

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



Dipartimento di Fisica e Astronomia

Corso di Laurea in Astronomia

Tesi di Laurea Triennale

Il rapporto D/H nel Sistema Solare

Relatore:

Prof.ssa Monica Lazzarin

Laureanda:

Maria Mastropietro

matricola 1103211

Anno Accademico 2016/2017

Indice

- Abstract..... pag. 1
- Introduzione..... pag. 1
- Capitolo 1: Evoluzione del D/H nel Sistema Solare
 - 1.1 D/H dal Big Bang al mezzo interstellare (ISM)..... pag. 3
 - 1.2 Arricchimento di deuterio nella nebulosa protosolare..... pag. 4
 - 1.3 Determinazione del D/H protosolare..... pag. 5
- Capitolo 2: D/H sulla Terra
 - 2.1 Origine dell'acqua sulla Terra..... pag. 6
 - 2.2 Il mantello della Terra..... pag. 7
 - 2.3 Asteroidi o comete per l'acqua sulla Terra?..... pag. 8
- Capitolo 3: Comete..... pag. 10
 - 3.1 Cometa 1P/Halley..... pag. 10
 - 3.2 Cometa 103P/Hartley 2..... pag. 11
 - 3.3 Cometa Hale-Bopp..... pag. 11
 - 3.4 Cometa 67/P Churyumov-Gerasimenko..... pag. 12
 - 3.5 Altre comete..... pag. 12
 - 3.6 Origine delle comete in base al rapporto D/H..... pag. 12
- Capitolo 4: IDPs e meteoriti..... pag. 14
 - 4.1 Particelle di polvere interplanetaria (IDPs)..... pag. 14
 - 4.2 Micrometeoriti Ultracarbonacei Antartici (UCAMMs)..... pag. 14
 - 4.3 Meteoriti LL3..... pag. 14
 - 4.4 Condriti Carbonacee (CC)..... pag. 15
 - 4.4.1 Studio su due condriti carbonacee e una condrite ordinaria..... pag. 16
 - 4.5 Eucriti..... pag. 17
 - 4.6 Meteoriti: contaminazione terrestre e fattori che influenzano il rapporto D/H..... pag. 18

-	Capitolo 5: Altri corpi del Sistema Solare	
-	5.1 Luna.....	pag. 19
-	5.2 Marte.....	pag. 21
-	5.3 Venere.....	pag. 22
-	5.4 Giove.....	pag. 23
-	5.5 Saturno.....	pag. 23
-	5.6 Satelliti di Saturno	
-	5.6.1 Encelado.....	pag. 24
-	5.6.2 Titano.....	pag. 25
-	5.7 Urano e Nettuno.....	pag. 25
-	Capitolo 6: Discussione.....	pag. 27
-	Capitolo 7: Conclusione.....	pag. 29
-	Bibliografia.....	pag. 30
-	Sitografia.....	pag. 32

Abstract

L'origine dell'acqua presente negli oceani terrestri non è ancora ben definita e si ritiene che buona parte di essa possa provenire da comete e/o asteroidi che avrebbero colpito il nostro pianeta in modo molto intenso in particolare durante il Late Heavy Bombardment (LHB), periodo che si estende tra 4.1 e 3.8 miliardi di anni fa. Molti studi sono in atto per comprendere l'origine dell'acqua terrestre e uno dei parametri fondamentali per questo studio è il rapporto D/H, che sembrerebbe essere costante nei nostri oceani. Le ultime ricerche sembrerebbero suggerire che le comete non siano i principali responsabili dell'acqua terrestre, mentre più probabile sembrerebbe una provenienza di tipo asteroidale.

In questo lavoro si effettuerà un riepilogo delle conoscenze relative a questo rapporto Deuterio-Idrogeno, dalla sua formazione nelle prime fasi di evoluzione dell'Universo alla sua distribuzione nel Sistema Solare, si effettuerà il confronto con i dati terrestri e con le conoscenze attuali relative ai vari oggetti nel Sistema Solare.

