

Introduzione allo studio del Sistema Solare

III

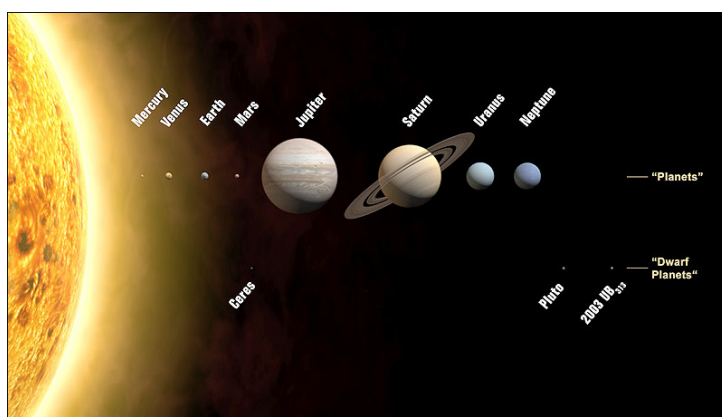
Pianeti giganti

Lezione SP 3
G. Vladilo

1

Pianeti giganti

- Pianeti giganti gassosi
 - Giove, Saturno
 $\langle \rho \rangle \sim 1.3 \text{ e } 0.7 \text{ g cm}^{-3}$; $d = 5 \text{ e } 10 \text{ AU}$; $M = 318 \text{ e } 95 M_{\text{terra}}$
- Pianeti giganti ghiacciati
 - Urano, Nettuno
 $\langle \rho \rangle \sim 1.3 \text{ e } 1.6 \text{ g cm}^{-3}$; $d \sim 20 \text{ e } 30 \text{ AU}$; $M = 14 \text{ e } 17 M_{\text{terra}}$



2

Pianeti giganti

Allen (2000)

- **Temperatura effettiva**
 - Valori bassi rispetto ai pianeti terrestri
Al di sotto del valore di condensazione dei ghiacci

Pianeta	Temperatura effettiva [K]
Terra	255
Giove	124
Saturno	95
Urano	59
Nettuno	59

- **Albedo**
 - Valori relativamente alti
Strati atmosferici esterni notevolmente riflettenti

Pianeta	Albedo nel <u>visibile</u>
Terra	0.38
Giove	0.52
Saturno	0.47
Urano	0.51
Nettuno	0.41

3

Pianeti giganti

Allen (2000)

- **Estensione delle atmosfere**
 - in virtù della loro massa, i pianeti giganti hanno una maggior capacità di catturare gas durante la fase di formazione rispetto ai pianeti di tipo terrestre
 - per lo stesso motivo hanno le velocità di fuga maggiori di tutti i pianeti del Sistema Solare
 - Non sorprende pertanto che abbiano le atmosfere più estese
 - Le osservazioni riescono a penetrare solo gli strati più esterni

Pianeta roccioso	Pressione atmosferica superficiale [bar]	Altezza di scala H [km]
Terra	1	8
Pianeta gigante	Pressione atmosferica al livello della superficie visibile delle nubi [bar]	Altezza di scala dal livello della superficie visibile H [km]
Giove	~ 0.3	19-25
Saturno	~ 0.4	35-50
Urano	...	22-29
Nettuno	...	18-22

4

Pianeti giganti

- **Composizione chimica dei pianeti giganti**

- Dedotta da osservazioni spettroscopiche degli strati esterni
 - La densità media planetaria vincola la composizione degli strati interni
- Atmosfere composte principalmente di idrogeno ed elio, come nel Sole
 - A differenza dei pianeti rocciosi, i pianeti giganti sono probabilmente riusciti a trattenere, in gran parte, il gas della nebulosa protosolare
- Presenza di molecole
 - Oltre ad H_2 , le più abbondanti osservate sono CH_4 e NH_3
- Elementi pesanti
 - Generalmente “arricchiti di metalli” rispetto alla composizione chimica solare
 - Forse più appropriato pensare che siano “impoveriti di idrogeno”
 - Le deviazioni dalla composizione chimica solare favoriscono un’ipotesi di formazione più complessa di un semplice collasso di gas protoplanetario

5

Esempio: composizione chimica di Giove

- **Giove**

- Abbastanza simile a quella solare

A causa dell’abbondanza di H,
l’atmosfera è riducente e gli
elementi chimici sono
principalmente presenti in forma
ridotta, anziché ossidata

ad esempio, CH_4 anziché CO_2

89.8±2.0% hydrogen (H_2)
10.2±2.0% helium (He)
≈0.3% methane (CH_4)
≈0.026% ammonia (NH_3)
≈0.003% hydrogen
deuteride (HD)
0.0006% ethane (C_2H_6)
0.0004% water (H_2O)

