

NETTUNO

di **Federico Tosi**

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

Sommario

§I) STORIA	3
§II) CARATTERISTICHE ORBITALI E DINAMICHE	7
§III) L'ATMOSFERA	9
- STRUTTURA	9
- OSSERVAZIONI FOTOMETRICHE.....	11
- LA TEMPERATURA.....	11
- LE PRINCIPALI FORMAZIONI NUVOLOSE.....	12
§IV) LE OSSERVAZIONI DEL TELESCOPIO SPAZIALE	15
§V) IL CAMPO MAGNETICO	17
§VI) GLI ANELLI	19
§VII) I SATELLITI DI NETTUNO	22
- TRITONE.....	22
- PROTEUS.....	27
- LE LUNE MINORI.....	29
§VIII) ESPLORAZIONE SPAZIALE	31
§IX) OSSERVAZIONI AMATORIALI	34
PARAMETRI ORBITALI E FISICI DI NETTUNO	36
TABELLA RIASSUNTIVA DEGLI ANELLI DI NETTUNO	36
TABELLA RIASSUNTIVA DEI SATELLITI DI NETTUNO	37
BIBLIOGRAFIA	38

STORIA

Dopo la scoperta di Urano, avvenuta nel 1781, si trovò traccia di numerose sue osservazioni fin dal 1690, malgrado non ne fosse stata individuata la natura di pianeta. Le prime effemeridi di Urano furono ottenute a partire dal 1792 dall'astronomo francese Jean Baptiste Joseph Delambre (1749-1822), e quasi subito mostrarono notevoli discrepanze con le osservazioni. Delambre disponeva di numerosi dati che andavano dal periodo della scoperta fino al 1788, e di due osservazioni precedenti: una di Flamsteed del 1690 ed una di Mayer del 1756. Le tavole scaturite dal lavoro di Delambre risultarono soddisfacenti fino al 1820: in quell'anno le osservazioni di Urano contavano già 40 anni dalla scoperta; inoltre quelle relative alla pre-scoperta erano arrivate a 17. Ma le posizioni predette da Delambre differivano dalle osservazioni più recenti. Un tentativo di revisione fu intrapreso nel 1821 da Alexis Bouvard (1767-1843) e nel 1845 da suo nipote Eugène ma, al contrario degli altri corpi orbitanti, il pianeta sfuggiva a una previsione esatta delle orbite che risultasse valida per più di una decina d'anni: intorno al 1830 la differenza tra le previsioni e la posizione effettiva del pianeta era già cresciuta a circa 20 secondi d'arco.

Nello stesso 1845 l'*Académie des Sciences* parigina affrontò il problema, fornendo due spiegazioni possibili: o la legge di gravitazione non agiva a grandi distanze come sino allora stabilito e abbisognava di un qualche termine correttivo, oppure, come già ipotizzato nel 1834 dal reverendo T.J. Hussey, rettore a Hayes, era corretta e le incongruenze osservate erano causate dalla presenza perturbatrice di un ulteriore corpo massiccio facente parte del Sistema Solare e non ancora scoperto. L'incarico di esaminare la questione fu affidato da Jean-François Dominique Arago (1786-1853), direttore dell'Osservatorio di Parigi, al suo brillante assistente Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811-1877): si trattava di colui che oggi potremmo definire l'incaricato di esercizi di astronomia al Politecnico cittadino dove Arago insegnava, un giovane dal carattere orgoglioso e poco affabile ma dotato di innegabili doti matematiche, il quale, negli anni immediatamente precedenti, aveva già fatto un buon lavoro sull'orbita di Mercurio.

La verifica dell'esistenza di un possibile corpo perturbatore era concettualmente semplice: si trattava di determinare accuratamente le deviazioni del pianeta dall'orbita prevista in base alle perturbazioni indotte dai pianeti già noti, di confrontarle con quelle effettive di Urano e di usare le differenze per calcolare la massa, la distanza e la posizione sulla sfera celeste del pianeta sconosciuto. Nell'applicazione pratica, però, il problema era molto complesso. L'orbita di un pianeta è il risultato delle sue interazioni gravitazionali con il Sole e, in misura minore, con tutti gli altri pianeti del Sistema Solare. Se si sottraggono gli effetti indotti da tutti gli oggetti conosciuti tranne il Sole, l'orbita che si ottiene è quella *osculatrice*, cioè quella puramente kepleriana non perturbata, con in più, eventualmente, le perturbazioni introdotte dai pianeti sconosciuti se ce ne sono. Ciò implica che i parametri dell'orbita residua sono lievemente diversi da quelli previsti per l'orbita non perturbata: se dunque si derivano le perturbazioni introdotte dal pianeta sconosciuto a partire dall'orbita residua, si hanno in realtà delle perturbazioni, per così dire, di seconda approssimazione, che sono quelle che portano all'identificazione dei parametri del possibile nuovo corpo celeste.

Nel novembre del 1845 Le Verrier impostò dunque la ricerca sulle linee seguenti. Anzitutto, l'influenza di Giove e Saturno poteva essere esclusa, a meno di non assegnare ai due pianeti giganti masse molto diverse da quelle calcolate fino a quel momento. Poi, un certo numero di elementi orbitali incogniti potevano essere inseriti nelle equazioni, come per esempio la distanza del supposto ottavo pianeta, confidando nella regola empirica di Titius-Bode che forniva con una semplice formula i semiasse maggiori delle orbite planetarie note fino a quel tempo, e aveva già dimostrato la sua validità in occasione della scoperta di Urano e dei primi asteroidi. Vale ora la pena ricordare che ogni orbita dovrebbe essere descritta da sei parametri (semiasse maggiore, eccentricità, inclinazione, longitudine del nodo ascendente, longitudine del perielio e istante del passaggio al perielio, più eventualmente la massa del corpo orbitante). In base alla teoria delle

perturbazioni, gli elementi orbitali non restano fissi nel tempo ma variano in funzione delle reciproche interazioni planetarie, cosicché per osservazioni effettuate in epoche diverse essi risultano diversi. In conclusione, v'era un certo numero di equazioni che legavano tra loro le varie incognite indipendenti risultanti.

Le Verrier pervenne alla previsione finale della possibile posizione del corpo perturbante il 31 agosto 1846, e la espose in una memoria sul tema presentata davanti all'*Académie*. Non aveva tuttavia il modo di verificare se la posizione prevista fosse effettivamente occupata da un corpo celeste, non perché non disponesse di telescopi, ma perché a Parigi non c'erano buone carte celesti sulle quali distinguere un nuovo oggetto dalle stelle di campo. Queste carte erano invece state appena disegnate a Berlino nell'*Akademische Sternkarten*, un atlante celeste assai accurato che elencava anche stelle piuttosto deboli, pubblicato a cura dell'Accademia delle Scienze di Berlino e realizzato sotto la guida di F.W. Bessel e J.F. Encke, direttori rispettivamente degli Osservatori di Königsberg e Berlino. Le Verrier chiese quindi ai colleghi tedeschi di effettuare le necessarie osservazioni, con una lettera datata 18 settembre.

Un assistente di Encke, il professor Johann Gottfried Galle (1812-1910), ricevette la missiva del teorico francese il 23 settembre. Quel giorno, a Berlino, il cielo era sereno, e la sera stessa Galle si mise subito alla ricerca del nuovo pianeta: ottenuto dal direttore il permesso di usare il rifrattore *Fraunhofer* di 23 cm, orgoglio dell'Osservatorio, e assistito dal suo giovane studente Heinrich Louis D'Arrest, iniziò a scrutare la zona di cielo indicata da Le Verrier nella speranza di riconoscere il pianeta grazie al disco (stimato dallo studioso francese in 3,3 secondi d'arco). Ma nessun disco venne percepito con certezza. Allora Galle usò un altro metodo: egli si mise ad osservare le stelle visibili al telescopio e l'assistente ne verificava la presenza sulla carta n.21 dell'atlante, ancora fresca di stampa. Questo esame era stato intrapreso da circa mezz'ora, quando Galle poté scorgere in prossimità dell'eclittica, nella costellazione zodiacale dell'Acquario al confine con quella del Capricorno, un oggetto di ottava magnitudine che sulla carta non compariva, trovandolo ad una distanza angolare di appena 52 primi d'arco dalla posizione indicata da Le Verrier. Subito osservato anche da Encke con il grande telescopio equatoriale dell'Osservatorio, il nuovo corpo celeste si mostrò in forma di disco appena accennato, e nel corso della stessa notte fu pure possibile apprezzarne il movimento angolare rispetto alle stelle di sfondo. In una lettera datata 25 settembre 1846, Galle comunicò a Le Verrier quanto segue:

«Signore, il pianeta del quale avete indicato la posizione esiste realmente. Il giorno stesso che ricevetti la vostra lettera trovai una stella di ottava magnitudine non registrata sull'eccellente Carta Hora XXI disegnata dal dottor Bremiker. Mie osservazioni del giorno seguente confermarono che questa stella era il pianeta cercato [...]».

Anche in Inghilterra vi era tuttavia chi aveva previsto la presenza e la posizione di un nuovo pianeta. Si trattava di John Couch Adams (1819-1892), uno studente di lettere del St. John's College di Cambridge con una grande passione per l'astronomia, che si era messo sulle tracce del misterioso corpo celeste dopo aver letto una memoria sul problema scritta dal direttore dell'Osservatorio di Greenwich, il celebre astronomo reale Sir George Biddell Airy (1801-1892). Il giovane Adams aveva già trovato una prima approssimazione dell'orbita del nuovo pianeta nel 1843, appena laureato, ma per tre anni, a causa di vari motivi, non era mai riuscito a farsi dare ascolto da Airy. Nell'ottobre del 1845 concluse il suo lavoro costruendo un'orbita definitiva per il nuovo pianeta ed indicandone una posizione che, a quanto sappiamo oggi, differiva di meno di 2° dalla posizione vera (due gradi, in cielo, sono pari a quattro volte il diametro della Luna). Solo il 9 luglio 1846, quando i francesi erano ormai vicini alla soluzione, Airy incaricò il suo astronomo James Challis, professore a Cambridge, di organizzare un programma di ricerca per verificare la previsione.

L'unico telescopio inglese in grado di svolgere questo tipo di compito (nonché il più grande telescopio a lenti d'Inghilterra) era il rifrattore *Northumberland* da 29,5 cm di diametro

dell'Osservatorio di Cambridge, e qui la ricerca fu avviata secondo i metodi tradizionali, cioè con la determinazione, al circolo meridiano, della posizione delle stelle nella zona di interesse, che sarebbe stata ripetuta dopo un certo tempo per verificare se qualche stella avesse cambiato la propria posizione: un metodo concettualmente corretto ma lungo. Le osservazioni ebbero inizio il 29 luglio 1846, ma a causa del cattivo tempo fu possibile osservare solo nei giorni 29 e 30 luglio e 4 e 12 agosto. Sorprendentemente, le osservazioni non furono ridotte e furono effettuati solo controlli parziali: se, al contrario, le osservazioni fossero state completamente ridotte, Challis si sarebbe accorto che una stellina di ottava grandezza osservata il 12 agosto era completamente assente nelle osservazioni del 30 luglio. Un esame più approfondito avrebbe poi mostrato che egli aveva osservato il pianeta sconosciuto già il 4 agosto. La negligenza di Challis era dovuta a un misto di scarsa fiducia nelle stravaganti richieste di Airy e a un'eccessiva considerazione dell'importanza delle proprie ricerche sulle orbite cometary. L'astronomo inglese ricevette il lavoro di Le Verrier solo il 29 settembre, e quella stessa sera osservò, a poca distanza dalla posizione predetta, il nuovo pianeta. Ma ormai era troppo tardi, e il 1° ottobre giunse la notizia ufficiale che a Berlino l'astronomo Galle aveva già scoperto da una settimana il pianeta, per il quale il *Bureau des Longitudes* parigino aveva scelto il nome di *Nettuno*, in onore del dio romano del mare. L'insuccesso degli inglesi è senza dubbio da ascrivere a una serie di sfortunate coincidenze, tra le quali la mancanza di un'adeguata carta celeste: lo scarso impegno con cui furono effettuate le osservazioni a Cambridge può essere giustificato considerando, oltre allo scetticismo di Airy e all'inerzia di Challis, quanto fosse ardua l'impresa di riconoscere un astro di ottava magnitudine con le carte allora disponibili.

Il primo annuncio dei calcoli indipendenti di Adams – quasi altrettanto esatti di quelli di Le Verrier – fu dato il 3 ottobre 1846 da Sir John Herschel, figlio del grande William, e causò una profonda irritazione in Francia. Malgrado un'aspra disputa giornalistica sorta sulla paternità della scoperta, nella quale peraltro non ebbero molta parte né Adams né Le Verrier, entrambi vennero ricoperti di onori dalle rispettive monarchie. Sta di fatto che le orbite calcolate in ambedue i casi erano piuttosto differenti da quanto risultò all'osservazione: Nettuno distava dal Sole non 38,8 ma sole 30 Unità Astronomiche (si ricorda che una Unità Astronomica è pari alla distanza media Terra-Sole, circa 149,6 milioni di chilometri), e anche il valore dell'eccentricità calcolato era eccessivo. Oltre ad aver preso per buona la pseudoregola di Titius-Bode senza un reale motivo fisico (si dimostrerà infatti infondata proprio con Nettuno), i due astronomi avevano ipotizzato una perturbazione costante da parte del nuovo pianeta su Urano, mentre invece questa agisce praticamente solo quando i due pianeti si trovano in congiunzione, ovvero nel punto di massima vicinanza. Ma queste ombre sulla scoperta di Nettuno non diminuirono la sua importanza: pur con l'intervento di una buona dose di fortuna, essa aumentò il raggio del Sistema Solare di un fattore 1,6, e poté essere considerata il massimo trionfo della meccanica celeste del diciannovesimo secolo. Non solo tale dottrina aveva infatti predetto l'esistenza di un altro corpo maggiore del Sistema Solare, ma era riuscita a dimostrare inequivocabilmente che le numerose anomalie osservate nei moti celesti non mettevano in crisi la legge di gravitazione universale, la quale, appunto con la meccanica celeste, divenne il vero pilastro del cosmo.

Con la scoperta di Nettuno, la questione circa la validità della legge di Newton sembrava definitivamente risolta. C'era una sola eccezione: Mercurio, il pianeta più vicino al Sole, mostrava una irregolarità (una lenta precessione o avanzamento del perielio) che nemmeno i calcoli più rigorosi riuscivano a spiegare. Le Verrier, salito agli onori della fama e divenuto nel 1854 direttore dell'Osservatorio di Parigi, tentò di bissare il trionfo ottenuto con Nettuno calcolando la posizione di un ipotetico pianeta, battezzato in anticipo *Vulcano*, il quale avrebbe dovuto causare la perturbazione osservata; ma Vulcano non fu mai trovato nella posizione calcolata, né altrove, e la questione venne accantonata in attesa di tempi migliori. La soluzione del mistero arrivò nel 1916, quando Albert Einstein pubblicò la sua Teoria della Relatività Generale. Secondo questa teoria la gravità non è più una forza che attira i corpi ma l'effetto della curvatura dello spazio. La relatività generale, la cui validità è stata verificata nel corso degli anni con numerosissimi esperimenti, spiega

molto bene il residuo di 43 secondi d'arco per secolo del moto del perielio di Mercurio per cui la presenza del fantomatico Vulcano non era più necessaria.

Da ultimo è curioso osservare che nel 1980 l'astronomo americano Charles T. Kowal, per poter valutare meglio la precisione dell'orbita di Nettuno, cercò di raccogliere avvistamenti del pianeta anteriori alla sua scoperta. Era stato calcolato che nella notte fra il 3 e il 4 gennaio 1613 Giove dovette "occultare" Nettuno (cioè interporsi fra questo e la Terra) nella costellazione della Vergine, perciò Kowal decise di controllare nel diario di Galileo, che in quel periodo stava eseguendo accurate osservazioni del sistema gioviano, se ci fosse una qualche traccia della presenza di Nettuno. Galileo era solito segnare nel diario la posizione relativa di Giove, dei suoi satelliti maggiori e quella delle stelle di campo. Il 28 gennaio riportava un disegno di due stelle che erano allineate con Giove, con a margine la seguente osservazione: «Oltre la stella fissa *a* ne seguiva un'altra sulla stessa linea, [...], la quale fu osservata anche la notte precedente; ma sembravano più lontane fra loro». Purtroppo Galileo nelle notti successive non si occupò più delle due stelle, ma queste annotazioni rivelano come egli, quasi 234 anni prima di Galle, avesse effettivamente osservato Nettuno, senza peraltro riconoscerlo come pianeta.