Introduzione

L'acqua è composta da idrogeno e ossigeno. A volte però l'isotopo pesante di H, il deuterio (il cui nucleo è costituito da un protone e un neutrone, mentre l'idrogeno ha solo un protone e quindi è più leggero del deuterio), sostituisce solo un atomo di H nella molecola, ottenendo HDO (acqua semi-pesante), o li sostituisce entrambi, ricavando D_2O (acqua pesante). Mediante tale trasformazione vengono alterate le proprietà chimiche e fisiche della molecola. Il rapporto tra acqua pesante e acqua normale indica le quantità di D e H presenti nell'acqua (D/H) [S1].

Per comprendere da dove potrebbe provenire l'acqua sulla Terra è di particolare importanza studiare il suo rapporto D/H. Secondo alcuni modelli tale rapporto varierebbe in base alla distanza dal Sole [S2], per questo studiare i rapporti D/H serve anche a comprendere la posizione di formazione dei vari corpi [A1].

Per determinare in quale proporzione gli oggetti nel Sistema Solare possono aver contribuito alla formazione degli oceani terrestri, è utile quindi studiare i loro rapporti isotopici D/H e confrontarli con il valore terrestre.

Gli isotopi di uno stesso elemento, poiché hanno massa diversa, hanno proprietà fisiche e chimiche leggermente diverse. Per tale motivo, in seguito a trasformazioni chimiche e fisiche avviene il cosiddetto frazionamento isotopico, ovvero i due isotopi si distribuiscono con abbondanza

differenti nei reagenti e nei prodotti.

L'abbondanza isotopica è il rapporto tra il numero di atomi di un isotopo di un elemento e il numero di atomi dell'elemento stesso, dà quindi le deviazioni delle rispettive abbondanze in un campione.

Poiché i valori di questo rapporto sono in genere molto bassi, spesso si usa la grandezza:

$$\delta X = \left(\frac{R_{\text{campione}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000 \quad , \text{dove } R \text{ indica il rapporto tra la massa dell'isotopo pesante e la massa}$$

dell'isotopo leggero, R_{standard} è il rapporto di riferimento e R_{campione} è il rapporto misurato nel campione che si sta studiando. Nel caso del D/H, la variazione δD è data da

$$\left(\frac{D/H_{\text{campione}}}{D/H_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000 \quad , \text{dove } D/H_{\text{standard}} \text{ è il valore terrestre e } D/H_{\text{campione}} \text{ è il valore ad}$$

esempio di uno degli oggetti del Sistema Solare preso in considerazione.

Se $\delta X > 0$ c'è un arricchimento dell'isotopo pesante nel campione rispetto a quello standard, se $\delta X < 0$ c'è invece un impoverimento [S5].

Per misurare i rapporti isotopici si utilizza lo spettrometro di massa, uno strumento usato per determinare la composizione chimica di un materiale mediante la misura diretta della massa degli ioni che lo costituiscono.

Il rapporto D/H si può ricavare dalle osservazioni delle righe di HDO (effettuate nel sub-millimetrico a $\nu=509.3$ GHz e nelle microonde a $\nu=242$ GHz, ma le bande sono presenti anche nel radio, che viene di solito usato per le osservazioni delle comete), il D/H in tal caso sarà uguale a

$\frac{1}{2} HDO/H_2O$, questo perché nel passaggio da H_2O a HDO, il deuterio andrebbe sostituito con 2 atomi di H, ma per mantenere la forma dell'acqua, il D è sostituito solo con un H, da qui il fattore $\frac{1}{2}$.

Il D/H si può anche ricavare dalle abbondanze del metano. Il CH_4 ha 4 atomi identici di H che andrebbero sostituiti con il D, poiché invece il D sostituisce solo un H, per lo stesso ragionamento fatto sopra, si ha in questo caso un fattore $\frac{1}{4}$ e quindi $D/H = 0.25 \times (CH_3D/CH_4)$.

