttore dell’Osservatorio di Greenwich, l’astronomo reale John Flamsteed (1646-1719), scambiò il pianeta per una normale stella. È noto, infatti, come egli avesse inserito nel suo *Historia Coelestis Britannica*, pubblicato postumo nel 1725, un catalogo di 2935 stelle. Oggi noi sappiamo che le stelle fino alla magnitudine 5,49 sono esattamente 2862: nulla di strano se fra quelle catalogate ci fosse stato anche il lontano pianeta. Ed infatti Flamsteed, il 23 dicembre 1690, registrò il passaggio in meridiano di una stellina di magnitudine 5½ (all’epoca Urano aveva magnitudine 5,59), che fu poi denominata da Lalande *34 Tauri* nell’edizione francese del catalogo (1783). Curiosamente, Urano trovò posto come stella in ben due atlanti celesti: quello di Flamsteed *Atlas Coelestis*, pubblicato a Londra nel 1729, e quello di John Bevis, *Uranographia Britannica*, compilato, prendendo come base il precedente (ma con 600 stelle in più), intorno al

1750, ma non pubblicato fino al 1786, 15 anni dopo la morte dell'autore. Forse non ci si può stupire di questi fatti, visto che molti astronomi non usavano registrare le loro osservazioni, o le registravano con scarsa accuratezza. L'esempio peggiore fu quello di Le Monnier, che osservò il pianeta almeno nove volte senza mai riconoscerlo: una sua osservazione è stata ritrovata su un foglio usato dal suo parrucchiere per la confezione di un pacchetto di cipria!

Si può certamente affermare che la scoperta di Urano sia stata frutto del caso. Allo stesso tempo, tuttavia, non si può ignorare che a favore di Herschel giocò il fatto che egli, a differenza della maggior parte degli astronomi professionisti che osservavano oggetti noti con lo scopo, generalmente, di misurarne le posizioni, era un esploratore sistematico del cielo che osservava tutti gli oggetti senza pregiudizi. Infatti, da autodidatta dell'astronomia egli non era interessato al tedioso lavoro di compilazione di tabelle sulla posizione di stelle, Luna e pianeti, mentre come dilettante poteva osservare liberamente qualsiasi cosa colpisse la sua curiosità. In più, era motivato da un programma di ricerca e catalogazione di stelle doppie che lo spingeva, ogni qualvolta il cielo era sereno, a passare intere serate all'oculare del suo telescopio.

William Herschel è ricordato soprattutto per aver scoperto Urano, ma i suoi contributi all'astronomia del '700 furono molteplici: a lui si devono, per esempio, la scoperta dell'apice del moto solare, il calcolo dell'inclinazione dell'asse di Marte sul piano orbitale, la stima del periodo di rotazione di Saturno e la scoperta di numerose comete. Nel 1800, durante i suoi studi sullo spettro solare, scoprì la radiazione infrarossa. Con i cosiddetti *scandagli del cielo*, un vero e proprio metodo di esplorazione consistente nel contare le stelle che si presentano in diverse zone del cielo nel campo dell'oculare, Herschel compì studi fondamentali sui sistemi stellari, classificò le stelle e le nebulose, studiò le stelle doppie. Tentò di censire le stelle della Galassia, compiendo studi sistematici sulla loro luminosità e distribuzione nello spazio: avvalendosi di strumenti sempre più potenti fino al gigantesco telescopio di 122 cm di diametro, egli intendeva infatti stabilire la "distribuzione apparente" delle stelle nel cielo per risalire, sulla base di ipotesi semplici e ragionevoli, alla loro più probabile "distribuzione reale" nello spazio. Ciò gli permise infine di tracciare uno schema tridimensionale della nostra Galassia, che risultò per la prima volta come un oggetto piatto: in base alle sue osservazioni, Herschel giunse alla concezione strutturale secondo cui ciò che egli pensava fosse tutto l'Universo era simile a un enorme disco, una specie di macina da mulino, disposto nel piano della Via Lattea ed entro il quale le stelle sono distribuite con una densità pressoché uniforme, con il Sistema Solare collocato al centro.

Per i suoi tanti meriti scientifici, Herschel fu nominato cavaliere (*Sir*) nel 1816. Nel 1820 venne fondata la *Royal Astronomical Society*, e Sir William Herschel ne fu eletto vicepresidente e l'anno successivo presidente, anche se le sue osservazioni erano ormai cessate definitivamente: una delle sue ultime note riguarda l'osservazione di una cometa il 4 luglio 1819, mentre la sua ultima pubblicazione fu un catalogo di 145 stelle doppie, datato 1821. Herschel morì nella sua casa di Slough il 25 agosto 1822, vecchissimo per quell'epoca, a quasi 84 anni di età, lasciando al figlio John, anch'egli valente astronomo, un'ingente mole di materiale contenente le sue osservazioni ed esperienze effettuate dal 1776 in poi. A lui furono intitolati due crateri su altrettanti corpi del Sistema Solare: uno di 45 km di diametro sulla Luna, sul bordo del *Mare Nubium* a nord del cratere Tolomeo, e, in tempi più recenti, uno di notevoli proporzioni (circa 130 km) su Mimas, il satellite di Saturno scoperto dallo stesso Herschel nel 1789.

CARATTERISTICHE ORBITALI E DINAMICHE

Settimo pianeta in ordine di distanza dal Sole e primo ad essere stato scoperto dopo l'invenzione del telescopio, Urano è appena visibile ad occhio nudo in condizioni particolarmente favorevoli. Date le sue piccole dimensioni apparenti, dovute alla grande distanza, fino all'incontro ravvicinato con il Voyager 2 di esso si conosceva poco: per esempio non era stato determinato in modo preciso il raggio del pianeta, il suo periodo di rotazione e la sua composizione; inoltre erano stati scoperti solo cinque dei suoi satelliti, che peraltro apparivano come deboli punti luminosi. Ma le nostre conoscenze sono cambiate notevolmente dal 24 gennaio 1986, quando la sonda spaziale americana passò a meno di 81.500 km dalla sommità delle nubi del pianeta, mostrandoci questo mondo in tutta la sua bellezza e stranezza.

Urano si muove a una distanza media dal Sole di 2870,99 milioni di chilometri (pari a 19,1914 UA) impiegando 84,01 anni per completare una rivoluzione. La sua orbita a bassa eccentricità ($e = 0,0461$) lo porta al perielio a 2735 milioni di chilometri dall'astro (l'ultimo passaggio al perielio si è verificato il 20 maggio 1966), mentre nel punto di massima lontananza esso supera i 3 miliardi di chilometri portandosi, per la precisione, a quasi 3007 milioni di chilometri dal Sole, come avverrà il 27 febbraio 2009. L'inclinazione del piano orbitale di Urano rispetto a quello della Terra è la più bassa di tutti i pianeti del Sistema Solare: solo $0^{\circ},774$ ($0^{\circ}46'$); pertanto esso appare muoversi, di circa $4^{\circ},3$ all'anno, praticamente lungo l'eclittica.

Visto da Urano, il Sistema Solare muta notevolmente il suo aspetto. Solo tre pianeti sono ancora osservabili a occhio nudo: Mercurio, Venere, la Terra e Marte sono scomparsi nelle immediate vicinanze del Sole, completamente sovrachiati dalla sua luce. Giove e Saturno appaiono talvolta come astri del mattino o della sera, allontanandosi dal Sole rispettivamente non più di 16° e non più di 33° . Giove appare al massimo come una stella di magnitudine 5, Saturno come una di 4; entrambi, dunque, molto deboli. Nettuno è visibile, debolissimo, solo nei pochi anni in cui è più vicino a Urano, poi sparisce per circa 150 anni. Plutone è invisibile anche nelle condizioni più favorevoli. Così, dal pianeta Urano, quasi tutto il Sistema Solare è già scomparso, svanito nella distanza o soffocato dalla luce del Sole. Ma il Sole stesso ci apparirebbe ridotto in maniera impressionante: il suo diametro angolare medio, laggiù, è di appena 100 secondi d'arco e l'occhio umano lo percepirebbe più come un punto che come un disco. Un punto luminosissimo, il più luminoso del cielo, ma solo un punto.

Accurate simulazioni eseguite mediante potenti calcolatori elettronici hanno suggerito che sia Urano che Nettuno siano nati più vicini al Sole del 30% circa rispetto alle posizioni attuali. L'ipotesi corrente vuole che tutti i pianeti del Sistema Solare si siano formati dalla collisione di un gran numero di planetesimi che ruotavano nell'immenso disco che circondava il Sole. Tuttavia, mentre accumulavano materiale per la loro formazione, gli embrioni di Urano e Nettuno avrebbero subito un'ingente quantità di urti da parte di alcuni di questi planetesimi residui, deviandone una porzione verso l'interno del Sistema Solare: furono proprio questi ultimi a provocare un effetto di "rinculo" che fece allargare gradualmente e lentamente le orbite dei due pianeti. Questo spiegherebbe come Urano e Nettuno, giganti gassosi, possano esistere ai confini del Sistema Solare, dove ai primordi non ci sarebbe potuta essere sufficiente materia, gas e polveri, per creare simili oggetti. Anche Giove, che cresceva più velocemente di tutti perché era relativamente vicino al Sole, dove la densità del materiale del disco era maggiore, esercitò la sua forza gravitazionale sugli altri pianeti in crescita, ma il suo contributo allo slittamento delle orbite di Urano e Nettuno è ancora da dimostrare.

Per i quattro pianeti giganti del Sistema Solare, dove non esiste una superficie solida direttamente osservabile, è difficile fornire un valore preciso del raggio, perciò si definisce *livello zero* l'altitudine a cui corrisponde la pressione atmosferica di 1 bar (equivalente a 100.000 Pascal ovvero circa 0,987 atmosfere). Il raggio equatoriale di Urano così calcolato risulta pari a 25.559 km, mentre quello polare, a causa dello schiacciamento del pianeta, è di 24.973 km. Con una massa di

$8,6832 \times 10^{25}$ kg (14,536 volte quella della Terra), la sua densità media risulta essere piuttosto bassa, $1,27 \text{ g/cm}^3$ (di poco superiore a quella dell'acqua, che è esattamente di 1 g/cm^3). Il pianeta può quindi essere considerato un gemello del più distante Nettuno, che però, pur essendo leggermente più piccolo, è più massiccio e più denso.

Urano presenta un sensibile schiacciamento ai poli a causa della veloce rotazione su se stesso. All'equatore il pianeta compie un giro completo in 17,9 ore, ma il periodo di rotazione del mantello e del nucleo, ai quali è ancorato il campo magnetico, è ancora più breve ed è pari a 17,24 ore (17h 14m). Tuttavia, la particolarità più curiosa di Urano è quella di essere, per così dire, "coricato su un fianco". L'asse di rotazione, infatti, è inclinato di ben $97^\circ,86$ rispetto alla perpendicolare dell'orbita, il che significa che giace praticamente sul piano orbitale; in altre parole Urano è ruotato di oltre un angolo retto rispetto alla posizione degli altri pianeti del Sistema Solare e "rotola" sulla propria orbita invece di effettuare un corretto movimento di rivoluzione. L'asse di rotazione di Urano è inclinato a tal punto che, secondo la convenzione del moto in senso antiorario adottata dall'Unione Astronomica Internazionale (IAU), quello che sarebbe il polo nord in realtà giace sotto il piano dell'eclittica. L'inclinazione di Urano è quindi data pari a circa 98° invece che a 82° , e questo fa sì che il pianeta abbia una rotazione *retrograda*: visto da un punto ideale posto sopra il polo nord, il moto avviene in senso orario, da est verso ovest, e non viceversa, come per la maggioranza dei pianeti. In tutto il Sistema Solare, infatti, a parte Urano solo Venere e Plutone, avendo assi di rotazione ancora più inclinati, presentano un analogo tipo di rotazione.

L'inusuale orientazione dell'asse di rotazione ha delle profonde conseguenze stagionali. Durante i solstizi (l'ultimo si è verificato nel 1985, poco prima del sorvolo del Voyager 2) uno dei poli è praticamente rivolto verso il Sole (a meno di 8 gradi) e l'emisfero a cui appartiene non conosce tramonti, con l'astro sempre molto vicino allo zenit; l'altra metà del pianeta è invece permanentemente avvolta nel buio. Più precisamente, nella configurazione equivalente al solstizio estivo, il Sole raggiunge lo zenit a una latitudine di circa 82° e, per la posizione che viene ad assumere il circolo di illuminazione, la zona compresa tra il polo e gli 8° di latitudine rimane sempre in luce; in una sottile fascia equatoriale compresa tra le latitudini -8° e $+8^\circ$ si ha il succedersi del giorno e della notte e la parte restante è completamente buia. Questa situazione si ripete invertita non appena il pianeta abbia completato un altro mezzo giro attorno al Sole, cioè dopo 42 anni circa. Agli equinozi, invece (il prossimo avrà luogo nel 2007), giorno e notte si alternano su tutto il globo, così come avviene anche sulla Terra. In questo modo, nel corso di un'orbita di 84 anni, il Sole può trovarsi allo zenit a qualsiasi latitudine, cosa che non avviene su nessun altro pianeta del Sistema Solare.

La causa di questa anomala inclinazione è sconosciuta; un'ipotesi probabile è che derivi da una gigantesca collisione avvenuta in tempi remoti. Il fatto che quasi tutti i satelliti di Urano giacciono approssimativamente sul piano equatoriale del pianeta avvalorava l'ipotesi secondo cui l'evento che lo ha portato ad assumere la strana orientazione dell'asse di rotazione debba essere avvenuto durante la formazione del sistema, prima che si originassero le lune e gli anelli. L'urto con un planetesimo di massa pari a 1/10 di quella del pianeta (per esempio un oggetto grande come la Terra) potrebbe aver ribaltato l'asse di rotazione del corpo in accrescimento e condizionato per sempre l'evoluzione di un sistema che, a oltre due secoli dalla scoperta, non finisce ancora di stupire.

L'OSSERVAZIONE TELESCOPICA DEL PIANETA

Subito dopo la scoperta di Urano, diversi astronomi iniziarono a scrutare il pianeta allo scopo di individuare dei particolari che potessero fornire indicazioni sulle condizioni fisiche, composizione e periodo di rotazione. Ma il lontano corpo celeste, che non si avvicina mai alla Terra a meno di 2,6 miliardi di chilometri, si dimostrò subito ostico agli osservatori. Il fatto è che Urano si trova a una distanza dal Sole circa 19,2 volte superiore a quella della Terra, e di conseguenza la luce della nostra stella vi giunge in media 368 volte più debole: un panorama così scarsamente illuminato non mostra facilmente i suoi particolari. Infatti, in condizioni osservative discrete, Urano appare al telescopio come un minuscolo dischetto verdastro privo di strutture, con l'eccezione di un certo oscuramento verso il bordo che rivela la presenza di una spessa atmosfera gassosa.

Le osservazioni visuali ammantate da maggiore credibilità furono quelle dell'astronomo di origine greca Eugene M. Antoniadi, che, attraverso il più grande telescopio a lenti d'Europa, il rifrattore *Grand Lunette* di 83 cm dell'Osservatorio astrofisico di Meudon (presso Parigi), vide Urano con deboli bande parallele all'equatore; un po' come appare Giove con un piccolo cannocchiale terrestre. Antoniadi fu anche in grado di scorgere una regione più scura in prossimità del polo rivolto verso il Sole. Analoghe *performance* furono raggiunte dal francese Audouin Dollfus, che negli anni '60 si avvale prima del rifrattore da 60 cm e successivamente del riflettore Cassegrain da 106 cm dell'Osservatorio del Pic du Midi, situato a 2870 m nei Pirenei: egli evidenziò strutture poco contrastate e allungate in direzione est-ovest, ma non vere e proprie bande chiare e scure. Altri osservatori, invece, segnalano proprio una struttura a bande. Tutte le riprese fotografiche si rivelarono deludenti, anche se ottenute con i maggiori telescopi del mondo.

Ciononostante, prima dell'arrivo del Voyager 2 si era riusciti a "strappare" qualche segreto al debole e lontano pianeta. Oltre alle dimensioni, misurabili direttamente al telescopio, si conoscevano con una certa approssimazione il periodo di rotazione, l'inclinazione dell'asse polare, la massa e i principali costituenti dell'atmosfera. Il periodo di rotazione era stato determinato da misure dello spostamento Doppler delle linee spettrali dei bordi del disco, uno in avvicinamento e l'altro in allontanamento, ma le stime presentavano ampi margini di errore. La composizione atmosferica invece era stata desunta soprattutto attraverso gli spettri di emissione e di assorbimento (lo spettro di assorbimento della luce solare riflessa fornisce la prova della presenza e dell'abbondanza dei diversi gas; lo spettro di emissione, invece, mette in evidenza l'emissione termica propria del pianeta). Dal punto di vista storico, ricordiamo qui che le righe in assorbimento dello spettro di Urano furono osservate per la prima volta da Padre Angelo Secchi nel 1869, ma solo nel 1932 Rupert Wildt suggerì che alcune di esse fossero dovute al metano. L'analisi spettrale aveva infatti indicato che idrogeno ed elio erano i principali elementi costituenti, ma non aveva permesso di stimarne le abbondanze relative, mentre dovevano esserci anche tracce di idrocarburi, in particolare il metano.