CARATTERISTICHE ORBITALI E DINAMICHE

Nettuno orbita a una distanza media dal Sole di 4497,07 milioni di chilometri (pari a 30,0611 UA) e per completare una rivoluzione impiega circa 164,79 anni, quindi da quando è stato scoperto non ne ha ancora portato a termine una per intero. L'orbita del pianeta è leggermente ellittica ($e = 0,0097$) e giace praticamente sul piano dell'eclittica, con un'inclinazione di appena $1^{\circ},774$ ($1^{\circ}46'$); per la scarsa eccentricità la distanza di Nettuno dal Sole non varia mai di molto, passando dai 4459 milioni di km del perielio ai 4538 milioni di km dell'afelio. Nel ventennio compreso tra il 7 febbraio 1979 e l'11 febbraio 1999 si è verificata la circostanza che Nettuno era il pianeta più esterno del Sistema Solare, dal momento che Plutone penetrava all'interno della sua orbita.

Riguardo l'orbita stessa, le teorie sulla formazione del sistema planetario suggeriscono che Nettuno probabilmente si sia formato più vicino al Sole rispetto alla sua posizione attuale. Mentre accumulava materiale, il proto-Nettuno avrebbe avuto infatti un gran numero di incontri ravvicinati con planetesimi di passaggio, residui non aggregati – ma di dimensioni anche considerevoli – della nebulosa solare originaria, deviandone una parte verso l'esterno e altri verso le zone più interne del Sistema Solare. I modelli quantitativi mostrano che questi ultimi dovettero essere la maggioranza, cosicché Nettuno, guadagnando energia, finì per allargare via via la sua orbita, fino a raggiungere quella odierna. Nel corso di questa migrazione, estesasi per un valore compreso tra 5 e 10 UA e durata un tempo dell'ordine della decina di milioni di anni, anche le risonanze di moto medio (che insorgono quando due oggetti orbitanti hanno periodi che stanno tra loro come i rapporti fra numeri interi piccoli, e danno luogo ad un'amplificazione delle reciproche perturbazioni gravitazionali) si spostarono rigidamente verso l'esterno insieme con Nettuno, “catturando” e trascinando con sé tutti gli oggetti che incontravano sulla loro strada; questi cominciarono a loro volta ad allontanarsi dal Sole aumentando progressivamente anche l'eccentricità delle loro orbite. Lo stesso Plutone avrebbe subito questa sorte: formatosi inizialmente in un'orbita quasi circolare e quasi coincidente con il piano dell'eclittica, “cadde” nella buca di potenziale gravitazionale rappresentata dalla risonanza 3:2 con Nettuno (nel senso che il periodo orbitale ad essa corrispondente è pari ai $3/2$ di quello di Nettuno), e fu forzato a modificare la propria orbita da circolare in ellittica, aumentando anche l'inclinazione dell'orbita stessa e subendo forse a sua volta alcune collisioni con i planetesimi dello sciame originario cui apparteneva. Questi risultati suggeriscono inoltre che anche Urano probabilmente si sia mosso in maniera considerevole verso l'esterno rispetto al suo luogo di formazione.

A causa della sua grande distanza dalla Terra, lo studio di Nettuno è progredito con difficoltà: le osservazioni telescopiche restituivano l'immagine di un piccolo disco verde-azzurro di appena 2 secondi d'arco di diametro angolare, circa la metà di quello di Urano, che non presentava segni o strutture osservabili. La difficoltà nell'osservazione del pianeta risiede anche nella sua scarsa luminosità: mentre Urano si trova al limite di visibilità ad occhio nudo, Nettuno, quando appare illuminato dal Sole, risulta cinque volte più debole, il che significa che sarebbero necessari cinque pianeti come Nettuno per uguagliare lo splendore di Urano. Solo in un paio di casi infatti erano state identificate delle piccole macchie bianche, molto più luminose, che sembravano stagliarsi sullo sfondo uniforme del pianeta.

Questo quadro di desolante mancanza di dati venne sconvolto nel 1989 dalla sonda spaziale americana Voyager 2, che concluse il suo fantastico *grand tour* dei pianeti esterni passando a meno di 5000 km dalla sommità delle nubi nettuniane. Dai dati inviati a Terra sappiamo oggi con certezza che il pianeta ha una massa di $1,0243 \times 10^{26}$ kg (17,147 volte quella della Terra) e una densità media pari a $1,64 \text{ g/cm}^3$ (quella dell'acqua liquida è di 1 g/cm^3). Come tutti i giganti di tipo gioviano, Nettuno non presenta una separazione netta tra un'atmosfera gassosa e una superficie solida, per cui si definisce convenzionalmente come *livello zero* quello a cui corrisponde la pressione di 1 bar (si ricorda che 1 bar equivale a 100.000 Pascal, ovvero circa 0,987 atmosfere). Il raggio equatoriale

così definito è risultato pari a 24.764 km; quello polare, a causa dello schiacciamento del pianeta, è più corto di 421 km. Sempre a causa della natura “fluida” di Nettuno non esiste un periodo di rotazione univocamente definito: rispetto alle stelle l’equatore compie un giro in 19,2 ore, mentre il campo magnetico, che in qualche modo è ancorato all’interno del pianeta, ruota in appena 16,11 ore (16h 06m), periodo che di norma viene assunto come quello vero. L’asse di rotazione è inclinato di 29°,6 rispetto alla perpendicolare dell’orbita.

Nettuno è stato spesso considerato un pianeta gemello di Urano, ma sicuramente non si tratta di un gemello identico: esso è infatti leggermente più piccolo di Urano, ma di poco più massiccio e denso; inoltre Nettuno presenta un’inclinazione “normale” dell’asse di rotazione, mentre la caratteristica principale di Urano è quella di avere una rotazione retrograda, con l’asse che giace quasi sul piano dell’orbita. Le diversità tra i due corpi celesti rimangono evidenti quando si va ad analizzare l’aspetto esteriore della loro atmosfera.

L'ATMOSFERA

- STRUTTURA -

Le osservazioni della sonda Voyager 2 hanno confermato la somiglianza di Nettuno con Urano, non solo per quanto concerne la massa e le dimensioni, ma anche per ciò che riguarda il sistema di quattro anelli e undici satelliti che circondano il pianeta, di cui discuteremo ampiamente in un secondo tempo. Pure l'involucro gassoso dei due pianeti, dal punto di vista della composizione e della struttura interna, è assai simile: già alla fine dell'Ottocento si sapeva che lo spettro di Nettuno presenta fortissime bande di assorbimento; analizzate in notevole dettaglio da Vesto M. Slipher nel 1912, esse rivelarono la presenza di metano. In effetti la composizione chimica dell'atmosfera di Nettuno indica la netta abbondanza di idrogeno molecolare (80%), seguito dall'elio (19%), e da quantità relativamente minori di metano, acqua e anidride carbonica che si condensano a formare nubi e pioggia. Il rapporto tra la massa dell'He e quella dell'H₂ è pari a $0,32 \pm 0,05$. Ciò che più colpisce di Nettuno è la meravigliosa colorazione azzurra della sua atmosfera, che può essere spiegata in base alla composizione e alla riflettività dell'atmosfera stessa: alle rigide temperature che si possono incontrare nell'involucro gassoso del pianeta (fino a valori minimi di -220°C), gli strati uniformi di nubi si formano a grande profondità, lasciando al metano sovrastante, presente in tracce nell'atmosfera di idrogeno ed elio, il compito di assorbire selettivamente le radiazioni solari di lunghezza d'onda maggiore (corrispondenti ai colori rosso, arancione e giallo). Nello spazio viene così riflessa la porzione dello spettro di lunghezza d'onda minore, relativa ai colori verde, blu e violetto, che conferisce al pianeta il suo caratteristico aspetto.

Alcuni modelli teorici indicano che l'atmosfera di Nettuno, al pari di quella di Urano, si dovrebbe estendere per circa 1/3 del raggio del pianeta, sovrastando un immenso oceano di acqua, ammoniacca e metano sottoposto a una pressione di 200.000 atm e a una temperatura che sfiora i 2500°C . Al centro del pianeta dovrebbe invece esserci un nucleo costituito presumibilmente da un amalgama di elementi pesanti, soprattutto silicio e ferro: un materiale "roccioso", sebbene le sue proprietà fisiche siano completamente diverse da quelle delle rocce ordinarie. Questo nucleo, di massa pari a 3-4 masse terrestri, avrebbe funzionato da "seme" per l'accrescimento del gas nebulare. Gli studi più recenti, tuttavia, suggeriscono sia per Nettuno che per Urano un modello a due strati, con un grosso nucleo di roccia e ghiaccio avvolto da un'atmosfera superdensa presente in entrambe le fasi liquida e gassosa, oppure un modello addirittura più semplificato, con un unico strato indifferenziato formato da un ammasso di miliardi di nuclei cometari.

Ricercatori dell'Università della California (Berkeley) stanno cercando di capire come possa essere fatto il nucleo di questi due pianeti, e dalle loro analisi risulterebbe che potrebbero avere un "cuore" di diamante. Infatti il metano, che a una profondità di oltre 4000 km al di sotto della superficie visibile di Urano e Nettuno diventa uno dei costituenti dominanti dei due pianeti, nelle condizioni di intensa pressione e temperatura a cui si trova sottoposto tende a scindersi in carbonio e idrogeno, i due elementi che lo compongono, e il carbonio a sua volta si addensa in varie strutture tra le quali quella del diamante (di cui è l'elemento unico). Dato che la massa di Nettuno è leggermente maggiore di quella di Urano, non è improbabile che una grande quantità di metano presente nel mantello del pianeta si possa trasformare in diamante, e ciò potrebbe avere anche un importante ruolo nel ciclo chimico che produce calore al suo interno. Essendo infatti più densi del fluido da cui si formano, i diamanti tenderebbero a precipitare verso le regioni interne trasformando in calore la loro energia potenziale. Questo calore potrebbe indurre moti convettivi, incrementando il campo magnetico di Nettuno, che da questi moti dipende, e contribuire all'eccesso di calore che viene irradiato dal pianeta rispetto a quello che riceve dal Sole. Il metano può comunque decomporsi anche a minori profondità, producendo gli idrocarburi leggeri individuati nell'atmosfera di Urano e

Nettuno sia con osservazioni telescopiche sia dalla sonda Voyager 2. In una serie di esperimenti condotti da un altro gruppo di ricerca, infatti, si è riscontrato che il metano diventa instabile già a una pressione di 70 mila atmosfere e a una temperatura di 2000 K, condizioni che sono presenti a poche migliaia di chilometri sotto la superficie visibile dei due pianeti. Da profondità così modeste i prodotti della decomposizione del metano, come l'etano, hanno la possibilità di risalire sino alla superficie. Questi risultati costringono a rivedere i modelli classici che descrivono l'interno dei pianeti giganti come una serie di strati imperturbati di diversa composizione. Purtroppo, le osservazioni condotte da Terra e in particolare dal Voyager 2 hanno potuto sondare solo gli strati più esterni dell'atmosfera, fin dove la pressione non supera di dieci volte quella che si riscontra sulla superficie del nostro pianeta.

Le temperature su Nettuno sono decisamente basse. Alla "superficie", ossia alla quota corrispondente alla pressione di 1 bar, la temperatura cessa di diminuire e si stabilizza su un valore attorno ai 73 K (-200°C); tuttavia aumenta rapidamente verso l'interno ed è comunque più alta di quella prevista in base alla radiazione solare incidente. Si può notare come i profili verticali di temperatura in funzione della quota siano quasi identici per Urano e Nettuno, anche se quest'ultimo è molto più lontano dal Sole. L'unica differenza si registra a circa 125 km sopra il livello di riferimento, dove la pressione è di 1/100 di atm: a questa quota la temperatura di Urano rimane costante, mentre quella di Nettuno riprende a salire e raggiunge i 150 K (-123°C) a un'altezza di 250 km sopra il livello zero, dove la pressione è di circa un decimillesimo di atm.

Circa la struttura interna dell'atmosfera di Nettuno, i modelli teorici prevedono che, a profondità inaccessibili alle osservazioni, il pianeta presenti strati sovrapposti di nubi di acqua (H_2O , a 100 atm e oltre), idrosolfuro di ammonio (NH_4SH , a 50 atm) e ammoniaca (NH_3 , a 10 atm). A 80 km sotto il livello di riferimento, dove la temperatura è di 130 K (-143°C) e la pressione di 3 atm, si stende uno strato di nubi di ammoniaca e solfuro di idrogeno, mentre 40 km più in alto, dove la pressione comincia ad avvicinarsi al valore di 1 atm tipico del livello zero, il metano condensa formando uno strato di nubi. Ad altezze ancora maggiori, dove la pressione è compresa fra un centesimo e qualche millesimo di atm, si trovano tenui nebbie fotochimiche di idrocarburi complessi quali l'etano (C_2H_6) e l'acetilene (C_2H_2), originati dalla dissociazione del metano da parte della radiazione ultravioletta solare che raggiunge l'alta atmosfera. Tali idrocarburi si legano a formare particelle più grandi che precipitano nelle regioni sottostanti più calde, dove si combinano con l'idrogeno riformando metano. Quest'ultimo viene nuovamente trascinato in alto da colonne di nubi, perciò dette *colonnari*, e in tal modo il ciclo ricomincia, instaurando un vigoroso processo di rimescolamento convettivo. La struttura a strati delle nubi è chiaramente visibile in alcune immagini particolarmente fortunate della sonda, in cui si possono scorgere nuvole molto alte che gettano la loro ombra sugli strati inferiori. Un modo meno casuale di mettere in evidenza la stratificazione delle nubi consiste nel fotografare più immagini in diverse lunghezze d'onda, dall'ultravioletto al visibile fino all'infrarosso: solo le nubi più elevate sono visibili nella luce ultravioletta, che è fortemente diffusa dalle particelle dell'alta atmosfera; osservando alle lunghezze d'onda del visibile caratteristiche del metano (514 e 619 nm) si scorgono altri dettagli di nubi e un bordo più splendente del resto del disco, dovuto a uno strato di nebbia di metano situato a grande altezza.

Nel 1997 il satellite europeo per astronomia infrarossa ISO (*Infrared Space Observatory*) osservò le atmosfere di Saturno, Urano e Nettuno nella regione del medio e lontano infrarosso compresa tra 7 e 45 micron, alla ricerca delle righe di emissione caratteristiche dell'acqua. I risultati mostrarono che tracce di vapor d'acqua erano presenti nelle stratosfere di tutti e tre i pianeti, sebbene naturalmente a concentrazioni (20 parti per miliardo) molto più basse di quelle terrestri. Tuttavia, anche se di valore così basso, queste abbondanze risultano troppo elevate per poter essere originate dalle regioni interne di quei pianeti. Si deve quindi dedurre che buona parte dell'acqua osservata provenga dall'esterno, sebbene finora siano state fatte solo ipotesi su quale meccanismo ne sia responsabile. Le osservazioni di ISO hanno inoltre rivelato un'abbondanza relativamente elevata di anidride carbonica (CO_2) su Saturno e Nettuno, a differenza di Urano ove è presente solo in tracce.

Tra i possibili responsabili della presenza di CO₂ vi è il monossido di carbonio (CO), trasportato dai moti atmosferici verso le regioni più esterne, e che risulta essere molto poco abbondante su Urano. Parte del CO potrebbe quindi essere ossidato dall'OH prodotto dalla fotolisi delle molecole di acqua e dare luogo alla produzione di CO₂. Un processo analogo è con ogni probabilità il responsabile della produzione di questa molecola nella stratosfera di Titano, il principale satellite di Saturno.

- OSSERVAZIONI FOTOMETRICHE -

Alla distanza a cui si trova, Nettuno riceve una quantità di radiazione solare circa 904 volte inferiore a quella che arriva sulla Terra: il diametro apparente medio del Sole, osservato da Nettuno, è di soli 1,06 primi d'arco, 30 volte più piccolo di quello visibile dal nostro pianeta e dunque puntiforme per l'occhio umano. Eppure la dinamica dell'atmosfera sembra essere legata in maniera importante all'attività solare. Dal 1972, presso il *Lowell Observatory* di Flagstaff (Arizona), viene seguito sistematicamente il comportamento fotometrico di Nettuno per verificare l'eventuale emergere di queste correlazioni. Con il fotometro fotoelettrico applicato al riflettore Cassegrain di 50 cm dell'Osservatorio, due astronomi, G.W. Lockwood e D.T. Thompson, hanno scoperto che nel periodo tra il 1972 e il 2000 l'albedo visuale nettuniana ha mostrato un curioso andamento: dal 1980 in poi è andata aumentando, in modo particolare dopo il 1990, con il risultato che allo stato attuale Nettuno è più luminoso che nei precedenti 50 anni.

