

Introduzione allo studio del Sistema Solare

I parte

Lezione SP 1
G. Vladilo

Astronomia Osservativa C, SP 1, Vladilo (2011)

1

Definizioni

- **Pianeta**
 - Demarcazione tra pianeta e stella
 - I pianeti hanno una massa inferiore alla massa critica per l'innescamento di reazioni di fusione termonucleare del deuterio
 - Massa limite $\sim 13 M_{\text{Giove}}$
 - Oggetti di massa superiore, che non riescono ad innescare la fusione dell'idrogeno, si chiamano "brown dwarfs"
 - Massa nell'intervallo $13 M_{\text{Giove}} < M < \sim 75-80 M_{\text{giove}}$
 - Demarcazione tra pianeta e corpi minori
 - Complessa da definire: vedere definizione IAU pagina successiva
- **Satellite**
 - Oggetto astronomico orbitante attorno ad un pianeta
 - Con $M_{\text{satellite}} < M_{\text{pianeta}}$, ma non esiste una demarcazione precisa

Astronomia Osservativa C, SP 1, Vladilo (2011)

2

Definizione IAU di pianeta del Sistema Solare

- (1) A planet¹ is a celestial body that
 - (a) is in orbit around the Sun,
 - (b) has sufficient mass for its self-gravity to overcome rigid body forces so that it assumes a hydrostatic equilibrium (nearly round) shape,² and
 - (c) has cleared the neighbourhood around its orbit.

- (2) A "dwarf planet" is a celestial body that
 - (a) is in orbit around the Sun,
 - (b) has sufficient mass for its self-gravity to overcome rigid body forces so that it assumes a hydrostatic equilibrium (nearly round) shape²,
 - (c) has not cleared the neighbourhood around its orbit, and
 - (d) is not a satellite.

- (3) All other objects³, except satellites, orbiting the Sun shall be referred to collectively as "Small Solar System Bodies".

¹ The eight planets are: Mercury, Venus, Earth, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, and Neptune.

² An IAU process will be established to assign borderline objects to the dwarf planet or to another category.

³ These currently include most of the Solar System asteroids, most Trans-Neptunian Objects (TNOs), comets, and other small bodies.

Tecniche osservative di pianeti del Sistema Solare

Il Sistema Solare può essere studiato mediante (1) tecniche osservative astronomiche tradizionali, (2) campioni raccolti a Terra, (3) sonde spaziali

Osservazioni da Terra

Metodologie classiche astronomiche

Tecniche radar

Campioni raccolti a Terra

Meteoriti

Polvere interplanetaria

Tecniche osservative di pianeti, satelliti e corpi minori del Sistema Solare

Sonde spaziali

Imaging

Storia geologica/geofisica; processi superficiali su grande scala

Spettroscopia

Composizione; mineralogia

Emissione di gas - Interazione con particelle ionizzate

Magnetometri

Campi magnetici

Osservazioni radio

Atmosfera e struttura interna dei pianeti gassosi; onde radio emesse dal plasma ionizzato

Radar

Struttura superficiale e proprietà dielettriche

Analizzatori di polvere

Studi di grani di ghiaccio e polvere

Astronomia Osservativa C, SP 1, Vladilo (2011)

5

Sistema Solare

Sole

$$M_{\text{sole}} = 2.0 \times 10^{33} \text{ g}$$

Pianeti e satelliti

$$M_{\text{pianeti}} = 2.67 \times 10^{30} \text{ g}$$

Corpi minori

$$M_{\text{corpi minori}} \sim 2 \times 10^{24} \text{ g}$$

Nonostante le masse relativamente basse coinvolte, pianeti, satelliti e corpi minori rappresentano un laboratorio di fisica e geochimica molto variegato. Basti considerare il ruolo che hanno avuto nella nostra comprensione delle leggi del moto in meccanica classica e come test della relatività generale.