Ices:

- ammonia (NH_3)
- water (H_2O)
- ammonium hydrosulfide (NH_4SH)

Pianeti giganti

- **Velocità di rotazione**

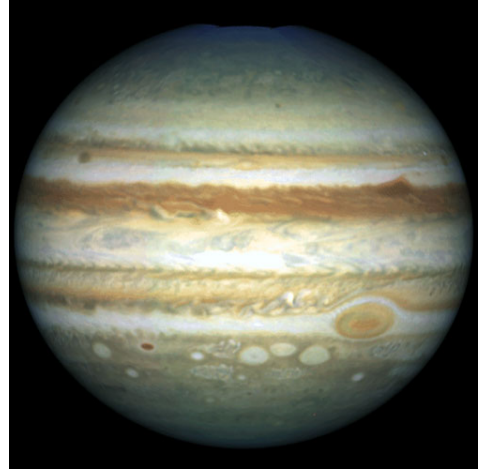
- Nella banda visibile si misura quella degli strati atmosferici esterni, mentre nella banda radio si misura quella di strati più interni

- Giove e Saturno hanno velocità di rotazione superficiale notevolmente elevate

Periodo di rotazione $P \sim 10\text{h}$ per entrambi

- La rotazione è differenziale sia per Giove che per Saturno

il periodo di rotazione aumenta al crescere della latitudine, ovvero si ruotano più velocemente all'equatore



7

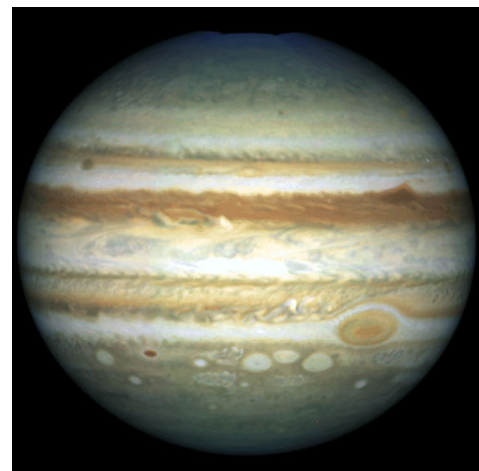
Pianeti giganti

- **Struttura a bande**

- Dovuta alla direzione principalmente zonale, cioè orientata lungo i paralleli, del vento nell'atmosfera

- La differenza del calore ricevuto dal Sole tra l'equatore e i poli provoca la comparsa di correnti idrodinamiche che vengono deviate in direzione zonale dalla forza di Coriolis

- Ulteriore esempio del fatto che all'aumentare della velocità di rotazione planetaria aumenta il numero di celle convettive, come già discusso nel caso di Venere e della Terra



8

Pianeti giganti

- **Sorgenti di calore interno**

- Giove, Saturno e Nettuno emettono più energia di quanta ne ricevano dal Sole

Non è ancora chiaro quale sia il meccanismo

Potrebbe trattarsi di calore residuo primordiale

Il pattern di circolazione atmosferico dei pianeti giganti è sostenuto anche dalle sorgenti di calore interno

A differenza del caso della Terra, il cui pattern di circolazione atmosferico è sostenuto dall'energia ricevuta dal Sole

- Urano non ha una sorgente di calore interno

Campi magnetici dei pianeti giganti

Russel & Dougherty 2010

- **I più intensi di tutti i pianeti del Sistema Solare**

- Indicativi di un forte meccanismo dinamo in azione, quindi della presenza di uno strato esteso convettivo di un fluido elettricamente conduttivo

Riportiamo i valori di momento di dipolo magnetico per i pianeti giganti

- **Giove**

$1.55 \times 10^{20} \text{ T m}^3$

$\sim 2 \times 10^4$ volte il valore terrestre

Tilt $\sim 10^\circ$ con asse rotazione

- **Saturno**

~ 600 volte il valore terrestre

Tilt $\sim 1^\circ$ con asse rotazione

- **Urano**

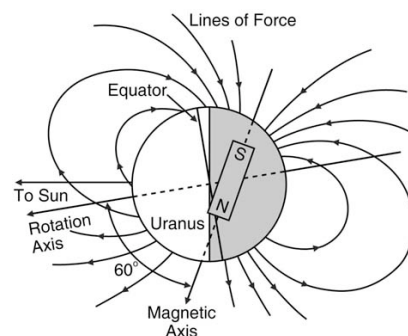
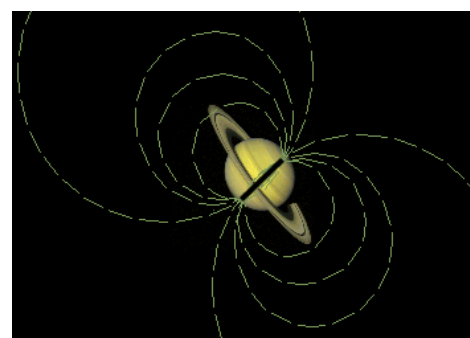
~ 50 volte il valore terrestre