Inizialmente era stata ipotizzata una possibile anticorrelazione con il ciclo di attività solare, cioè si pensava che il pianeta risultasse meno brillante quando era massimo il numero dei gruppi e delle macchie sul Sole. Tuttavia, quando nel 1988 il Sole si avviava alla sua fase di massimo undecennale, il pianeta invertiva stranamente l'andamento incostante nella luminosità e aumentava progressivamente la propria albedo, fino a raggiungere i valori massimi oggi rilevati. Com'è logico, dal 1991 in poi nacquero forti dubbi sulla validità dell'ipotesi originaria, ma nel contempo bisognava riconoscere che l'esistenza di una correlazione tra questo fenomeno e l'attività solare era pur sempre plausibile. Infatti, posto che la distanza dal Sole di Nettuno varia poco nel corso dell'orbita, e che quindi l'irraggiamento è pressoché costante, per giustificare questo andamento bisognava considerare che l'attività atmosferica del pianeta fosse in qualche altro modo influenzata dalle dinamiche energetiche dell'astro.

Dagli studi di Lockwood e Thompson, proseguiti per un altro ciclo solare fino a tutto il 2000, è emerso che, tra le possibili cause, quella più convincente pare essere legata al flusso di raggi ultravioletti emessi dal Sole. È stato infatti dimostrato che variazioni nel flusso di raggi UV solari possono influenzare in modo significativo la copertura nuvolosa di un pianeta e di conseguenza anche la sua riflettività, un effetto questo che riguarda anche la Terra.

- LA TEMPERATURA -

Malgrado la sua bassa temperatura, Nettuno, osservato nell'infrarosso termico, appare assai brillante. Mappe della superficie alla lunghezza d'onda di 29 micron, ricavate grazie al rivelatore infrarosso IRIS installato a bordo della sonda Voyager 2, indicano che la temperatura è maggiore all'equatore e ai poli, con valori di circa 58-60 K (-213°C). Le zone a latitudine intermedia hanno temperature più basse, comprese fra 54 e 58 K. Più precisamente, mentre l'immagine in luce bianca mostra tracce appena visibili di fasce parallele all'equatore, come nel caso di Giove e Saturno, l'immagine in radiazione infrarossa indica che le zone di uguale temperatura sono collocate in distinte fasce parallele all'equatore, distribuite simmetricamente rispetto ad esso. Si ha dunque la fascia equatoriale alla temperatura di circa 58 K con macchie a 60 K; poi due fasce a circa 15° di

latitudine sopra e sotto l'equatore, a 57 K; due fasce simmetriche rispetto all'equatore a 30° di latitudine con temperature minime di 53-54 K; altre due fasce circumpolari in cui la temperatura risale a 57 K e infine i poli con temperature quasi uguali a quelle equatoriali. In pratica vi è una sorprendente uniformità della temperatura in funzione della latitudine: questo comportamento appare strano, anche perché al momento delle osservazioni di Voyager 2 il Sole si trovava allo zenit delle latitudini intermedie, e tutto porterebbe a ritenere che il calore interno di Nettuno sia più importante di quello dovuto al debole irraggiamento solare. L'interazione delle due fonti di calore può dar luogo a complesse correnti di gas ascendenti e discendenti, in grado di ridistribuire molto efficacemente il calore spiegando così questo tipo di distribuzione superficiale della temperatura; più esattamente, le correnti di gas a medie latitudini salgono verso l'alto raffreddandosi e, giunte al di sopra dei poli e dell'equatore, discendono di nuovo a quote più basse, riscaldandosi. Inoltre, mentre su Giove, in corrispondenza della Grande Macchia Rossa, la temperatura è più bassa che nel resto della fascia che la ospita, su Nettuno, in corrispondenza della Grande Macchia Scura, il radiometro per l'infrarosso non ha misurato alcuna differenza di temperatura con le regioni limitrofe.

Un dato di fatto è che la maggiore brillantezza media di Nettuno rispetto a Urano può essere spiegata con una più alta abbondanza di metano, oppure, più verosimilmente, con una minore opacità dell'atmosfera. Ciò sarebbe confermato indirettamente dal fatto che Nettuno emette nell'infrarosso circa 2,6 volte più energia di quella che riceve dal Sole, mentre per Urano il rapporto è molto vicino a uno. È assai probabile che ciò sia semplicemente dovuto alla maggiore trasparenza dell'atmosfera di Nettuno che disperde più efficacemente il calore interno nello spazio per irraggiamento infrarosso, mentre la sorgente di questa energia "nascosta" è quasi certamente il nucleo del pianeta, che non si è ancora liberato del calore prodotto per compressione durante la sua formazione: questa fonte di calore può giustificare il profilo verticale di temperatura e in parte anche le anomale variazioni di luminosità globale di cui si è detto in precedenza. Infatti la sommità delle nubi atmosferiche di Nettuno, dove la temperatura più alta è risultata di -213°C , ha rivelato l'esistenza di tempeste che non possono essere giustificate solo con l'attività solare, poiché la temperatura teorica nel punto subsolare è nell'ordine di -230°C . La maggiore trasparenza dell'atmosfera di Nettuno sarebbe dovuta al fatto che la costituzione di smog, capace di assorbire la radiazione infrarossa, è ostacolata dalla grande lontananza dal Sole: meno radiazione ultravioletta è così disponibile per dissociare il metano, l'etano e l'acetilene e creare gli idrocarburi che condensano formando le caratteristiche nebbie, quelle stesse nebbie che invece ricoprono completamente Urano impedendone l'osservazione dei dettagli atmosferici. Senza contare che un efficace meccanismo di rimozione di queste foschie è dato su Nettuno dal rimescolamento verticale dell'atmosfera, in grado di trasportare le particelle di smog sotto il livello delle nubi opache.

- LE PRINCIPALI FORMAZIONI NUVOLOSE -

Mentre Urano aveva offerto alle telecamere del Voyager 2 un volto blando e privo di particolari, l'atmosfera di Nettuno si è rivelata molto più attiva: oltre a brillanti nubi bianche simili a cirri giganteschi e formate da cristalli di metano o etano ghiacciati, la sonda spaziale ha anche ripreso delle distinte bande di nubi che avvolgono tutto il pianeta, correndo parallele all'equatore. Ciò indica la presenza di forti correnti *zonali*, cioè dirette lungo i paralleli, come accade su Giove e Saturno. Le differenze di albedo tra le diverse fasce possono essere dovute al variabile contenuto di ghiaccio nell'alta atmosfera.

La formazione più caratteristica, scoperta dalle telecamere del Voyager 2 già otto mesi prima del massimo avvicinamento, fu la cosiddetta *Grande Macchia Scura* (GMS, oppure, secondo la denominazione anglosassone, GDS, *Great Dark Spot*), un enorme ovale localizzato nell'emisfero meridionale a latitudini comprese fra 8° e 28° , che completava un giro attorno all'asse di rotazione

del pianeta in 18,3 ore. Una macchia brillante più piccola fu individuata a 42° sud, e poiché sopravanzava la Grande Macchia Scura ogni 8 giorni, muovendosi nell'atmosfera più rapidamente delle altre formazioni nuvolose, venne denominata *Scooter* dagli scienziati del centro di controllo della missione Voyager. Una terza formazione, confinata tra 51° e 55° sud ed estesa per circa 3000 km, si muoveva quasi di conserva a Scooter impiegando 16,5 ore a compiere un giro: era un ovale scuro con nubi bianche centrali molto variabili, probabilmente causate da correnti ascendenti di metano, che per la sua somiglianza con la GMS fu battezzato *DS2*. La misurazione del periodo di rotazione del nucleo di Nettuno, pari a 16,11 ore, dimostrò comunque che, rispetto al pianeta, le tre formazioni si muovevano verso occidente e che la più veloce di esse (325 m/s, ovvero 1170 km/h) era proprio la GMS. Quindi, a differenza di quanto succede su Giove e Saturno, dove vicino all'equatore i venti sono diretti verso est, su Nettuno le correnti equatoriali spirano violentemente verso ponente, in senso contrario alla rotazione, e questo significa che le nubi temporalesche rimangono indietro rispetto all'interno del pianeta.

Per Nettuno la misura delle velocità dei venti zonali è stata in parte semplificata dalla presenza di numerose formazioni atmosferiche: ne è risultata una fortissima rotazione differenziale analoga a quella di Urano, con venti che alle medie latitudini soffiano verso est, mentre nelle regioni equatoriali spirano verso ovest, sfiorando anche punte di 610 m/s (quasi 2200 km/h): un record significativo e strabiliante se si pensa che a detenerlo è il pianeta gassoso più distante dal Sole, quello che meno di ogni altro può contare sul contributo energetico della nostra stella. I venti di Nettuno sono di eccezionale violenza, quasi dieci volte più intensi dei maggiori venti terrestri, e, sebbene siano limitati allo strato più alto delle nubi, la loro origine è da ricercarsi almeno in parte nella sorgente di calore che risiede nell'interno del pianeta, e che favorisce il movimento convettivo. La similarità nella distribuzione dei venti zonali tra Urano e Nettuno è inoltre sorprendente, considerando che i due pianeti hanno assi di rotazione orientati in modo completamente diverso rispetto al piano dell'orbita e che il secondo ha una sorgente di energia interna tutt'altro che trascurabile. Ancor più incredibile è l'analogia con la circolazione generale dell'atmosfera terrestre, dove si ritiene che la superficie solida svolga un ruolo importante. Non è chiaro se si tratti di una semplice coincidenza, ma di certo il confronto delle atmosfere dei pianeti esterni tra loro e con quella della Terra può consentire di far progredire non poco i modelli matematici che descrivono l'evoluzione del tempo meteorologico e del clima.

I ripetuti tentativi di usare le nubi bianche più alte come traccianti per misurare le velocità dei venti dovettero arrendersi all'estrema mutevolezza di queste formazioni, il cui aspetto cambiava nel giro di pochi minuti. Probabilmente i moti verticali dell'atmosfera producono le condensazioni bianche di metano ed etano ghiacciati quando l'aria sale e la loro rapida scomparsa quando l'aria scende. Quanto alla natura della Grande Macchia Scura, si ritiene che per molti aspetti fosse analoga alla Grande Macchia Rossa di Giove, anche se le diverse condizioni ambientali sui due pianeti introducono importanti differenze.

A causa dell'assenza su Nettuno di nubi sufficientemente stabili nel tempo, non fu possibile misurare il campo di velocità dei venti attorno alla GMS così come era stato fatto per la GMR di Giove. Tuttavia si sapeva che il centro blu scuro della GMS era il cuore della tempesta, dove l'aria più calda e limpida saliva spazzando via lo smog e le nubi bianche di metano ghiacciato (di qui la maggiore profondità ottica che conferisce la caratteristica colorazione blu più intensa). La GMS era dunque un immenso vortice, esteso per circa 37° in longitudine con un asse maggiore di 16.000 km, e ruotante su se stesso in senso antiorario (anticiclone di alta pressione) con un periodo di circa 10 giorni. Lungo il suo margine meridionale furono misurati venti relativi diretti verso oriente che spiravano ad oltre 100 km/h: la spiegazione fu che quando l'aria si imbatte sulle correnti ascensionali ad alta pressione della macchia è forzata a innalzarsi, pertanto si raffredda e si formano sottovento delle lunghe condensazioni bianche di cristalli di metano o etano che rappresentano uno degli spettacoli più belli offerti dal pianeta. Poiché su Nettuno manca una superficie solida, le tempeste non dissipano rapidamente la loro energia come succede ai cicloni tropicali terrestri quando si inoltrano sulle masse continentali, per cui si poteva pensare che la GMS fosse una

formazione duratura, invece così non si è rivelata: come vedremo tra poco, le osservazioni di Nettuno effettuate dal telescopio spaziale Hubble (HST) della NASA mostrano che allo stato attuale non v'è più traccia né della GMS né della formazione denominata DS2.

LE OSSERVAZIONI DEL TELESCOPIO SPAZIALE

Il telescopio spaziale Hubble, dopo la correzione delle ottiche avvenuta sul finire del 1993, offrì l'opportunità di osservare direttamente i fenomeni dell'atmosfera di Nettuno: le immagini prese con la sua *Wide Field Planetary Camera 2* (WFPC2) consentono infatti di risolvere il disco del pianeta nello stesso modo in cui la maggior parte dei telescopi terrestri è in grado di risolvere il disco di Giove. Ovviamente la risoluzione spaziale delle immagini della WFPC2 non è elevata come quella ottenuta con la Camera ad angolo stretto del Voyager 2 durante il suo storico incontro ravvicinato; nondimeno queste riprese denotano una qualità scientifica indubitabile, vista la maggiore sensibilità nella banda ultravioletta e infrarossa, il migliore rapporto segnale/rumore e la grande precisione fotometrica.

Le osservazioni di Nettuno da parte dell'HST iniziarono quando il pianeta si portò ad una distanza angolare dal Sole maggiore di 50° (un valore minimo ritenuto indispensabile per non rischiare di compromettere i delicatissimi strumenti di bordo), e si svilupparono in due periodi, distanziati di quattro mesi. Le prime furono condotte dal gruppo scientifico della WFPC2 guidato da John Trauger (*Jet Propulsion Laboratory*), dal 27 al 29 giugno 1994, con riprese nell'ultravioletto, nel visibile e nel vicino infrarosso. Le seconde da Heidi B. Hammel (*Massachusetts Institute of Technology*) e G. Wesley Lockwood (*Lowell Observatory*) tra l'ottobre e il novembre dello stesso anno, riprendendo Nettuno nel visibile con l'ausilio di vari filtri per poter ricostruire anche immagini a colori.

La faccia del pianeta rivolta verso Terra all'inizio del primo programma di osservazione (11:36 TU del 27 giugno) fu ripresa con filtri colorati che spaziavano dall'ultravioletto (255 e 300 nm), al visibile (467, 588, 620 e 673 nm) al vicino infrarosso (890 nm). Quando Nettuno, circa 9 ore più tardi, mostrò l'emisfero opposto, si presero immagini in un sottoinsieme di questi colori (300, 467, 588, 620 e 673 nm). Il programma di osservazione condotto successivamente da Hammel e Lockwood avrebbe coperto un più ampio intervallo di longitudini in un tempo più lungo, ma avrebbe utilizzato un minor numero di filtri (e quindi un più ristretto set di colori). Le immagini prese nell'ultravioletto mostrano un disco pressoché privo di dettagli e tendenzialmente più scuro ai bordi per la presenza di smog idrocarburo d'alta quota; il contrasto osservato cresce invece progressivamente nelle immagini prese nel blu, verde, rosso e vicino infrarosso, che rivelano molte delle formazioni scoperte dal Voyager 2, ivi compresa la banda scura a 60° di latitudine sud e alcune distinte formazioni nuvolose di colore chiaro. Queste ultime sono evidentissime in quelle parti dello spettro rosso e infrarosso (rispettivamente 619 e 890 nm) in cui il gas metano viene maggiormente assorbito, e ciò dimostra ulteriormente che si tratta di formazioni molto più elevate rispetto alla coltre atmosferica principale. Il bordo del disco inoltre, osservato con questi filtri, appare piuttosto luminoso, indicando la presenza di uno strato uniforme di foschia. Notevole fu anche, in questa occasione, la scoperta di una singola e cospicua banda nuvolosa chiara che corre parallela all'equatore alla latitudine di 30° nord, inesistente nelle immagini della sonda e forse collegata all'aumento di luminosità che il pianeta aveva mostrato in osservazioni da Terra effettuate a partire dal 1990; questa banda era ancora presente nelle immagini riprese in ottobre, anche se, stranamente, la sua luminosità subiva in quel periodo forti oscillazioni. I tropici appaiono inoltre più scuri del 20% circa rispetto al resto del disco nelle immagini a 890 nm, e uno di questi fotogrammi mostra una discreta nube chiara sull'equatore, vicino al bordo del pianeta. L'emisfero meridionale appare invece solcato da due bande chiare interrotte: quella più larga è centrata a una latitudine di 30° sud, e si estende per almeno 40° in longitudine, come le nubi bianche situate sotto la Grande Macchia Scura. Sono altresì presenti una sottile banda nuvolosa a 45° S, che circonda quasi tutto il pianeta, e un collare chiaro attorno al polo sud.