Il rapporto D/H nel metano si ottiene dalle osservazioni delle bande vibrazionali nel vicino IR. Per quanto riguarda ad esempio le osservazioni per le comete, si ha che la banda vibrazionale più forte di CH_3D nell'atmosfera di una cometa è la banda attorno a $\nu=3000 \text{ cm}^{-1}$, che è vicina alla banda vibrazionale del metano. Sono così vicine che si possono misurare le linee di emissione sia di CH_3D che di CH_4 simultaneamente [A2].

Il rapporto D/H si può rilevare anche dalla molecola HD. Le linee di HD sono molto deboli e vanno confrontate con H_2 , che sono invece più intense, affinché si possa ottenere il rapporto D/H da HD/H_2 [L2].

Nelle atmosfere cometarie l'acqua viene fotodissociata in OH e H, quindi per il D/H è utile anche il rapporto OD/OH [A3]. Sempre per le comete, spesso, nel determinare le abbondanze isotopiche dell'acqua, invece di usare H_2O nel rapporto HDO/H_2O , si utilizza $H_2^{18}O$ (banda sub-millimetrica $\nu=547.7$ GHz), questo perché le linee di emissione di $H_2^{18}O$ negli spettri sono più facili da determinare [A2].

Capitolo 1: Evoluzione del D/H nel Sistema Solare

1.1 D/H dal Big Bang al mezzo interstellare (ISM)

Secondo le teorie di Epstein, Lattimer e Schramm (1976), il deuterio è prodotto dal Big Bang [A4] e successivamente distrutto nelle stelle, quindi la sua abbondanza decresce nel tempo. La formazione di D negli shocks di supernovae non sembra essere rilevante, perciò il rapporto D/H dell'ISM dovrebbe decrescere con il tempo, per l'aumento di idrogeno senza deuterio iniettato nello spazio dalle supernovae o dal vento stellare (Galli et al., 1995). I valori del rapporto D/H nell'ISM sono stati ottenuti da misure effettuate con il telescopio Hubble e si trova un valore di

$(0.165 \pm 0.018) \times 10^{-4}$ e $(0.14 \pm 0.01) \times 10^{-4}$ (Linsky et al., 1993) entro 1 kpc dal Sole e un valore medio di 0.15×10^{-4} (McCullough, 1992) [A5], mentre il valore iniziale dopo il Big Bang sembra essere 0.3×10^{-4} [A1].

Misure del rapporto D/H per il mezzo interstellare sono però difficili da ottenere per gli effetti del frazionamento chimico. Alcuni valori sono stati ottenuti da osservazioni delle righe Lyman dell'idrogeno e del deuterio in stelle early-type. Da osservazioni di 5 stelle, Rogerson e York (1973) e York e Rogerson (1976) hanno ottenuto un valore di D/H pari a $(0.18 \pm 0.04) \times 10^{-4}$, da osservazioni di 10 stelle, Laurent, Vidal-Madjar e York (1979) e Bruston et al. (1981) hanno ottenuto un valore medio di $(0.15 \pm 0.10) \times 10^{-4}$. Bruston et al. (1981) hanno rianalizzato i dati relativi all'ISM, correggendoli per effetti di pressione di radiazione e fotodissociazione UV, e hanno ottenuto un rapporto D/H di $(0.225 \pm 0.025) \times 10^{-4}$. La differenza tra questi valori potrebbe essere dovuta a eterogeneità dell'ISM e ad incertezze nelle misure. Il valore D/H dell'ISM sembrerebbe più basso di quello della nebulosa protosolare e ciò sembrerebbe in accordo con il fatto che il deuterio

viene esaurito dall'attività stellare [A4].