Il 26-27 marzo 1970, nell'ambito del progetto *Stratoscope II*, Urano venne fotografato da un telescopio riflettore di 36 pollici (circa 91,4 cm) di diametro installato su un pallone aerostatico che fu innalzato fino alla quota stratosferica di 24 mila metri, per riprendere immagini ad alta definizione del pianeta. Nonostante la risoluzione raggiunta (0,15 secondi d'arco, il diametro di una moneta da 1 euro alla distanza di 550 metri), dieci volte migliore di quella che si poteva avere con un telescopio di base al suolo, l'immagine finale, ottenuta fondendo insieme per mezzo di un calcolatore 17 singole fotografie, non mostrò dettagli visibili sul disco, fatta eccezione per una debole banda scura che si proiettava parallela all'equatore nell'emisfero sud. Inizialmente predominò l'ipotesi che si trattasse di una struttura atmosferica. Quando però, sette anni dopo, si scoprì che Urano aveva una fascia di anelli, l'interpretazione cambiò e ci si accorse che il 26 marzo 1970 l'inclinazione dell'asse polare di Urano rispetto alla Terra era tale che l'anello doveva proiettarsi sul disco esattamente nella posizione della banda scura incriminata. Da questo scaturì che eventuali fasce o altre caratteristiche non avrebbero potuto avere un contrasto superiore al 5%,

altrimenti sarebbero state rilevate dall'apparecchiatura. Non deve dunque sorprendere che gran parte delle informazioni oggi disponibili su Urano siano state acquisite dalla sonda Voyager 2 durante il suo storico sorvolo del gennaio 1986.

L'ATMOSFERA

La prima sorpresa dell'incontro della sonda Voyager 2, nel gennaio del 1986, fu dovuto all'atmosfera di Urano. Fin dalle prime immagini inviate a Terra, essa appariva priva di dettagli: scrutare Urano era come guardare un oceano senza fondo. Ci si aspettava di ricevere dalla sonda immagini simili a quelle di Giove e Saturno, anche in considerazione del fatto che alcuni osservatori visuali avevano delineato il disco del pianeta attraversato da fasce. Invece, alle telecamere del Voyager 2 apparve una sfera con una tinta azzurrino-verdastra quasi completamente uniforme, simile ad una palla da biliardo. La mancanza di dettagli nell'atmosfera persistette fino a una settimana prima del massimo avvicinamento; poi, grazie a un trattamento delle immagini, nelle regioni equatoriali furono trovate nubi e altre formazioni. Si scoprì uno strato nebbioso composto prevalentemente da cristalli derivati dall'acetilene (C_2H_2) e da goccioline di altri idrocarburi, circondanti lo strato nuvoloso più denso e più interno. Con la tecnica delle immagini a falsi colori si notò anche come la densità delle brine diminuisse progressivamente andando dal polo verso l'equatore. Si capì che erano proprio la nebbia e le nubi di metano a dare al pianeta un aspetto soffuso, e a nascondere alla vista l'atmosfera inferiore. Fu inoltre confermato che era il metano gassoso ad assorbire selettivamente le lunghezze d'onda della luce solare corrispondenti ai colori arancione e rosso, dando al pianeta il suo pallido colore azzurro-verdognolo.

Il primo problema risolto dal Voyager 2 riguardò la composizione dell'atmosfera, e in particolare la percentuale di elio presente. Come Giove e Saturno, infatti, anche Urano possiede un'atmosfera composta prevalentemente di idrogeno molecolare (H_2) ed elio (He), e l'incertezza maggiore risiedeva proprio nell'abbondanza di quest'ultimo elemento. Alcune osservazioni da terra avevano sorprendentemente indicato un valore del 40%, ciò che avrebbe completamente messo in discussione le idee attuali sulla formazione degli interni planetari. Fortunatamente, i risultati del Voyager portarono l'abbondanza di elio verso valori normali: oggi sappiamo che l'atmosfera di Urano è costituita per l'83% da idrogeno molecolare, per il 15% da elio e per la restante parte da metano e altri composti minori, in sostanziale accordo con quanto registrato su Giove e Saturno. Il rapporto tra la massa dell'He e quella dell' H_2 è pari a $0,26 \pm 0,05$, molto vicino a quello solare ($0,28 \pm 0,01$), e induce a pensare che per Urano non siano all'opera i meccanismi di impoverimento dell'elio attivi su Giove e Saturno. Nell'alta atmosfera del pianeta non è stata inoltre osservata l'ammoniaca: probabilmente le basse temperature prevalenti, anche inferiori a $-200^\circ C$, fanno sì che le nubi di ammoniaca e quelle dei composti dello zolfo si trovino molto più in profondità che su Giove o Saturno; la luce diffusa dalla massa di gas sovrastante e dallo smog di idrocarburi (creato a grandi altezze dalla dissociazione del metano da parte dei raggi ultravioletti solari) rende di fatto invisibili le nubi più basse. Non è invece chiaro perché le stesse nubi di metano, relativamente alte, abbiano presentato perfino agli occhi elettronici del Voyager 2 così pochi dettagli (teoricamente, le righe di assorbimento del metano si collocano a 886, 725,8, 619,1 e 544,4 nm).

Solo con la tecnica dei falsi colori, infatti, fu possibile individuare alcune formazioni nuvolose. Una di queste, situata a 27° dall'equatore, dimostrò un periodo di rotazione di 16,9 ore; un'altra, 13° più vicina al polo, ne impiegava 16,0. Queste furono le prime misure sicure della rotazione dell'atmosfera di Urano, in accordo con quelle precedenti stabilite dalla Terra. Le variazioni di potenza nell'emissione radio del pianeta indicarono tuttavia che il campo magnetico ruotava con un periodo più lungo, stimato in 17,24 ore. E siccome lo stesso campo magnetico era certamente associato al nucleo o al mantello del pianeta, rivelandone quindi il moto dell'interno profondo, fu quest'ultimo valore ad essere preso ufficialmente come periodo di rotazione.

L'atmosfera di Urano è molto estesa, e si valuta rappresenti il 30% del raggio totale del pianeta. Essa dovrebbe sovrastare un oceano di acqua, ammoniaca e metano sottoposto a pressioni e temperature molto elevate, rispettivamente di 200.000 atmosfere e circa 2500 K. La natura dell'interno non è stata evidentemente accertata, ma esistono vari studi teorici al riguardo. Uno dei modelli più accreditati fino al 1986 prevedeva che sia Urano che Nettuno fossero formati da tre

strati sovrapposti, ognuno dei quali con una composizione chimica estremamente diversa. Per Urano si supposeva la presenza di un nucleo solido “roccioso” di circa 7500 km di raggio costituito da un amalgama di elementi pesanti quali silicio e ferro. La densità media di Urano è di poco inferiore a quella di Giove, ma la sua massa è ben 22 volte minore, quindi troppo scarsa per permettere l’esistenza di uno strato interno di idrogeno metallico liquido, che invece è stato appunto teorizzato per Giove e Saturno. Si supposeva così che il nucleo di Urano fosse circondato da un mantello liquido spesso circa 10.500 km (il cosiddetto “oceano”), composto in profondità da idrogeno molecolare, elio e ammoniaca, poi da acqua ghiacciata, ammoniaca e metano, a sua volta involupato da un’atmosfera gassosa a bassa densità formata principalmente da idrogeno ed elio, estesa per circa 7600 km. Per Nettuno, leggermente più piccolo ma di poco più denso, variavano solo le estensioni dei tre strati, ma secondo questo modello le pressioni interne dei due pianeti dovevano essere molto simili, nell’ordine dei 20 megabar, cioè circa 20 milioni di volte la pressione atmosferica terrestre, con temperature centrali di circa 7000 K.

Dopo l’incontro ravvicinato della sonda Voyager 2, tuttavia, i dati suggerirono un modello a due strati, con un’atmosfera superdensa composta da gas e ghiacci, tenuta allo stato liquido da altissime temperature e pressioni, e un nucleo molto esteso composto da roccia e ghiacci. Più accurate analisi dei dati e diverse prove di laboratorio portarono poi, nei primi anni ’90, a teorizzare un modello ancora più semplificato. Un gruppo scientifico guidato da William B. Hubbard (Università dell’Arizona) sottopose in laboratorio una miscela di acqua, ammoniaca e isopropanolo a una pressione di 2 milioni di atmosfere, trovando che questa corrispondeva meglio ai profili interni di Urano e Nettuno di quanto non si ottenesse ipotizzando la presenza di un nucleo roccioso. Di conseguenza, stando a questi risultati i due pianeti sarebbero in larga parte indifferenziati, come se fossero formati da un ammasso di miliardi di frammenti cometari costituenti un unico strato.

Nel 1997 il satellite europeo per astronomia infrarossa ISO (*Infrared Space Observatory*) esaminò le atmosfere dei quattro pianeti giganti del Sistema Solare. Scopo della ricerca era quello di identificare nella regione spettrale del medio e lontano infrarosso, compresa tra 7 e 45 micrometri, le righe di emissione caratteristiche dell’acqua. Purtroppo, nel caso di Giove non fu possibile effettuare le misure a causa dell’eccessiva luminosità del pianeta. Il risultato fu comunque positivo: venne rilevata la presenza di vapore acqueo nelle stratosfere di Saturno, Urano e Nettuno, seppure a concentrazioni (20 parti per miliardo) migliaia di volte inferiori a quelle terrestri. Tuttavia, anche se apparentemente molto basso, questo valore risulta di fatto troppo elevato per poter essere originato dalle regioni più interne degli stessi pianeti. Ne consegue dunque che buona parte dell’acqua osservata deve provenire dall’esterno, forse portata dall’erosione del materiale ghiacciato che forma gli anelli e i satelliti, per il continuo bombardamento di micrometeoriti. Le osservazioni di ISO mostrarono inoltre che su Urano l’anidride carbonica (CO₂) è presente solo in tracce, a differenza di quanto accade su Saturno e Nettuno dove questo composto è relativamente abbondante; ciò può essere spiegato notando che su Urano è molto scarso anche il monossido di carbonio (CO), presumibilmente responsabile della formazione del CO₂.

Ma non è tutto: stando ai risultati di studi ed esperimenti condotti da un gruppo di ricercatori dell’Università della California (Berkeley), all’interno di Urano e Nettuno potrebbero verificarsi vere e proprie “piogge” di minuscoli diamanti. Secondo i modelli teorici correnti, questi due pianeti giganti, al di sotto dell’atmosfera esterna di idrogeno ed elio, dovrebbero infatti contenere una quantità di metano compresa tra il 10 e il 15% della loro massa e che, alle altissime temperature e pressioni presenti al loro interno, potrebbe dissociarsi trasformando il suo carbonio in diamanti. Anche Giove e Saturno, sebbene meno ricchi di metano, potrebbero contenere diamanti prodotti in condizioni analoghe. Le alte temperature dissociano la molecola di metano (CH₄) nei suoi costituenti, carbonio e idrogeno, mentre le altissime pressioni fanno condensare gli atomi di carbonio in varie strutture tra le quali quella del diamante. Gli altri tipi di idrocarburi, invece, si formerebbero con ogni probabilità in zone più fredde e sottoposte a minor pressione. La formazione di diamanti all’interno dei pianeti giganti potrebbe avere un ruolo chiave nel ciclo chimico del loro

interno, dunque potrebbe essere un elemento importante per capire la loro evoluzione passata e presente.

Un dato di fatto è che il nuovo modello di atmosfera scaturito dagli esperimenti di laboratorio e dalle recenti osservazioni si dimostra nettamente migliore rispetto al precedente, che del resto non riusciva a giustificare un importante fenomeno che differenzia Urano e Nettuno. Infatti, mentre Urano irradia nello spazio praticamente la stessa energia che riceve dal Sole, Nettuno emette nell'infrarosso 2,6 volte l'energia assorbita dalla luce solare, in analogia con quanto osservato anche su Giove e Saturno. Questa differenza di emissione ha come conseguenza che entrambi i pianeti hanno una temperatura media molto simile (58-59 K), nonostante la maggiore distanza dal Sole di Nettuno. La sorgente dell'energia extra di quest'ultimo è presumibilmente da ricercarsi nell'interno caldo del pianeta, che non si è ancora liberato del calore prodotto per compressione durante la sua formazione.

Secondo le ipotesi correnti, l'energia emessa in eccesso dai giganti gassosi è dovuta al processo di contrazione gravitazionale dei loro nuclei. Non v'è ragione di pensare che per Urano non sia la stessa cosa, quindi per spiegare il suo comportamento anomalo sono state proposte alcune ipotesi che qui riassumiamo:

1. Il comportamento di Urano sarebbe imputabile al fatto che su di esso la variazione di temperatura con la quota non è tale da innescare moti convettivi nell'alta atmosfera. Nettuno, con una temperatura alla sommità del guscio opaco alla radiazione infrarossa di poco più rigida, non avrebbe ancora raggiunto questo stadio, ed è tuttora interessato da un vigoroso rimescolamento convettivo.
2. Se Urano ha una sorgente interna di calore, essa non è stata ancora individuata, e nell'eventualità che esistesse dovrebbe comunque essere molto più debole di quelle di Giove e Saturno.
3. L'abbondanza di elio nell'atmosfera esterna del pianeta è considerevolmente maggiore di quella nell'involucro esterno di Saturno, e questo indica che le goccioline di elio non piovono su Urano come invece avviene su Saturno, in accordo col debole calore interno del primo. La convezione profonda nell'atmosfera di Urano probabilmente limita l'accesso al calore interno prodottosi ai tempi della sua formazione, formando una sorta di strato isolante.
4. Il relativo surriscaldamento dei poli di Urano avrebbe generato un'instabilità nelle regioni interne del pianeta, che a sua volta avrebbe reso più attivo il trasferimento del calore dalle zone interne verso la superficie. Questa maggiore efficienza nel trasporto di energia verso l'esterno sarebbe stata la causa della rapida dissipazione del calore che originariamente era presente nelle zone interne di Urano. Al contrario, gli altri tre pianeti giganti non avrebbero sviluppato questa instabilità a causa del diverso posizionamento dei loro assi di rotazione: come conseguenza mantengono ancora parte del calore originario, che continuano a dissipare nello spazio.

Quest'ultima ipotesi, proposta dai due planetologi americani Richard Holme (*Harvard University*) e Andrew Ingersoll (*California Institute of Technology*), è attualmente ritenuta la più convincente.

Su Urano la temperatura atmosferica diminuisce con l'altezza fino a raggiungere un minimo di circa 58 K (pari a -215°C) ad una quota corrispondente alla pressione di 0,1 bar; poi rimane quasi costante. Alle basse temperature che dominano nei pressi dello strato atmosferico superiore, il gas metano congela e forma uno strato di nubi; qui si formano anche particelle di nebbia, a causa dell'azione della luce solare ultravioletta sullo stesso metano. Più in basso nell'atmosfera si formano nubi di ammoniaca e acqua, che difficilmente si lasciano scorgere.

Le nubi di metano si formano dove la pressione atmosferica è circa pari a quella terrestre al livello del mare (1 bar). A questo livello di riferimento, il raggio equatoriale del pianeta risulta di 25.559 km e la temperatura è quella minima: 58 K; inoltre qui sia Urano che Nettuno presentano delle piccole regioni con temperature di 2-3 K inferiori rispetto alle masse di gas circostanti e localizzate

alle medie latitudini di entrambi gli emisferi. Poiché una spiegazione del fenomeno in termini di riscaldamento differenziale o variazione locale di albedo non appare plausibile, deve trattarsi di aree caratterizzate da movimenti di risalita dal basso di masse d'aria che si raffreddano espandendosi rapidamente. Venticinque chilometri al di sotto del livello zero, la temperatura atmosferica sale a 100 K e la pressione è di quasi 2 atmosfere, mentre 25 km al di sopra la temperatura resta di 58 K. A quell'altezza la pressione diminuisce da circa 1 atmosfera a 0,2 atmosfere. 175 km sopra il livello di riferimento la temperatura di Urano è ancora di 58 K e la pressione di circa un millesimo di atmosfera, mentre a 200 km di altezza la temperatura risale fino a circa 150 K e la pressione scende a mezzo millesimo di atmosfera. In definitiva, a pressioni superiori a 1/100 di atmosfera i profili verticali di temperatura in funzione della quota sono quasi identici per Urano e Nettuno, anche se quest'ultimo è molto più lontano dal Sole. L'apparente paradosso può essere spiegato proprio dalle misure infrarosse ottenute dal Voyager 2, che prevedono per Nettuno una sorgente interna di energia termica tutt'altro che trascurabile. Anzi, si osserva che a pressioni inferiori a 1/100 di atmosfera Nettuno è addirittura più caldo di Urano, forse perché lo strato assorbente di idrocarburi è più spesso e l'abbondanza di metano stratosferico più elevata (anche se il motivo di ciò è sconosciuto).

Quando la sonda Voyager 2 oltrepassò il pianeta, il 24 gennaio 1986, diverse striature furono scoperte nel suo strato di nubi altrimenti indifferenziato. Accurate mappe dei movimenti di queste striature permisero di determinare la velocità e la latitudine dei venti, così come era avvenuto per Giove e Saturno. Prima del Voyager 2, i meteorologi erano certi che l'inconsueta inclinazione di Urano avrebbe dato origine a condizioni atmosferiche particolari e forti venti. Ci si aspettava in particolare che il polo sud sarebbe risultato il luogo più caldo del pianeta, poiché all'epoca dell'incontro era orientato quasi esattamente verso il Sole. Ci si attendeva altresì che questo desse origine ad un forte gradiente termico, causa di impetuosi venti longitudinali nella direzione nord-sud. Sorprendentemente, la sonda misurò non solo una piccola differenza di temperatura longitudinale, ma anche che il polo nord, situato nell'emisfero buio, era più caldo, pur se solo di 1 K. Ciò può essere giustificato dalle basse temperature in gioco e da complessi movimenti atmosferici che fanno di Urano una perfetta macchina termica: evidentemente la circolazione atmosferica distribuiva il calore dell'emisfero illuminato a tutto il pianeta. Inoltre, a dispetto delle attese, le sottili nubi osservate dal Voyager si muovevano parallelamente all'equatore così come avviene negli altri pianeti giganti, e l'inevitabile conclusione fu che su Urano i venti dominanti soffiano nella direzione dei paralleli: alle medie latitudini hanno velocità prossime a 180 m/s (circa 650 km/h) nella direzione di rotazione del pianeta, verso est, mentre a latitudini più vicine all'equatore essi soffiano in senso opposto a quello di rotazione, verso ovest, con velocità fino a 100 m/s (360 km/h). I dati del Voyager 2 su tali correnti coprono l'intervallo da 25 a 41 gradi di latitudine sud e un solo punto a 71° sud; nessuna misura di velocità è disponibile per l'emisfero nord perché non era illuminato all'epoca dell'incontro.