Ma ciò che più colpisce in questa serie di immagini è proprio l'assenza del ciclone noto come Grande Macchia Scura (GMS). Pure un altro ovale scuro più piccolo, denominato DS2 e fotografato

chiaramente dalle telecamere del Voyager 2, è del tutto assente. La mancanza di queste strutture atmosferiche fu una delle maggiori sorprese di questo programma di ricerca. Il gruppo scientifico della WFPC2 suppose inizialmente che durante le osservazioni i due cicloni si trovassero vicini al bordo del disco, dove non sarebbero stati particolarmente evidenti. Ma un'analisi della copertura longitudinale effettuata rivelò che durante le riprese coi filtri in cui questi ovali avrebbero dovuto mostrare il maggior contrasto (467 e 588 nm) erano stati tralasciati meno di 20° di longitudine; siccome la GMS nel 1989 si estendeva per quasi 40° in longitudine, fu presto dedotto che anche una sua posizione periferica avrebbe dovuto comunque mostrarla parzialmente. Eppure niente di tutto questo fu osservato; di più le osservazioni di Hammel e Lockwood, effettuate qualche mese più tardi e distribuite in tre giorni, confermarono tale evidenza, pertanto si pensò che i due cicloni fossero in effetti ancora presenti, ma che nella seconda metà del 1994 fossero nascosti da uno strato di smog più denso del solito. Reiterate osservazioni portarono però ben presto alla conclusione che sia la GMS che la DS2 si erano davvero dissolte. A sostegno di questa tesi vi era anche la constatata instabilità della dinamica del grande ciclone nettuniano rispetto, per esempio, alla Grande Macchia Rossa di Giove: è infatti ben noto come, nelle immagini ravvicinate del Voyager 2 montate in sequenza, la GMS ruotasse oscillando continuamente lungo il suo asse maggiore ed allungandosi a volte in longitudine fino quasi a spezzarsi in due componenti. Come se non bastasse, a queste osservazioni negative se ne aggiunse una positiva altrettanto clamorosa: la scoperta, sempre operata dal telescopio spaziale, di un altro ciclone scuro, grande come quello visto dal Voyager 2 ma questa volta localizzato ad elevate latitudini settentrionali.

Ancora due volte, nell'agosto del 1996 e del 1998, l'occhio del telescopio spaziale è stato puntato verso Nettuno, confermando l'estrema dinamicità della sua atmosfera. Sono state rilevate di nuovo la struttura a bande e cenni di attività nei due emisferi, ma non è stato possibile confermare la presenza del nuovo ovale scuro, il quale anziché aumentare consistentemente le proprie dimensioni è andato via via scemando. Questi repentini cambiamenti nel sistema di cicloni e nelle bande nuvolose sul pianeta non sono stati ancora compresi appieno, e dimostrano la necessità di ulteriori osservazioni e monitoraggi.

IL CAMPO MAGNETICO

La sonda Voyager 2, in viaggio verso il sistema di Nettuno, cominciò ad “avvertire” il campo magnetico del pianeta 30 giorni prima del massimo avvicinamento. Otto giorni prima dell’incontro registrò brevi impulsi di onde radio, che si ripetevano ogni 16,11 ore: era la prova che Nettuno possiede una magnetosfera popolata di particelle cariche che, muovendosi entro il campo magnetico generato al suo interno, danno luogo a emissione di radioonde. Il valore di 16,11 ore era dovuto al periodo di rotazione del pianeta, come fu poi confermato dalle osservazioni dei dettagli visibili sulla sua superficie.

In circa tre giorni la sonda attraversò la magnetosfera di Nettuno. Oltre ai precedenti impulsi intensi e periodici, fu rilevata anche una dozzina di emissioni più deboli e di frequenza minore. Si trovò che il campo magnetico di Nettuno, come già quello di Urano, è alquanto insolito: per quanto si sia rivelato più debole del previsto, ha dimostrato subito di possedere notevoli peculiarità. Prima di tutto l’asse magnetico di Nettuno è inclinato di $46^{\circ},8$ rispetto a quello di rotazione, cosa che renderebbe piuttosto difficile la navigazione a bussola su questo pianeta (sulla Terra la differenza è di soli $11^{\circ},7$); inoltre l’asse del dipolo risulta fortemente disallineato, dal momento che passa a ben 13.600 km dal centro del pianeta e pertanto è più vicino alla superficie che al centro stesso (su Urano si aveva invece una maggiore inclinazione dell’asse magnetico e un minore decentramento del dipolo). Il dipolo spostato è all’origine dell’intensità del campo magnetico alla sommità delle nubi, che oscilla da più di 1 gauss in un emisfero a meno di un decimo di questo valore nell’altro (per confronto, l’intensità media del campo magnetico terrestre è di 0,31 gauss al suolo). In conseguenza di tali caratteristiche tutto il campo magnetico si attorciglia a spirale mentre Nettuno ruota attorno al proprio asse.

I risultati acquisiti suggeriscono in generale che il campo magnetico di Nettuno, come del resto quello di Urano, non può avere un’origine riconducibile a un nucleo conduttore fuso in rapida rotazione, come avviene sulla Terra o su Giove. Esso deve piuttosto generarsi all’interno di un mantello fluido che circola attorno al nucleo solido, un mantello dove l’acqua e l’ammoniaca, sottoposte a enormi pressioni e temperature, si ionizzano, diventando discrete conduttrici di elettricità. Per esempio, a 5000 km di profondità la pressione su Nettuno è pari a 200.000 atm e la temperatura a 2300°C : in queste condizioni l’acqua può condurre l’elettricità e il mescolamento turbolento di questo denso fluido può originare un campo magnetico del tipo osservato. I modelli elaborati dagli studiosi sembrano indicare che anche la pronunciata inclinazione del campo sia una conseguenza del flusso di corrente in un conduttore mediocre presente nel mantello del pianeta.

Le fasce di Van Allen di Nettuno, percorse dalle particelle cariche intrappolate dalle linee di forza del campo magnetico, riempiono una regione a forma di ciambella (un “toro”) centrata sul pianeta e confinata entro l’orbita del satellite Tritone; un’altra ciambella di idrogeno è disposta lungo l’orbita di questa luna. Analogamente a quanto avviene sugli altri pianeti, la magnetosfera è deformata a guisa di “lacrima” dalla pressione di radiazione del vento solare: sul lato illuminato si estende fino a 870.000 km di distanza, mentre sul lato buio si protende per almeno 5 milioni di km. L’inclinazione del campo magnetico rotante complica la magnetosfera di Nettuno e la sua interazione col vento solare: una volta ogni 16 ore il polo sud magnetico è rivolto direttamente verso la radiazione proveniente dall’astro, e dopo mezza rotazione è l’equatore magnetico ad essere orientato in quella direzione. La conseguenza è una coda magnetica oscillante, la cui forma cambia con la rotazione del pianeta.

Le misure del Voyager 2 hanno permesso di identificare due distinte componenti nel gas ionizzato intrappolato dal campo magnetico di Nettuno: la prima, costituita prevalentemente da protoni e azoto, ha temperature comprese tra i 100°C e i 200.000°C ; la seconda, consistente soprattutto di protoni, cioè atomi di idrogeno ionizzati cui è stato strappato l’unico elettrone, ha una temperatura superiore al miliardo di gradi, il valore più elevato mai riscontrato nel plasma di una magnetosfera

planetaria. È comunque opportuno ricordare che quando la materia si trova in questo stato il termine “temperatura” non indica tanto una condizione di calore media, quanto piuttosto l’energia cinetica di cui le particelle sono dotate; infatti l’energia cinetica di una particella è direttamente proporzionale alla sua temperatura, o in altre parole la velocità di agitazione termica di una particella è tanto più grande quanto più grande è la sua temperatura e più piccola la sua massa. La densità del plasma è comunque così bassa (un centinaio di ioni al metro cubo) che il contenuto calorico è minuscolo, e in ogni caso non in grado di riscaldare un veicolo spaziale in misura apprezzabile.

Le lune del pianeta agiscono come efficaci collettori delle particelle cariche che popolano la fascia di radiazione, e ne spazzano grandi quantità fuori dalla magnetosfera, che quindi ne risulta relativamente povera. Le particelle che riescono a raggiungere l’alta atmosfera di Nettuno innescano le aurore polari, visibili solo nell’ultravioletto perché qui il vento solare eccita gli atomi di idrogeno e non quelli di ossigeno e azoto come sulla Terra. Le aurore su Nettuno appaiono di forma diffusa anziché concentrate in zone ovali come sul nostro pianeta: quella osservata dal Voyager 2 sull’emisfero buio del pianeta era relativamente debole, emettendo sotto forma di luce solo 10 megawatt (MW), contro i 100.000 MW della Terra.

GLI ANELLI

Dopo la scoperta, alla fine degli anni Settanta, di anelli attorno a Urano e Giove, molti astronomi cominciarono a sospettare che anche il più remoto dei pianeti giganti, Nettuno, ne fosse provvisto. L'unica tecnica promettente per rivelarli da Terra era la stessa che aveva consentito l'individuazione dei sottili anelli di Urano, ossia l'occultazione di una stella da parte del disco del pianeta. Eventi di questo tipo sono molto inconsueti per Nettuno, tuttavia gli astronomi non si lasciarono sfuggire le rare occasioni favorevoli; le prime campagne sistematiche di osservazione delle occultazioni da parte di Nettuno cominciarono all'inizio degli anni '80.

Il 24 maggio 1981 Nettuno transitò molto vicino a una stella senza eclissarla. Con telescopi operanti nel sud dell'Arizona, un gruppo di astronomi osservò che durante la fase di avvicinamento la stella era sparita per un istante, ma siccome ciò non si era verificato simmetricamente dalla parte opposta essi credettero di aver individuato una nuova luna, che aveva intercettato la luce stellare interponendosi tra loro e la stella; vedremo più avanti, parlando dei satelliti, come otto anni più tardi fu data loro ragione. Nel giugno del 1983, nonostante uno schieramento di diversi *team* ed eccellenti condizioni di osservazione, nessuno notò alcunché di anomalo. L'insuccesso determinò un clima di pesante scetticismo da parte della comunità astronomica internazionale nei confronti dell'esistenza di anelli intorno al pianeta. Ma il 22 luglio 1984 ci fu una svolta clamorosa.

L'astronomo francese André Brahic, dopo molte insistenze conseguenti a un iniziale rifiuto, era riuscito a farsi assegnare per quella notte il telescopio di 1 metro dell'Osservatorio Australe Europeo (*European Southern Observatory*, ESO) a La Silla, sulle Ande cilene, per seguire il transito di Nettuno accanto alla stella SAO 186001 (mag. 9) nella costellazione del Sagittario. Ancora una volta durante la fase di avvicinamento fu osservato un indebolimento della luce stellare, pari al 35% e della durata di un secondo, e assolutamente niente dalla parte opposta. Dato che la probabilità di aver scoperto un nuovo satellite era troppo bassa, l'unica spiegazione possibile era rappresentata dalla presenza attorno a Nettuno di un anello parziale, non completo. Quella stessa notte il pianeta era stato seguito anche all'Osservatorio Inter-Americano di Cerro Tololo, situato soli 100 km a sud dell'ESO. Ma le misure di un fotometro molto sensibile applicato al telescopio riflettore di 91 cm erano state registrate su nastro magnetico e trascurate fino a quando il capo dell'équipe che aveva raccolto i dati, William B. Hubbard dell'Università dell'Arizona, non seppe in ottobre della strana osservazione dell'astronomo francese. Analizzando le registrazioni magnetiche fu così in grado sia di confermare il risultato del collega che di scartare definitivamente l'ipotesi, in quella determinata circostanza, della scoperta casuale di una nuova luna (infatti considerando la separazione tra i due osservatori un satellite non avrebbe potuto occultare la stella ad entrambi contemporaneamente). Per conciliare i risultati delle osservazioni di Brahic e Hubbard occorreva invocare un "arco" di anello spesso 25 km, orbitante a 2,65 raggi planetari dal centro di Nettuno ed esteso non più di un decimo dell'intera circonferenza. In tutto, su una ventina di occultazioni, 15 diedero esito negativo, mentre le rimanenti segnalavano la presenza di frazioni di anello; ma solo tre archi, a diverse distanze dal pianeta, si meritavano un minimo di credibilità.

Ammesso che gli archi di anello fossero reali, si trattava di spiegare come potessero esistere. Infatti, poiché le particelle più vicine a Nettuno si muovono con maggiore velocità rispetto a quelle più lontane, nel giro di qualche anno un arco di detriti dovrebbe distribuirsi su un anello completo. Quindi, a meno di aver effettuato le osservazioni in un momento molto particolare, caratterizzato dall'improbabile disintegrazione mareale di una o più piccole lune, doveva essere all'opera qualche misterioso meccanismo in grado di stabilizzare gli archi per milioni o miliardi di anni. Una possibile spiegazione fu offerta nel 1986 dai teorici Peter Goldreich, Scott Tremaine e Nicole Borderies, i quali scoprirono che una luna "pastore" su un'orbita circolare, ma leggermente inclinata rispetto al piano degli anelli ad arco, avrebbe potuto stabilizzare con un gioco di risonanze gravitazionali queste strutture.

Il sorvolo di Nettuno nell'agosto del 1989 da parte della sonda interplanetaria Voyager 2 offrì un'occasione unica per studiare gli strani anelli sospettati dagli astronomi e immaginati dai meccanici celesti. Le condizioni di osservazione non erano le più propizie: con un'illuminazione circa 912 volte più debole che in prossimità della Terra furono in molti a temere che la sonda non riuscisse a vedere niente, rinviando ad un futuro remoto tutte le risposte ai tanti interrogativi degli scienziati. Ma già tre settimane prima dell'incontro le telecamere del Voyager 2 rivelarono dei segmenti di anello, e due settimane più tardi la sonda scoprì che in realtà gli archi erano solo le parti più appariscenti di un anello completo. Superato Nettuno, Voyager 2 puntò le telecamere all'indietro per riprendere lo stesso anello da un'angolazione diversa, in controluce. Si scoprì che in questo caso esso appariva meno brillante, mentre risaltavano altre strutture che in un primo tempo non erano evidenti. La differenza può essere spiegata in base alle dimensioni delle particelle di polvere: quelle più grandi della lunghezza d'onda della luce diffondono la maggior parte della radiazione incidente all'indietro, verso la sorgente; quelle più piccole invece in direzione opposta. In tal modo Voyager 2 fotografò la luce diffusa in avanti dalle particelle di polvere più minute, rivelando in tutto due anelli sottili e luminosi (di cui uno, il più esterno, era quello previsto in base alle occultazioni stellari) e altri due notevolmente più deboli e ampi. In ogni caso, una densità media di 0,003 particelle per metro cubo indicava una maggiore presenza di polvere negli anelli di Nettuno rispetto a quelli di Urano. Per quanto alla fine gli anelli fossero risultati completi, gli archi erano tutt'altro che un'illusione: le immagini del Voyager 2 mostravano chiaramente tre addensamenti di materiale sull'anello più esterno, ed erano questi ad essere stati scoperti dagli astronomi a terra, anche se erano stati erroneamente interpretati a causa della scarsa precisione con cui all'epoca era nota l'orientazione dell'asse di rotazione di Nettuno. Si notò in generale che gli anelli mostravano una riflettività dimezzata rispetto a quella, già molto bassa, della fuliggine: non c'era da meravigliarsi quindi che queste formazioni, a causa della loro debolezza, non fossero state viste prima nella loro globalità. Il Voyager 2 aveva fatto una rapida immersione nel piano degli anelli: a 10.000 km dal loro piano e a 50.000 km di distanza dal pianeta la sonda registrò ben 300 microimpatti al secondo, ma il fatto più importante è che ne uscì indenne. La cosa poi non stupisce più di tanto, considerando che questi anelli, costituiti da oggetti scuri e ghiacciati con dimensioni che vanno dalla polvere microscopica a quella di un'automobile, contengono circa solo un millesimo del materiale di quelli – deboli – di Urano, e, se costituissero un unico corpo, essi formerebbero un oggetto di non oltre pochi chilometri di diametro. Infatti un'ipotesi portata avanti dagli astronomi planetari americani è che la formazione degli archi sull'anello più esterno sia la conseguenza della distruzione di un satellite il cui diametro originario doveva essere compreso tra uno e dieci chilometri; tale distruzione si sarebbe verificata qualche centinaio di milioni di anni fa a causa dell'impatto catastrofico con un asteroide o una cometa, o forse sarebbe avvenuta in seguito alla cattura di Tritone. I frammenti di questo satellite primordiale si sarebbero dispersi per poi sistemarsi nelle zone di stabilità gravitazionale, dando così luogo alla formazione degli archi osservati.