D/H dopo il Big Bang $\times 10^{-4}$	0.3
D/H per l'ISM $\times 10^{-4}$	(0.165 ± 0.018) e (0.14 ± 0.01) (Linsky et al., 1993)
D/H per l'ISM $\times 10^{-4}$	0.15 (McCullough, 1992)
D/H per l'ISM $\times 10^{-4}$	(0.18 ± 0.04) (Rogerson e York, 1973; York e Rogerson, 1976)
D/H per l'ISM $\times 10^{-4}$	(0.15 ± 0.10) (Laurent, Vidal-Madjar e York, 1979; Bruston et al., 1981)
D/H per l'ISM $\times 10^{-4}$	(0.225 ± 0.025) (Bruston et al., 1981)

Tabella 1: Rapporti D/H dopo il Big Bang e per il mezzo interstellare

1.2 Arricchimento di deuterio nella nebulosa protosolare

L'origine di composti organici e acqua nel Sistema Solare è un argomento di particolare importanza in astronomia, perché si è visto che le molecole contenenti H nelle comete, nei pianeti e nelle meteoriti condriti hanno un arricchimento in deuterio maggiore rispetto a quello delle molecole di H della nebulosa solare. Poiché non c'è una sorgente nucleare per il deuterio nell'Universo, un tale aumento isotopico deve essere dovuto a reazioni per cui il D reagisce più velocemente di H. La maggior riserva di D nell'Universo è H e H_2 : reazioni chimiche devono perciò frazionare i due isotopi [A5].

La teoria più accreditata sull'origine del Sistema Solare propone che esso si sia formato dalla condensazione di gas e polvere all'interno di una nube molecolare 4.6 miliardi di anni fa [A6]. I pianeti poi si sono formati mediante processi complessi e seguiti da migrazioni fino alle loro posizioni attuali [A1].

Molte reazioni dalla fase prestellare a quella del disco protoplanetario hanno portato ad un frazionamento del D delle specie contenenti H e in particolare dell'acqua.

Modelli cercano di spiegare la distribuzione chimica nella nebulosa protosolare. Considerando un modello in cui era presente turbolenza e viscosità, responsabili non solo dell'accrescimento di massa, ma anche della dispersione del momento angolare mediante la diffusione di materia all'esterno, ci sono stati scambi di atomi di D tra l'acqua e l'idrogeno molecolare tramite la reazione (Geiss e Reeves, 1981) [A6]:



L'arricchimento di D è dato dal fattore $f = \frac{\frac{1}{2} \text{HDO}/\text{H}_2\text{O}}{\frac{1}{2} \text{HD}/\text{H}_2} = \frac{\text{D}/\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{D}/\text{H}_{\text{H}_2}}$ che indica che lo scambio

isotopico è avvenuto tra le specie abbondanti H_2O e H_2 [A5].

Il rapporto D/H nell'acqua sembrerebbe essere basso nelle parti interne del Sistema Solare, per lo scambio intenso con l'idrogeno molecolare solare, e alto nelle parti esterne [A7].

Secondo la [Formula 1], ad elevate temperature ($T > 500$ K) la reazione è molto efficiente, l'acqua è facilmente frazionata e di conseguenza la reazione va sia a destra, in modo che H_2O diventi

H_2 , che a sinistra, HDO diventa HD, e pertanto si ha $f=1$. A temperature intermedie ($200 \text{ K} < T < 500 \text{ K}$) la reazione è lenta, l'acqua si fraziona più lentamente e pertanto si favorisce la trasformazione di HD in HDO in modo da avere un aumento di HDO rispetto a H_2O e si ha $f \leq 3$. A temperature ancora più basse ($T < 200$ K) la reazione è troppo lenta affinché ci siano scambi isotopici.

L'arricchimento di D trovato nelle comete OCC (della nube di Oort) sarebbe compatibile con tale modello, se esse si fossero formate nella regione di Urano-Nettuno come predetto dal modello di Nizza (Levison et al., 2008; Brasser e Morbidelli, 2013). Tale modello però non riesce a spiegare il valore D/H trovato per la 103/PHartley, cometa della famiglia di Giove (JFC), più basso rispetto a quello misurato nelle comete OCC. Alcuni modelli hanno tentato di dare una spiegazione suggerendo una distribuzione eterogenea del rapporto D/H nel Sistema Solare, probabilmente dovuta ad una diffusione turbolenta dei grani della nebulosa, tra parti interne ed esterne, che ha pertanto creato un gradiente isotopico eterogeneo. Ciò potrebbe spiegare anche la distribuzione varia e asimmetrica dei rapporti D/H per le condriti carbonacee [A6].