Dunque su Urano le nubi equatoriali tendono a rimanere indietro rispetto alla rotazione dell'interno, così come avviene sulla Terra. Benché il Sole debba fornire la maggior parte dell'energia termica che riscalda l'atmosfera esterna e ne provoca la circolazione, esso non influisce sull'andamento della stessa circolazione: l'andamento meteorologico è invece determinato principalmente dagli effetti della rotazione del pianeta (Giove e Saturno hanno una circolazione zonale simmetrica intorno all'asse di rotazione, che è poco inclinato rispetto alla perpendicolare dell'orbita, ma possiedono anche considerevoli sorgenti interne di calore).

Al di sopra delle nubi c'è un'atmosfera più calda, formata principalmente da molecole d'idrogeno, con una certa quantità di idrogeno atomico e di elio. Le osservazioni delle emissioni ultraviolette dell'idrogeno indicano che una densa corona di questo elemento si estende per migliaia di chilometri al di sopra delle nubi visibili, fino agli anelli: Urano ha una densità media piuttosto scarsa, e il gas atmosferico è caldo a sufficienza da far sì che l'idrogeno possa sfuggire all'attrazione gravitazionale del pianeta, perdendosi di conseguenza nello spazio. I più massicci Giove e Saturno trattengono invece le loro atmosfere di idrogeno nei pressi della sommità delle

nubi, così come il più remoto e freddo pianeta Nettuno. La sonda ha osservato inoltre una luminescenza proveniente da circa 1500 km al di sopra degli strati più alti dell'atmosfera, dalla parte illuminata del pianeta: per questo essa fu chiamata *dayglow*. Si suppone che questa sorta di "splendore diurno" sia prodotto dagli elettroni generati dalla fotodissociazione dell'idrogeno nell'atmosfera, accelerati da qualche meccanismo associato alla rotazione di Urano ed alla orientazione del suo asse magnetico.

LE OSSERVAZIONI DEL TELESCOPIO SPAZIALE

Il telescopio spaziale “Hubble” (HST), messo in orbita dalla NASA nell’aprile del 1990, dovette attendere qualche anno prima di poter scrutare distintamente i pianeti più esterni del Sistema Solare: il grave difetto di aberrazione sferica di cui soffriva il suo specchio principale impediva di fatto il raggiungimento della risoluzione ottimale necessaria per distinguere particolari su oggetti angolarmente poco estesi. Ma dopo la correzione delle ottiche, avvenuta sul finire del 1993, HST fu finalmente pronto per osservare con successo i pianeti giganti. Così il 14 agosto 1994, sotto la guida di Ken Seidelmann (*U.S. Naval Observatory*), la *Wide Field Planetary Camera 2* (WFPC2) del telescopio spaziale fu puntata per 7 ore su Urano, che allora si trovava a 2,8 miliardi di km di distanza, col Sole inclinato di 35° rispetto al polo sud. Con pose distanziate di 6 minuti furono per la prima volta ripresi, nel visibile, i movimenti di cinque dei 10 piccoli satelliti scoperti dal Voyager 2, permettendo anzitutto di misurare con maggiore accuratezza le loro orbite eliminando i piccoli errori rimasti dopo i calcoli compiuti con le immagini della sonda. Inoltre, la loro ripetuta osservazione permise di iniziare anche uno studio sulla composizione mineralogica, attraverso la valutazione della luminosità in quattro colori, aiutando a migliorare la conoscenza dell’origine delle lune e a capire come il sistema uraniano si sia evoluto dopo la formazione dei pianeti. Uno studio analogo fu pure condotto sugli 11 anelli, i più compatti dei quali furono perfettamente risolti sia per quanto riguarda la forma che per le variazioni di luminosità.

Non meno importante fu il lavoro effettuato sull’emisfero australe del pianeta, con un filtro centrato nell’infrarosso vicino. Si ripresentò, molto evidente, la cappa polare di smog d’alta quota prodotta quasi certamente dalla prolungata azione fotochimica della radiazione solare sul metano di cui è ricca l’atmosfera del pianeta. L’inclinazione del Sole era cambiata rispetto al 1986 e si era fatta più radente, così da favorire la visibilità delle formazioni atmosferiche più elevate; infatti, a -30° e -35° di latitudine, HST individuò la presenza di due nubi d’alta quota, estese per 4300 e 3100 km rispettivamente, assenti all’epoca del Voyager 2 e ruotanti attorno al polo con un periodo quasi coincidente con quello del pianeta (17,2 ore). Non si trovò invece traccia della macchia scura scoperta un anno prima; in realtà, osservando anche Nettuno, ci si rese poi conto che queste formazioni cicloniche sono abbastanza comuni sui due pianeti, ed hanno un carattere temporaneo.

Dopo questo primo “assaggio”, anche successivamente il telescopio spaziale fu in grado di strappare qualche altro segreto all’atmosfera del lontano Urano. Autore della seconda fase delle osservazioni fu Erich Karkoschka del *Lunar and Planetary Lab* dell’Università dell’Arizona. Egli utilizzò HST in tre occasioni, nel 1996, 1997 e 1998, per acquisire immagini del pianeta nell’infrarosso. Facendo un confronto con le riprese effettuate dieci anni prima dalla sonda americana Voyager 2, ci si rende conto delle numerose differenze, date dalla diversità degli strumenti impiegati. Anzitutto, quelle immagini erano state prese in luce bianca e non nell’infrarosso; inoltre, esse mostravano un’atmosfera di colore verde-azzurro uniforme senza alcun dettaglio. Guardando invece nell’infrarosso con le capacità di HST e con i suoi dispositivi più recenti, il risultato è indubbiamente diverso. Il 24 aprile 1996, combinando tre pose effettuate con filtri differenti, furono evidenziate altrettante zone sul disco di Urano. Il gioco combinato delle riflessioni della luce solare e degli assorbimenti selettivi operati dagli strati atmosferici più profondi fa sì che la scala dei colori si presti ad essere interpretata anche come una scala delle quote. Così furono individuati un sottile guscio di foschia d’alta quota, di un colore rosato dovuto all’idrogeno, che circonda tutto il pianeta; un secondo strato nebbioso, di colore verde-giallastro, centrato attorno al polo sud ed esteso fino a medie latitudini; infine una zona equatoriale più “chiara” e relativamente sgombra da nebbie, di colore blu, in cui si possono intravedere nubi più profonde.

Il 20 novembre 1997, utilizzando la camera infrarossa NICMOS del telescopio spaziale, furono prese due immagini a 90 minuti di distanza l’una dall’altra. Ottenute attraverso tre filtri che selezionano bande diverse nell’infrarosso vicino (fino a circa 2 micrometri), furono poi sovrapposte. L’elaborazione in falsi colori mise in evidenza cinque distinte formazioni nuvolose,

delle dimensioni paragonabili a un continente come l'Europa, che ruotavano in senso antiorario nell'alta atmosfera di Urano, distribuite in fila indiana nel senso dei paralleli. Un'altra nube, molto tenue e un poco più profonda, si muoveva a sud dell'equatore. Strutture di tale contrasto non erano mai state viste prima di allora, e i dettagli rilevati sulla superficie vennero utilizzati dagli astronomi per calcolare il periodo di rotazione alle diverse latitudini. Fu anche impressionato il complesso sistema di anelli, estremamente debole se osservato in luce visibile, e l'area perimetrale al di là degli anelli fu ulteriormente elaborata ed amplificata per evidenziare 8 dei 10 deboli satelliti scoperti dal Voyager 2, le cui dimensioni variano da circa 40 a 160 km.

Ma i risultati più soddisfacenti provennero dalle immagini prese l'8 agosto 1998 sempre con la camera NICMOS in luce infrarossa: in quella occasione HST fotografò addirittura una ventina di nubi (in un colpo solo più di tutte quelle mai osservate sul pianeta), tra le quali la più brillante aveva una velocità di migrazione di 500 km/h. Come al solito il telescopio spaziale mise in evidenza i tre principali strati atmosferici già scoperti negli anni precedenti (nubi profonde, nebbie e formazioni nuvolose di alta quota), oltre agli anelli e a ben 10 satelliti. La presenza di queste strutture nell'alta atmosfera di Urano fa sospettare che l'aspetto del pianeta non sia sempre uniforme e che possano esserci variazioni stagionali; di qui la necessità di ulteriori riscontri osservativi.

IL CAMPO MAGNETICO

Solo grazie alle sonde spaziali è stato possibile scoprire il campo magnetico di Urano. Prima delle misure del Voyager 2 lo spettro dei valori pronosticati per un possibile campo magnetico uraniano spaziava per ben sei ordini di grandezza. Il sospetto che esistesse un campo planetario molto forte aveva preso consistenza nel 1982 dopo che tre gruppi di ricercatori avevano osservato, indipendentemente l'uno dall'altro, forti emissioni ultraviolette con i rivelatori a bordo del satellite astronomico *International Ultraviolet Explorer* (IUE). Molto intensa era soprattutto la riga Lyman-alfa situata nel lontano ultravioletto alla lunghezza d'onda di 1216 Å e dovuta ai fotoni emessi dagli atomi di idrogeno neutro: la circostanza faceva propendere verso l'idea che sul pianeta avesse avuto luogo un'aurora polare del tutto simile a quelle che si sviluppano nell'alta atmosfera terrestre o a quelle osservate dai Voyager negli altri pianeti "magnetici", Giove e Saturno.

In un'aurora, la causa scatenante è l'impatto del vento solare sulla magnetosfera che avvolge il pianeta. Gli elettroni che ristagnano nelle cosiddette fasce di radiazione, lì intrappolati dal campo magnetico, vengono accelerati da queste perturbazioni e convogliati lungo le linee di forza verso i poli magnetici. Precipitando sul pianeta, eccitano le molecole dell'atmosfera che rispondono emettendo luce, disegnando in cielo quei fantastici "drappaggi" tenuamente colorati che rischiarano le notti polari. Qui sulla Terra i colori delle aurore sono i più vari e quasi sempre è presente una riga verde dell'ossigeno; su Urano e sugli altri pianeti giganti, dove l'atmosfera è ricca di idrogeno, non fa meraviglia che la riga Lyman-alfa ultravioletta sia tanto intensa.

Nel 1986 la sonda Voyager 2 incrociò la soglia del campo magnetico di Urano a una distanza di circa 467.000 chilometri dal centro del pianeta, meno di 8 ore prima del massimo avvicinamento. Misurò un campo mediamente più intenso di 48 volte rispetto a quello terrestre, benché alla "superficie", dato il maggiore raggio, esso risultasse leggermente più debole del nostro (l'intensità all'equatore magnetico è di 0,25 gauss, paragonabile a quella della Terra e di Saturno, ma molto inferiore a quella di Giove). La cosa più straordinaria, tuttavia, è che l'asse magnetico di Urano è inclinato di ben 58°,6 rispetto all'asse di rotazione, per cui i poli magnetici sono più vicini all'equatore che non ai poli geografici; un po' come se sulla Terra il polo nord magnetico fosse a Il Cairo e quello sud a Brisbane, in Australia: è facile intuire che la navigazione a bussola sarebbe altamente sconsigliabile, su un pianeta così! Come se non bastasse, dai rilievi del Voyager 2 risultò che l'asse magnetico di Urano passava a 7700 km dal centro del pianeta, a circa 1/3 del raggio, spostato verso il polo di rotazione nord (all'epoca dell'incontro quello in ombra). Per confronto, l'asse del dipolo magnetico terrestre è inclinato di soli 11°,7 ed è decentrato di 1/14 del raggio.

Sorpresi dall'inattesa scoperta, gli scienziati cercarono dapprima di interpretare lo strano campo magnetico come una coincidenza fortuita: forse Voyager 2 era arrivato proprio in un momento in cui il campo si stava invertendo, evento che si è verificato ripetutamente anche sul nostro pianeta; oppure la ragione andava ricercata nella peculiare orientazione dell'asse di rotazione di Urano, praticamente adagiato sul piano orbitale. Quando però, tre anni e mezzo dopo, la sonda sorvolò Nettuno trovando caratteristiche simili anche per l'ultimo dei pianeti giganti, ci si rese conto che occorrevo spiegazioni più solide e convincenti.

La presenza di un campo magnetico planetario è importante perché può aiutare a capire la struttura interna del pianeta stesso. Per possedere un campo magnetico, secondo le vedute attuali, un pianeta deve rispettare le seguenti condizioni:

1. All'interno del pianeta deve esistere una regione fluida;
2. La regione fluida deve essere conduttrice;
3. Deve esistere una sorgente di energia che instauri e mantenga delle correnti all'interno del fluido.

Responsabile del campo magnetico di Urano, dunque, non dovrebbe essere il nucleo roccioso caldo, ma una regione meno densa circostante, composta principalmente da acqua e ammoniacca. Sotto alta pressione, infatti, le molecole di tali sostanze si dissociano in ioni elettricamente carichi, e correnti generate da questo “mare” di fluido ionizzato dovrebbero poter produrre un campo magnetico del tipo osservato. Le due peculiarità di Urano, vale a dire l’inclinazione dell’asse di rotazione, quasi giacente nel piano dell’orbita, e l’angolo molto aperto fra i due assi magnetico e di rotazione, sono quasi certamente collegate: è possibile che il campo magnetico di Urano sia in parte di origine fossile e in parte di origine interna. Esso sarebbe, cioè, sia un residuo del campo magnetico presente nella nebulosa da cui si è formato il Sistema Solare, con l’asse orientato perpendicolarmente al piano dell’orbita, sia il risultato dell’effetto dinamo, con l’asse più o meno coincidente con l’asse di rotazione. La situazione attuale ne sarebbe dunque la risultante, con un’inclinazione intermedia dell’asse del campo magnetico.

Poiché, come nel caso di tutti gli altri pianeti dotati di campo magnetico, l’asse magnetico di Urano è pressoché perpendicolare al piano dell’eclittica, la sua magnetosfera non presenta proprietà particolari. Tuttavia, a causa della rotazione del pianeta, la coda della magnetosfera si attorciglia nel piano dell’orbita: tutti i satelliti e gli anelli passano attraverso il campo magnetico che ruota con lo stesso periodo del pianeta. Anche l’ambiente circumuraniano è interessato da plasma interplanetario, la cui temperatura è dell’ordine dei 500 milioni di gradi (in questo caso, vista l’estrema rarefazione della materia, la temperatura è indice solamente della velocità di agitazione ovvero dell’energia cinetica delle particelle, e non certo di una condizione di calore media). Le fasce di radiazione di Urano sono intense al punto tale che in soli 100.000 anni possono decomporre una superficie di metano ghiacciato rendendola scura grazie alla formazione di una pellicola di carbonio. Le particelle ad alta energia, cioè elettroni e protoni presenti nel plasma della magnetosfera (mancano ioni più pesanti, probabilmente assorbiti dalle superfici dei satelliti), determinano così l’annerimento della materia organica sulle superfici ghiacciate delle lune, che appaiono molto scure all’osservazione diretta.

GLI ANELLI

Gli astronomi planetari da tempo applicano allo studio dei corpi del Sistema Solare così lontani o di luminosità così debole da risultare inaccessibili all'osservazione diretta al telescopio, un metodo di studio originale e indiretto. È il metodo delle *occultazioni stellari*: quando un corpo, nel suo moto orbitale, passa davanti a una stella abbastanza luminosa, ne intercetta la luce, cosicché basta tenere sotto controllo la luminosità totale della stella e del corpo "occultante" in funzione del tempo per ricavare informazioni preziose sul moto e sulla struttura di quest'ultimo.

Sulla base di previsioni astrometriche fatte calcolando la posizione di Urano rispetto alle stelle fisse, era stato trovato che il 10 marzo 1977, osservando il pianeta dall'emisfero meridionale della Terra, questo sarebbe passato davanti a una stella di magnitudine 8,9 (denominata SAO 158687, dal catalogo che ne fornisce i dati) situata nella costellazione della Bilancia, occultandola agli occhi degli osservatori: si trattava cioè di un'eclisse della stella da parte di Urano. Le occasioni di osservare questi fenomeni sono abbastanza rare e rivestono grande interesse soprattutto nello studio dei pianeti più lontani: infatti, prima di essere eclissata dal pianeta, la luce della stella passa attraverso le regioni più rarefatte dell'atmosfera planetaria e viene modificata per effetto dell'assorbimento da parte dei suoi costituenti. A seconda delle lunghezze d'onda assorbite è possibile determinare la composizione chimica degli strati più esterni con una precisione molto maggiore di quella ottenibile studiando gli spettri della luce solare riflessa.