I due anelli principali, che sono anche i più sottili, sono stati battezzati *Adams* (1989 N1R) e *Le Verrier* (1989 N2R), in onore di coloro che indipendentemente l'uno dall'altro calcolarono la posizione precisa dell'ancora sconosciuto pianeta Nettuno. Adams, l'anello più esterno di tutti, dista dal centro di Nettuno circa 62.930 km (38.170 km sopra la sommità delle nubi), ed è largo meno di 50 km. Come si è già detto, è quello su cui risiedono i tre addensamenti di materiale rilevati anche da Terra, che sono stati chiamati *Liberté*, *Egalité* e *Fraternité* dal motto rivoluzionario francese: si estendono sulla circonferenza rispettivamente per 4°, 4° e 10° e sono separati l'uno dall'altro da zone meno dense di 14° e 12°. Mentre l'anello lascia passare dal 98 al 99% della radiazione incidente nelle sue parti più sottili, gli archi presenti su di esso ne lasciano passare dal 90 al 96%. Il secondo anello, *Le Verrier*, si trova a 53.200 km dal centro di Nettuno (28.440 km sopra le nubi) ed è largo circa 15 km. È costituito per almeno il 40% da polveri, e lascia passare il 90% della luce incidente. Oltre a questi due anelli principali, il Voyager ne ha scoperti altri due, battezzati rispettivamente *Lassell* (1989 N4R) e *Galle* (1989 N3R). Il primo, molto più largo degli altri con i

suoi 5800 km di ampiezza, si trova fra i due maggiori a una distanza dal centro di Nettuno di 59.000 km per il bordo più esterno e 53.200 km per il bordo più interno, andando quindi a terminare proprio in corrispondenza dell'anello Le Verrier. È un anello estremamente tenue, il cui contenuto di polvere è pressoché nullo e assorbe solo un decimillesimo della luce incidente. Al suo interno sarebbe inoltre collocato, a 57.500 km dal centro del pianeta, un ulteriore anello poco più brillante ma comunque non molto evidente, che è stato chiamato *Arago* (1989 N5R); la sua reale esistenza è peraltro dubbia. Infine, il quarto anello accertato con sicurezza, Galle, dista 41.900 km dal centro di Nettuno; è quindi il più interno ed ha una larghezza radiale di circa 1700 km. Anch'esso molto rarefatto, composto di polveri e gas, assorbe un decimillesimo della luce incidente.

I rilievi effettuati dal Voyager 2 suggeriscono anche l'esistenza di un disco di polveri che riempirebbe tutto il sistema interno nettuniano: si stima che il contenuto totale di queste polveri nel sistema anulare sia circa 100 volte più grande che nel sistema di Giove. La difficile visibilità del sistema di anelli di Nettuno non è dovuta solo alle loro esigue dimensioni, ma anche alla loro bassa albedo, che li rende oltremodo scuri e che può essere giustificata come segue. La presenza di plasma molto caldo nella magnetosfera ha probabilmente influito anche sull'evoluzione superficiale degli anelli stessi e delle sei piccole lune interne alla fascia di radiazione: si ritiene infatti che nel sistema sia molto comune il metano, che alla distanza di Nettuno dal Sole ghiaccia e solidifica in forma di cristalli; quando tale sostanza viene sottoposta al bombardamento di protoni ad alta energia, gran parte degli atomi di idrogeno presenti nella molecola vengono espulsi, lasciando solo l'atomo centrale di carbonio. Gli anelli sarebbero quindi scuri perché il metano viene trasformato in una serie di composti del carbonio, di colore scuro: questo processo richiederebbe da 10.000 a 1 milione di anni, un tempo che comunque risulta troppo breve per essere usato come metodo di datazione nel Sistema Solare esterno. Gli anelli giacciono tutti nel piano equatoriale di Nettuno e come si è detto sono immersi nella magnetosfera del pianeta. A causa della forte inclinazione dell'asse magnetico rispetto all'asse di rotazione, essi, così come i satelliti di cui si dirà più avanti, si muovono attraverso un ampio intervallo di latitudini magnetiche, percorrendo una larga striscia attraverso la magnetosfera stessa mentre il pianeta ruota; può allora accadere che in un dato momento anelli e lune si trovino nel piano dell'equatore magnetico e dopo circa 8 ore, vale a dire mezza giornata nettuniana, si trovino a transitare al di sopra dei poli magnetici di Nettuno. In questo continuo moto attraverso il campo magnetico, anelli e satelliti raccolgono particelle cariche, sottraendole alla magnetosfera e modificandone in tal modo la struttura. La permanenza delle polveri in questo sistema è un fenomeno la cui durata è molto più breve dell'attuale età del pianeta, e ciò significa che su Nettuno deve verificarsi una caduta costante di meteoriti in grado di rifornire gli anelli delle polveri che continuamente perdono.

I SATELLITI DI NETTUNO

Prima della missione della sonda Voyager 2 si conoscevano soltanto due dei satelliti di Nettuno: *Tritone*, distante 354.760 km dal centro del pianeta, e *Nereide*, molto più piccolo ed esterno, posto in un'orbita assai eccentrica che lo porta ad una distanza media di ben 5.513.400 km dal pianeta. Questi satelliti sono considerati *irregolari*: Tritone perché gira intorno a Nettuno in verso opposto alla rotazione del pianeta; Nereide invece proprio per via dell'elevata eccentricità dell'orbita.

Quando il Voyager 2 esplorò il sistema di Nettuno nell'agosto del 1989, scoprì come si è detto l'esistenza di due anelli sottili e due anelli diffusi: solo l'anello sottile più esterno (Adams) presentava tre archi in cui il materiale si trovava addensato. Se la spiegazione invocata per giustificare i sottili anelli di Urano era valida, dovevano esserci almeno 4 satelliti "pastori" per confinare la materia dei due anelli sottili (due per ogni anello, rispettivamente sul bordo interno e sul bordo esterno). In effetti, circa 900 km all'interno dell'anello Adams, Voyager 2 individuò una luna del diametro di 160 km, battezzata *Galatea*. Un altro satellite pastore, *Despina*, con un diametro di circa 150 km, venne individuato 700 km all'interno dell'altro anello sottile, Le Verrier. Non si trovò traccia dei satelliti pastori che avrebbero dovuto risiedere sul bordo esterno degli anelli, tuttavia si scoprì che Galatea e l'anello Adams hanno periodi orbitali il cui rapporto esatto è 42:43, il che porta a maree di risonanza che delimitano gli aggregati ad arco sull'anello e determinano i loro bordi netti. Lo stesso satellite provoca una distorsione radiale che fa sì che le concentrazioni si flettano dentro e fuori di circa 30 km all'avanzare della forza mareale lungo l'anello.

In ogni caso durante il volo della sonda spaziale furono scoperte in tutto 6 nuove lune; dalla più interna alla più esterna esse sono state battezzate: *Naiad*, *Thalassa*, *Despina*, *Galatea*, *Larissa* e *Proteus*. Queste ultime due, che sono le più grandi, si trovano all'esterno del sistema degli anelli, mentre le altre quattro vi sono immerse.

Nel 2002, un gruppo di astronomi guidato da M. Holman (*Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics*) e J.J. Kavelaars (*National Research Council of Canada*) ha scoperto tre nuovi satelliti irregolari di Nettuno, che portano il totale dei satelliti noti del pianeta a 11. Queste lune, il cui diametro stimato è di circa 30-40 km, sono state le prime ad essere scoperte dopo il sorvolo del Voyager 2 nel 1989, e soprattutto le prime ad essere scoperte con telescopi a terra dal 1949.

Esaminiamo ora singolarmente i vari satelliti.

- TRITONE -

Tritone, il maggiore dei satelliti di Nettuno, fu scoperto dall'astronomo dilettante britannico William Lassell (1799-1880) il 10 ottobre 1846, solo 17 giorni dopo la scoperta dello stesso Nettuno. Quasi subito le sue caratteristiche dinamiche apparvero insolite: Tritone gira infatti intorno a Nettuno su un'orbita perfettamente circolare, di raggio (354.760 km) poco inferiore a quello dell'orbita della Luna attorno alla Terra e particolarmente inclinata (157°) sul piano equatoriale del pianeta, impiegando 5,877 giorni per completare una rivoluzione. Ciò che però colpisce in modo indiscutibile è che il moto di Tritone avviene in senso *retrogrado*, ossia in senso opposto a quello di rotazione di Nettuno, che è antiorario se osservato da un punto ideale posto sopra il suo polo nord. Dunque Tritone, visto dallo stesso punto, si sposta lungo la sua orbita in verso orario, contrariamente a quanto avviene per gli altri satelliti di Nettuno (e in generale per la netta maggioranza dei satelliti del Sistema Solare) che hanno orbite *dirette*, percorse cioè nello stesso senso di rotazione del pianeta. Posto che l'orbita di Tritone sia di tipo retrogrado, si può affermare che il piano dell'orbita stessa sia inclinato di $(180^\circ - 157^\circ =) 23^\circ$ rispetto al piano dell'equatore.

La combinazione fra l'inclinazione dell'orbita di Tritone rispetto all'equatore di Nettuno e l'obliquità di quest'ultimo rispetto al piano orbitale del pianeta stesso produce un complicato ciclo stagionale cui va soggetto il satellite su archi di tempo di circa 650 anni; questo ciclo appare influenzare profondamente la sua atmosfera e l'estensione della grande calotta polare meridionale. Poiché Nettuno, a causa della sua rapida rotazione, è schiacciato ai poli, il suo rigonfiamento equatoriale causa un moto di precessione dell'orbita di Tritone; in altre parole il piano dell'orbita del satellite varia periodicamente la propria inclinazione rispetto al piano equatoriale di Nettuno, potendo assumere tutti i valori compresi fra 5,8 e 47,8 gradi. Ne consegue che la latitudine del punto investito perpendicolarmente dai raggi solari (detto *punto subsolare*) cambia in modo periodico, quindi in determinate epoche Tritone presenta cicli stagionali con modesti effetti, mentre in altri periodi esso può trovarsi in posizioni tali che le sue stagioni vengono ad assomigliare a quelle di Urano. Altri satelliti nel Sistema Solare – ma tutti di piccole dimensioni e lontani dai rispettivi pianeti, Giove e Saturno – hanno orbite retrograde, e poiché si ritiene che tali orbite non siano possibili per satelliti “indigeni”, ossia formati da materiale circostante il pianeta stesso, si è dedotto che i satelliti retrogradi, Tritone compreso, siano stati con ogni probabilità “catturati” dopo la loro formazione. Ma mentre nel caso delle piccole lune esterne di Giove e Saturno sembra trattarsi di corpi di tipo originariamente asteroidale o cometario, che restano sempre così distanti dai rispettivi pianeti da non subirne alcun effetto mareale, le dimensioni di Tritone sono decine di volte maggiori e le maree ne influenzano in modo decisivo l'evoluzione.

L'orbita retrograda che ci informa sull'origine di Tritone ha delle profonde conseguenze sul suo destino futuro. Il moto orbitale, infatti, viene continuamente “frenato” poiché il cospicuo rigonfiamento mareale che il satellite produce sul pianeta attrae il satellite stesso con una forza che ha una componente diretta in senso contrario al suo movimento. Questa azione “frenante” delle maree, opposta a quella che si esplica su satelliti con orbite normali (come la Luna), provoca un restringimento graduale del raggio dell'orbita di Tritone che si traduce, su tempi lunghi, in una sorta di “caduta a spirale” del satellite verso Nettuno. L'effetto delle maree è relativamente intenso perché l'orbita attuale di Tritone ha un raggio che non supera i 15 raggi planetari, rispetto al fattore 60 che caratterizza il sistema Terra-Luna. Tuttavia, data la scarsa conoscenza che abbiamo dell'efficienza dei processi con cui le maree dissipano energia dentro Nettuno, sussiste una forte incertezza sulla previsione del momento in cui Tritone si sarà avvicinato talmente a Nettuno da disgregarsi, formando forse uno spettacolare anello di frammenti e detriti. Le stime migliori danno un periodo di tempo di qualche miliardo di anni, ma questo tempo potrebbe essere 10 volte più breve o più lungo. In ogni caso, Tritone (come il satellite marziano Phobos) è un corpo votato alla distruzione.

Un altro effetto delle maree su un'orbita retrograda è quello di circularizzarla rapidamente: ciò è coerente con la bassa eccentricità attuale di Tritone, ma significa anche che, in passato, l'orbita era probabilmente molto eccentrica, forse inizialmente addirittura parabolica, il che implicherebbe che Tritone provenga dall'esterno del sistema nettuniano, cioè, come si è già accennato, che si tratti di un satellite “catturato”. Secondo questa teoria, Tritone in tempi remoti aveva un'orbita eliocentrica indipendente, ma poi restò intrappolato – su un'orbita inizialmente molto eccentrica – nella sfera d'influenza gravitazionale di Nettuno, ed infine ebbe l'orbita gradualmente ristretta e circularizzata dall'azione delle maree. In questo intervallo di tempo, dell'ordine di 100 milioni di anni, le maree dovettero causare continue e alternate deformazioni del satellite, con un conseguente intenso riscaldamento per frizione del suo interno, il che provocò fenomeni di fusione e di vulcanismo superficiale di cui le immagini inviate dalla sonda Voyager 2 hanno dato un'eloquente testimonianza. L'evoluzione dei parametri orbitali causata dalle maree potrebbe tra l'altro aver provocato incontri ravvicinati fra Tritone e i preesistenti satelliti “regolari” di Nettuno: il sistema dei satelliti del pianeta è oggi così “irregolare” che appare inevitabile ricorrere a qualche scenario di tipo catastrofico per spiegarne le caratteristiche.

L'ultimo effetto dovuto alle forze di marea, tanto più evidente quanto più vicini e di massa comparabile sono i due corpi in questione, è quello di sincronizzare il periodo orbitale di un satellite

col suo periodo di rotazione, o in altre parole di far sì che la rotazione del satellite sul proprio asse rallenti fino a raggiungere il valore del periodo di rivoluzione. In conseguenza di ciò, il satellite rivolge sempre la medesima faccia al pianeta: una caratteristica che pare essere piuttosto comune nel Sistema Solare, e a cui neppure la nostra Luna e Tritone fanno eccezione. Anche quest'ultimo, infatti, impiega lo stesso identico tempo per completare una rivoluzione attorno al pianeta e una rotazione sul proprio asse (5,877 giorni), cosicché mostra a Nettuno sempre lo stesso emisfero.

Quasi tutto quello che si conosce sulle proprietà fisiche di Tritone è il risultato dell'esplorazione della sonda Voyager 2, che il 25 agosto 1989 passò a meno di 40.000 km dal satellite dopo aver sfiorato Nettuno. Da tali informazioni è noto che il diametro del satellite è di circa 2707 km, mentre la sua densità media risulta di 2,05 g/cm³. Le immagini inviate a Terra hanno rivelato che la superficie di Tritone è caratterizzata da un insieme estremamente complesso di regioni di diverso colore, riflettività e conformazione, a cui corrisponde una grande varietà di strutture geologiche. La pressione superficiale, ricavata per mezzo dell'attenuazione della luce solare operata dalla debole atmosfera del satellite e misurata dallo spettrometro ultravioletto di bordo, è risultata di 15 microbar (circa 1/67.550 di quella della Terra al livello del mare). Il potere riflettente è molto alto: le scarse caratteristiche scure riflettono circa il 60% della luce del Sole, mentre le più brillanti arrivano al 90%; l'albedo media nel visibile risulta così pari a 0,77. Il fatto di riflettere la quasi totalità della radiazione solare incidente trova riscontro nelle misure di temperatura effettuate, che hanno fornito un valore di 38 K (pari a -235°C), il che fa di Tritone il corpo più freddo del Sistema Solare finora esplorato. Il numero di crateri che si possono contare sul suolo è inoltre molto scarso (il più grande cratere accertato ha un diametro di 27 km), e testimonia che, nonostante la sua bassissima temperatura e le sue dimensioni limitate, Tritone ha subito degli intensi e duraturi processi evolutivi di tipo endogeno, cioè dovuti non agli impatti esterni ma a calore immagazzinato nel suo interno e trasportato verso la superficie; processi in grado di cancellare quel risultato di miliardi di anni di bombardamento cosmico che si può invece leggere su molti altri corpi del Sistema Solare.