Tilt $\sim 98^\circ$ con asse rotazione

- **Nettuno**

~ 25 volte il valore terrestre

Tilt $\sim 47^\circ$ con asse rotazione



Struttura interna dei pianeti giganti

Come per tutti i pianeti, i dati sperimentali sugli interni dei pianeti giganti sono estremamente difficili da ottenere

Gli interni sono ricostruiti mediante modelli in cui si assume una determinata composizione chimica

Vincoli sui modelli

- Diagramma di fase dell'idrogeno
Strumento diagnostico fondamentale
Esistono ancora incertezze teoriche e sperimentali riguardo al diagramma di fase dell'idrogeno alle pressioni e temperature caratteristiche
Si ripercuotono sulla nostra capacità di modellare gli interni dei pianeti giganti

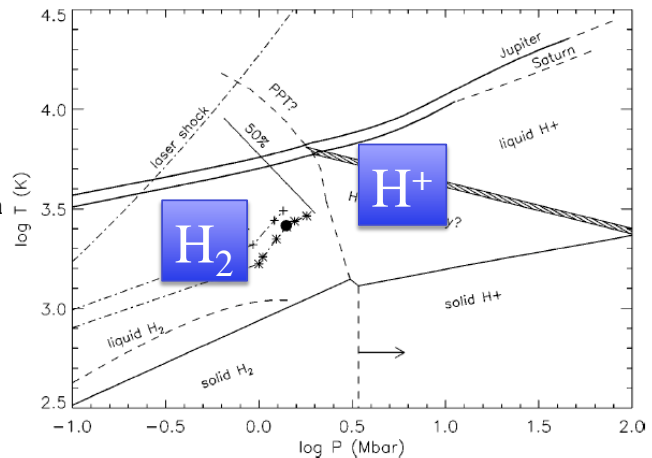
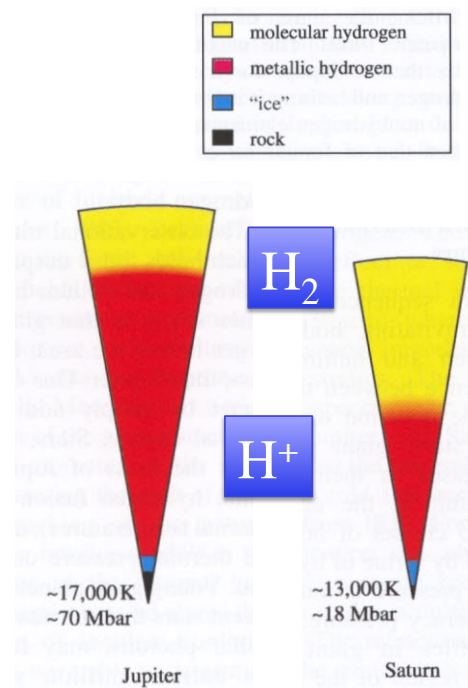


Figure 1 The phase diagram of hydrogen, showing regions of stability of liquid and solid molecular hydrogen (H₂), and of liquid and solid metallic (pressure-ionized) hydrogen (H⁺). Also shown are trajectories of experimental shock-compression experiments (dashed-dot lines) and trajectories of the interiors of Jupiter and Saturn at the present epoch (heavy solid lines). See text for discussion of further details of this figure.

11

Interni dei giganti gassosi

- Giove e Saturno
 - Principali fasi
 - Idrogeno molecolare H₂ in fase liquida
Si trova nelle parti esterne
 - Idrogeno metallico H⁺ in fase liquida
Ionizzato dalla pressione
Si trova a maggior profondità
- Verosimilmente la fase di idrogeno metallico liquido e ionizzato gioca un ruolo fondamentale nella generazione dei forti campi magnetici dei giganti gassosi