Pianeti, satelliti e corpi minori del Sistema Solare sono oggi un fondamentale punto di riferimento per lo studio di pianeti extrasolari.

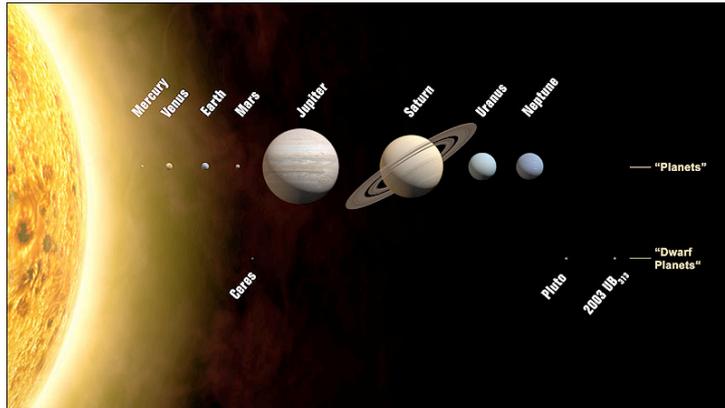
È in quest'ottica che introduciamo in queste lezioni alcune delle principali proprietà fisiche e chimiche di tali oggetti astronomici.

Astronomia Osservativa C, SP 1, Vladilo (2011)

6

Principali tipi di pianeti del Sistema Solare

- **Pianeti rocciosi (“terrestri”)**
 - Mercurio, Venere, Terra, Marte
 $\langle \rho \rangle \sim 4 - 5 \text{ g cm}^{-3}$; $d < 2 \text{ AU}$; $R \sim 0.4 - 1 R_{\text{terra}}$
- **Pianeti giganti gassosi**
 - Giove, Saturno
 $\langle \rho \rangle \sim 0.7 - 1.3 \text{ g cm}^{-3}$; $d \sim 5 - 10 \text{ AU}$; $R \sim 9 - 11 R_{\text{terra}}$
- **Pianeti giganti ghiacciati**
 - Urano, Nettuno
 $\langle \rho \rangle \sim 1.3 - 1.6 \text{ g cm}^{-3}$; $d \sim 20 - 30 \text{ AU}$; $R \sim 4 R_{\text{terra}}$



Astronomia Osservativa C, SP 1, Vladilo (2011)

7

Proprietà cinematiche del Sistema Solare

- **Moti orbitali dei pianeti**
 - coplanari, con bassa eccentricità
 - progradati rispetto alla rotazione solare
 - piano orbitale dei pianeti prossimo all'equatore del Sole
- **Forti indizi di un'origine comune**
- **Le orbite planetarie obbediscono alle leggi di Keplero**

8

Principali caratteristiche fisiche dei pianeti del Sistema Solare

Passiamo brevemente in rassegna alcune delle principali
caratteristiche fisiche dei pianeti del Sistema Solare

- **Superfici planetarie**
- **Atmosfere planetarie**
- **Interni planetari**

È importante tener presente che interni, superfici e atmosfere sono tra
loro collegati mediante numerosi tipi di interazioni

Interazioni tra superficie e atmosfera

Interazioni tra superficie e interni planetari

Il pianeta interagisce poi con il mezzo interplanetario

Interazione con il vento solare

Raggi cosmici

Principali caratteristiche fisiche dei pianeti del Sistema Solare

Condizioni fisiche superficiali

Sono di particolare importanza per l'abitabilità

Superfici dei pianeti rocciosi

- **Fattori che influenzano le condizioni superficiali**
 - Presenza di un'atmosfera
 - Reazioni chimiche con composti atmosferici alterano la composizione chimica superficiale
 - Processi fisici atmosferici (ad esempio erosione da venti) alterano le superfici
 - L'erosione tende a cancellare eventuali crateri d'impatto dovuti a collisioni con corpi minori
 - L'atmosfera rallenta e altera corpi di piccola massa che collidono con il pianeta (meteoriti e micrometeoriti)
 - “Space weather”
 - Interazione con particelle del vento solare e raggi cosmici in pianeti privi di atmosfera e di magnetosfera
 - Attività geologica
 - Fenomeni vulcanici e tettonici, se presenti, alterano la superficie planetaria
 - L'attività geologica tende a cancellare eventuali crateri d'impatto dovuti a collisioni con corpi minori