Una buona parte dell'emisfero meridionale di Tritone è ricoperta da una grande calotta polare chiara, di colore leggermente rosato probabilmente risultante dal colore bianco dell'azoto ghiacciato e dal colore del metano, che diventa rosso quando viene colpito dalla radiazione solare. Sulla superficie sono stati riscontrati anche altri composti ghiacciati abbastanza comuni nei nuclei cometari, come il monossido di carbonio (CO) e l'anidride carbonica (CO₂), questi ultimi individuati anche grazie a osservazioni infrarosse condotte dalla Terra. La calotta, che appare limitata da un confine netto, sembra attualmente in via di riduzione, perché il complesso ciclo stagionale tritoniano (che si ripete all'incirca ogni 650 anni terrestri) sta attraversando un periodo di insolazione dell'emisfero australe relativamente intensa, come si è potuto evincere dal fatto che all'epoca dell'incontro con Voyager 2 il punto subsolare si trovava quasi alla massima latitudine meridionale. Benché i ghiacci d'azoto e di metano sembrino essere i costituenti principali della superficie di Tritone, è necessaria anche la presenza di ghiaccio d'acqua per formare e sorreggere la topografia osservata, comprendente rupi e rilievi che superano il chilometro d'altezza. All'incredibile temperatura di Tritone, infatti, il ghiaccio d'acqua è resistente quanto l'acciaio, e si comporta come la roccia dura della Terra; ma i ghiacci di metano e di azoto non hanno una forza sufficiente a sostenere le formazioni elevate, che si deformerebbero e crollerebbero sotto il loro stesso peso. Dunque, bisogna concludere che una crosta rigida di ghiaccio d'acqua è apparentemente ricoperta da sottili e brillanti strati di questi elementi.

Alle latitudini più basse, dove il ghiaccio si è sciolto, si osserva il terreno sottostante di colore scuro, ma anche la calotta stessa è costellata da un gran numero di striature scure, lunghe da poche centinaia di metri ad oltre 100 km e orientate in gran parte nella stessa direzione. Sul terreno libero dai ghiacci si nota poi un lungo solco (*graben*) che si biforca a forma di "Y". Caratteristiche simili erano già state osservate sui satelliti gioviani Europa e Ganimede: si tratta in realtà di rilievi prodottisi quando una quantità di materiale fuso fluisce attraverso le fratture della superficie per poi solidificarsi creando una sorta di argine lungo i bordi del crepaccio. In una foto ottenuta dal Voyager 2 nella regione equatoriale si osserva inoltre una pianura di forma quasi circolare, di 200

km di diametro, circondata da un bordo di colline alte 200 metri. All'interno di questa caldera, che somiglia a un lago ghiacciato, si nota un cratere da impatto, evidentemente formatosi dopo che il bacino si era riempito di materiale fuso. Il vulcanismo di ghiaccio d'acqua molto probabilmente ha avuto fine diverso tempo fa, quando l'orbita di Tritone è divenuta circolare, e il riscaldamento mareale interno si è interrotto.

Anche Tritone, come il satellite di Saturno Titano, possiede un'atmosfera, sia pure molto più tenue. Tanto i rilievi effettuati dal Voyager 2 quanto le osservazioni spettroscopiche condotte dalla Terra indicano che essa è composta da azoto molecolare (N₂) e metano (CH₄), con tracce di argon e monossido di carbonio. L'atmosfera tritoniana è così rarefatta che i suoi venti, pur molto intensi con velocità che possono raggiungere quella del suono, non sono in grado di sollevare materiale dalla superficie, sebbene possano trasportare in una direzione preferenziale il pulviscolo eventualmente sollevato da qualche altro fattore. In un'immagine del margine sud-occidentale del satellite, all'inizio delle striature maggiori, si notano delle peculiari formazioni tondeggianti scure, spesso circondate da un "collare" di materiale più chiaro. Queste strutture sono state interpretate dai planetologi come il prodotto di un tipo peculiare di *geyser*: in questi punti si verifica la potente eruzione in superficie di azoto liquido contenuto in "serbatoi" sotterranei, azoto che passa immediatamente allo stato gassoso liberando un pulviscolo scuro, ricco di composti del carbonio, che poi si deposita nella direzione in cui lo trasportano i venti dominanti. Due di tali *geyser* in piena attività sono stati scoperti in altrettante immagini riprese dal Voyager vicino al bordo del satellite a distanza di 45 minuti l'una dall'altra, ed il materiale che si vede fuoriuscire si innalza in colonne dritte e sottili, raggiungendo gli 8 km di quota e formando un vero e proprio smog nell'atmosfera. Questa colonna di fumo salendo produce poi una lunga nube scura trascinata per circa 150 km dai venti di Tritone; altre simili formazioni nuvolose scure vengono spinte verso nord dalle correnti del satellite e possono essere distinte nelle immagini più dettagliate della calotta polare.

Il fatto che i *geyser* siano concentrati alle latitudini investite perpendicolarmente dai raggi del Sole indica che probabilmente essi sono alimentati dall'energia solare: lievi innalzamenti stagionali di temperatura aumentano la pressione nelle sacche liquide sotterranee, provocando la fuoriuscita della miscela colorata di azoto liquido e idrocarburi da fessure che si formano nella calotta ghiacciata. Su Tritone il calore sotterraneo potrebbe essersi accumulato grazie alla luce solare che passa attraverso il ghiaccio traslucido, e viene assorbita dal più scuro metano o dagli idrocarburi, confinati sotto di esso. Il ghiaccio d'azoto sovrastante, essendo opaco alla radiazione termica infrarossa, intrappolerebbe il calore solare, producendo un effetto serra interno agli strati solidi. Il gas d'azoto, tenuto sotto pressione dal calore sotto la superficie, in seguito erompe in modo esplosivo dalle bocche ostruite dal ghiaccio, lanciando nell'atmosfera pennacchi vulcanici di azoto gassoso e materiale più scuro inglobato nel ghiaccio, nello stesso modo in cui in un radiatore d'auto surriscaldato l'acqua fuoriesce in maniera esplosiva quando viene tolto il tappo.

Gran parte della fascia equatoriale, in prossimità del confine tra zona scura e zona illuminata, consiste di regioni geologicamente giovani dall'aspetto rugoso e quasi raggrinzito, che per questo sono state denominate "a buccia di melone" (*cantaloupe*): qui si osserva una successione ininterrotta di infossature, approssimativamente circolari, di dimensioni tipiche di 20 km, ed insieme un intreccio poligonale di rilievi lineari e di valli, che non superano le poche centinaia di metri di dislivello. Queste strutture rappresentano probabilmente ciò che resta di un insieme di antiche celle di convezione e fratture crostali, dovute ad uno o più episodi di rapido riscaldamento che provocarono la fusione dell'interno di Tritone; tali episodi sono associati verosimilmente alla cattura in orbita nettuniana, che causò un violento *stress* termico, e all'azione delle maree di cui già si è detto. Nella zona equatoriale ripresa dal Voyager vi sono anche vaste aree ricche di caldere vulcaniche dal fondo piatto e dai bordi a terrazza, circondate da regioni quasi completamente lisce che testimoniano imponenti emissioni successive di materiale fluido. Deve essersi trattato di una specie di lava fangosa formata da un miscuglio di ghiaccio d'acqua, ammoniacca e metano, che poteva scorrere in modo relativamente rapido e "fluido" nonostante le rigidissime temperature superficiali tipiche di Tritone. Questa lava ricoprì il terreno preesistente, cancellando in particolare i

crateri da impatto ma anche in parte i terreni “a buccia di melone”. In base all’analisi dei dati, la superficie di Tritone risulterebbe così non più vecchia di mezzo miliardo di anni e forse anche più giovane, sebbene in alcune zone il “ringiovanimento” sia stato solo parziale, e le strutture precedenti sono ancora visibili.

Come si è accennato prima, Tritone possiede un’atmosfera. Le misure spettroscopiche effettuate da Terra avevano mostrato che il satellite doveva possedere un tenue involucro gassoso, ricco di metano. C’era poi negli spettri infrarossi l’indicazione che fosse presente sul satellite azoto molecolare in forma solida o liquida, il che faceva ritenere che anche nell’atmosfera questo composto (non rilevabile direttamente allo stato gassoso) fosse in qualche modo abbondante. Queste scoperte sono state confermate dalle misure ravvicinate del Voyager 2, che hanno rivelato come la pressione atmosferica superficiale sia assai scarsa, in conseguenza del fatto che la temperatura estremamente rigida rende molto bassa la tendenza dei composti solidi a sublimare (cioè a passare direttamente allo stato gassoso). Si è avuta conferma che i componenti principali sono effettivamente azoto e metano, con piccole tracce di altri gas come argon e monossido di carbonio. Il metano, concentrato alle quote inferiori a 40 km, contribuisce solo per l’1% circa alla densità complessiva; sottoposto alla radiazione ultravioletta solare esso forma però anche composti del carbonio più complessi e pesanti, che producono alle quote comprese fra i 3 e i 14 km una specie di smog persistente, il quale causa una sorta di effetto serra che tende a mantenere costante la temperatura della superficie permettendo così la sublimazione di altro ghiaccio. L’origine dell’atmosfera di Tritone è da ricercarsi nelle eruzioni prodotte dai vulcani in epoche remote e dai geysers in tempi più recenti, che hanno emesso quantità relativamente consistenti di questi elementi. Un ulteriore elemento di interesse circa l’atmosfera tritoniana proviene dagli studi effettuati dalla NASA col telescopio spaziale Hubble in collaborazione con alcuni telescopi terrestri, nel 1997: da queste ricerche sembrerebbe molto probabile che, dall’epoca dell’incontro con la sonda Voyager 2, la temperatura media del satellite sia aumentata. L’atmosfera di Tritone, cioè, sarebbe stata interessata da un periodo di riscaldamento globale dovuto in parte al processo di conversione in forma gassosa dell’azoto congelato; un fenomeno, questo, in grado di aumentare anche la densità dell’atmosfera stessa. Il sistema usato dal telescopio spaziale per rilevare la densità dell’atmosfera ha sfruttato un fenomeno di occultazione stellare: misurando la variazione di luminosità di una stella che, avvicinandosi al bordo, diminuisce secondo la densità dell’atmosfera, è stato possibile ricostruire un grafico che riporta l’esatta stratificazione atmosferica del satellite. Dall’analisi della curva di luce ottenuta nel corso dell’occultazione, si è trovato che la pressione atmosferica a un’altezza di 1400 km sulla superficie di Tritone era di 2,3 microbar, alquanto superiore ai valori ricavati da una precedente occultazione osservata nel 1995 e agli 0,8 microbar misurati dalla sonda Voyager 2 nel 1989. Il valore di pressione ottenuto con l’occultazione ed estrapolato alla superficie corrisponde grosso modo ad oltre 30 microbar, ben il doppio circa di quanto misurato dalla Voyager 2. Secondo i modelli messi a punto per descrivere l’atmosfera di Tritone, a questo valore di pressione superficiale corrisponderebbe un innalzamento della temperatura relativamente contenuto, dell’ordine del 5%, passando dai -235°C del 1989 ai circa -233°C attuali.

Molto probabilmente le cause di questo fenomeno sono da ricercare nei cambiamenti stagionali che interessano le calotte ghiacciate del satellite. Infatti, Tritone ha l’asse di rotazione molto inclinato rispetto al piano orbitale di Nettuno e in questo periodo si sta avvicinando al massimo dell’estate nel suo emisfero meridionale. Durante questa stagione, che a causa del lento moto orbitale di Nettuno attorno al Sole (164,8 anni) si verifica una volta ogni secolo e mezzo circa, la nostra stella è allo zenit in regioni del satellite che si trovano a latitudini corrispondenti a circa 50 gradi sud. Il continuo riscaldamento della calotta sud farebbe quindi sublimare i ghiacci di azoto, responsabili dell’aumento di pressione registrato e del relativo incremento di temperatura. Secondo gli scienziati questo effetto potrebbe, nell’arco della rivoluzione solare, alterare il rivestimento di ghiaccio ai poli, esattamente come avviene sulla Terra ma in tempi decisamente superiori, visto che le stagioni su Tritone si susseguono con intervalli che durano alcune centinaia di anni.

Tritone trattiene intorno a sé un toro (ossia una “ciambella”) di idrogeno neutro, paragonabile a quello di Titano intorno a Saturno. Il toroide è alimentato dall’idrogeno liberato dall’atmosfera di Tritone per l’azione dei fotoni più energetici della luce solare sul metano. Quando il Voyager 2 transitò dietro Tritone, i segnali radio delle trasmissioni destinate alla Terra attraversarono anche una ionosfera la cui esistenza costituì una sorpresa per gli scienziati responsabili della missione, sebbene in realtà essa fosse stata prevista da Sushil K. Atreya, un fisico dell’Università del Michigan. La sonda fece dunque il suo ingresso nella ionosfera del satellite in corrispondenza di un’elevata latitudine nord per poi uscirne quando si trovava sopra l’emisfero meridionale, trovando che qui la densità degli elettroni incontrati era molto maggiore: questa differenza è presumibilmente da imputare al fatto che l’emisfero sud era fortemente illuminato dal Sole. In ogni caso i fotoni di alta energia della luce solare non possono qui costituire il fattore determinante per la formazione e il mantenimento della ionosfera, come invece accade sulla Terra; questo fattore va piuttosto ricercato nelle interazioni tra l’atmosfera di Tritone e le particelle cariche della magnetosfera di Nettuno.

Tritone presenta numerose analogie con l’ultimo dei pianeti del Sistema Solare, Plutone. Tali affinità non si limitano alle dimensioni, alla massa e alla densità media, ma interessano anche la composizione chimica della superficie e della tenue atmosfera che avvolge i due corpi. Il fatto poi che Tritone sia un oggetto quasi certamente catturato da Nettuno in epoche primordiali ha alimentato l’ipotesi che esso si sia formato assieme a Plutone in una regione transnettuniana del Sistema Solare, popolata da un’arcaica famiglia di planetesimi di cui Tritone e Plutone sarebbero appunto i maggiori rappresentanti superstiti. È decisamente presto per dire se questo corrisponda a verità, tuttavia è sicuro che i due corpi, per motivi ancora sconosciuti, ebbero storie dinamiche diverse: il primo finì nella sfera d’influenza gravitazionale di Nettuno, mentre il secondo subì una drastica variazione dell’orbita che lo confinò nelle regioni più buie e remote del sistema planetario. Da quel momento in poi la loro evoluzione fisica proseguì in modo separato.

- PROTEUS -

La maggiore delle nuove lune di Nettuno scoperte dal Voyager 2 è Proteus. Con un diametro di circa 400 km si è rivelato più grande di Nereide, e quindi è a pieno titolo il secondo satellite per dimensioni dopo Tritone. Proteus gira intorno a Nettuno su un’orbita circolare, equatoriale e diretta, a circa 117.647 km dal centro del pianeta, e ha dimensioni analoghe a quelle dei satelliti Mimas ed Enceladus di Saturno e Miranda di Urano. Come gli altri satelliti più interni di Nettuno non era stato scoperto prima soltanto per la sua vicinanza al pianeta, che aveva reso impossibile scorgerlo nel bagliore di quest’ultimo. Infatti Proteus è stato immortalato direttamente dalla Terra solo nel 1993, quando due astronomi francesi utilizzarono a questo proposito una speciale camera CCD applicata al telescopio di 2,20 metri dell’Osservatorio Australe Europeo (ESO) situato a La Silla, in Cile. L’impresa non fu tuttavia semplice: le osservazioni furono effettuate in eccezionali condizioni di *seeing*, e per poter evidenziare la debolissima luce proveniente dall’oggetto, la cui luminosità apparente era di circa ventesima magnitudine, fu necessario sovrapporre un certo numero di *frames* acquisiti in tempi diversi.