12

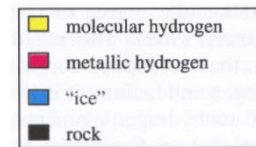
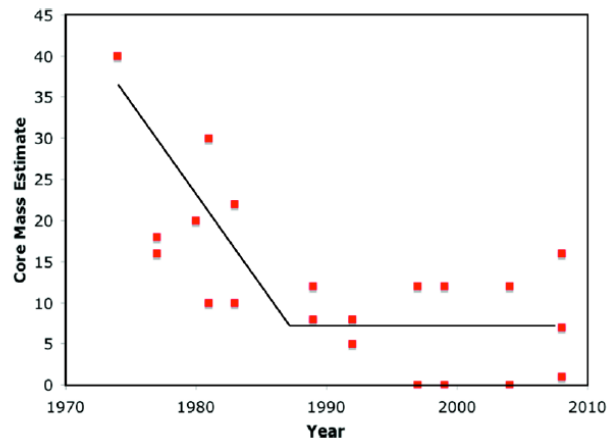
Interni dei giganti gassosi

- Esistenza di un core solido/roccioso
- Giove

Sembra confermato ($M_{\text{core}} \sim 12 M_{\text{terra}}$) dopo
lungo dibattito in letteratura

- Saturno

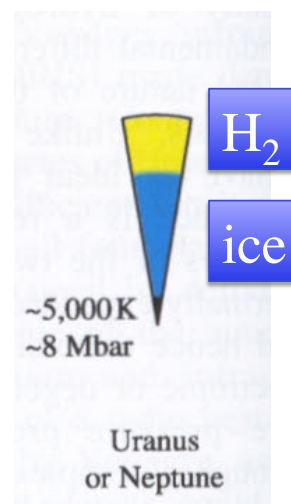
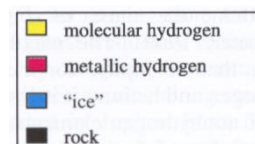
$M_{\text{core}} \sim 9 - 22 M_{\text{terra}}$



13

Pianeti "giganti ghiacciati"

- Nettuno
 - Strato esterno ricco di idrogeno molecolare
Occupi circa 20% del raggio del pianeta
 - Strati interni di ghiaccio e roccia
Parte della roccia potrebbe essere separata in un core
- Urano
 - Struttura molto simile
Forse più condensato centralmente
- Prototipi di "giganti ghiacciati" negli studi di esopianeti



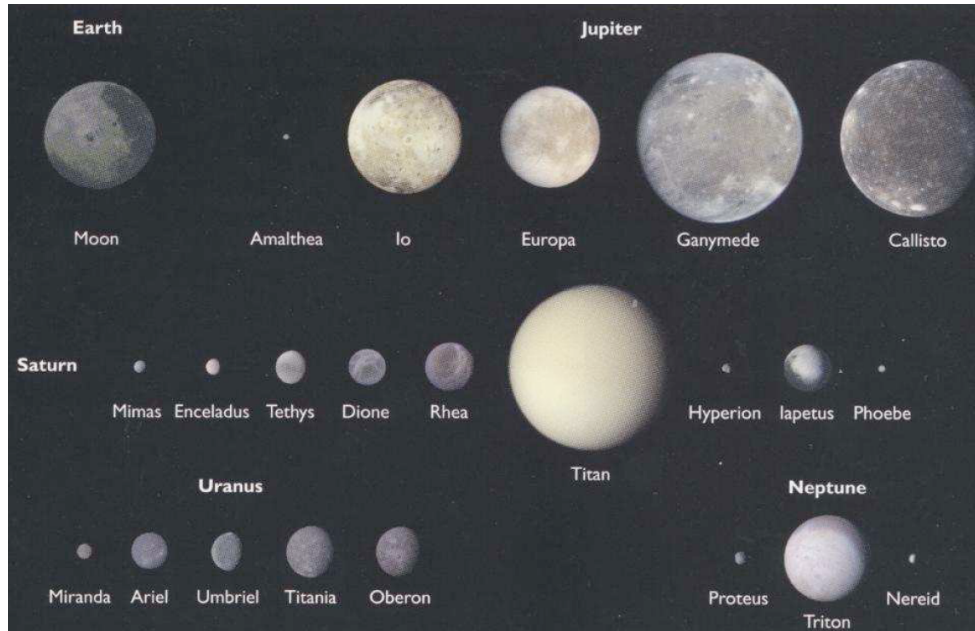
14

Satelliti

- I satelliti del Sistema Solare

- Esistono almeno 168 satelliti che orbitano 6 degli 8 pianeti

La stragrande maggioranza orbita i pianeti giganti



15

Satelliti dei pianeti giganti

- I pianeti giganti hanno un notevole numero di satelliti
 - Attualmente se ne contano almeno 165
- Concentriamo la nostra attenzione su alcuni satelliti regolari
 - Caratteristiche che definiscono i satelliti regolari
 - Orbite di bassa eccentricità rispetto al proprio pianeta e approssimativamente coplanari con l'equatore del pianeta
 - Tali caratteristiche indicano un'origine comune dei satelliti regolari e del pianeta
 - Piuttosto che una cattura accidentale di un corpo minore formatosi altrove, ipotesi in linea con le caratteristiche dei satelliti irregolari