Tutto era dunque pronto, quel 10 marzo, per approfittare della situazione favorevole che si sarebbe presentata. Lo scopo era appunto quello di ottenere informazioni sulla temperatura e sull'atmosfera del pianeta e, come risultato collaterale, notizie accurate sul diametro e sullo schiacciamento. Quattro gruppi di osservatori si erano distribuiti lungo la fascia dalla quale l'occultazione sarebbe stata visibile: uno in Sudafrica a Città del Capo, uno a Kavalur in India, un altro a Perth in Australia, mentre il quarto gruppo di astronomi, quello della *Cornell University* guidato da James L. Elliot, pianificò le osservazioni a bordo del *Kuiper Airborne Observatory* (KAO), un cargo militare Lockheed C-141 modificato, di proprietà della NASA, attrezzato ad osservatorio volante di alta quota, oggi non più attivo. Su quest'ultimo era installato un telescopio riflettore di 91,4 cm di diametro stabilizzato per mezzo di un computer e accoppiato ad un fotometro a tre canali, molto sensibile. Le ultime previsioni indicavano che l'occultazione sarebbe stata osservabile anche dal cielo dell'Australia del Nord, ma non era precisa la determinazione del confine esatto; quindi si decise di adottare per il KAO una rotta, a 12.000 metri di quota, che fosse il più possibile a sud. Alle 20:00 (ora di Greenwich) l'osservatorio volante assunse la traiettoria migliore per l'osservazione del fenomeno e, proprio a causa dell'incertezza sull'istante esatto di scomparsa della stella, cinque minuti dopo la strumentazione fu subito attivata, cominciando a registrare una serie continua di dati sulla luce emessa da Urano e dall'astro.

Sia a bordo dell'aereo che a Perth, grande fu lo stupore quando, alle ore 20:11:43 di Tempo Universale, si registrò una brusca diminuzione nell'intensità della luce della stella, che durò alcuni secondi prima che il segnale tornasse al livello precedente. A questo evento, nei successivi dieci minuti ne seguirono altri di minore durata (pochi decimi di secondo). All'inizio si pensò che la causa di questi fenomeni fosse un guasto temporaneo delle apparecchiature, ma un'accurata osservazione della luce riflessa da Urano confermò che tutto funzionava al meglio. Qualcuno ipotizzò che si trattasse dell'effetto determinato da sottili veli di nubi, anche se improbabili alla quota di volo, ma gli strumenti di bordo indicavano che non esisteva la minima traccia di nubi all'esterno dell'aereo. Le cadute di intensità osservate erano dunque dovute a reale perdita della luce inviata dalla stella, e l'unica causa possibile restava l'occultazione dell'astro da parte di piccoli corpi associati a Urano.

Dopo circa 30 minuti Urano occultò la stella, e il fenomeno durò 25 minuti. Quando la SAO 158687 riemerse da dietro il disco del pianeta, si continuò a raccogliere dati nella speranza di osservare altre brevi occultazioni. Infatti, nell'ora successiva furono registrati cinque eventi dello stesso tipo di

quelli verificatisi prima dell'occultazione vera e propria, in posizione quasi esattamente simmetrica rispetto a questi. I lampeggiamenti dopo l'emersione della stella furono osservati anche a Città del Capo. L'impressione immediata che si ricavò dall'analisi della curva di luce fu che sia le occultazioni precedenti l'immersione sia quelle successive all'emersione fossero avvenute alla stessa distanza dal pianeta, così come erano simili ampiezza e durata delle coppie di eventi corrispondenti. In quel periodo l'asse di rotazione di Urano era orientato verso la Terra, perciò questa era la prova che il pianeta era circondato da almeno cinque sottili anelli di materiale che assorbiva la luce.

I cinque anelli furono chiamati con lettere dell'alfabeto greco: *Alfa* (α), *Beta* (β), *Gamma* (γ), *Delta* (δ) ed *Epsilon* (ϵ); solo quest'ultimo, il più periferico, sembrava possedere una struttura interna complessa e una forma non esattamente simmetrica. Un attento esame dei dati e l'osservazione di altre due occultazioni di poco successive, permisero poi di individuare la presenza di altri tre deboli anelli interni all'anello Alfa (denominati rispettivamente 6, 5 e 4) e di un nono anello tra il Beta e il Gamma, battezzato *Eta* (η). Inoltre, un'altra osservazione dell'anello Epsilon a distanza di un anno ne rivelò il peculiare comportamento dinamico: l'anello mostrava un'eccentricità dello 0,8% e una netta diversità di larghezza tra la zona più lontana dal pianeta (circa 100 km) e quella più vicina (circa 20 km). Per di più, l'intero anello sembrava precedere di 1,4 gradi al giorno attorno ad Urano quasi come un corpo rigido, ossia senza che la sua forma e la sua struttura interna mostrassero alcuna variazione.

Tra il 1977 e il 1986, anno dell'incontro tra il sistema di Urano e la sonda Voyager 2, furono osservate con successo altre 13 occultazioni stellari, la cui capacità di risoluzione spaziale, con l'affinarsi delle tecniche di misura, aveva raggiunto i 2-3 km. Tutte le osservazioni furono effettuate alla lunghezza d'onda di 2,2 micron, la zona dello spettro in cui Urano presenta la banda di assorbimento del metano più intensa, al punto che la sua albedo precipita a valori infimi (addirittura inferiori a quelli, già molto bassi, degli anelli), cosicché la sua luminosità si abbassa notevolmente rispetto a quella della stella occultata offrendo un ottimo rapporto segnale/rumore. Se le prime tre occultazioni servirono soprattutto a definire il numero degli anelli, le successive furono usate per misurare con precisione la forma e la posizione degli stessi e per studiarne la struttura interna. Anche l'astronomia infrarossa diede un contributo: una mappa della regione circostante Urano alla lunghezza d'onda di 2,2 micrometri confermò nel 1985 l'esistenza degli anelli, sebbene la risoluzione fosse molto inferiore a quella ottenibile con le occultazioni. Quando poi il Voyager 2 sorvolò il pianeta, il 24 gennaio 1986, le immagini inviate a Terra mostrarono finalmente l'aspetto degli anelli, confermandone le principali caratteristiche, cioè che si tratta di formazioni sottili, scure, dai bordi ben definiti. Il Voyager scoprì anche un decimo anello molto debole (denominato provvisoriamente 1986 U1R, poi *Lambda*) situato tra i due anelli più esterni noti in precedenza, Delta ed Epsilon; inoltre durante il passaggio della sonda nel piano degli anelli gli strumenti rivelarono l'esistenza di una debole banda diffusa (1986 U2R), larga sui 2500 km, entro l'anello 6 (il più interno), portando il totale degli anelli a 11. Sia lo spessore che l'opacità di parecchi anelli sono risultati variare con la longitudine; una proprietà poi ritrovata, in modo ancora più evidente, nel sistema di anelli di Nettuno.

Il sistema di anelli di Urano appare scheletrico se paragonato a quello di Saturno. Procedendo dall'interno verso l'esterno, incontriamo dapprima 1986 U2R, con raggio variabile da 37.000 a 39.500 km e quindi con il bordo interno a circa 11.440 km dalla "superficie" del pianeta; 6, con raggio di 41.840 km; 5, con raggio di 42.230 km; 4, situato a 42.580 km dal centro di Urano. Seguono quindi gli anelli α , β , η , γ , δ , λ ed ϵ , i raggi dei quali variano da 44.720 a 51.140 km. La larghezza totale del sistema di anelli ammonta così a 14.140 km, più della metà del raggio del pianeta.

Già dall'analisi dei dati delle sole occultazioni, procedendo in ordine di raggio orbitale crescente, gli anelli 6, 5 e 4 risultavano i più sottili (meno di 3 km di larghezza) e trasparenti. L'anello 5 mostrava un'asimmetria nella trasparenza tra punti diametralmente opposti. L'anello Alfa era

ancora più peculiare: da un lato la sua struttura appariva singola, per sdoppiarsi nell'altro in due componenti distanti sui 4 km; l'anello quindi sembrava formato da due sottoanelli con una separazione variabile. L'anello Beta, meno opaco di quello Alfa, mostrava una larghezza variabile, ma la risoluzione delle osservazioni non permetteva di distinguere chiaramente dei sottoanelli. L'anello Eta sembrava simile agli anelli 6, 5 e 4, ma in alcune curve di luce si distinguevano due componenti, una interna e molto sottile (1-2 km) e un'altra esterna, larga circa 60 km, più trasparente e "strutturata". Al contrario, gli anelli Gamma e Delta apparivano molto opachi, sottili, e dai bordi nettissimi.

L'anello Epsilon, poi, era il più opaco e complesso: le curve di luce indicavano una larghezza media sui 60 km (ma fortemente variabile lungo la sua *silhouette* ellittica) e la presenza di una ventina di componenti di diversa opacità, che sembravano permanere sia nello spazio (cioè girando intorno ad Urano) sia nel tempo (in quanto si ritrovarono inalterate in occultazioni diverse). Anche i suoi bordi erano però molto netti, con una variazione "brusca" nella densità del materiale presente a diverse distanze orbitali. Le immagini ravvicinate del Voyager 2 hanno permesso di scoprire che questa formazione, più densa ai bordi che al centro, ruota attorno al pianeta in 6300 ore; nello stesso intervallo di tempo i suoi componenti percorrono circa 750 orbite. Lo spessore ai bordi non supera i 150 metri e le componenti in queste posizioni raggiungono un diametro massimo di trenta metri, mentre quelle con dimensioni più piccole di 30 centimetri sono piuttosto rare. Gli anelli 6, 5, 4, Alfa e Beta hanno pure rivelato di essere ellittici, anche se meno dell'Epsilon (con eccentricità dell'ordine dello 0,1%); quasi tutti gli anelli hanno mostrato anche piccole inclinazioni (millesimi o centesimi di grado) rispetto al piano equatoriale di Urano.

Oltre alla diversa struttura rispetto agli anelli di Saturno, le osservazioni da Terra (confermate dal Voyager 2) hanno rivelato un'altra notevole differenza: si tratta dell'albedo delle particelle, ossia della loro capacità di riflettere la luce solare incidente. Nel caso di Urano, l'albedo è così bassa (inferiore al 5%) che se il materiale degli anelli fosse visibile direttamente, esso apparirebbe scuro come la pece. Ciò naturalmente pone dei problemi circa la sua composizione chimica: potrebbe trattarsi di particelle rocciose invece che ghiacciate, oppure di pezzi di ghiaccio ricoperti da un sottile strato di sostanze scure, ricche di polimeri del carbonio. È un enigma che accomuna le particelle degli anelli di Urano ad altri corpi "neri" formati nella zona esterna del Sistema Solare, dai nuclei di molte comete all'emisfero scuro di uno dei satelliti di Saturno, Giapeto.

I planetologi si aspettavano di ottenere le immagini più dettagliate degli anelli dopo l'incontro del Voyager 2 con il pianeta, sfruttando la luce diffusa in avanti da particelle di dimensioni microscopiche: un metodo che aveva funzionato bene per gli anelli di Giove e Saturno. Ma, nel caso di Urano, questa tecnica non diede i risultati sperati: in luce diffusa in avanti, gli anelli risultarono invisibili. Ciò significa certamente che essi contengono una quantità trascurabile di "polvere", e sono invece costituiti in gran parte da particelle di dimensioni macroscopiche. Stranamente, invece, in un'immagine finale esposta per 96 secondi con gli anelli a soli 8 gradi dal Sole (e la sonda immersa nell'ombra di Urano, in modo da non danneggiare le telecamere), si è resa chiaramente visibile una larga banda "polverosa", con una complessa struttura interna e sovrapposta agli anelli "classici". In questa immagine, che ricorda quelle dell'anello D di Saturno, gli anelli più luminosi non sono quelli visibili in luce riflessa, bensì altri situati in posizioni intermedie, a volte sottili e a volte diffusi. La conclusione che negli anelli "classici" la maggior parte del materiale deve essere concentrato in corpi grandi dalle decine di centimetri in su è stata poi confermata usando i trasmettitori radio del Voyager. Quando gli anelli si trovavano fra la Terra e la sonda, quest'ultima fece passare attraverso di essi fasci di onde radio alle lunghezze d'onda di 3,6 e 13 cm: tutti e nove gli anelli noti dalle occultazioni produssero segnali molto chiari, attenuando di molto le radioonde ricevute a Terra.

L'assenza di polvere negli anelli "classici" di Urano è un mistero, perché le collisioni casuali fra le particelle più grandi dovrebbero produrla continuamente. Una possibile spiegazione è che, una volta acquistata una carica elettrica statica grazie agli urti con gli elettroni presenti nella magnetosfera, le particelle di polvere vengano rimosse dalla forza prodotta dal campo magnetico

(rotante e fortemente inclinato) del pianeta. Ma questa ipotesi non spiega la scarsità di particelle di dimensioni millimetriche o centimetriche dedotta dalle osservazioni radio, né la presenza di anelli di polvere in posizioni diverse da quelle degli anelli “classici”.

Altri strumenti montati sulla sonda osservarono gli anelli in modo diverso da quello delle telecamere. Il fotopolarimetro di bordo del Voyager 2 ottenne le curve di luce di due stelle occultate dagli anelli grazie al moto della sonda: Nunki (*sigma* Sagittarii) ed Algol (*beta* Persei). Questi dati permisero di rivelare negli anelli strutture radiali non più larghe di qualche decina di metri; l’anello Gamma risultò largo meno di 1 km. Furono inoltre scoperti tre anelli vicini fra loro, non più larghi di qualche centinaio di metri, all’esterno dell’anello Epsilon; e particelle microscopiche sono evidentemente concentrate nel piano degli anelli anche molto più all’esterno, dato che quando il Voyager attraversò questo piano, a una distanza di oltre quattro raggi planetari dal centro di Urano, fu rilevato un chiaro “picco” nel numero di microimpatti contro la sonda.

La struttura degli anelli di Urano dedotta dalle occultazioni a partire dal 1977 aveva suggerito ai teorici Peter Goldreich (*Caltech*) e Scott Tremaine (*Princeton University*) un’idea originale sulla dinamica degli anelli: quella che le particelle costituenti ogni anello fossero “confinare” all’interno di una fascia ristretta e limitata dall’interazione con due piccoli satelliti (non direttamente osservabili da Terra, e soprannominati “pastori”) orbitanti all’interno e all’esterno degli anelli stessi. Ogni satellite, scambiando energia orbitale con l’anello, tenderebbe a “spingerlo” verso l’altro, e questo effetto repulsivo impedirebbe al materiale dell’anello di “allargarsi” e di diluirsi in una vasta regione di spazio. Una prima conferma a questa teoria giunse dalle immagini relative al sistema anulare di Saturno, dove i due piccoli satelliti-pastore Prometeo e Pandora confinano effettivamente l’anello F.

Dopo le osservazioni del Voyager, il problema di come gli anelli possano rimanere indefinitamente così sottili e mantenere in molti casi dei bordi estremamente netti è rimasto almeno parzialmente irrisolto. La teoria di Goldreich e Tremaine è stata brillantemente confermata anche per l’anello Epsilon di Urano: vicino ai suoi bordi interno ed esterno la sonda scoprì infatti due piccoli satelliti del diametro di una quarantina di chilometri, poi battezzati rispettivamente *Cordelia* ed *Ophelia*, che sembrano giocare il ruolo previsto. Ma per gli altri anelli le coppie di mini-lune previste dalla teoria non sono state individuate, forse perché troppo piccole o scure, e quindi la loro esistenza rimane incerta; anche per l’anello Epsilon (come per l’anello F di Saturno) la complessità della struttura interna rappresenta ancora un enigma. In compenso, le osservazioni del Voyager 2 e quelle successive del telescopio spaziale Hubble hanno permesso agli studiosi di meccanica celeste di stabilire che la materia degli anelli compie una rivoluzione attorno a Urano in 8 ore, e che tutto il sistema va soggetto a un moto di tipo precessionale con un periodo di circa nove mesi.

I SATELLITI DI URANO

Urano possiede un sistema di ben 21 satelliti, ed è quindi il terzo pianeta del Sistema Solare ad averne di più dopo Giove (39) e Saturno (30). Tutte le lune di Urano prendono il nome da personaggi della letteratura inglese: ad esempio, dei cinque satelliti maggiori, Oberon e Titania sono i nomi del re e della regina di elfi e fate nel *Sogno di una notte di mezza estate* di Shakespeare. All'interno delle loro orbite c'è Umbriel, dal nome di un "folletto tetro e malinconico" nel *Ricciolo rapito* di Alexander Pope. Più vicino al pianeta si trova Ariel, descritto da Shakespeare ne *La Tempesta* come "uno spirito dell'aria", e ancora più vicina è la luna Miranda, dal nome della figlia di Prospero sempre nella *Tempesta*. Oberon, Titania, Umbriel, Ariel e Miranda erano già ben noti prima della missione Voyager: i primi due furono scoperti dallo stesso Herschel alcuni anni dopo la scoperta di Urano. Altre dieci piccole lune, orbitanti nella regione tra gli anelli e l'orbita di Miranda, furono scoperte nel 1986 dalla sonda spaziale Voyager 2, e anch'esse portano i nomi di personaggi delle opere teatrali di Shakespeare. Tutti questi satelliti sono "regolari", ossia hanno orbite con piccole eccentricità ed inclinazioni rispetto al piano equatoriale di Urano (che però è quasi perpendicolare al piano dell'orbita del pianeta), una caratteristica che testimonia come essi si siano formati dopo che l'asse di rotazione del pianeta aveva già assunto l'anomala orientazione attuale, probabilmente in seguito a un gigantesco impatto avvenuto durante la sua formazione.