Nel 1989, il Voyager 2 ottenne due sequenze di immagini di Proteus ad alta e media risoluzione (rispettivamente 1,4 e 8 km per elemento sensibile o pixel). Da queste è immediatamente evidente che la forma globale del satellite è marcatamente non sferica, e si tratta di una scoperta interessante in quanto gli altri satelliti di Saturno e Urano comparabili per dimensioni hanno invece una forma vicina a quella sferica, con rilievi topografici localizzati che non superano i 10 km di quota rispetto alla superficie d’equilibrio media. Allo stesso tempo Proteus non ha la forma di un frammento fortemente triassiale, come molti piccoli asteroidi o satelliti, con un rapporto dell’ordine di 2:1 fra l’asse più lungo e quello più corto: una forma tipica di frammenti generati da eventi di distruzione

collisionale, e dotati di sufficiente rigidità da resistere all'effetto "livellatore" della forza di gravità. Sembra quindi che Proteus si situi proprio al confine fra i corpi irregolari e quelli sferici, un'impressione confermata anche quantitativamente se si esamina un diagramma che mette in relazione l'altezza del più alto rilievo topografico presente sui satelliti dei pianeti esterni in funzione del loro raggio: i valori relativi a Proteus si collocano chiaramente alla transizione fra oggetti piccoli, sui quali i rilievi crescono proporzionalmente al raggio, e oggetti grossi dominati dalla gravità, che hanno forme globali sempre più vicine a quella sferica al crescere delle dimensioni.

Ma l'immagine di Proteus a maggiore risoluzione mostra un'altra caratteristica interessante: una grande depressione tondeggiante, circondata da un'alta scarpata, che domina la parte meridionale dell'emisfero rivolto a Nettuno. Il diametro di questa struttura, chiamata *Pharos*, raggiunge i 255 km circa. La scarpata che la circonda, con un'altezza di circa 10 km e una larghezza di 22, ha una pendenza media di 24°. *Pharos* ricorda altre strutture analoghe scoperte dai Voyager su alcuni satelliti di Saturno (*Herschel* su Mimas, *Odysseus* su Thetys), e come queste sembra il prodotto di un gigantesco impatto. Le tecniche di *image processing* hanno anche permesso di mettere in evidenza sulla piccola luna nettuniana numerosi crateri di dimensioni inferiori, che mostrano come si tratti di un corpo dalla superficie "primitiva", non evoluta dal punto di vista geologico. Appena visibili sono anche diverse depressioni lunghe sino a 100 km, larghe sui 30 km e profonde diversi chilometri: come nei casi del satellite marziano Phobos e dell'asteroide Gaspra, si tratta probabilmente della manifestazione superficiale di profonde fratture dell'interno del corpo. Se *Pharos* è effettivamente un cratere da impatto, esso detiene il record per quanto riguarda il rapporto fra le sue dimensioni e quelle del corpo che ha subito la collisione: molti modelli teorici sui processi di impatto ad alta velocità contro i corpi solidi prevedono che il cratere più grande che può formarsi senza distruggere catastroficamente il "bersaglio" dovrebbe avere un diametro compreso fra un terzo e la metà di quello del bersaglio stesso, mentre *Pharos* supera nettamente questo limite. Una spiegazione potrebbe risiedere nel fatto che gli strati superficiali di Proteus non siano costituiti da materiale compatto, ma al contrario molto "poroso", ossia ricco di cavità e caverne: in questo caso i modelli teorici prevedono la formazione di crateri più grandi, a parità di energia dell'impatto. Oltre a ciò, è probabile che *Pharos* rappresenti in realtà il prodotto di un evento intermedio fra un semplice cratere e la distruzione totale del bersaglio, un evento in cui l'interno del bersaglio viene profondamente fratturato e molti frammenti di dimensioni considerevoli si staccano l'uno dall'altro, ma non hanno una velocità sufficiente per sfuggire alla reciproca attrazione gravitazionale, e quindi riformano un corpo unico, sulla cui superficie resta una depressione tondeggiante a ricordare il centro della grande "esplosione" dovuta all'impatto.

- LE LUNE MINORI -

Per quanto concerne le altre lune di Nettuno, non vi è molto da dire. Il satellite più esterno, *Nereide*, fu scoperto il 1° maggio 1949 dal padre della planetologia moderna, l'astronomo di origine olandese Gerard P. Kuiper (1905-1973), con il riflettore di 208 cm dell'Osservatorio McDonald nel Texas. Kuiper lo aveva così battezzato per ricordare le ninfe che secondo la mitologia classica servivano il dio del mare.

Nereide detiene un primato: la sua orbita è la più eccentrica ($e = 0,75$) fra tutte le lune del Sistema Solare, avvicinandosi fino a 1,35 milioni di km dal pianeta per poi allontanarsi fino a una distanza di 9,62 milioni di km; inoltre l'orbita stessa è sensibilmente inclinata ($27^{\circ},6$) rispetto al piano equatoriale planetario, e viene percorsa dal satellite in modo diretto in 360,14 giorni. Durante il transito di Voyager 2 Nereide si trovava a 4,7 milioni di km di distanza, per cui le telecamere della sonda non hanno potuto fare altro che rilevare una piccola falce dai contorni irregolari. Il diametro stimato è risultato pari a 340 km; l'albedo (14%) è più che doppia rispetto a quella delle altre piccole lune (6%) e delle particelle degli anelli, il che confermerebbe che Nereide non è un satellite primordiale di Nettuno, bensì un corpo catturato dopo Tritone. Secondo alcuni scienziati, tuttavia, è anche possibile che Nereide fosse originariamente un satellite regolare, la cui orbita sarebbe stata sconvolta dalla cattura gravitazionale di Tritone da parte di Nettuno.

Spostandoci verso l'interno, la prima luna che si incontra dopo Proteus andando verso il pianeta è *Larissa*, con una forma decisamente irregolare e un diametro di 190 km, che presenta una superficie scura e butterata da crateri. Larissa era stata probabilmente scoperta da Terra già nel 1981 da Harold J. Reitsema, William B. Hubbard, Larry Lebofsky e David J. Tholen. Usando il metodo delle occultazioni stellari per evidenziare l'eventuale presenza di anelli attorno a Nettuno, come già era stato fatto nel 1977 con Urano, essi avevano infatti osservato l'occultazione di una stella, durata 8,1 secondi, che non si era ripetuta dalla parte opposta al pianeta. Anche se la probabilità di un simile evento era minima, i quattro astronomi si convinsero che la stella era stata eclissata da una piccola luna, mai osservata prima, con un diametro di almeno 180 km. Con la scoperta degli anelli parziali negli anni successivi furono però in pochi a credere a questa versione dei fatti: si pensava che Reitsema e colleghi avessero semplicemente scoperto un arco di anello particolarmente spesso. Quando nel 1989 gli scienziati confrontarono le osservazioni effettuate da Terra con i dati del Voyager, si accorsero che alla distanza a cui era avvenuta l'occultazione stellare del 1981 non si trovava alcun anello, bensì Larissa. Calcolando all'indietro nel tempo l'orbita della piccola luna, trovarono inoltre che essa poteva effettivamente aver prodotto l'occultazione osservata nel 1981, perciò ai quattro astronomi andava riconosciuto il merito della scoperta confermata dal Voyager 2, nonché l'onore di scegliere un nome per il piccolo satellite tra una rosa di proposte ispirate alla letteratura e alla mitologia.

I quattro satelliti più interni, *Despina*, *Galatea*, *Thalassa* e *Naiad*, non avrebbero potuto formarsi nella regione in cui si trovano ora, perché violano il *limite di Roche*, quello entro il quale le forze gravitazionali non riescono a tenere aggregato un corpo a causa delle maree prodotte dal pianeta attorno a cui orbita. Tale limite è direttamente proporzionale al raggio del pianeta e alla radice cubica del rapporto fra densità del pianeta e densità del satellite; nel caso di Nettuno, questa distanza critica si situa a circa 65.000 km dal suo centro. A complicare le cose, l'esistenza di questi quattro satelliti è contraddetta anche dalla presenza di Tritone: la cattura di Tritone da parte di Nettuno, infatti, avrebbe velocemente condotto alla distruzione di qualsiasi oggetto preesistente. Delle varie ipotesi avanzate, quella parsa più convincente suggerisce che di queste quattro lune le due più esterne, Despina e Galatea, potrebbero essersi formate in un luogo più lontano da Nettuno per poi essere state attratte gradualmente verso le loro attuali posizioni, mentre quelle più interne, Thalassa e Naiad, potrebbero essersi formate dal disco di detriti rimasto dopo l'azione distruttrice esercitata durante la cattura di Tritone. Da questo disco si sarebbe formato un oggetto piuttosto

grande che fu attratto più vicino a Nettuno dalle forze mareali, e fu in seguito frammentato da impatti asteroidali o cometari: Thalassa e Naiad sarebbero così gli ultimi sopravvissuti di questa fase finale.

Il 13 gennaio 2003 è stato dato l'annuncio ufficiale dell'esistenza di tre nuove lune irregolari di Nettuno. Scoperte nel 2002 e per questo battezzate provvisoriamente S/2002 N1, S/2002 N2 e S/2002 N3, esse erano sfuggite alle telecamere del Voyager 2 perché estremamente deboli e periferiche. Autori dell'impresa sono stati gli astronomi Matthew Holman e J.J. Kavelaars, già protagonisti della scoperta di alcuni satelliti irregolari di Urano. Nel caso di Nettuno, l'individuazione di nuove lune dopo quelle scoperte dal Voyager 2 rappresentava una sfida ancora maggiore, poiché, alla distanza a cui si trova il pianeta, oggetti così piccoli come quelli scoperti, con diametri stimati di 30-40 km, non sono più brillanti della magnitudine 25, una luminosità circa 100 milioni di volte minore di quella che l'occhio nudo può scorgere. Ed infatti Holman e Kavelaars hanno utilizzato una tecnica innovativa: usando il telescopio Blanco di 4 metri di diametro dell'Osservatorio Inter-Americano di Cerro Tololo, in Cile, e il telescopio franco-canadese-hawaiano di 3,6 metri nelle isole Hawaii, essi hanno ripreso molte immagini della zona di cielo che circondava Nettuno. Successivamente, hanno sommato insieme digitalmente questi fotogrammi per incrementare il rapporto segnale/rumore degli oggetti, fino ad isolare quelli compatibili con un'orbita planetocentrica.

Sebbene proprio l'orbita sia, almeno per ora, l'unica caratteristica osservabile delle nuove lune, appare chiaro che le popolazioni di satelliti irregolari che circondano ogni pianeta gigante del Sistema Solare siano il risultato di un'arcaica collisione tra una luna preesistente e un asteroide o una cometa di passaggio. Questi incontri occasionali avrebbero prodotto l'eiezione di parte del materiale della luna "genitrice", che andò a riaccumularsi costituendo una famiglia di nuovi piccoli satelliti.

ESPLORAZIONE SPAZIALE

Lanciato da Cape Canaveral, Florida, il 20 agosto 1977, il Voyager 2 aveva già sorvolato con successo i sistemi di Giove (1979), Saturno (1981) e Urano (1986). Diversi inconvenienti tecnici avvenuti nel corso degli anni, alcuni potenzialmente catastrofici, avevano messo a repentaglio il funzionamento del veicolo spaziale, ma gli ingegneri del *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) di Pasadena, in California, a cui era affidato il controllo della missione, erano sempre riusciti a superare le avversità. L'ultima meta del grande viaggio della sonda americana, durato fino a quel momento 12 anni, era Nettuno. Quando il veicolo della NASA giunse nelle sue vicinanze, nell'agosto del 1989, la sonda Magellano era già stata felicemente inviata verso Venere e la Galileo era pronta per partire alla volta di Giove. Lo stesso incontro con Nettuno rappresentò un finale spettacolare del progetto *Voyager*. Il pianeta, lontano dalla Terra 4,5 miliardi di chilometri e che nei manuali di astronomia era rappresentato poco più grande di un bagliore di stella, si trovava nella posizione più periferica rispetto a tutti gli altri pianeti del Sistema Solare; infatti Plutone, che tradizionalmente è conosciuto come il pianeta più lontano, si trovava in quel momento al perielio, che cade all'interno dell'orbita di Nettuno.

I tecnici del JPL avevano adottato diverse misure per garantire il successo dell'ultima parte della straordinaria impresa. Il 14 febbraio 1986, mentre la sonda stava ancora compiendo le ultime osservazioni di Urano, veniva comandata l'accensione dei suoi motori per due ore e mezzo. Bruciando 12 chilogrammi di idrazina la velocità del robot cosmico saliva così a 21,1 km/s. Contemporaneamente ne veniva corretta la traiettoria, in modo da permettere a Voyager 2 di effettuare un incontro più ravvicinato rispetto a quelli compiuti con gli altri pianeti. L'obiettivo era quello di portare la sonda a non più di 1300 km sopra il tetto delle nubi di Nettuno; in seguito si modificava la quota innalzandola a circa 4700 km per evitare la sospetta presenza di anelli o frammenti di essi nelle vicinanze del pianeta. Inoltre, nel settembre del 1986, temendo di incontrare difficoltà nelle comunicazioni durante la ricognizione di Nettuno, i tecnici provvedevano a caricare nei computer di bordo del Voyager 2 un nuovo programma: chiamato "*Backup Mission Load*", comprendeva mille parole ed era in grado di istruire la sonda per un intero ciclo automatico di osservazione di Nettuno, anche se dalle stazioni di controllo non fosse stato possibile trasmettere alcun ordine. Nel frattempo, sulla Terra si era provveduto a potenziare ulteriormente la capacità del *Deep Space Network* (DSN) della NASA, la rete di antenne formata da tre grandi stazioni situate rispettivamente a Goldstone nel deserto californiano di Mojave, a Madrid in Spagna e a Canberra in Australia. In questo modo almeno una delle tre stazioni assicurava la ricezione costante dei segnali, nonostante la rotazione della Terra. Nei tre centri, che disponevano ciascuno di tre antenne paraboliche, si aumentava la potenza di trasmissione per sopperire all'aumento della distanza dalla Terra e si ampliava il diametro dei paraboloidi più grandi; inoltre, visto che ricevere i segnali emessi da un trasmettitore di soli 20 Watt di potenza posto a oltre 4 miliardi di km di distanza non è cosa da poco, nell'intento di migliorare la qualità della ricezione venivano collegate ai tre centri principali altre stazioni sparse per il pianeta. Si poté contare sull'aiuto dell'Osservatorio Radio Astronomico Nazionale degli Stati Uniti (NRAO) nel New Mexico, per raddoppiare l'effettiva capacità di ricevere i segnali dalla stazione di Goldstone: con un considerevole sforzo globale, senza precedenti, collegando elettronicamente le parabole di Goldstone con i 27 dischi separati del *Very Large Array* appartenente al NRAO fu possibile ricevere i dati da Voyager 2 con la stessa velocità di 21,6 kbit al secondo con cui la sonda aveva trasmesso da Urano, più vicino al Sole di 1,66 miliardi di km. Per aumentare la quantità di informazioni trasmesse a Terra i tecnici di Pasadena avevano introdotto una variante che prevedeva l'impiego di un numero ridotto di bit per la trasmissione di un'immagine; ciò richiese un cambiamento nella codificazione dei dati prima della loro elaborazione, compressione e trasmissione. Dopo l'inizio della sequenza di ordini, i tecnici provvedevano all'invio di altri comandi e di set di istruzioni che aggiornavano il programma

di lavoro, così da perfezionarlo ulteriormente in base alle informazioni via via raccolte sulla posizione del pianeta e dei suoi satelliti: quest'ultimo accorgimento consentiva di migliorare la traiettoria di sorvolo rispetto alla pianificazione precedente.

Le riprese fotografiche su Nettuno rappresentavano un'autentica sfida tecnologica, poiché la luce solare a quella distanza era circa 912 volte inferiore a quella presente sulla Terra, 33 volte inferiore a quella utilizzabile su Giove e 2,5 volte inferiore a quella – già scarsa – che arriva su Urano. Quindi per ottenere risultati accettabili era necessario tenere gli obiettivi delle fotocamere aperti per lunghi tempi di esposizione per raccogliere una maggiore quantità di luce. Peraltro, tenendo conto che nel frattempo sia la sonda che il pianeta si sarebbero spostati, l'immagine catturata sarebbe risultata mossa e illeggibile. Per aggirare questo problema erano state messe a punto manovre di compensazione dei movimenti del veicolo e del pianeta durante le riprese, facendo ricorso a rotazioni combinate della sonda e della piattaforma degli strumenti che ospitava le fotocamere: la rotazione della sonda sul suo asse longitudinale veniva ridotta del 20% accendendo per 4 millisecondi i propulsori di assetto a idrazina; infine si interveniva con alcune modifiche del software sia di bordo che di terra. In precedenza, le riprese con esposizione più lunga di 15 secondi erano prima registrate e solo successivamente trasmesse; dal momento che l'esposizione media su Nettuno era intorno a 15 secondi, i cambiamenti di software consentirono di non registrare le immagini a lunga esposizione aumentando la flessibilità di ripresa. Se già dal 23 gennaio 1989 la sonda era in grado di inviare a Terra le prime immagini del sistema di Nettuno e Tritone prese da una distanza di 310 milioni di km, solo il 5 giugno, a meno di tre mesi dall'appuntamento, gli strumenti di Voyager 2 venivano pienamente attivati per iniziare la ricognizione, e il 1° agosto i suoi motori venivano ancora accesi per correggere un'ultima volta la traiettoria in vista del momento di massima attività previsto per il 25 agosto. Quel giorno la sonda, dopo aver percorso in tutto qualcosa come 7 miliardi di km, sorvolò il tetto nuvoloso sopra il polo nord del pianeta a una distanza minima di appena 4950 km, arrivando al suo appuntamento con meno di 6 minuti di ritardo. I dati raccolti, viaggiando alla velocità della luce, impiegarono circa 4 ore e 6 minuti per coprire la distanza che separava Nettuno dalla Terra. Cinque ore dopo il massimo avvicinamento al pianeta, Voyager 2 passava inoltre a 40.000 km dal suo obiettivo più atteso, Tritone, la principale luna di Nettuno che, assieme a Nereide, era l'unica fino ad allora conosciuta. Gli obiettivi della sonda ne scoprivano altre sei con diametri compresi tra 58 e 400 km, rimaste invisibili all'osservazione da Terra in quanto troppo vicine al pianeta. Se Nereide, il satellite più esterno, rientra in questo ambito dimensionale con i suoi 340 km, Tritone raggiunge invece un diametro di 2707 km, vale a dire circa tre quarti della nostra Luna, rivelandosi di estremo interesse per i planetologi.