Valori misurati di temperature atmosferiche superficiali

- **Temperatura superficiale**
 - Per pianeti rocciosi
 - Definita come la temperatura media atmosferica al livello della superficie solida
 - Per pianeti giganti
 - Definita come la temperatura atmosferica al livello con pressione di 1 bar [=10⁵ Pa]
- **Rispetto all'intervallo di temperature per cui l'acqua è in fase liquida alla pressione di 1 bar**
 - Pianeti troppo caldi in superficie
 - Mercurio, Venere
 - Pianeti troppo freddi in superficie
 - Marte, Giove, Saturno, Urano, Nettuno
 - Unico pianeta con condizioni giuste
 - Terra

Allen (2000)

Pianeta roccioso	Temperatura superficiale [K]
Mercurio	440
Venere	735
Terra	288-293
Marte	183-268
Pianeta gigante	Temperatura al livello con pressione di 1 bar [K]
Giove	165
Saturno	134
Urano	76
Nettuno	73

Calcolo della temperatura superficiale

La costante solare

- Il campo di radiazione solare è una delle principali sorgenti di energia per i pianeti
- Potenza della radiazione incidente sul pianeta
 - Per un pianeta con
 - Distanza media dal sole: D
 - Raggio medio del pianeta: R_p
 - La potenza incidente sul pianeta sarà

$$P = L_{\text{sole}} (R_p^2/4D^2)$$

Dove

L_{sole} : luminosità bolometrica del Sole

$L_{\text{sole}} = 3.845 \times 10^{26} \text{ W}$
 - Nel caso della Terra viene chiamata “costante solare” la quantità

$$S = L_{\text{sole}}/(4\pi D^2)$$

$S = 1366 \text{ W/m}^2$

dove $D = 1 \text{ AU} = 1.495 \times 10^{11} \text{ m}$

Calcolo della temperatura superficiale

Albedo planetaria

Allen (2000)

- **Albedo**
 - Frazione di fotoni riflessi da una superficie planetaria rispetto al totale di fotoni incidenti in una data banda spettrale
 - A parità di materiale l'albedo, A , dipende dalla lunghezza d'onda
 - Albedo alta se la superficie è coperta di nubi o ghiacci
 - Ghiacci/neve $A \sim 0.8/0.9$
 - Minore per superfici rocciose
 - Deserto sabbioso $A \sim 0.25$
 - È uno dei fattori che determinano la temperatura superficiale planetaria
 - Tenendo conto dell'albedo la potenza assorbita dal pianeta sarà

$$P_{\text{assorbita}} = \pi R^2 S (1-A)$$

Pianeta	Albedo nel visibile
Mercurio	0.11
Venere	0.65
Terra	0.38
Marte	0.15
Giove	0.52
Luna	0.12

Calcolo della temperatura superficiale

- Assumendo equilibrio tra la potenza assorbita e quella irradiata si ricava una stima della temperatura effettiva

- Potenza ricevuta dal Sole e assorbita in superficie

$$P_{\text{assorbita}} = \pi R^2 S (1-A)$$

- Potenza irradiata (emissione di corpo nero)

$$P_{\text{irradiata}} = 4\pi R_p^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

R_p : raggio del pianeta

σ : costante di Stephan-Boltzmann

Questa espressione definisce la temperatura effettiva

Temperatura di un corpo nero che emette la stessa potenza emessa complessivamente dal pianeta

- Uguagliando $P_{\text{assorbita}} = P_{\text{irradiata}}$ si ottiene

$$T_{\text{eff}} = [S (1-A) / (4 \sigma)]^{(1/4)}$$

Confronto tra temperature effettive calcolate e temperature superficiali misurate