I cinque satelliti maggiori hanno diametri variabili fra circa 500 e 1600 km, densità comprese fra una e due volte quella dell'acqua (che testimoniano come il loro interno sia ricco non solo di ghiacci, ma anche di materiali rocciosi) e valori dell'albedo variabili tra il 18% e il 34%, notevolmente inferiori a quelli dei satelliti di Saturno (tranne Febe e l'emisfero scuro di Giapeto), e indici del fatto che sulle superfici il ghiaccio d'acqua, la cui presenza è testimoniata dagli spettri infrarossi, è mescolato in proporzioni variabili a polveri scure. I periodi di rotazione sono uguali a quelli di rivoluzione, per cui tutti e cinque volgono sempre la stessa faccia al pianeta.

Sembrava improbabile che con temperature nell'ordine di -200°C queste piccole lune di ghiaccio avessero potuto sostenere qualsivoglia attività geologica. Ma il Voyager 2 rivelò che queste aspettative erano errate. All'inizio i satelliti mostrarono solo macchie indistinte, che furono interpretate come crateri, e pochi vortici luminosi che gli scienziati attribuirono alla presenza di depositi freschi di ghiaccio lungo le spaccature superficiali. Ma con l'aumentare della risoluzione delle immagini fu chiaro che il grado di evoluzione geologica di questi satelliti era molto vario: Miranda ha una superficie estremamente complessa e ricca di strutture enigmatiche e di zone dall'aspetto assai "giovane"; Ariel e Titania hanno estesi sistemi di fratture crostali; Oberon ha crateri raggiati riempiti di materiale più scuro, mentre Umbriel ha una superficie ricoperta quasi uniformemente di crateri e dall'aspetto assai antico. Le ragioni di queste differenze non sono chiare, e misteriosa è anche la sorgente di energia termica interna che su alcuni satelliti deve aver prodotto processi geologici superficiali che si sono sovrapposti ai crateri da impatto. È interessante sottolineare come i cinque satelliti maggiori sembrano avere una diversa storia geologica. I più grandi e lontani, Oberon e Titania, non mostrano evidenza di grande attività interna; Umbriel e Ariel, di minore diametro e distanza dal pianeta, hanno una superficie che dimostra un'intensa attività tettonica; infine Miranda, il più piccolo e il più vicino al pianeta, ha una superficie che testimonia una notevole attività interna. L'aumento di attività interna dei satelliti progressivamente più vicini a Urano sta probabilmente a indicare l'aumento di fluidità del materiale di cui sono formati. Il materiale fluido potrebbe essere dovuto a inclusioni di molecole di metano nel ghiaccio e alla conseguente formazione di un composto chiamato *clatrato*, che solidifica a temperature inferiori a 100 K.

Un'altra caratteristica enigmatica è di tipo dinamico: per Miranda, Ariel ed Umbriel (i tre satelliti più interni) vale approssimativamente una relazione di risonanza analoga a quella scoperta da Laplace per i periodi orbitali dei tre satelliti gioviani Io, Europa e Ganimede. In quest'ultimo caso la risonanza "a tre corpi", che impone ai tre satelliti di muoversi con un particolare sincronismo che

li porta a ripetere periodicamente le stesse configurazioni reciproche, “costringe” l’orbita di Io a mantenere una piccola eccentricità, che a sua volta permette alle maree gioviane di riscaldare l’interno del satellite. Per i tre satelliti di Urano questo invece non si verifica, poiché la relazione di risonanza di Laplace non è rispettata esattamente, anche se i valori osservati dei periodi danno una discrepanza di meno dello 0,1%. Un’ipotesi plausibile, avanzata da diversi planetologi, è che la risonanza esatta fosse rispettata in passato, e magari abbia continuato a riscaldare Miranda e Ariel, e poi qualche processo esterno (impatti, maree, ecc.) abbia “spostato” le orbite abbastanza da renderla inefficace.

Come nel caso degli altri pianeti esterni, le immagini raccolte dalla sonda spaziale Voyager 2 hanno permesso di scoprire numerosi nuovi satelliti di Urano, di piccole dimensioni e con orbite giacenti all’interno di quelle delle lune già note. Si va da Cordelia ed Ophelia, con un diametro di una quarantina di chilometri e orbite che “bordano” dai due lati l’anello Epsilon (si tratta del meccanismo di interazione dinamica fra un anello sottile e due piccoli satelliti “pastori” già visto all’opera intorno a Saturno), a Puck, che ha un diametro di circa 160 km, una forma non lontana da quella sferica (ma punteggiata da grossi crateri) e un’albedo superficiale piuttosto bassa (0,07), simile a quella del materiale che forma gli anelli. Nulla si sa del loro periodo di rotazione, ma è molto probabile che si comportino come i cinque satelliti maggiori, con periodi di rotazione coincidenti con quelli di rivoluzione. È possibile che questi satelliti siano frammenti di uno o più corpi progenitori di maggiori dimensioni, distrutti da immani collisioni nel Sistema Solare primordiale.

Dopo l’*exploit* del Voyager 2, si dovette attendere fino al 1997 per scoprire nuovi satelliti di Urano: in quell’anno, un gruppo formato da quattro ricercatori americani e canadesi (P.D. Nicholson, J.A. Burns, B.J. Gladman e J.J. Kavelaars) utilizzò il telescopio riflettore di 200 pollici (508 cm) di Monte Palomar, in California, per mettere in luce l’esistenza di una coppia di piccoli oggetti che accompagnano il pianeta su orbite di grande raggio ed elevata inclinazione. Si trattava dei primi due satelliti irregolari di Urano, poi battezzati *Caliban* (S/1997 U1) e *Sycorax* (S/1997 U2), con dimensioni stimate rispettivamente in 96 e 190 km.

Un altro potenziale satellite di Urano fu scoperto nel 1999: E. Karkoschka, astronomo dell’Università dell’Arizona, lo individuò analizzando le immagini del Voyager 2 vecchie di 13 anni e confrontandole con recenti riprese del telescopio spaziale Hubble. Le osservazioni gli permisero di scoprire un oggetto, poi denominato *S/1986 U10*, su sette fotogrammi del Voyager. Karkoschka ha determinato che il nuovo satellite ha un diametro di circa 40 km ed orbita intorno a Urano ogni 15 ore e 18 minuti a una distanza di circa 51 mila chilometri dalle nubi più alte del pianeta. Un’orbita, questa, molto simile a quella della vicina luna Belinda, che farebbe sì che si sorpassino l’un l’altra una volta al mese. Ma su questa scoperta l’*International Astronomical Union* (IAU) ha sospeso il giudizio, in attesa di ulteriori riscontri provenienti dal telescopio Hubble.

Sempre nel 1999 sono state scoperte altre tre lune di Urano. J.J. Kavelaars (*McMaster University*), B.J. Gladman (*Observatoire de la Côte d’Azur*) ed altri avevano prima identificato una coppia di oggetti nella luce rossa di magnitudine 23 e 24, battezzati rispettivamente *Setebos* (S/1999 U1) e *Stephano* (S/1999 U2), nelle immagini provenienti dal telescopio franco-canadese-hawaiano di 3,6 m installato presso l’Osservatorio del Mauna Kea nelle isole Hawaii. M. Holman dell’*Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics*, che faceva parte del team, ha trovato in seguito un altro piccolo corpo di 23ma magnitudine, battezzato *Prospero* (S/1999 U3), nelle immagini prese con lo stesso telescopio il 18 luglio.

Infine, nel 2002 è stata annunciata la scoperta dell’ultimo satellite di Urano, battezzato provvisoriamente S/2001 U1. La nuova luna in realtà era stata osservata per la prima volta nel 2001 da un gruppo di astronomi guidato da M. Holman, con telescopi operanti nelle isole Hawaii e nel Cile, poi era stata persa di vista ed infine riosservata nell’agosto del 2002. Con un diametro stimato tra 15 e 20 km, è il più piccolo satellite fra quelli noti di Urano.

Poco o nulla si sa di questi ultimi satelliti scoperti, che seguono comunque orbite molto irregolari a grande distanza da Urano.

- OBERON -

Nel 1787, utilizzando un nuovo telescopio di 47,7 cm di apertura, William Herschel scoprì a Slough i primi due satelliti di Urano, *Titania* e *Oberon*. Herschel li scorse entrambi l'11 gennaio, anche se tardò a darne l'annuncio finché non fu assolutamente certo della loro natura.

Oberon è il più esterno dei cinque satelliti maggiori del pianeta: ha un'orbita circolare, equatoriale e diretta di raggio pari a 582.600 km. È la seconda luna di Urano in ordine di dimensioni, con un diametro di circa 1523 km, e presenta una densità media di 1,58 g/cm³ che indica una composizione "mista" di ghiacci e rocce. Anche le proprietà ottiche della superficie (albedo, spettri) indicano che essa è coperta in proporzioni variabili da ghiacci chiari e da materiale più scuro, di colore neutro e simile a quello che forma gli anelli e i piccoli satelliti interni; si tratta probabilmente di composti ricchi di carbonio, simili a quelli presenti nelle meteoriti classificate come *condriti carbonacee*.

Oberon fu il primo satellite di Urano ad essere ripreso dal Voyager 2 il 24 gennaio 1986, da una distanza minima di 660.000 km. Nelle immagini inviate dalla sonda una grande montagna, forse il picco centrale di una struttura da impatto grande centinaia di chilometri, si staglia per un'altezza di più di 20 km dal bordo circolare illuminato del satellite. Sono anche debolmente visibili alcune lunghe scarpate ricurve, probabilmente tracce di grandi fratture derivate da processi tettonici globali, avvenuti in un'epoca successiva a quella della formazione.

La caratteristica più appariscente della superficie di Oberon è rappresentata da diversi grandi crateri, spesso circondati da "aloni" chiari, simili a quelli osservati su Ganimede o Callisto; ma il fondo dei crateri appare "riempito" da macchie di materiale molto più scuro, con albedo fra il 5% e il 10% e colore neutro, che ricordano le analoghe strutture nell'emisfero posteriore della luna saturniana Giapeto. Questo materiale scuro deve essersi depositato nelle conche dei maggiori crateri da impatto solo dopo la fine della fase di intenso bombardamento primordiale cui andò soggetto il satellite, altrimenti esso sarebbe stato cancellato o sepolto da impatti successivi: probabilmente si tratta di un fluido emesso dall'interno di Oberon, di colore scuro per la composizione chimica ricca di composti del carbonio e diversa da quella del ghiaccio circostante. L'associazione con i grandi crateri fa pensare che siano stati proprio gli impatti ad innescare le eruzioni di materiale scuro, un po' come è avvenuto per i mari lunari.

- TITANIA -

Titania, scoperto da Herschel nel 1787 assieme a Oberon, è il più grande dei satelliti di Urano, con un diametro di circa 1578 km. Lo si incontra proprio dopo Oberon andando verso il pianeta; si muove su un'orbita praticamente circolare, equatoriale e diretta di raggio pari a 435.840 km. La sua albedo visuale (27%) è leggermente superiore a quella di Oberon, mentre la densità media è la più alta di tutte le lune di Urano: 1,68 g/cm³, a testimoniare una composizione relativamente equilibrata di ghiacci e rocce.

Oberon e Titania si assomigliano molto nelle loro proprietà globali (dimensioni, densità, albedo, colore), ma dal punto di vista geologico le loro superfici sono notevolmente diverse. Nelle immagini del Voyager 2 a più alta risoluzione, Titania ha un aspetto diverso da Oberon. Oltre a un gran numero di piccoli crateri sparsi sulla superficie, sono visibili pochi grandi bacini da impatto, di diametro compreso tra i 100 e i 200 km. Parecchie zone dall'aspetto più "liscio", piuttosto povere di crateri, suggeriscono che processi di ringiovanimento superficiale si prolungarono abbastanza a lungo su questo satellite. Inoltre, una vasta rete di fratture attraversa la superficie di Titania, con una larghezza variabile fra i 20 e i 50 km e profondità fra i 2 e i 5 km; specialmente nelle scarpate vicine al terminatore è evidente che materiale più riflettente viene esposto in superficie. Queste

fratture sembrano indicare che la crosta di Titania abbia subito un processo di “rigonfiamento” globale, probabilmente come conseguenza del congelamento dei ghiacci all’interno del satellite dopo la sua formazione. Le fratture attraversano diversi grandi crateri, e sono pochi anche i crateri di piccole dimensioni che appaiono sovrapporsi ad esse: se ne conclude che queste sono tra le strutture geologiche più giovani presenti sul satellite.

L’evoluzione di Titania potrebbe aver seguito questa sequenza di eventi: all’inizio si formarono i grandi crateri, probabilmente dovuti ad impatti primordiali con oggetti su orbite interplanetarie avvenuti nell’ultima fase di formazione del satellite. Questi crateri furono poi in gran parte cancellati dall’eruzione di materiale fluido in superficie, o erosi da impatti successivi. In seguito, il bombardamento fu dominato da oggetti più piccoli, in orbita intorno ad Urano a distanze simili a quelle di Titania. Dopo che questi detriti circumpolari vennero spazzati via dal processo collisionale, alcune regioni vennero “ringiovanite” da nuovi episodi di tipo vulcanico. Infine, la crosta di Titania fu spezzata dalle tensioni interne, producendo il sistema di fratture e scarpate. I crateri circondati da raggi chiari sono recenti: il loro numero è dell’ordine che ci si aspetterebbe considerando gli impatti con le comete avvenuti negli ultimi 3 o 4 miliardi di anni.

- UMBRIEL -

Il 24 ottobre 1851 William Lassell (1799-1880), agiato commerciante di birra in Liverpool con la passione dell’astronomia, utilizzando un telescopio riflettore di 24 pollici (circa 61 cm) di diametro, scoprì due nuovi satelliti di Urano, poi battezzati *Ariel* e *Umbriel*. Umbriel è il terzo dei satelliti “storici” di Urano, già noti prima della missione Voyager, in ordine di distanza dal pianeta: esso si muove infatti su un’orbita pressoché circolare, equatoriale e diretta, situata a 266.000 km dal centro di Urano. È il terzo anche per dimensioni, con un diametro di circa 1169 km, e presenta una densità media di 1,51 g/cm³.

Quando il Voyager 2 arrivò a pochi milioni di chilometri dal sistema di Urano, divenne chiaro che Umbriel presentava caratteristiche enigmatiche. Con un’albedo visuale del 18% distribuita assai uniformemente su tutta la superficie, esso è il più scuro dei cinque satelliti maggiori. Lo spettro mostra segni meno evidenti della presenza di ghiaccio d’acqua, inoltre non vi sono tracce significative di crateri raggiati e di processi endogeni. Solo due o tre zone di albedo diversa dalla media risaltavano nelle immagini: la più evidente era un anello di materiale chiaro con un raggio interno di 10 km e uno esterno di circa 40 km, situato vicino al terminatore. Le immagini a risoluzione maggiore mostrano che la superficie di Umbriel è pesantemente craterizzata (con l’anello chiaro che occupa il fondo di uno dei numerosi grandi crateri), il che indica che si tratta di una superficie assai antica.

Ci si può chiedere come mai i crateri di Umbriel non abbiano prodotto significativi contrasti di albedo, come accade su molti degli altri satelliti ghiacciati dei pianeti esterni (e in particolare su Ariel, Titania e Oberon). Una possibilità è che Umbriel sia stato recentemente ricoperto da una coltre sottile ma uniforme di polvere di provenienza esterna, forse materiale posto in orbita intorno ad Urano dopo essere stato espulso da un precedente impatto su Umbriel, e poi riaccumulatosi gradualmente sul satellite. Un’altra ipotesi è quella di un’eruzione esplosiva, forse collegata con l’anello di materiale chiaro, benché processi vulcanici recenti sembrano poco plausibili su un satellite dalla superficie così antica. Infine, si potrebbe pensare che le proprietà ottiche del materiale superficiale siano così uniformi e “insensibili” agli impatti da non produrre alcuna variazione di albedo associata ai crateri, ma in tal caso sarebbe difficile spiegare l’esistenza dell’anello brillante e il perché del diverso comportamento degli altri satelliti.

- *ARIEL* -

Proseguendo il nostro viaggio verso Urano, dopo aver incontrato Oberon, Titania e Umbriel ci si imbatte in Ariel, scoperto nel 1851 da William Lassell assieme allo stesso Umbriel. Ariel, che si muove attorno al pianeta da una distanza di 191.240 km su un'orbita equatoriale e diretta, ha un diametro di circa 1158 km e una densità media relativamente alta: $1,66 \text{ g/cm}^3$. Sebbene l'errore di misura non sia trascurabile ($\pm 0,3 \text{ g/cm}^3$), questo sembra indicare che l'interno del satellite sia formato da una mescolanza abbastanza equilibrata di ghiacci e di rocce. Per dimensioni e densità media, Ariel appare molto simile ad Umbriel, ma a dispetto della somiglianza fra queste loro proprietà globali le superfici dei due satelliti, viste nelle immagini del Voyager 2, si sono rivelate notevolmente diverse dal punto di vista dell'evoluzione geologica.