1.3 Determinazione del D/H protosolare

Poiché Giove e il Sole hanno avuto un'origine comune nella nebulosa protosolare, poiché si crede che Giove, essendo abbastanza massivo, abbia mantenuto lo stesso mix di elementi leggeri del mix solare e dato che l'elio è chimicamente inattivo, si potrebbe dire che il rapporto He/H di Giove corrisponda al valore protosolare.

Lo stesso vale per il deuterio. Esso è distrutto nelle stelle nella conversione in ^3He , in tal modo non è praticamente presente nel Sole ($\text{D}/\text{H}_{\text{sun}} \sim 10^{-18}$). Non è prodotto in modo significativo in processi cosmici, quindi il D osservato su Giove potrebbe essere una buona stima del valore primordiale [L3].

Il rapporto D/H nella nebulosa solare di $(0.25 \pm 0.05) \times 10^{-4}$ si può derivare dai rapporti D/H di Giove e Saturno e dai rapporti solari attuali ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ e ${}^4\text{He}/\text{H}$.

Secondo gli studi di Gautier e Owen (1983), i rapporti D/H per i due giganti devono riflettere il valore della nebulosa solare. In questi pianeti, il D è sotto forma di HD, che non ha subito frazionamento e quindi riflette il valore protosolare. L'abbondanza di HD è stata ricavata dalle misure del telescopio spaziale Infrared Space Observatory (ISO) e tali osservazioni sono in accordo con i rapporti HD/H_2 misurati in-situ dallo spettrometro di massa della sonda Galileo,

$$D/H = (0.26 \pm 0.07) \times 10^{-4}.$$

Il D nella nebulosa protosolare è stato convertito in ${}^3\text{He}$ dalla reazione $\text{D} + \text{H} \leftrightarrow {}^3\text{He}$, perciò il rapporto D/H protosolare si può ricavare dall'attuale rapporto ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ misurato nel vento solare, ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}_{\text{solar}} = (3.8 \pm 0.5) \times 10^{-4}$, a condizione di conoscere il rapporto iniziale della nebulosa solare ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}_{\text{sn}}$: $D/H_{\text{earlySun}} = ({}^3\text{He}/{}^4\text{He}_{\text{solar}} - {}^3\text{He}/{}^4\text{He}_{\text{sn}}) \times ({}^4\text{He}/\text{H})_{\text{sn}}$.

Il valore di ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}_{\text{sn}}$ è stato preso da Giove pari a 1.5×10^{-4} (Mahaffy et al., 1998), che corrisponde a $D/H_{\text{earlySun}} = (0.21 \pm 0.05) \times 10^{-4}$ (Geiss e Gloeckler, 1998) con $({}^4\text{He}/\text{H})_{\text{sn}} = 10^{-1}$.

Combinando le due determinazioni si è ottenuto $D/H = 0.25 \times 10^{-4}$.

La differenza tra il rapporto D/H solare 0.25×10^{-4} e quello dell'ISM di 0.16×10^{-4} è causata dalla distruzione del deuterio interstellare nelle stelle da quando il Sistema Solare si è formato 4.5 miliardi di anni fa [A8].

Capitolo 2: D/H sulla Terra

2.1 Origine dell'acqua sulla Terra

Una delle ipotesi sulla formazione della Terra è che, quando si è formata 4.6 miliardi di anni fa, era calda, quindi è improbabile che l'acqua attuale derivi dal tempo di creazione del pianeta. Altre teorie però suggeriscono che la Terra avesse acqua già dall'inizio, intrappolata nei silicati durante la sua formazione. Pertanto un'origine dalla nebulosa protosolare potrebbe sembrare plausibile come ipotesi, ma ciò non basta a spiegare il valore D/H attuale, poiché il valore protosolare è 7 volte più piccolo di quello terrestre. [S1] Per questo si pensa che impatti, durante il LHB, di comete, asteroidi e oggetti di origine trans-nettuniana avrebbero potuto arricchire la Terra di acqua [S6]. Secondo i modelli correnti (modello di Nizza) oggetti piccoli, interagendo gravitazionalmente con Giove e Saturno in migrazione, sarebbero stati scagliati nelle regioni interne ed esterne del Sistema Solare,

provocando il bombardamento [A9].