16

Satelliti dei pianeti giganti

- Principali satelliti regolari dei pianeti giganti
 - alcuni di tali satelliti sono particolarmente interessanti dal punto di vista astrobiologico
 - daremo alcuni cenni su quelli sottolineati
 - Giove
 - Io, Europa, Ganimede, Callisto, Amaltea
 - Saturno
 - Mimas, Enceladus, Tethys, Dione, Rhea, Titan, Hyperion
 - Urano
 - Ariel, Umbriel, Titania, Oberon
 - Nettuno
 - Triton, Nereid, Proteus

17

Satelliti di Giove

- I principali sono i 4 satelliti Galileiani
 - così chiamata in quanto scoperti da Galileo nel 1610
- Oggetto di studi di sonde spaziali
 - In particolare le sonde Voyager e Galileo



18

Satelliti di Giove

Io

A. Coradini (2010)

- Caratterizzato da un'attività vulcanica particolarmente intensa

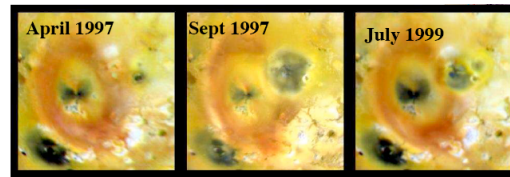
Chiare evidenze di variabilità

- Attività presumibilmente indotta dalle forti interazioni mareali e magnetiche con Giove

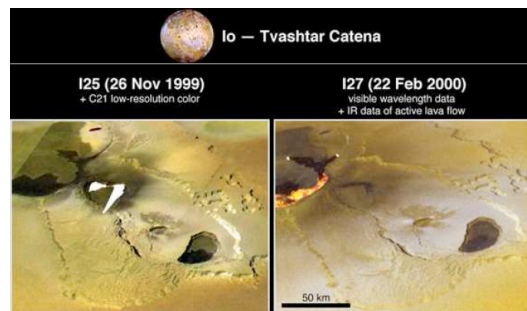
I composti volatili (tra cui H_2O e CO_2) probabilmente persi in epoche passate a causa del continuo riciclo di materiale dall'interno verso la superficie dovuto all'attività geologica

- Interno

- Fuso e differenziato



Galileo images of overlapping deposits at Pillan and Pele



19

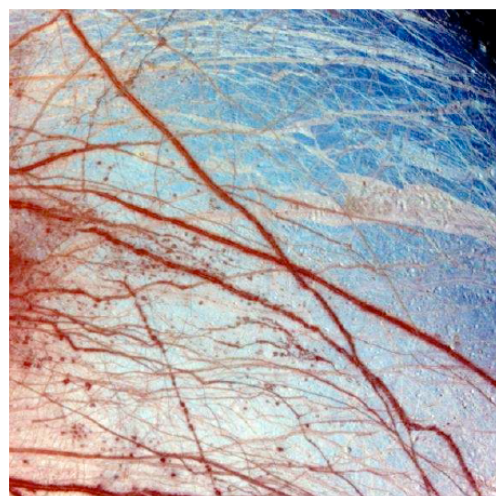
Satelliti di Giove

Europa

A. Coradini (2010)

- Caratterizzato da una superficie di ghiaccio H_2O
 - Da misure di gravimetria risulta che lo spessore dello strato di ghiaccio potrebbe essere di varie decine di chilometri