In primo luogo, la superficie di Ariel è più riflettente (albedo 0,34) di quella delle altre lune di Urano; inoltre essa appare più giovane e geologicamente complessa di quella degli altri tre grossi satelliti che orbitano più all'esterno. Le zone geologicamente più antiche sono costituite da terreni ricchi di crateri di piccole dimensioni (al massimo 60 km di diametro); i crateri più grandi, formati in un'epoca precedente, sembrano essere stati cancellati quasi completamente dalla superficie. Il cratere maggiore che è sopravvissuto ha un fondo appiattito: come per strutture analoghe osservate su Ganimede, ciò sembra dovuto al rilassamento viscoso del materiale sotto l'influenza della gravità. I terreni craterizzati sono attraversati, interrotti, e a volte sembrano anche essere stati spostati orizzontalmente da un sistema globale di fratture e faglie. Le più nette (e forse più giovani) di queste strutture costituiscono una rete di *canyon* stretti e profondi. Le fratture sembrano essere il prodotto di tensioni che hanno "gonfiato" la crosta; deve essersi trattato di un processo prolungato nel tempo, perché le scarpate presentano densità molto variabili di piccoli crateri.

Alcune zone di Ariel, come ad esempio il fondo di molte "valli" limitate dalle fratture e anche una regione "liscia" che appare ad alta latitudine, sembrano ricoperte da flussi successivi di materiale fluido, che si sono sovrapposti ai crateri più antichi; ma si è trattato di episodi eruttivi abbastanza antichi, perché anche queste zone non sono del tutto prive di crateri di piccole dimensioni. I loro margini sono spesso segnati da depressioni, e al loro interno vi sono anche striature e rilievi. Il materiale che ha ricoperto la superficie preesistente sembra essere stato molto viscoso, eruttato dall'interno durante il processo di "gonfiamento" e fratturazione della crosta.

La natura chimica dei flussi osservati su Ariel e su Titania è incerta. Il ghiaccio d'acqua, che è abbondante dentro i satelliti, ha un punto di fusione troppo alto, superiore di 200 gradi alla temperatura ambiente che si riscontra sulla superficie degli stessi. Tuttavia il punto di fusione si abbassa molto per un miscuglio di ghiaccio d'acqua e ammoniac. Anche altri composti chimici, come il metano e i clatrati di monossido di carbonio, potrebbero aver giocato un ruolo importante.

Quanto alla sorgente del riscaldamento, rispetto a quelli di Saturno i satelliti di Urano sono più scuri (cioè assorbono una maggior quantità di luce solare) e contengono più materiali rocciosi (ricchi anticamente di isotopi radioattivi che, decadendo, produssero energia termica); se il riscaldamento radioattivo non è stato sufficiente a fondere il materiale e a generare attività endogene, sembra comunque plausibile che (almeno nel caso di Ariel) un riscaldamento mareale associato a risonanze orbitali sia stato efficace durante alcuni periodi.

- *MIRANDA* -

Scoperto soltanto il 16 febbraio 1948 dal padre della planetologia moderna, l'astronomo di origine olandese Gerard P. Kuiper (1905-1973), per mezzo del riflettore Hale da 5 metri dell'Osservatorio di Monte Palomar in California, Miranda trae il suo nome da un personaggio femminile de *La Tempesta* di Shakespeare. Ha un'orbita praticamente circolare, di raggio pari a 129.800 km, inclinata di circa 4° rispetto al piano equatoriale del pianeta e percorsa in modo diretto. Con un

diametro di circa 471 km, comparabile con quello dei satelliti di Saturno Mimas ed Enceladus, Miranda è il più piccolo dei cinque satelliti “classici” di Urano, ed anche il meno denso, avendo una densità media di $1,35 \text{ g/cm}^3$ che non supera di molto quella del ghiaccio d’acqua.

Fin dalle prime immagini inviate a Terra dal Voyager 2, Miranda ha mostrato una superficie molto eterogenea, con una curiosa figura a “V” chiara (denominata “caprone”) al di sotto del centro del disco. Nelle immagini successive, più definite, si nota l’estrema scabrosità della forma del satellite, evidenziata dal profilo accidentato del bordo visibile; inoltre risulta evidente che esistono su Miranda due tipi di terreni, geologicamente molto diversi: le regioni più chiare, pesantemente craterizzate e dalla topografia tormentata, e quelle più scure, povere di crateri ma ricchissime di striature e scarpate dai bordi scabri, con rilievi che arrivano a qualche chilometro d’altezza e presentano una geometria molto complessa.

Le immagini più ravvicinate ottenute dal Voyager sono state riprese a soli 31.000 km dal satellite e la loro risoluzione (fino a soli 600 metri) è tra le più elevate mai raggiunte nel corso dell’intera missione. Queste immagini non hanno certo deluso le aspettative: con grande sorpresa dei geologi planetari, esse hanno mostrato che nei terreni meno craterizzati (tre vaste regioni di forma peculiare, che va dall’ovale al trapezoidale) esiste un’estrema varietà di strutture, come scarpate, fratture, faglie, *canyon*, sistemi di striature parallele sia rettilinee sia curve sia ad angolo, e rilievi dalla diversa elevazione e morfologia. In qualche caso queste strutture, distribuite in modo differente nelle diverse regioni, ricordano quelle osservate su altri corpi del Sistema Solare (per esempio Marte, Ganimede, Encelado); altre volte il loro aspetto bizzarro sembra completamente nuovo.

L’aspetto dei terreni osservati testimonia anche età geologiche molto diverse: le regioni più antiche sono naturalmente quelle a maggiore densità di crateri da impatto, che sono poco profondi probabilmente a causa delle peculiari proprietà meccaniche dei materiali superficiali. In altre zone i crateri sono stati cancellati o sepolti da eruzioni di materiale fluido proveniente dall’interno. Si sono identificati vari sistemi stratigrafici, separati talora da confini molto netti. Questo fa pensare all’esistenza di fratture profonde ma sottili, da cui è fuoriuscito il materiale che ha formato gli strati più esterni. Dal modo in cui le strutture lineari contigue si sovrappongono, è evidente la presenza di attività tettonica, soprattutto di tipo distensivo: in altre parole, la crosta superficiale del satellite è stata deformata e stirata formando profondi corrugamenti ed esponendo materiali dalle diverse proprietà ottiche (e probabilmente composizione).

I terreni craterizzati più antichi sono invece ricchi di colline smussate e di crateri semicancellati; le zone di contatto tra questi terreni e quelli solcati da valli e dorsali allineate mostrano chiaramente che questi ultimi si sono sovrapposti ai primi in un’epoca relativamente recente.

Per spiegare le peculiari caratteristiche di Miranda, sono state avanzate due ipotesi. La prima è che la lenta espansione delle orbite dei satelliti causata dalle maree del pianeta abbia fatto “attraversare” a coppie o terne di essi risonanze fra i periodi di rivoluzione (che dipendono dai raggi orbitali in base alla terza legge di Keplero), dello stesso tipo della “risonanza di Laplace” che oggi interessa Io, Europa e Ganimede.

Una tale relazione di risonanza non è presente nel sistema di Urano, ma potrebbe essersi transitoriamente verificata in un passato relativamente recente, aumentando di colpo le eccentricità e le inclinazioni orbitali dei satelliti coinvolti. È interessante notare che l’inclinazione, a differenza dell’eccentricità, non viene smorzata dalle maree, e poiché l’inclinazione di Miranda non è trascurabile, potremmo già avere un indizio che questo satellite abbia veramente attraversato una risonanza. In questo caso, analogamente a ciò che accade su Io, il riscaldamento mareale potrebbe aver riversato così tanta energia nel satellite da innescare estesi processi di tettonica e vulcanismo superficiale.

L’altra ipotesi è che l’attuale Miranda sia un corpo riaccumulatosi da una serie di grossi frammenti di un satellite preesistente, distrutto catastroficamente da un impatto esterno. Il processo di riaccumulazione avrebbe prodotto una superficie “a mosaico”, giustapponendo regioni di diversi frammenti, alcune delle quali provenivano dalla superficie del corpo progenitore, altre dal suo

interno. Inoltre, se questo interno conteneva strati diversi, di composizione prevalentemente rocciosa oppure ghiacciata, alcuni frammenti potrebbero essere stati formati di roccia, altri di ghiaccio; dopo la riaccumulazione, i primi (più densi) avrebbero teso a sprofondare, i secondi a risalire in superficie e questo riaggiustamento potrebbe aver liberato abbastanza energia da produrre fenomeni di fusione e di vulcanismo e, al contempo, aver posto in tensione gli strati superficiali generandovi grandi fratture.

Comunque stiano le cose, Miranda – in perfetta coerenza con il proprio nome – è certamente uno degli oggetti più affascinanti del Sistema Solare. La sua storia è ancora enigmatica, ma è comunque una dimostrazione lampante che anche i piccoli corpi del Sistema Solare possono aver subito un'evoluzione altrettanto travagliata e complessa di quella dei maggiori pianeti.

- LE LUNE MINORI -

Le orbite descritte dai cinque maggiori satelliti di Urano, la cui scoperta è associata ad alcune delle figure più rappresentative nella storia dell'astronomia, a causa dell'elevata inclinazione dell'asse attorno a cui ruota Urano sono disposte su un piano che si trova rivolto verso la Terra ogni 42 anni circa, com'è successo l'ultima volta alla metà degli anni '80. Proprio in quel periodo, la sonda Voyager 2 raggiunse la minima distanza dal pianeta, ed ebbe il merito di svelare un corpo sino a quel momento praticamente sconosciuto, ma in particolare consentì di osservare dieci nuove lune: di queste, la prima e più grande, *Puck*, venne fotografata sul finire del 1985, mentre le rimanenti nel gennaio dell'anno successivo. I nomi a loro assegnati, allontanandosi dal pianeta, sono nell'ordine: *Cordelia*, *Ophelia*, *Bianca*, *Cressida*, *Desdemona*, *Juliet*, *Portia*, *Rosalind*, *Belinda* e *Puck*. Le quindici lune, posizionate a distanze comprese tra circa 50.000 e 583.000 km, resero Urano piuttosto insolito, almeno tra i pianeti di maggiori dimensioni, poiché l'unico a non avere satelliti irregolari, quelli caratterizzati da orbite molto eccentriche oppure fortemente inclinate rispetto al piano equatoriale del corpo centrale. L'origine più probabile di questo tipo di lune è la cattura gravitazionale, durante l'occasionale transito nelle vicinanze del pianeta, di qualche grande asteroide.

Le fotografie evidenziarono tra l'altro le curiose correlazioni dinamiche tra i satelliti e gli anelli che circondano Urano e in particolare l'azione ordinatrice esercitata da *Cordelia* e *Ophelia* sull'anello Epsilon. Le orbite delle due lune più interne, inizialmente designate con le sigle 1986 U7 e 1986 U8, hanno tra loro frapposto l'anello esterno di maggiore luminosità e per questo sono state soprannominate "lune pastore": i loro effetti gravitazionali, infatti, tengono riuniti insieme numerosissimi frammenti come fanno i cani pastore con le pecore di un gregge.

I dati raccolti dal Voyager 2, in meno di due settimane, non consentirono di stabilire esattamente l'orbita di queste due lune, tanto da sfuggire anche ai più grandi telescopi del mondo, e solo l'analisi condotta da Erich Karkoschka (*Lunar and Planetary Lab*), sovrapponendo dozzine di immagini riprese dal telescopio spaziale Hubble (HST), ha permesso di rintracciare *Ophelia* nei primi mesi del 2000. Grazie alle indicazioni fornite allo stesso Karkoschka da Richard French e Philip Nicholson, ottenute misurando le distorsioni in ampiezza dell'anello Epsilon durante numerose occultazioni stellari, è stato possibile ritrovare poco dopo anche *Cordelia*. Gli effetti gravitazionali generano infatti delle increspature che si propagano lungo l'anello con una velocità uguale a quella della luna pastore, e da questo fenomeno sono state determinate delle previsioni tanto precise sulla posizione del satellite da riuscire ad osservarlo nuovamente dopo molti anni.

Il 6 settembre 1997, utilizzando il glorioso riflettore "Hale" di 5 metri dell'Osservatorio di Monte Palomar in California abbinato a una potente camera CCD, Philip Nicholson, Joseph Burns, Brett Gladman e J. Kavelaars mostrarono due deboli compagni, di magnitudine visuale intorno a 22, nelle immediate vicinanze di Urano. Le successive indagini, condotte con i telescopi delle Hawaii e del New Mexico, furono la prima conferma alla scoperta dei nuovi satelliti: posizionati 6 primi d'arco

ad est del pianeta, il più debole, e 7 primi a nord-ovest, l'altro. L'annuncio ufficiale della probabile esistenza di due nuove lune di Urano venne dato il 31 ottobre, mentre le osservazioni furono interrotte nel dicembre 1997, quando il Sole si trovava nella medesima direzione del pianeta; nel corso dell'inverno la ricerca comunque proseguì, attraverso l'esame delle fotografie riprese negli anni precedenti, per rintracciare altre posizioni con cui estrapolare quelle in cui si sarebbero trovate le due lune quando, a primavera, sarebbero riemerse da dietro il Sole. Nel marzo seguente le immagini ottenute con due telescopi da 4 metri in Australia e Cile, dove si verificarono poco prima dell'alba le condizioni favorevoli all'osservazione, confermarono le predizioni fatte sulla posizione dei satelliti, escludendo definitivamente la possibilità che si potesse trattare di qualcuno dei numerosi asteroidi presenti nella medesima area di cielo. I nuovi dati consentirono di stabilire, con maggiore affidabilità, l'elevata inclinazione del loro piano orbitale, 141 e 159 gradi, che insieme al loro moto retrogrado li classifica come irregolari: si tratterebbe cioè di oggetti asteroidali o cometari catturati in epoche remote dal campo gravitazionale del pianeta a seguito di un passaggio ravvicinato.

La composizione degli oggetti, di diametro stimato in 96 e 190 km (valori calcolati ipotizzando che essi riflettano solo il 7% della luce solare), è probabilmente un miscuglio di roccia e ghiaccio, mentre il colore rossastro del maggiore dei due suggerisce la presenza di idrocarburi sulla sua superficie, che si possono formare a seguito della prolungata azione esercitata dalla radiazione solare di elevata energia.

Per i due satelliti, inizialmente indicati con le sigle S/1997 U1 e S/1997 U2, furono proposti i nomi, poi accettati, di *Caliban* e *Sycorax*, entrambi ispirati a personaggi de *La Tempesta* di Shakespeare: Caliban, schiavo deforme e selvaggio del mago Prospero, è figlio della strega Sycorax che imprigionò lo spirito dispettoso Ariel per punirlo della sua disobbedienza.

Ma anche le fotografie riprese dalla sonda Voyager 2 non finiscono ancora di sorprendere i ricercatori, e nel 1999 sempre Erich Karkoschka, in attività presso l'Università dell'Arizona, riesaminandole ha individuato un altro potenziale satellite di Urano, distante circa 76.000 km dal centro del pianeta e la cui orbita sarebbe molto simile a quella di Belinda. L'annuncio ufficiale è del 18 maggio, ma, nonostante questo sia stato il primo satellite trovato nel 1999, è stato deciso di designarlo con la sigla S/1986 U10, ovvero il decimo della serie individuata nello stesso anno dalla sonda Voyager 2. Tuttavia, nel dicembre 2001, l'*International Astronomical Union* (IAU), con una mossa un po' inusuale, ha tolto a questo corpo il titolo ufficiale di "satellite di Urano", poiché non vi sono sufficienti informazioni per concludere che in effetti lo sia.

Le immagini da cui si era giunti alla scoperta, vecchie di 13 anni, erano state rese pubbliche in formato digitale fin da allora, senza che nessuno si accorgesse di quanto stavano nascondendo. Solo il loro confronto con quelle fornite recentemente dal telescopio spaziale Hubble, finalizzate allo studio delle modificazioni stagionali nell'atmosfera del pianeta, ha portato all'identificazione dell'oggetto, di diametro intorno a 40 km, la cui composizione potrebbe essere molto simile a quella della cometa Hale-Bopp. Le posizioni ricavate da sette diverse fotografie avevano infatti permesso di stimare in 15 ore e 18 minuti il periodo di rivoluzione della nuova luna, un valore poco inferiore a quello impiegato da Urano per completare una rotazione attorno al proprio asse. L'immagine della scoperta è formata da dieci riprese del telescopio spaziale, nelle quali solo l'area circostante il pianeta è stata sovraesposta, per consentire di individuare anelli e satelliti di luminosità molto più deboli. Ma in base ai nuovi criteri adottati dall'IAU per le scoperte astronomiche, ben più stringenti di quelli in vigore nel 1986, il giudizio su questa luna è stato sospeso, almeno fino a quando il telescopio spaziale Hubble non ne otterrà nuove immagini in numero sufficiente.

Sempre nel 1999, ma in luglio, un gruppo internazionale di astronomi guidati da Brett Gladman ha scoperto altri tre satelliti di Urano utilizzando il più grande CCD mai costruito fino a quel momento, installato sul telescopio franco-canadese-hawaiano (CFHT) situato nelle isole Hawaii, a 4200 metri di quota. Sia questo ricercatore che il collega J. Kavelaars, dell'Università McMaster del Canada, facevano parte anche del team che aveva precedentemente individuato Caliban e Sycorax.

La camera CCD, installata al fuoco primario del telescopio di 3,6 metri di diametro collocato sul vulcano spento Mauna Kea, fotografò vaste zone di cielo intorno al pianeta, dove si ipotizzava più probabile la presenza di nuovi satelliti, e le riprese eseguite tra il 17 e il 21 luglio accesero subito le speranze degli astronomi attorno a una coppia di oggetti. L'analisi preliminare, condotta con programmi in grado di confrontare e individuare ogni eventuale variazione di posizione compatibile con un'orbita planetocentrica, portò all'annuncio della scoperta pochi giorni più tardi, e il 27 luglio i due candidati al rango di satellite furono designati con le sigle provvisorie S/1999 U1 e S/1999 U2. Le immagini, ottenute a distanza di circa un'ora durante la medesima notte, furono analizzate con due differenti programmi, scritti da Hans Scholl e Matthew Holman; l'elaborazione proseguì poi con procedure ad affinamento crescente, finalizzate ad evidenziare allineamenti estremamente deboli, sino a quando, il 30 luglio, si scoprì anche il terzo candidato, S/1999 U3.