Simulazioni dinamiche danno che il contributo di acqua sulla Terra dalle comete è molto basso, non può essere maggiore del 10% (Deloule et al. 1997) o del 30% (Owen 1997), poiché i rapporti D/H cometari sono 2-3 volte maggiori del valore terrestre [A14].

Un'altra possibile fonte di acqua sono gli asteroidi. I loro rapporti D/H variano tra 1.2 e 3.2

$\times 10^{-4}$ (Lecuyer et al., 1998), che corrisponderebbe ad un apporto pari a circa il 64% dell'acqua attuale.

Poiché asteroidi, planetesimi ed embrioni planetesimali sono stati scatterati in varie orbite dopo aver interagito tra di loro e con i giganti, si può pensare che l'acqua sulla Terra potrebbe essere in buona parte arrivata durante l'intero processo di formazione del pianeta, mediante gli impatti [A12].

2.2 Il mantello della Terra

La Terra al momento della sua formazione era calda, piena di attività vulcanica e bombardata da asteroidi e meteoriti. Formata la sua atmosfera, mediante processi geologici, molecole di acqua degli strati più profondi sono state portate in superficie, gli elementi pesanti, Fe e Ni, sono rimasti al centro e i volatili all'esterno. Grazie ai vulcani, l'atmosfera si è arricchita di vapore acqueo, poi, in seguito a condensamento del vapore, l'acqua si è accumulata sulla superficie. L'acqua proveniente dai vulcani però è sterile per l'elevata temperatura e questo è incompatibile con l'elevata quantità di sostanze organiche presenti in essa. Per tale motivo, gli studiosi hanno proposto che l'acqua sulla Terra derivi da zone esterne del Sistema Solare, comete e asteroidi, che durante la migrazione dei giganti, sono arrivati sui pianeti interni.

Alcune informazioni importanti per l'origine dell'acqua terrestre possono arrivare da studi geologici degli strati profondi del pianeta [S9].

Fabrizio Nestola, del Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova, nel 2012 ha iniziato a dedicarsi al progetto Indimedeia (*Inclusions in Diamonds: Messengers from the Deep earth*), per determinare i meccanismi di formazione dei diamanti, analizzando le sostanze, minerali e fluidi, intrappolate al loro interno, che vengono dette inclusioni. Queste sono campioni inalterati del mantello profondo terrestre, poiché protetti nella struttura del diamante. Nestola e i suoi collaboratori hanno studiato diamanti super profondi e super giganti molto rari, che non sono mai stati esaminati finora. In base a questa ricerca si è visto che i diamanti si dividono in due grandi categorie: i diamanti litosferici che si formano tra i 120 e i 250 km di profondità e quelli super profondi che invece hanno origine tra i 300 e i 1000 km di profondità. Questi sono più rari,

rappresentano solo il 6% della popolazione di diamanti (cit. Nespola) [S10].

Nel 2014 ricercatori dell'Università di Alberta in Canada, tra cui Fabrizio Nestola, hanno analizzato un frammento molto piccolo di ringwoodite incluso in un diamante super profondo ritrovato in Brasile. La ringwoodite è un polimorfo dell'olivina, che si trova a 520, 660 km di profondità nella Terra. Essa non era mai stata osservata nella forma naturale sulla Terra, ma solo come minerale da impatto nelle meteoriti oppure sintetizzata in laboratorio. Gli studi sulla ringwoodite sintetica avevano mostrato che questo minerale si comporta come una spugna per l'acqua. Tuttavia nella ringwoodite rinvenuta nelle meteoriti, non era mai stata rilevata alcuna presenza di acqua (cit. Nespola).