Dopo il passaggio sopra il polo nord di Nettuno, la rotta del Voyager 2 si impennava al di sotto del piano dell'eclittica, formando un angolo di ben 48°. Il 26 agosto, mentre si allontanava dal pianeta con una velocità relativa di 14,9 km/s, la sonda si “guardava indietro” e otteneva delle immagini a lunghissima esposizione delle regioni dove gli osservatori terrestri avevano creduto di vedere delle frazioni di anello, ritenendo che si trattassero di archi incompiuti. In effetti le riprese di Voyager 2 rivelavano la presenza di strutture sottili ma complete, suddivise in quattro fasce a diversa distanza dal pianeta, anche se in alcuni punti si notavano degli enigmatici addensamenti di materia che con ogni probabilità avevano fatto pensare all'esistenza di “archi”. Il 28 agosto veniva acquisita un'ultima immagine spettacolare del sistema di Nettuno e Tritone. Il 2 ottobre 1989 le telecamere di Voyager 2 venivano spente e rimanevano in funzione solo lo spettrometro ultravioletto e alcuni rivelatori: in quel momento terminava la più lunga e complessa esplorazione mai condotta da una sonda interplanetaria, che rimane di diritto nella storia dell'astronautica per i grandi risultati tecnici e scientifici raggiunti.

Dal 1° gennaio 1990 le due sonde Voyager 1 e 2 hanno cominciato l'ultima fase della loro impresa, iniziando un prolungamento della missione chiamato *Voyager Interstellar Mission* (VIM): il suo scopo consiste nella raccolta di dati sull'ambiente del Sistema Solare esterno, per scoprire quale sia l'estremo limite della sfera d'influenza del vento solare, e nell'individuazione delle sorgenti

ultraviolette presenti nell'Universo (galassie attive, quasar, nane bianche, ecc.). Attualmente la Voyager 1 si sta allontanando da noi a una velocità di 17,2 km/s (3,628 UA/anno) ed è il più lontano oggetto costruito dall'uomo.

OSSERVAZIONI AMATORIALI

Per dimensioni e struttura Nettuno è simile a Urano; la maggiore distanza lo rende però decisamente meno luminoso, dal momento che esso viene raggiunto da una luce solare in media 904 volte più debole di quella che arriva sulla Terra. L'osservazione di Nettuno richiede pertanto uno strumento professionale di alte prestazioni se lo scopo è quello di ricercare particolari, ma in ogni caso la risoluzione di deboli dettagli sul disco, che appare di un colore grigio-azzurro uniforme, è assai rara e generalmente non bisogna pretendere di vedere alcunché. Anche solo per la percezione del disco stesso, che appare non molto più grande dei maggiori satelliti di Giove avendo dimensioni di poco superiori ai 2 secondi d'arco, si richiede un telescopio con un'apertura minima di 15 cm e sono necessari almeno 750 ingrandimenti per vederlo sotto lo stesso angolo della Luna. Un rifrattore di 10 cm spinto a 250× consente in molte circostanze di mostrare il pianeta come un minutissimo disco grigiastro, poco più che un punto sfocato, se il *seeing* (grado di turbolenza atmosferica) è buono e l'osservatore esperto. Comunque, come regola empirica valida per gli strumenti amatoriali, possiamo dire che visualmente sarà bene usare l'ingrandimento numericamente uguale al valore del diametro dell'obiettivo espresso in millimetri (chiamato "ingrandimento risolvante") e magari qualcosa di più, se il *seeing* lo permette. Il modo migliore per percepire la sua natura non stellare consiste nell'esaminare prima e dopo una stella vicina della stessa magnitudine, naturalmente curando al massimo la messa a fuoco. Se è già difficile risolvere il disco, che al massimo misura 2",4, possiamo immaginare quanto impervio sia tentare di individuare eventuali particolari, sia pure, ovviamente, con strumenti molto potenti: è stato evidenziato che scorgere dettagli su Nettuno è come vederne sul picco centrale del cratere Copernicus durante la fase di Luna piena!

Il monitoraggio delle atmosfere di Urano e Nettuno richiede strumenti con un buon diametro, ma anche i non professionisti possono portare il loro contributo allo studio del Sistema Solare esterno, a patto di condurre osservazioni sufficientemente prolungate nel tempo. Spesso la difficoltà di queste ultime induce l'astrofilo a cambiare il soggetto delle proprie ricerche, ma la perseveranza è una dote necessaria e non solo nell'osservazione di Urano e Nettuno. Test condotti a Harvard nel 1985 su dischi imitanti Nettuno e Urano mostrarono che con un rifrattore da 28 cm è possibile rintracciare dettagli fino a 0",5 in diametro, purché ben contrastati. Del resto, differenze di albedo sono state individuate anche su corpi angolarmente più piccoli di Nettuno, come i satelliti galileiani di Giove. In questo caso servirà un telescopio rifrattore di almeno 15 cm di diametro (il rifrattore ha il pregio di evidenziare maggiormente il contrasto), oppure un riflettore con un'apertura minima di 30 cm. La lunghezza focale del telescopio non dovrà essere inferiore a 1,5 m. Gli ingrandimenti per l'osservazione visuale volta allo studio del disco partono da 500× in su: è quindi necessario disporre di una lente di Barlow 2× (costituita da un doppietto acromatico negativo) luminosa e di buona qualità ottica, da inserire tra l'obiettivo e l'oculare del telescopio. Sarà bene non utilizzare oculari dalla focale minore di 6 mm, per via della loro scarsa estrazione pupillare, ed evitare l'uso di filtri data la bassa luminosità del pianeta. La durata minima di una sessione osservativa è di 2 ore, non perché i dettagli sul disco siano molti ma perché è raro avere qualche istante di *seeing* veramente buono, indispensabile per scorgere qualcosa sul pianeta.

Come nel caso di Urano, per condurre le osservazioni è possibile avvalersi di una camera CCD, effettuando alcune riprese di Nettuno nell'arco di pochi minuti per evitare che la rapida rotazione del pianeta sposti eventuali particolari presenti sul disco. Dopo aver selezionato le immagini più nitide, si procederà alla loro somma digitale volta al miglioramento del rapporto segnale/rumore. In questo caso, tuttavia, la determinazione dell'orientamento delle singole immagini rispetto alle direzioni nord ed est sarà meno agevole rispetto al caso di Urano, visto il minor numero di satelliti luminosi a cui fare riferimento.

Se ci si accontenta di vedere Nettuno come un piccolo punto di luce, è sufficiente un comune binocolo: all'opposizione appare di magnitudine 7,7 e un binocolo 10×50 rende accessibili oggetti di magnitudine 9. L'identificazione richiede però una cartina celeste che riporti le stelle fino alla magnitudine 8 (ottimo è l'atlante celeste *Uranometria 2000*); inoltre è necessaria la conoscenza esatta della posizione del pianeta, ricavabile dalle effemeridi che vengono sovente tabulate su riviste o almanacchi astronomici. Una volta riconosciuto, Nettuno è facile da seguire perché il suo spostamento medio nel cielo è di soli 22" al giorno. Circa il sistema di satelliti, solo il massiccio Tritone può essere visto teoricamente mediante telescopi del diametro di almeno 20 cm, dato che la sua magnitudine apparente all'opposizione è 13,6 e la separazione massima dal pianeta è di circa 17"; la sua identificazione dovrebbe essere appena più agevole di quella dei satelliti di Urano, ma non senza problemi, specialmente se il pianeta si trova basso sull'orizzonte. L'altro satellite visibile di Nettuno, Nereide, è enormemente più debole di Tritone: all'opposizione appare di magnitudine 18,7 e pertanto è riservato ai potenti strumenti professionali. Come per Urano, un certo interesse nell'osservazione di Nettuno potrebbe risiedere nello studio delle sue variazioni di luminosità, che al momento indicano un'oscillazione di 0,36 magnitudini in un periodo di 21 anni e potrebbero essere correlate al ciclo di attività solare. Naturalmente questo genere di ricerche richiede un fotometro fotoelettrico o una camera CCD da applicare al telescopio.

Per quanto riguarda la fotografia tradizionale, i risultati che si possono ottenere con Nettuno sono sempre molto modesti, come del resto nel caso di Urano. Il diametro apparente del disco varia pochissimo nel corso degli anni e di conseguenza non vi sono periodi privilegiati per la ripresa, a patto, ovviamente, che il pianeta sia ben alto nel cielo notturno. Le dimensioni angolari però sono troppo scarse per ottenere un'immagine estesa del disco anche con l'uso di strumenti medio-grandi: solo i maggiori telescopi e le condizioni atmosferiche più favorevoli permettono di evidenziare Nettuno come un piccolo dischetto. Con strumenti meno impegnativi l'unica soluzione rimane quella di riprenderlo come una stella di magnitudine 8 e, allo scopo, può venire impiegata anche una normale macchina fotografica adatta all'uso astronomico, montata su un supporto equatoriale (o meglio in parallelo a uno strumento con tale montatura) ed equipaggiata con un obiettivo di 50 mm di focale, tenendo il diaframma aperto almeno a $f/2$ e impiegando una pellicola di media sensibilità (400 ISO). Naturalmente è bene che lo strumento su cui la macchina fotografica è montata sia dotato di moto orario che compensi la rotazione terrestre, poiché i tempi di esposizione possono arrivare al minuto e quindi si richiede un inseguimento dell'oggetto inquadrato. In alternativa è possibile utilizzare pellicole più sensibili, come quelle a 1600 ISO che permettono di ottenere un'immagine del pianeta in soli 15 secondi di posa, sempre a patto comunque che le condizioni del cielo siano ottime; in caso contrario la luce che ci arriva da Nettuno sarà facilmente soverchiata da quella del fondo cielo. Con teleobiettivi e l'inseguimento orario risulta molto facile registrare l'immagine puntiforme del pianeta. Per il disco, però, il discorso resta lo stesso: qui sono necessari strumenti professionali di potenza estrema che lavorino in condizioni di *seeing* eccellente. I deboli anelli, mostrati dalla sonda Voyager 2 nel 1989, non sono invece fotografabili da Terra nel modo più assoluto, neanche col telescopio spaziale posto al di fuori della nostra atmosfera.

PARAMETRI ORBITALI E FISICI DI NETTUNO

Scopritore	Johann Gottfried Galle
Data della scoperta	23 settembre 1846
Massa (kg)	1,0243×10²⁶
Massa (Terra = 1)	17,147
Raggio equatoriale (km)	24.764
Raggio equatoriale (Terra = 1)	3,8825
Densità media (g/cm³)	1,638
Distanza media dal Sole (km)	4.497.070.000
Distanza media dal Sole (Terra = 1)	30,06106
Periodo di rotazione (ore)	16,11
Periodo orbitale (anni)	164,79
Velocità orbitale media (km/s)	5,45
Eccentricità orbitale	0,0097
Inclinazione dell'asse di rotazione (gradi)	29,6
Inclinazione dell'orbita (gradi)	1,774
Accelerazione di gravità all'equatore (m/s²)	11,00
Velocità di fuga all'equatore (km/s)	23,50
Albedo di Bond	0,290
Albedo visuale geometrica	0,41
Magnitudine visuale apparente all'opposizione	7,84
Temperatura di corpo nero (K)	46,6
Temperatura media delle nubi (K)	80-120 (da -193 a -153°C)
Pressione atmosferica al livello zero (bar)	1
Composizione dell'atmosfera	Idrogeno (80%), Elio (19%), Metano (1%)
Numero di satelliti	11

TABELLA RIASSUNTIVA DEGLI ANELLI DI NETTUNO

Nome	Distanza dal centro del pianeta (km)	Larghezza radiale (km)	Spessore (km)	Massa (kg)	Albedo
Galle (1989N3R)	41.900	1700	?	?	0,03
Le Verrier (1989N2R)	53.200	15	<30	?	0,03
Lassell (1989N4R)	53.200-59.100	5900	?	?	0,03
Arago (1989N5R)	57.200	<100	?	?	0,03
Adams (1989N1R)	62.930	<50	<30	?	0,03

TABELLA RIASSUNTIVA DEI SATELLITI DI NETTUNO

Nome	Distanza media (km)	Raggio (km)	Eccentricità	Inclinazione (gradi)	Periodo orbitale (giorni)
Naiad	48.227	29	0,0003	4,74	0,294396
Thalassa	50.075	40	0,0002	0,21	0,311485
Despina	52.526	74	0,0001	0,07	0,334655
Galatea	61.953	79	0,0001	0,05	0,428745
Larissa	73.548	104 × 89	0,0014	0,20	0,554654
Proteus	117.647	218 × 208 × 201	0,0004	0,55	1,122315
Tritone	354.760	1353,4	0,0000	157,35	-5,876854
Nereide	5.513.400	170	0,7512	27,6	360,13619
S/2002 N1	21.990.000	20	0,43	121	2868,4
S/2002 N2	20.200.000	20	0,17	57	2525,4
S/2002 N3	21.390.000	20	0,47	43	2751,8

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. 42, 67-68, 75; vol. 3, pagg. 846, 853-855, 871; vol. 5, pagg. 1560, 1853;
- AA.VV.: Enciclopedia a schede *Astronomia - dalla Terra ai confini dell'Universo*, ed. Fabbri, Milano 1991 (Il cielo nella storia, pagg. 221-222; Sistema Solare, pagg. 19-20, 121-122, 137-138, 143-144, 193-194, 201-202, 211-212, 241-242, 345-346, 353-354; Strumenti e metodi, pagg. 127-128, 143-144);
- 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:

- Paolo Farinella, Cesare Guaita: "Nettuno prima del Voyager", *l'Astronomia* n.91 agosto/settembre 1989, pagg. 6-21;
- Marcello Fulchignoni: "Nettuno svelato, grazie Voyager!", *l'Astronomia* n.94 novembre 1989, pagg. 6-25;
- Maria Antonietta Barucci: "Anelli e mini-lune", *l'Astronomia* n.94 novembre 1989, pagg. 26-37;
- Corrado Lamberti: "I venti di Nettuno", *l'Astronomia* n.96 febbraio 1990, pagg. 72-73;
- Corrado Lamberti: "Nettuno brillante come non mai", *l'Astronomia* n.112 luglio 1991, pag. 70;
- Salvo De Meis: "Una rara occultazione di Nettuno", *l'Astronomia* n.123 luglio 1992, pagg. 30-32;
- Cesare Guaita: "Voyager 3", *l'Astronomia* n.155 giugno 1995, pagg. 30, 32;
- Giuseppe e Tiziana Longo: "Nettuno: il trionfo della meccanica celeste", *l'Astronomia* n.168 agosto/settembre 1996, pagg. 24-29;
- Walter Ferreri: "Nettuno, il pianeta scoperto a tavolino", *Nuovo Orione* n.62 luglio 1997, pagg. 32-37;
- Mario Di Martino: "Tritone si sta riscaldando", *l'Astronomia* n.194 gennaio 1999, pagg. 15-16;
- Albino Carbognani: "Osservare Urano e Nettuno", *Astronomia UAI* n.4 luglio/agosto 2001, pagg. 4-9.