Nei giorni tra il 7 e l'11 agosto i tre oggetti furono nuovamente osservati con lo specchio di 5 metri di Monte Palomar, e nel mese di settembre con il telescopio di 4 metri di Kitt Peak in Arizona, trovando che rimanevano nelle vicinanze del pianeta: in tal modo aumentavano le probabilità che tutti quanti fossero effettivamente da classificare come satelliti, cosa che in effetti avvenne quando, nell'estate del 2000, ulteriori osservazioni confermarono definitivamente questa natura.

I tre oggetti ricevettero nomi ancora una volta ispirati ai personaggi de *La Tempesta*: *Setebos* (S/1999 U1), *Stephano* (S/1999 U2) e *Prospero* (S/1999 U3). I primi due hanno un diametro di circa 40 km e orbitano attorno al pianeta a una distanza rispettivamente di 10 e 25 milioni di chilometri, risultando assai più elusivi di quelli individuati nel 1997, che hanno una luminosità almeno 20 volte maggiore.

Infine, il 30 settembre 2002 è stata annunciata la scoperta dell'ultimo satellite di Urano: autore ancora una volta un gruppo di astronomi americani e canadesi, guidato da Matthew Holman dell'*Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics* di Cambridge, nel Massachusetts. La nuova luna, designata provvisoriamente S/2001 U1, era stata osservata per la prima volta il 13 agosto 2001 con il telescopio franco-canadese-hawaiano nelle isole Hawaii e presso l'Osservatorio Inter-Americano di Cerro Tololo in Cile, riprendendo varie immagini del pianeta con lunghi tempi di esposizione. Quell'osservazione non fu però annunciata pubblicamente, perché gli astronomi preferirono aspettare di avere altre osservazioni per poter calcolare l'orbita dell'oggetto. Infatti esso fu presto visto sparire nel chiarore generato dal disco di Urano, ed è stato ritrovato solo un anno dopo, nell'agosto del 2002. Le dimensioni del nuovo satellite non sono state evidentemente determinate con precisione, ma, facendo ragionevoli ipotesi sulla sua riflettività superficiale, si stimano essere comprese tra 15 e 20 km, cosa che lo rende il più piccolo satellite di Urano finora scoperto.

Gli astronomi ritengono che queste piccole lune irregolari provengano dalla *cintura di Kuiper*, la regione oltre l'orbita di Nettuno popolata da planetesimi di roccia e ghiaccio, considerata anche la principale sorgente di comete a breve periodo.

La recente successione di scoperte lascia supporre l'esistenza di altre lune da trovare, nascoste da superfici generalmente poco riflettenti. Se si considera che le più piccole lune oggi note hanno un raggio almeno doppio rispetto alle minori di Giove, non sembra affatto inverosimile che altri oggetti siano alla portata degli attuali strumenti.

ESPLORAZIONE SPAZIALE

Le sonde spaziali americane *Voyager* vennero progettate specificatamente per lo studio dei sistemi di Giove e Saturno. Tuttavia, fin dall'inizio fu chiaro che il raro allineamento dei pianeti esterni che si sarebbe verificato alla fine degli anni '70 avrebbe consentito di raggiungere anche Urano e Nettuno, e nulla fu fatto per precludere questa possibilità. L'incontro ravvicinato con Titano, il maggiore dei satelliti di Saturno, impedì al Voyager 1 il sorvolo di Urano e Nettuno o, in alternativa, di Plutone, ma la sonda gemella partita dalla Terra il 20 agosto 1977, Voyager 2, venne inserita su una traiettoria che lasciava aperta la possibilità di visitare tutti e quattro i pianeti giganti.

Una serie mozzafiato di guasti e anomalie di funzionamento mise a repentaglio l'esito della missione fin dalle battute iniziali. Anzitutto, quando la sonda si trovava nei pressi di Giove, si guastò il ricevitore radio principale da cui dipendeva l'acquisizione dei comandi impartiti dal *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) di Pasadena, in California, centro di controllo della missione interplanetaria. Come se non bastasse, il ricevitore di riserva entrò in funzione con una larghezza di banda ridottissima, ciò che costrinse i responsabili del volo ad analizzare sempre accuratamente tutti i potenziali fattori di disturbo della radiofrequenza su cui ricevevano i segnali. Se anche questo apparato ridondante avesse cessato di funzionare, la sonda avrebbe proseguito il suo viaggio con tutti gli strumenti operativi, ma completamente sorda ad ogni richiamo proveniente dalla Terra.

L'inventiva e le capacità tecniche degli ingegneri del JPL riuscirono tuttavia ad avere ragione degli inconvenienti, e gli incontri con Giove (1979) e Saturno (1981) furono coronati da uno straordinario successo. Circa 100 minuti dopo il massimo avvicinamento a quest'ultimo pianeta, però, la piattaforma orientabile su cui era montata gran parte degli strumenti scientifici si bloccava, gettando nello sconforto scienziati e tecnici. Un'accurata analisi del guasto permise agli stessi tecnici del JPL, dopo un paio di giorni, di far funzionare regolarmente la piattaforma a basse e medie velocità: probabilmente si era inceppata perché sottoposta a una rotazione troppo rapida. Nei 18 mesi successivi innumerevoli test vennero condotti per evitare il ripetersi di tale inconveniente potenzialmente disastroso.

Gli scienziati sapevano che la debole luminosità di Urano avrebbe richiesto lunghe esposizioni, con il rischio di ottenere immagini mosse. Il pianeta, infatti, dista dal Sole circa 3 miliardi di chilometri e riceve in media una quantità di luce 368 volte minore di quella che arriva sulla Terra. Per ovviare a questo problema, gli ingegneri escogitarono un sistema per far ruotare l'intera navicella intorno a un suo asse, in modo da ridurre l'uso della piattaforma compensando lo spostamento dovuto all'alta velocità relativa (quasi 65.000 km/h) e consentendo così pose fino a 15 secondi senza rischi di immagini degradate. La grande distanza del Voyager dalla Terra avrebbe inoltre allungato i tempi di trasmissione dei dati; per questo essi vennero concentrati in modo che si potessero trasmettere esposizioni differenti tra successive immagini. I computer di bordo furono istruiti per fare questo automaticamente. Alla fine il Voyager 2, nel gennaio del 1986, giunse nei pressi di Urano, il terzo pianeta del Sistema Solare in ordine di dimensioni e il primo sconosciuto agli antichi, dopo un viaggio durato fino a quel momento quasi otto anni e mezzo.

Urano, data la sua distanza, era poco conosciuto e le sue caratteristiche apparivano incerte; finalmente la sonda ne avrebbe rivelato con precisione la natura e il comportamento. L'impresa non era di facile attuazione e, tra l'altro, in quegli stessi giorni si sarebbe verificato il grande disastro dell'astronautica americana, quando nel cielo di Cape Canaveral esplodeva lo Shuttle *Challenger* provocando la morte dei sette astronauti a bordo. Al Jet Propulsion Laboratory l'atmosfera non vibrava di quegli euforici entusiasmi che avevano accompagnato i precedenti appuntamenti delle sonde Voyager con Giove e Saturno, nonostante l'eccezionalità dell'evento.

L'incontro, come si è detto, era stato preparato con grande impegno e gli ingegneri avevano compiuto diversi importanti interventi sulla sonda prima che questa giungesse a destinazione. Essi, infatti, non avevano solo riprogrammato via radio i computer di bordo del Voyager 2 in modo che potessero gestire il lavoro della sonda ottenendo buoni risultati nonostante la scarsa luce a

disposizione e l'elevata velocità del veicolo durante la ricognizione, ma, rispetto all'incontro con Saturno avvenuto nel 1981, avevano compiuto dei miglioramenti anche nei sistemi di ascolto sulla Terra. Le antenne principali del *Deep Space Network* (DSN) della NASA, situate negli Stati Uniti, in Australia e in Spagna, erano state collegate elettronicamente, e nelle tre stazioni i sistemi di inseguimento automatico della sonda erano stati perfezionati in modo da riuscire a catturare con continuità i deboli segnali emessi da così grande distanza: il trasmettitore di bordo del Voyager 2, operante su una frequenza di 8,4 GHz in banda X (la banda normalmente usata nelle comunicazioni spaziali, con radiofrequenze che vanno da 8 a 12 GHz), aveva infatti una potenza di soli 23 Watt. Le particolari condizioni dell'incontro con Urano erano infine determinate anche dal tipo di traiettoria, studiata per portare poi la sonda verso l'ultimo appuntamento con Nettuno.

Il 4 novembre 1985 i tecnici del JPL comandarono l'avvio della prima fase di osservazioni da grande distanza. La sonda viaggiava alla velocità di 15 km/s, ed era la prima volta che il pianeta e i suoi anelli potevano essere studiati con continuità per lunghi periodi di tempo. Le orbite dei satelliti noti furono determinate con precisione, in modo da poter correggere la traiettoria del Voyager 2 per la fase saliente dell'incontro, prevista dal 22 al 26 gennaio 1986. Quando il 24 gennaio la sonda sfiorò il pianeta da una distanza minima inferiore a 81.500 km, i segnali radio, viaggiando alla velocità della luce, impiegarono circa 2 ore e 45 minuti per raggiungere la Terra. Per via dell'enorme distanza il *bit rate*, cioè la velocità alla quale Voyager 2 trasmetteva i dati registrati alle stazioni terrestri, era stato ridotto a 21,6 kbit/s per garantire maggiore sicurezza e qualità della comunicazione.

A causa della geometria del sistema, giacente su un piano praticamente perpendicolare all'eclittica e alla traiettoria della sonda, tutti gli eventi cruciali risultarono compresi in una manciata di ore: la fase dell'incontro ravvicinato iniziò tre ore prima del raggiungimento della distanza minima e si concluse tre ore dopo. Il sorvolo di Titania (da una distanza di 365.200 km) avvenne 2h49m prima del massimo avvicinamento al pianeta; quello di Oberon (distanza 470.600 km) 1h 47m prima; quello di Ariel (127.000 km) 1h 38m prima; quello di Miranda (29.000 km) 55m prima; quello di Umbriel (325.000 km) 2h 53m dopo. L'incontro ravvicinato con Urano ebbe luogo alle ore 17:59 T.U. del 24 gennaio 1986, quando il Voyager 2 sorvolò la sommità delle nubi a una quota minima di 81.450 km e alla velocità di 64.800 km/h. Circa un'ora e mezza più tardi iniziò la fase delle occultazioni, sia da parte dei sottili anelli sia da parte del pianeta, che consentì di effettuare preziose misure. Il lavoro di osservazione proseguì per un mese intero, fino al 25 febbraio, quando venne dichiarato ufficialmente concluso. Il bilancio risultò eccezionale e ben superiore a quello prodotto dai telescopi terrestri nei due secoli trascorsi dalla scoperta di Urano: grazie alle migliaia di immagini trasmesse, il pianeta aveva finalmente un volto.

I dati raccolti dal Voyager 2 hanno rivoluzionato le nostre conoscenze sul sistema di Urano, e non poteva essere altrimenti. Uno dei risultati più sorprendenti è stato lo sviluppo di un nuovo modello dell'interno del pianeta. Prima dello storico incontro, infatti, si credeva che Urano fosse formato da tre strati distinti: un nucleo roccioso di silicati e ferro, un mantello liquido di acqua e altri costituenti ed infine un involucro gassoso costituito per lo più di idrogeno. Le misure del Voyager suggerirono invece un modello a due strati, con un grosso nucleo di roccia e ghiaccio circondato da una spessa atmosfera di idrogeno, elio e gas più pesanti. Nel momento del passaggio di Voyager 2, Urano volgeva al Sole il polo sud e appariva in effetti avvolto da un'atmosfera di idrogeno ed elio. La quantità di elio misurata era del 15% rispetto al totale dei gas atmosferici, molto inferiore a quella ipotizzata dai planetologi (40%). Erano presenti anche piccole quantità di metano, acetilene ed altri idrocarburi. Fu confermato che il metano, assorbendo nell'alta atmosfera la luce solare nelle lunghezze d'onda dell'arancione e del rosso, dava alle fotografie del pianeta un'immagine di colore verde-azzurro. La bassa atmosfera è invece molto probabilmente composta quasi interamente da acqua, metano e ammoniaca. Le immagini ricevute al Jet Propulsion Laboratory dimostravano che l'atmosfera di Urano era costituita da formazioni nuvolose ad altitudine costante e distribuite per fasce, come su Giove e Saturno. La velocità dei venti alle medie latitudini venne valutata attorno a 40-160 m/s. Attorno al polo sud esposto al Sole veniva individuato uno smog fotochimico, mentre

tutto l'emisfero illuminato emanava un intenso flusso di radiazione ultravioletta che gli scienziati chiamarono *dayglow* (letteralmente "splendore diurno"). La misurazione della temperatura diede valori attorno ai 58 K (215°C sotto lo zero), che però aumentavano fino a 150 K (-123°C) nell'alta atmosfera, e gli strumenti di Voyager 2 rilevarono delle fasce più fredde di 2-3°C tra i 15 e i 40 gradi di latitudine.

Mentre la sonda Voyager 2 si avvicinava, le emissioni radio provenienti dal pianeta confermarono la presenza intorno a Urano di una magnetosfera. Procedendo alla sua misurazione, non solo si provava l'esistenza di un campo magnetico, ma se ne apprezzava l'intensità media pari a 48 volte quella terrestre, con un asse eccezionalmente inclinato di circa 60° rispetto all'asse di rotazione. La coda della magnetosfera era inoltre estesa per almeno 10 milioni di chilometri. Attorno al pianeta si scoprivano anche fasce di radiazioni simili per intensità a quelle di Saturno, ma diverse nella composizione, essendo costituite principalmente da ioni di idrogeno.

La sonda Voyager 2 scopriva attorno a Urano due nuovi anelli che si andavano ad aggiungere ai nove già noti, ma le indagini ravvicinate dimostrarono che si trattava di formazioni anulari molto diverse da quelle osservate attorno a Giove e a Saturno. I planetologi ritengono che il sistema degli anelli sia posteriore all'epoca di formazione del pianeta. Molti sono costituiti di ghiaccio e tra essi si riscontra la presenza di polveri. Alcuni, inoltre, sono incompleti e altri sembrano originati dalla frammentazione di una qualche luna primordiale. I due nuovi anelli scoperti dalla sonda Voyager 2 furono 1986 U1R, distante 50.000 km dal centro di Urano e di larghezza molto ridotta, e 1986 U2R, localizzato a 38.000 km dal centro del pianeta e largo 2500 km. I rilievi del fotopolarimetro che ne aveva permesso la scoperta suggerivano pure la presenza, non confermata, di numerosi anelli o archi di anello, larghi anche solo 50 metri.

Le riprese ad alta risoluzione trasmesse dalla sonda avevano rivelato anche e soprattutto le caratteristiche delle numerose lune che circondano il pianeta. Fino al momento della ricognizione spaziale i satelliti conosciuti di Urano erano cinque; gli obiettivi del Voyager 2 ne scoprivano altri dieci, il più grande dei quali con un diametro di appena 160 km (gli ultimi satelliti, quasi tutti molto esterni e non inquadrati dalle telecamere della sonda, sarebbero poi stati scoperti da Terra dal 1997 in poi). Dalle immagini inviate, tutte le nuove lune apparivano formate da un miscuglio di ghiaccio e roccia che conferiva loro un colore grigio scuro uniformemente diffuso.

Per quanto riguarda i cinque satelliti già noti, le maggiori sorprese vennero da Miranda, definito "uno dei corpi più strani osservati nel Sistema Solare": le riprese di Voyager 2 mostravano la sua superficie con un dettaglio di un chilometro e in alcuni casi anche inferiore. Ciò permetteva di stabilire che si trattava di un corpo celeste formato da terreni in parte recenti e in parte molto antichi. Per questo i planetologi ritengono che Miranda possa essere un aggregato di materiali di diversa età, creato da un violento impatto verificatosi nelle prime epoche della sua formazione.

Per fortuna, i due guasti di cui soffriva la sonda, costretta ad utilizzare il ricevitore di riserva e con la piattaforma degli strumenti di rilevazione parzialmente paralizzata sul piano azimutale, non crearono particolari problemi durante la ricognizione. Quando lo straordinario veicolo cosmico ebbe terminato le osservazioni di Urano, si dispose ad affrontare l'ultima e più difficile parte del suo viaggio, iniziato nel 1977. Altri tre anni e mezzo di volo erano infatti necessari per raggiungere, nell'agosto del 1989, Nettuno, il più esterno dei pianeti giganti del Sistema Solare.

OSSERVAZIONI AMATORIALI

In teoria, Urano dovrebbe essere visibile ad occhio nudo in una notte serena e senza Luna: al suo massimo splendore può arrivare a toccare la magnitudine 5,32. Ma è tanto insignificante che non fu mai notato dagli antichi astronomi, presso i quali era profondamente radicata la convinzione che Saturno, “l’altissimo pianeta”, fosse l’ultimo del Sistema Solare. Tale convinzione venne scossa la notte del 13 marzo 1781, quando William Herschel, esplorando al telescopio una regione di cielo al confine tra le costellazioni zodiacali del Toro e dei Gemelli, vide un astro di sesta grandezza che mostrava un disco sensibile: era il pianeta che sarebbe stato successivamente battezzato Urano.