Allen (2000)

- In tabella confrontiamo le temperature superficiali con le temperature effettive dei pianeti del Sistema Solare
- Esistono differenze sistematiche, talvolta notevoli
 - In genere $T_{\text{superf}} > T_{\text{eff}}$
Venere è il caso più eclatante
 - Per comprendere tali differenze bisogna tenere in conto i fattori che influenzano il clima dei pianeti
- L'effetto serra è uno dei fattori più importanti per il calcolo della vera temperatura superficiale
 - Anche sorgenti di calore interno potrebbero alterare la temperatura superficiale

Pianeta roccioso	Temperatura superficiale [K]	Temperatura effettiva [K]
Mercurio	440	–
Venere	730	230
Terra	288-293	255
Marte	183-268	212

Atmosfere planetarie

- **Condizione per l'esistenza di un'atmosfera**

$$\langle v_{\text{termica}} \rangle \ll v_{\text{fuga}}$$

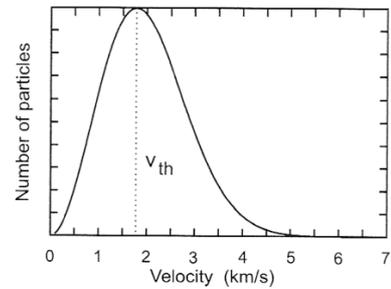
La velocità media di agitazione termica di un dato atomo o molecola presente nell'atmosfera dev'essere molto inferiore alla velocità di fuga dal pianeta

$$\langle v_{\text{termica}} \rangle \propto (T/\mu)^{1/2}$$

Dove μ è la massa atomica o molecolare; in [figura](#) distribuzione maxwelliana per molecole H_2 a $T=390K$

$$v_{\text{fuga}} \propto (M/r)^{1/2}$$

Dove M e r sono la massa e il raggio del pianeta; in [tabella](#) esempi di velocità di fuga per pianeti e Luna



Pianeta	Velocità di fuga all'equatore (km s ⁻¹)	
Mercurio	4.3	
Venere	10.4	
Terra	11.2	
Marte	5.0	
Giove	59.5	
Saturno	35.5	
Urano	21.3	
Nettuno	23.7	
Luna	2.4	

- **“Jean escape”**

- Meccanismo di perdita di molecole atmosferiche che si trovano nella coda di alta velocità della distribuzione maxwelliana

Allen (2000)

Atmosfere planetarie

Pressione atmosferica superficiale

- **Pianeti rocciosi**

- Venere e Terra hanno le maggiori velocità di fuga e hanno atmosfere
- Marte ha un'atmosfera estremamente rarefatta

- **Pianeti giganti**

- Hanno le velocità di fuga maggiori e atmosfere estese
Le osservazioni riescono a penetrarne solo gli strati più esterni

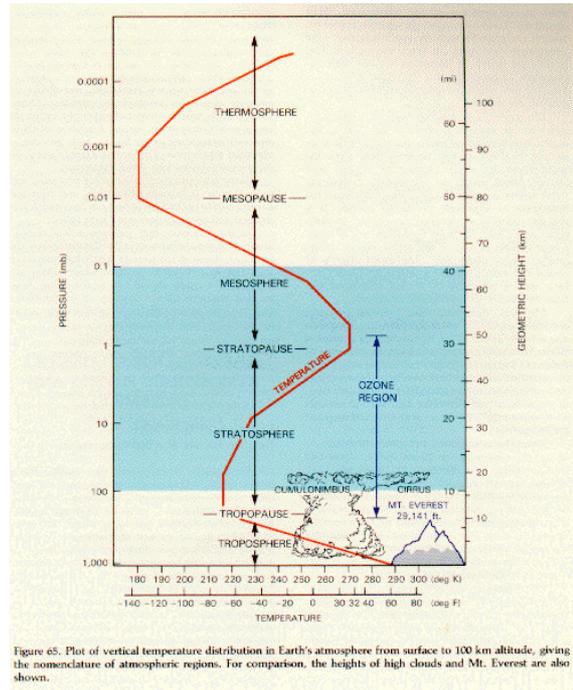
Allen (2000)