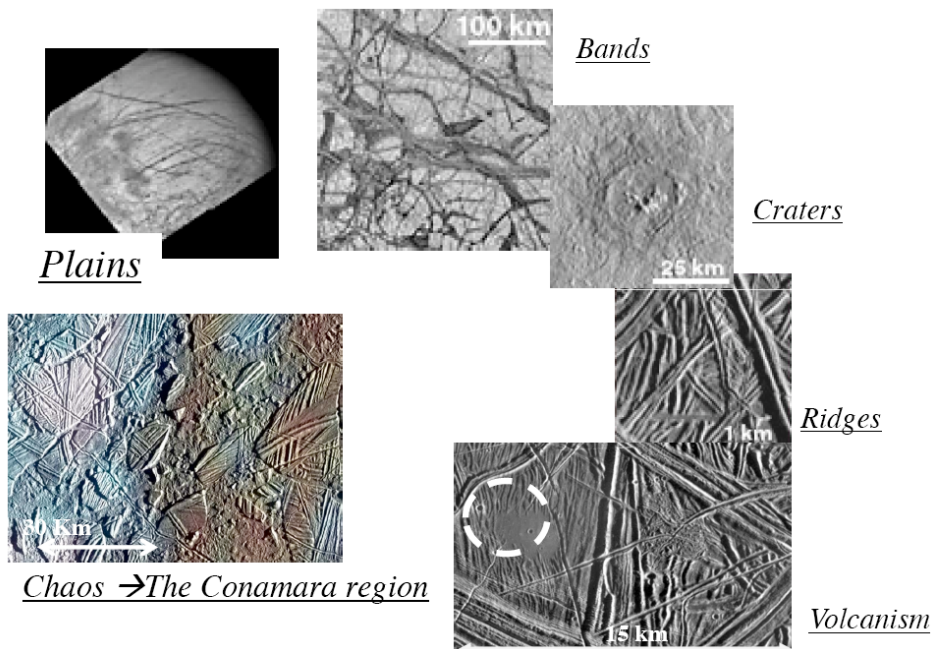
Sulla superficie si trovano composti "contaminanti" del ghiaccio (probabilmente sali) che sembrano avere un'origine endogena



20

Satelliti di Giove Europa

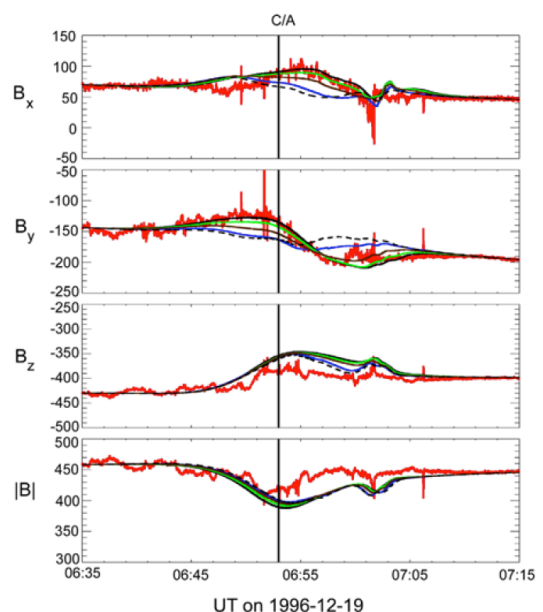
La superficie presenta una varietà di strutture indicative della presenza di una notevole attività



21

Oceano di acqua liquida sotto la superficie di Europa

- **Evidenze sperimentali**
 - Misure magnetometriche
 - Indicano la presenza di un composto con caratteristiche di conduttività tipiche di un oceano con sale
 - MgSO_4 fitta meglio i dati rispetto a NaCl
 - Getti di vapore dalla superficie
 - Scoperti dall'analisi di dati ultravioletti HST
 - Roth et al. 2014, Science
- Mostrano variabilità con il periodo orbitale
- Affinchè ci sia fase liquida serve la compresenza di composti volatili con punto di fusione più basso dell'acqua (ad esempio l'ammoniaca NH_3)

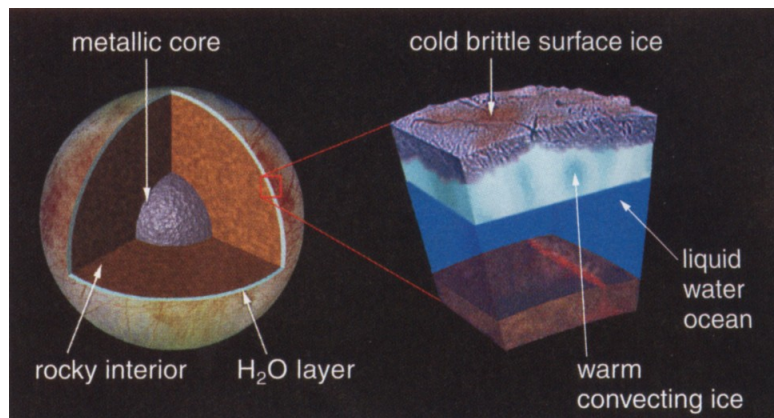


22

Oceano e struttura interna

Per mantenere l'oceano serve una fonte di riscaldamento interno, presumibilmente di tipo mareale

- **Struttura interna di Europa**
 - Si ritiene abbia un core metallico circondato da un mantello roccioso



Astronomia Osservativa C, SP 3, Vladilo (2011)