La ringwoodite nel diamante brasiliano mostrava un significativo contenuto di acqua e ciò indica che negli strati profondi della Terra c'è una gran riserva di acqua [S9], tre, quattro volte superiore a quanto si era ritenuto fino a quel momento [S10]. Se la ringwoodite rinvenuta nel diamante brasiliano fosse rappresentativa dell'intera zona di transizione si avrebbe un contenuto di acqua in questo settore della Terra non inferiore ad almeno 3-4 volte l'oceano Pacifico (cit. Nespola) [S9]. Nel 2016, Nestola e i suoi colleghi, hanno esaminato 53 diamanti di dimensioni variabili di 30-35 carati e hanno trovato al loro interno leghe di ferro-nickel, solfuri e carburi di ferro, che si credevano essere presenti solo nel nucleo terrestre, e quindi il ferro metallico liquido potrebbe formarsi lontano dal nucleo a profondità non superiori ai 1000 km. Le leghe inoltre erano circondate da un fluido costituito da metano e idrogeno. La presenza di H conferma la scoperta del 2014 che l'acqua è presente a grandissime profondità.

Interessante sarebbe capire l'origine dell'idrogeno nei diamanti, poiché sono diamanti molto antichi e possono risalire anche a 3.6 miliardi di anni fa, quindi l'idrogeno potrebbe essere di origine primordiale. Le ipotesi però sono anche altre, l'idrogeno potrebbe derivare dall'acqua in superficie, poi arrivato in profondità potrebbe rimanere intrappolato nel processo di formazione dei diamanti, in tal caso la Terra 3.6 miliardi di anni fa aveva acqua sulla superficie. Un'altra ipotesi è che l'idrogeno fosse già presente nei materiali che hanno costituito il pianeta [S10].

2.3 Asteroidi o comete per l'acqua sulla Terra?

Dalla Figura 1 si nota come i valori del rapporto D/H terrestre e quello delle meteoriti condriti (della fascia degli asteroidi) siano molto compatibili, al contrario invece di quelli cometari, dal momento che solo la Hartley e la 45P mostrano un valore simile a quello terrestre. Il valore infatti del rapporto D/H misurato nelle altre comete è mediamente 2-3 volte maggiore di quello degli oceani terrestri, valore confermato dalle recenti misure sulla 67P [S11]. Anche il valore del rapporto

D/H di un'altra cometa, la famosa Halley, misurato nel 1986 dalla sonda dell'ESA Giotto, risulta essere molto diverso da quello terrestre di circa due volte.

Proprio per tali motivi si sostiene l'idea secondo la quale la maggior parte dell'acqua sulla Terra derivi più probabilmente dagli asteroidi che dalle comete, appunto perché più ricche di D rispetto alla Terra di un fattore tra 1.5 e 3 [S6].

Non si hanno però dati statisticamente significativi per arrivare con certezza a una tale conclusione, infatti se si considera il D/H della Hartley (Figura 1), cometa JFC, l'ipotesi che l'acqua arrivi dalle comete non è del tutto da escludere [A13].