Pianeta roccioso	Pressione atmosferica superficiale [bar]	Altezza di scala H [km]
Mercurio
Venere	90	15
Terra	1	8
Marte	0.007-0.010	11
Pianeta gigante	Pressione atmosferica al livello della superficie visibile delle nubi [bar]	Altezza di scala H [km]
Giove	~ 0.3	19-25
Saturno	~ 0.4	35-50
Urano	...	22-29
Nettuno	...	18-22

Stratificazione delle atmosfere

Gradienti di temperatura

- Esempi di stratificazione delle atmosfere di pianeti rocciosi
- Terra
 - Gradiente di temperatura negativo negli strati più bassi
 - La radiazione solare penetra fino alla superficie e la riscalda; gli strati più bassi sono opachi alla radiazione termica riemessa dalla superficie; il flusso di radiazione termica va' verso l'alto e si crea quindi il gradiente osservato
 - Profilo di temperatura complesso negli strati più alti
 - I valori di pressione e temperatura atmosferici si devono raccordare a quelli del mezzo interplanetario



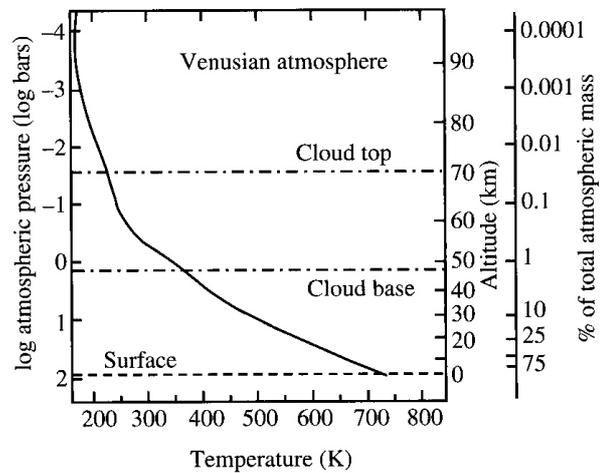
Astronomia Osservativa C, SP 1, Vladilo (2011)

19

Stratificazione delle atmosfere

Gradienti di temperatura

- Venere
 - Gradiente di temperatura negativo negli strati più bassi



Astronomia Osservativa C, SP 1, Vladilo (2011)

20

Composizione chimica atmosferica dei pianeti rocciosi

- **Terra**

- Componenti principali

- N₂ (78.1%)

- O₂ (20.9%)

- Tracce principali

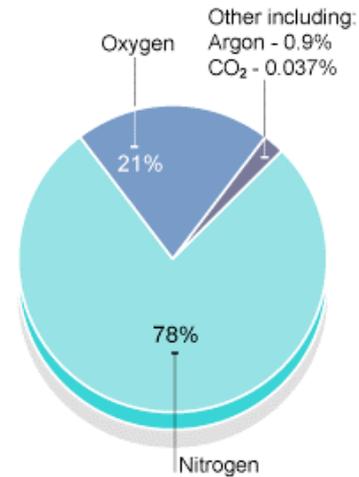
- Ar (0.93%)

- CO₂ (0.03%)

- Altre tracce di particolare interesse

- H₂O (~10⁻⁶)

- L'alta abbondanza di ossigeno è unica tra tutti i pianeti rocciosi



Astronomia Osservativa C, SP 1, Vladilo (2011)

21

Composizione chimica atmosferica dei pianeti rocciosi

- **Venere**

- Componenti principali

- CO₂ (96.5%)

- N₂ (3.5%)

- Tracce principali

- SO₂ (0.015%)