23

Satelliti di Giove Ganimede

- **Caratteristiche della superficie**
 - Due principali tipologie di terreno:
 - regioni scure, antiche e fortemente craterizzate
 - zone più chiare, di formazione leggermente più recente, ricche di scoscendimenti
 - L'origine delle caratteristiche superficiali non è ancora totalmente compresa, sebbene esse siano probabilmente il risultato dell'attività tettonica attivata dal riscaldamento mareale
 - Ghiaccio d'acqua sembra essere presente su gran parte della superficie
 - Si ritiene che un oceano di acqua salata esista a circa 200 km di profondità, compreso tra due strati di ghiaccio

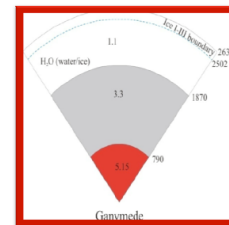
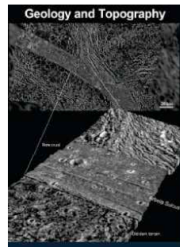
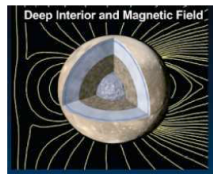
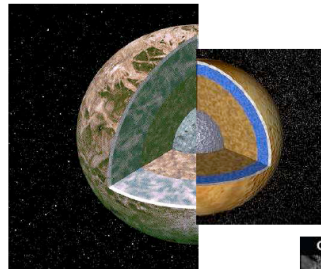


24

Satelliti di Giove Ganimede

- **Caratterizzato dalla presenza di un campo magnetico endogeno**
 - Le misure ottenute con il magnetometro sono spiegabili con la presenza di uno strato liquido conduttivo
 - I dati di densità e gravità suggeriscono la presenza di un core di Fe liquido che sarebbe responsabile dell'effetto dinamo
 - Unico satellite con meccanismo dinamo

Europa e Callisto hanno campi magnetici indotti



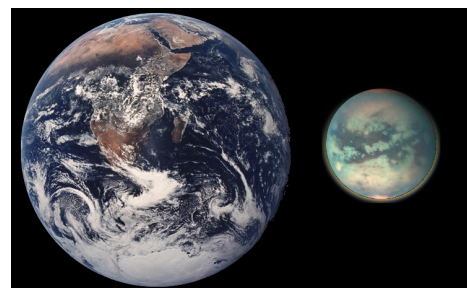
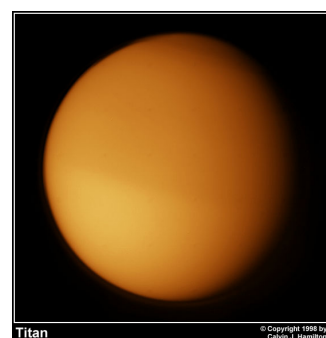
- Liquid layer proposed to explain magnetometer data.
- Density and gravity data suggest the possible presence of a liquid iron core, where the dynamo is generated

25

Satelliti di Saturno Titano

Il maggiore dei satelliti regolari di Saturno

- **Unico satellite con un'atmosfera significativa**
 - Pressione superficiale maggiore di quella della Terra ($P=1.5$ bar)
 - A destra, immagine ottenuta dalla sonda Voyager nella banda visibile
- **Fattori che hanno reso possibile l'esistenza dell'atmosfera di Titano**
 - Velocità di fuga non troppo bassa ($v_{esc}=2.65$ km/s)
 - Temperatura superficiale ($T=94$ K) sufficientemente bassa
 - Tale temperatura è comunque abbastanza alta da non far ghiacciare i composti volatili che la caratterizzano



26

Satelliti di Saturno Titano

- Composizione chimica dell'atmosfera di Titano

- Principale costituente N_2 , come sulla Terra

Ma priva di O_2

- Ricca di composti organici, principalmente metano CH_4

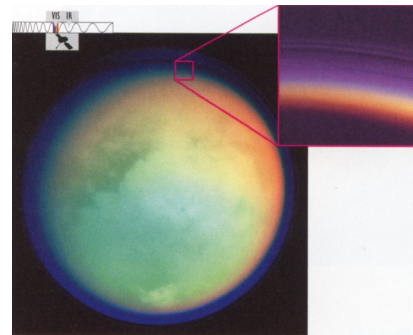
Anche altri idrocarburi, come l'etano C_2H_6

- Nella parte alta dell'atmosfera è presente uno strato di foschia (“haze”) di composti chiamati “tholins”

Molecole organiche ricche di azoto ottenute a partire dalla fotodissociazione di CH_4 , di colore marrone-rossastro