Per vedere il disco di Urano, che misura mediamente circa 3",7, non è necessario uno strumento potente: un rifrattore di 7,6 cm che utilizzi un ingrandimento di almeno un centinaio di volte è già sufficiente. Puntare un telescopio verso Urano può essere un’esperienza istruttiva: si inizia inquadrando la zona di cielo in cui le coordinate lo posizionano, a basso ingrandimento. Si vedrà, in generale, qualche stellina qua e là; una di esse, aumentando gli ingrandimenti, si dimostrerà però non puntiforme. A ingrandimento elevato, quello che appare è un minutissimo disco di colore grigio-verde con i bordi molto sfumati, che richiede comunque un buon *seeing* (cioè un buon grado di turbolenza atmosferica) per una definizione accettabile. Nelle osservazioni visuali non è poi raro notare una dominante blu e quindi un aspetto bicolore sul bordo del disco, imputabile alla rifrazione atmosferica differenziale e peraltro attenuabile mediante l’uso di un filtro giallo chiaro. L’oscuramento al bordo, causato dalla densa atmosfera del pianeta, è molto pronunciato ed è difficile capire quando il disco è a fuoco o meno. Per questo motivo è bene iniziare ad osservare dopo avere accuratamente messo a fuoco una stella sufficientemente luminosa.

Di tanto in tanto alcuni dilettanti hanno segnalato di aver scorto dei particolari sul disco, ma queste osservazioni oltremodo difficili, giudicate dubbie in passato, sono oggi ritenute prive di fondamento dopo che l’aspetto del pianeta ci è stato rivelato dalla sonda Voyager 2. Questa, da distanza ravvicinata, non ha potuto mostrare alcun particolare evidente in luce visibile nell’atmosfera. La visibilità di deboli bande è logicamente ostacolata dalla grande inclinazione, sul piano dell’orbita, dell’asse di rotazione del pianeta (circa 98°); inoltre non va dimenticato che gli effetti stagionali sull’atmosfera di Urano sono tuttora poco noti. Ciononostante, in più di una occasione, quando le regioni equatoriali del pianeta erano visibili e le condizioni di osservazione da Terra perfette, anche alcuni astronomi professionisti hanno osservato e registrato delle debolissime fasce. Tra le segnalazioni più frequenti vi è quella di una regione polare particolarmente chiara. Lo stesso telescopio spaziale Hubble ha permesso di osservare come l’alta atmosfera del pianeta sia a volte interessata dalla formazione di nubi chiare, che in teoria sarebbero osservabili anche con strumenti a terra. Appare inoltre lecito ipotizzare che la visibilità delle bande sia ciclica, con il periodo migliore di osservazione coincidente con la piena illuminazione delle regioni equatoriali.

A causa della forte inclinazione dell’asse di rotazione di Urano, durante il lento cammino attorno al Sole esso ci mostra alternativamente le regioni equatoriali, il polo, di nuovo l’equatore ed infine il polo opposto. Nel 1985 si è avuta l’esposizione del polo sud, e solo nel 2006 rivedremo l’equatore al centro del disco. Sono dunque molti anni che non è dato osservare le evanescenti bande del pianeta, né la più brillante zona equatoriale, e potrebbe essere interessante documentare l’eventuale ritorno alla visibilità di questi particolari. A tale scopo gli ingrandimenti per l’osservazione visuale partono da 300× in su, con un’apertura del telescopio di almeno 15 cm, meglio se lo strumento è un rifrattore per massimizzare il contrasto. Per un telescopio riflettore le dimensioni minime utili salgono a 25 cm. La durata minima di una sessione osservativa è di 2 ore, non certo perché i dettagli sul disco siano molti, bensì perché è raro avere qualche istante di *seeing* veramente ottimo, indispensabile per scorgere qualcosa sul pianeta.

Naturalmente le osservazioni di Urano possono essere condotte mediante l’impiego di camere CCD. Le riprese dovrebbero essere concentrate in un intervallo di tempo di pochi minuti per evitare che la veloce rotazione del pianeta sposti eventuali dettagli presenti sul disco. Dopo avere acquisito un

buon numero di immagini si sceglieranno le migliori che andranno sommate digitalmente in modo da attenuare il rumore di fondo e massimizzare il segnale. Per avere l'orientamento dell'immagine rispetto alle direzioni nord ed est sarà sufficiente riprendere, con un'esposizione di qualche decina di secondi, anche i satelliti principali di Urano; chiaramente l'immagine con i satelliti va ripresa senza spostare nulla dell'apparato impiegato per riprendere il disco. Le osservazioni del disco acquistano particolare valore se, oltre a riportare dei dettagli, sono confermate da altri osservatori indipendenti. La probabilità di avere due osservazioni contemporanee aumenta al crescere del numero degli osservatori, e questo è un buon motivo per intraprendere una campagna di osservazione del pianeta.

Nel passato il miglior contributo dilettantistico allo studio di Urano è stato portato alla determinazione della sua magnitudine apparente, un po' maggiore di quanto non indicassero le effemeridi. Infatti la magnitudine di Urano è leggermente variabile, su un periodo di 44 anni, in rapporto alla distanza dal Sole e dalla Terra e in qualche misura alla prospettiva che il globo assume nelle diverse posizioni orbitali a causa dello schiacciamento polare: quando il pianeta presenta i poli la luminosità è massima, mentre è minima quando mostra l'equatore. Si è discusso anche di possibili variazioni di luminosità intrinseche (periodiche e occasionali) dovute ad irregolarità atmosferiche o al ciclo di attività solare: pur non essendoci ancora prove certe, le osservazioni raccolte finora indicano una variazione fisica della luminosità con un'ampiezza di 0,3 magnitudini in un periodo di 8,4 anni. In questo caso una risposta definitiva sarà data dall'ampia disponibilità di precise misure fotometriche, sicuramente alla portata dei telescopi amatoriali muniti di fotometro fotoelettrico o camera CCD. Le stime visuali, tuttavia, sono ancora richieste come test per la verifica dei dati raccolti in passato. Nel caso di Urano, per questo lavoro è sufficiente un telescopio usato a bassi ingrandimenti o un binocolo, anche un piccolo 7×50 da utilizzarsi sotto cieli sereni e particolarmente bui, perché nel binocolo il pianeta ha un aspetto del tutto stellare ed il grande campo consente di vedere contemporaneamente qualche stella adatta per il confronto secondo le metodologie tipiche dell'osservazione delle stelle variabili. Una volta nota la sua posizione dalle effemeridi, Urano può facilmente essere seguito con un binocolo mentre si muove sullo sfondo delle stelle percorrendo mediamente circa 42" (0,7 primi d'arco) al giorno.

Urano ha in totale 21 satelliti. Solo i cinque maggiori sono osservabili dalla Terra, ma richiedono tutti strumenti impegnativi: per il dilettante non ci sono molte possibilità di osservazione, ed è già un successo cogliere la presenza dei satelliti più luminosi. Pare che Titania e Oberon – per l'appunto i più grandi e luminosi – siano stati visti con un rifrattore di 10,8 cm, ma si tratta di un risultato eccezionale (e per alcuni dubbio) se si pensa che la maggior parte degli osservatori necessita di un telescopio riflettore di almeno 25 cm di diametro e 2 metri di focale per vederli entrambi (magnitudine visuale in opposizione 14,0 per Titania, 14,2 per Oberon). Quando Urano si trova al perielio essi raggiungono la distanza massima apparente dal pianeta, allontanandosene rispettivamente di 35" e 47". Ariel e Umbriel (di magnitudine visuale rispettivamente 14,4 e 15,3) richiedono telescopi di 30-40 cm a f/10, e distano dal centro del pianeta al massimo 16" e 22". Miranda, invece, è riservato ai grandi strumenti professionali: all'opposizione risulta di magnitudine 16,5 e la sua distanza angolare apparente dal corpo centrale non supera mai gli 11".

Per osservare ed eventualmente fotografare i satelliti di Urano occorre usare ingrandimenti molto elevati, in buone serate. L'identificazione di queste lune lontane non è inoltre agevole a causa del grande numero di stelle di campo spesso presenti, perciò le difficoltà non si esauriscono con un discreto *seeing* e col raggiungimento di una magnitudine limite sufficiente. Una buona pratica consiste nell'annotare tutte le stelle visibili in prossimità del pianeta, poi nel riosservare alcune ore dopo (o la notte successiva) prestando attenzione agli eventuali spostamenti di quelle deboli stelle. Il compito, che richiede molta pazienza ed accuratezza all'osservatore visuale, può essere semplificato dall'utilizzo di una camera CCD che raggiunga rapidamente la magnitudine limite necessaria anche con strumenti di apertura modesta. Non è infatti indispensabile che il campo coperto sia molto esteso, e già un telescopio di 28 cm di diametro accoppiato a un buon CCD può,

in condizioni eccellenti, mettere in evidenza anche tutti e cinque i maggiori satelliti di Urano, soprattutto se si sommano insieme digitalmente tre o quattro riprese della stessa zona.

Urano è il primo dei cosiddetti “pianeti delle tenebre”, assieme a Nettuno e Plutone: le difficoltà di fotografarne il disco sono ben maggiori rispetto ai pianeti più interni. Solo nelle migliori condizioni possibili il suo diametro angolare apparente arriva a 4 secondi d’arco; come dire che con uno strumento di 10 metri di focale l’immagine sul negativo raggiungerebbe al massimo il quarto di millimetro. Ne consegue che soltanto con strumenti di grande apertura e con ottime condizioni atmosferiche vale la pena tentare di ottenere un’immagine che ne mostri il disco. Ma in ogni caso i risultati sono sempre modesti. In compenso il diametro apparente del pianeta varia pochissimo nel corso dell’orbita, e tutte le epoche in cui esso è visibile sono adatte per la sua ripresa, purché sia abbastanza alto sull’orizzonte. Il sistema di anelli, scoperto dalla Terra nel 1977 e osservato in dettaglio dalla sonda Voyager 2 nel 1986, non è praticamente fotografabile con nessun telescopio, a causa della sua debolezza.

Per strumenti amatoriali piccoli e medi bisogna accontentarsi di un’immagine puntiforme: lo si fotografa, cioè, come una stella. La sua luce, al minimo di magnitudine 6, permette di registrarne un’immagine anche con comuni macchine fotografiche senza alcun inseguimento orario. Ad esempio è adatta una fotocamera reflex con normale obiettivo di 50 mm di focale aperto a $f/2$, con la quale si può fotografare Urano con soli 15 secondi di posa utilizzando una pellicola di media sensibilità (400 ISO). Con pose sui 30 secondi inizia a notarsi il mosso causato dalla rotazione terrestre, ma l’immagine del pianeta diviene più evidente. Naturalmente i risultati migliori si ottengono con teleobiettivi e con l’inseguimento orario, adottando pose anche solo di un minuto. Per immagini di una certa estensione, eseguibili soltanto con strumenti di potenza estrema, a $f/100$ e con pellicola da 400 ISO, è necessario usare tempi intorno ai 30 secondi.

PARAMETRI ORBITALI E FISICI DI URANO

Scopritore	Friedrich Wilhelm Herschel
Data della scoperta	13 marzo 1781
Massa (kg)	$8,6832 \times 10^{25}$
Massa (Terra = 1)	14,536
Raggio equatoriale (km)	25.559
Raggio equatoriale (Terra = 1)	4,0073
Densità media (g/cm ³)	1,270
Distanza media dal Sole (km)	2.870.990.000
Distanza media dal Sole (Terra = 1)	19,19138
Periodo di rotazione (ore)	-17,24
Periodo orbitale (anni)	84,01
Velocità orbitale media (km/s)	6,81
Eccentricità orbitale	0,0461
Inclinazione dell'asse di rotazione (gradi)	97,86
Inclinazione dell'orbita (gradi)	0,774
Accelerazione di gravità all'equatore (m/s ²)	8,69
Velocità di fuga all'equatore (km/s)	21,30
Albedo di Bond	0,300
Albedo visuale geometrica	0,51
Magnitudine visuale apparente all'opposizione	5,52
Temperatura di corpo nero (K)	58,2
Temperatura media delle nubi (K)	80 (-193°C)
Pressione atmosferica al livello zero (bar)	1
Composizione dell'atmosfera	Idrogeno (83%), Elio (15%), Metano (2%)
Numero di satelliti	21

TABELLA RIASSUNTIVA DEGLI ANELLI DI URANO

Nome	Distanza dal centro del pianeta (km)	Larghezza radiale (km)	Spessore (km)	Massa	Albedo
1986U2R	(38.000)	(2500)	0,1	?	0,03
6	41.840	1-3	0,1	?	0,03
5	42.230	2-3	0,1	?	0,03
4	42.570	2-3	0,1	?	0,03
Alpha (α)	44.720	7-12	0,1	?	0,03
Beta (β)	45.660	8-12	0,1	?	0,03
Eta (η)	47.180	0-2	0,1	?	0,03
Gamma (γ)	47.630	1-4	0,1	?	0,03
Delta (δ)	48.300	3-9	0,1	?	0,03
Lambda (λ)	50.020	1-2	0,1	?	0,03
Epsilon (ε)	51.150	20-100	<0,15	?	0,03

TABELLA RIASSUNTIVA DEI SATELLITI DI URANO

Nome	Distanza media (km)	Raggio (km)	Eccentricità	Inclinazione (gradi)	Periodo orbitale (giorni)
Cordelia	49.752	20	0,000	0,08	0,335034
Ophelia	53.763	21	0,000	0,10	0,376400
Bianca	59.166	27	0,000	0,19	0,434579
Cressida	61.767	40	0,000	0,01	0,463570
Desdemona	62.658	32	0,000	0,11	0,473650
Juliet	64.358	47	0,000	0,07	0,493065
Portia	66.097	68	0,000	0,06	0,513196
Rosalind	69.927	36	0,000	0,28	0,558460
Belinda	75.256	40	0,000	0,03	0,623527
S/1986 U10 (?)	(76.500)	20	-	-	(0,620)
Puck	86.004	81	0,000	0,32	0,761833
Miranda	129.800	240 × 234,2 × 232,9	0,003	4,22	1,413479
Ariel	191.240	581,1 × 577,9 × 577,7	0,003	0,31	2,520379
Umbriel	266.000	584,7	0,005	0,36	4,144177
Titania	435.840	788,9	0,002	0,14	8,705872
Oberon	582.600	761,4	0,001	0,10	13,463239
Caliban	7.230.000	48	0,159	140,88	-579,5
Stephano	8.002.000	10	0,230	144,06	-676,5
Sycorax	12.179.000	95	0,522	159,40	-1283,4
Prospero	16.418.000	15	0,443	151,91	-1992,8
Setebos	17.459.000	15	0,588	158,17	-2202,3
S/2001 U1	(8.571.000)	10	(0,208)	(166,33)	(-758,1)

I valori incerti vengono chiusi tra parentesi tonde. Il segno – nel valore del periodo orbitale indica che l'orbita è percorsa in verso retrogrado.

Bibliografia

Libri:

- AA.VV.: Enciclopedia a fascicoli *Astronomia - alla scoperta del cielo*, ed. Curcio, Roma 1986, vol. 1, pagg. 67, 71-73; vol. 3, pagg. ; vol. 5, pagg.
- AA.VV.: Enciclopedia a schede *Astronomia - dalla Terra ai confini dell'Universo*, ed. Fabbri, Milano 1991 (Il cielo nella storia, pagg. 45-46; Sistema Solare, pagg. 35-36, 57-58, 211-212, 265-266, 269-270, 273-274, 277-278, 281-282, 287-288, 303-304, 353-354; Strumenti e metodi, pagg. 127-128, 143);
- Patrick Moore: *Il Guinness dell'astronomia*, ed. Rizzoli, Milano 1990;
- Alessandro Braccesi, Giovanni Caprara, Margherita Hack: *Alla scoperta del Sistema Solare*, ed. Mondadori, Milano 1993;
- Kenneth R. Lang, Charles A. Whitney: *Vagabondi nello spazio*, ed. Zanichelli, Bologna 1994;
- Marco Falorni, Paolo Tanga: *Osservare i pianeti*, manuale della sezione Pianeti dell'UAI, ed. Biroma, Galliera Veneta (PD) 1994.

Articoli:

- Marcello Fulchignoni: "La riscoperta del pianeta verde", *l'Astronomia* n.53 marzo 1986, pagg. 16-23;
- Maria Antonietta Barucci: "Uno sguardo al sistema di Urano", *l'Astronomia* n.53 marzo 1986, pagg. 24-38;
- Carlo Blanco, Danilo Riccioli: "Peculiarità negli anelli del Sistema Solare", *Nuovo Orione* n.3 agosto 1992, pagg. 60-65;
- Paolo Tanga: rubrica *Pianeti*, da *l'Astronomia* n.144 giugno 1994, pagg. 62-63;
- Mario Di Martino: "Urano l'eccezione", *l'Astronomia* n.150 gennaio 1995, pag. 11;
- Walter Ferreri: "Il pianeta Urano", *Nuovo Orione* n.53 ottobre 1996, pagg. 36-41;
- Massimiliano Razzano: "La famiglia Herschel", *Nuovo Orione* n.89 ottobre 1999, pagg. 34-37;
- Gianfranco Benegiamo: "Le nuove lune di Urano", *Nuovo Orione* n.109 giugno 2001, pagg. 46-49;
- Albino Carbognani: "Osservare Urano e Nettuno", *Astronomia UAI* n.4 luglio/agosto 2001, pagg. 4-9.