- Notare la bassissima abbondanza di ossigeno

Venere

Gas	Formula	Abundance
Main Constituents		
Carbon dioxide	CO ₂	96.5%
Nitrogen	N ₂	3.5
Trace Constituents		
Sulfur dioxide	SO ₂	130 ^a ppm ^b
Argon (40)	Ar-40	33
Argon (36)	Ar-36	30
Oxygen	O ₂	30
Water vapor	H ₂ O	30 ^a
Carbon monoxide	CO	20
Carbonyl sulfide	OCS	10 ^a
Neon	Ne	9
Hydrochloric acid	HCl	0.6
Hydrofluoric acid	HF	0.005

^aAbundances of these gases vary with altitude and latitude. They are not yet well defined.

^bparts per million

Astronomia Osservativa C, SP 1, Vladilo (2011)

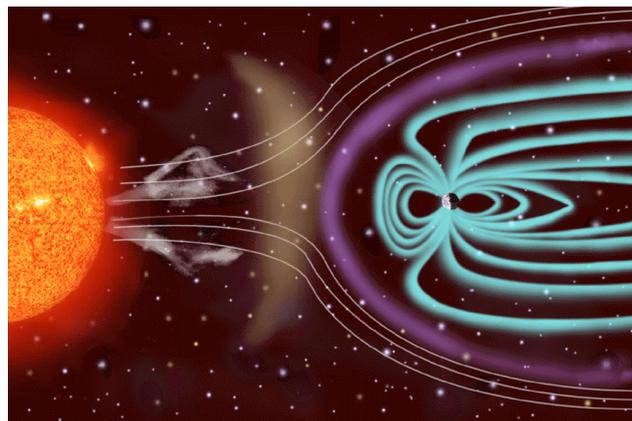
22

Vento solare

- Oltre al campo di radiazione solare, anche il vento solare gioca un ruolo importante sulla fisica degli strati esterni planetari
 - Vento solare
 - Particelle cariche di alta energia (~10-100 eV) emesse dagli strati solari più esterni
 - Le particelle del vento solare vengono deflesse dal campo magnetico eventualmente presente nei pianeti

“Space weather”

- Gli effetti del vento solare sui pianeti sono esempi di “space weather”
 - Atmosfere planetarie
 - Il vento solare tende a strappare le atmosfere di pianeti
 - I campi magnetici planetari, se presenti, proteggono l’atmosfera da tale effetto
 - Superfici planetarie
 - Il vento solare ha effetti a lungo termine sulle superfici di pianeti
 - La magnetosfera e le atmosfere planetarie, se presenti, proteggono la superficie planetaria da tali effetti



Campi magnetici planetari

- Pianeti che attualmente hanno campi magnetici
 - Pianeti terrestri
 - Terra, Mercurio
 - Pianeti giganti
 - Giove, Saturno, Urano, Nettuno
 - Satelliti
 - Ganymede
- Pianeti che attualmente non hanno campi magnetici, ma presumibilmente ne hanno avuti nel passato
 - Pianeti terrestri
 - Marte, Venere (?)
 - Satelliti
 - Luna (?)

Campi magnetici dei pianeti terrestri

Russel & Dougherty 2010

- I campi magnetici dei pianeti rocciosi sono deboli o assenti
 - Il più intenso è quello della Terra
 - Riportiamo i valori di momento di dipolo magnetico per i pianeti rocciosi
 - L'intensità di un polo magnetico si misura in Weber; 1 Weber=1 Tesla m²
 - Il momento di dipolo magnetico si misura in Weber m, quindi Tesla m³
- Mercurio
 - 2-6 x 10¹² T m³
- Venere
 - < 10¹¹ T m³
- Terra
 - ~ 8x10¹⁵ T m³
 - Tilt ~ 10° con asse rotazione
 - L'orientazione varia nel tempo
 - Evidenze di inversioni di polarità
- Marte
 - < 10¹² T m³