In figura: immagine a falsi colori ottenuta dalla sonda Cassini che evidenzia lo strato di foschia (“haze”)

	Titan	Earth
N_2	82-99 %	78%
CH_4	2-10 %	2 ppm
O_2	-	21%
CO_2	0.01 ppm	350 ppm
Ar	< 1-6 % ?	0.9%



27

Encelado

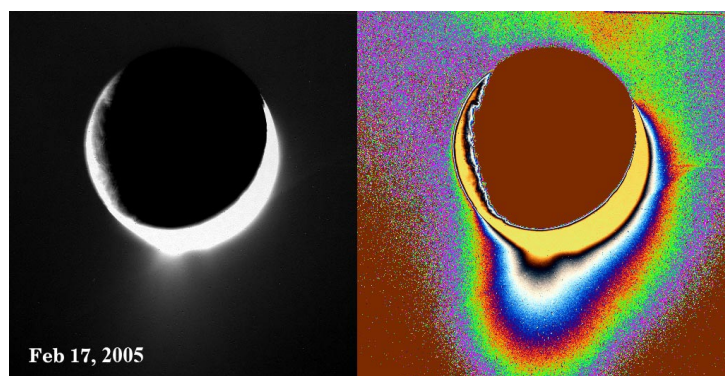
- Piccolo satellite di Saturno

- Scoperte evidenze di getti di particelle ghiacciate e vapor d'acqua espulsi dal polo Sud del satellite

Tale attività è indicativa di una sorgente di energia di carattere geofisico

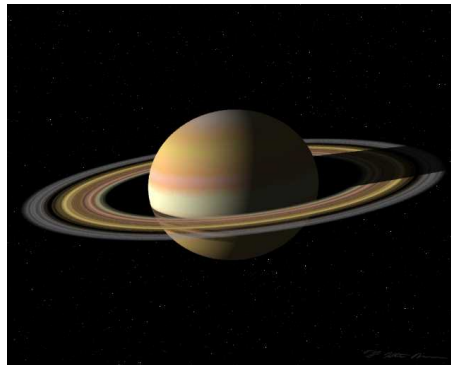
Il vapor d'acqua mostra semplici composti organici

McKay et al. (2008, AsBio, 8, 909)



Anelli dei pianeti giganti

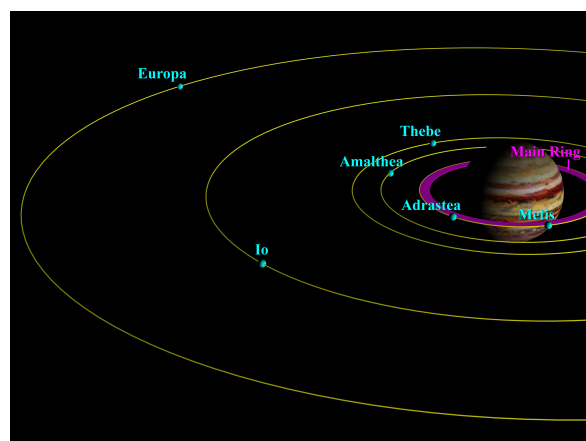
- **Tutti i pianeti giganti hanno sistemi di anelli**
 - strutture generalmente sottili, molto complesse e diverse da pianeta a pianeta
 - composti da solidi con dimensioni che variano tra un frazione di micron (polvere) fino ai metri
 - veri e propri laboratori di fisica
 - una varietà di processi dinamici necessari per spiegare le loro proprietà, tra cui l'esistenza di risonanze con i satelliti esterni



29

Anelli dei pianeti giganti

- **Caratteristiche comuni degli anelli**
 - Giacciono nel piano equatoriale del proprio pianeta
 - Particelle fuori dal piano subirebbero uno smorzamento della componente verticale del moto mediante collisioni durante l'attraversamento dell'anello
 - Si trovano vicini al pianeta, entro la distanza dei principali satelliti
 - Entro il limite di Roche



30

Limite di Roche

- Distanza dal centro di un corpo celeste al di sotto della quale un secondo corpo orbitante che si mantenga coeso solo grazie alla propria gravità, si frammenta per effetto delle forze di marea
- Si ricava imponendo l'eguaglianza tra forze gravitazionali e forze mareali all'interno del corpo

$$F_G = F_T$$

Si ottiene un'espressione del tipo

$$d \sim 2.44 R (\rho_M/\rho_m)^{1/3}$$

R : raggio del corpo maggiore

ρ_M , ρ_m : densità medie del corpo maggiore e di quello minore

La costante dipende dal tipo di assunzioni fatte nella derivazione