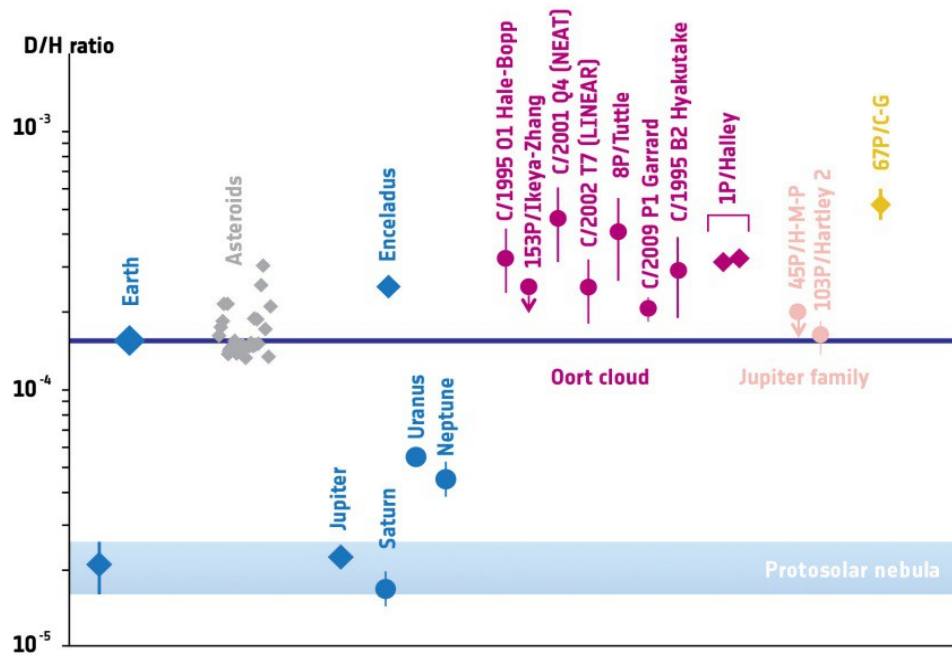


Figura 1: Rapporti D/H osservati nei vari oggetti del Sistema Solare (Altwegg et al., 2014)

Capitolo 3: Comete

Nella seguente tabella sono riportati i valori di D/H, calcolati per alcune comete. Precisamente nella prima colonna è riportata la molecola da cui è stato ricavato il rapporto D/H, nella seconda il valore ottenuto e poi il nome della cometa e la possibile provenienza:

Specie	D/H $\times 10^{-4}$	Cometa	Tipo	Referenze
H_2DO^+	(3.08 ± 0.50)	1P/Halley	OCC	Balsiger et al. (1995)
H_2DO^+	(3.06 ± 0.34)	1P/Halley	OCC	Eberhardt et al. (1995)
H_2DO^+	(2.1 ± 0.3)	1P/Halley	OCC	Brown et al. (2012)
HDO	(2.9 ± 1.0)	C/1996 B2 (Hyakutake)	OCC	Bockelée-Morvan et al. (1998)
HDO	(3.3 ± 0.8)	C/1995 O1 (Hale-Bopp)	OCC	Meier et al. (1998a)
HDO	(4.09 ± 1.45)	8P/Tuttle	OCC	Villanueva et al. (2009)
HDO	(1.61 ± 0.24)	103P/Hartley 2	JFC	Hartogh et al. (2011)
HDO	(2.06 ± 0.22)	C/2009 P1 (Garradd)	OCC	Bockelée-Morvan et al. (2012)
HDO	(5.3 ± 0.7)	67P/Churyumov-Gerasimenko	JFC	Altwegg et al. (2014)
HDO	< 2.5	153P/Ikeya-Zhang	OCC	Biver et al. (2006)
HDO	< 5.6	C/2007 N3 (Lulin)		Gibb et al. (2012)
HDO	< 2	45P/Honda-Mrkos-Pajdusakova	JFC	Lis et al. (2013)
OD	(2.5 ± 0.7)	C/2002 T7 (LINEAR)	OCC	Hutsemékers et al. (2008)

Tabella 2: Rapporti D/H nelle comete [A3]

3.1 Cometa 1P/Halley

Le prime misure del rapporto D/H nell'acqua cometaria sono state ottenute nella 1P/Halley dallo spettro dello ione H_3O^+ , acquisito dagli spettrometri IMS (Ion Mass Spectrometer) (Balsiger et al., 1995) e NMS (Neutral Mass Spectrometer) (Eberhardt et al., 1995), a bordo della sonda Giotto.

I valori ottenuti sono consistenti con il valore $\sim 3 \times 10^{-4}$, che è 2 volte il valore terrestre. Brown et al. (2012) però rianalizzando i dati hanno ottenuto un valore per la Halley di $(2.1 \pm 0.3) \times 10^{-4}$ [A3].

Il valore del D nella 1P/Halley è 12 volte maggiore di quello protosolare e 2 volte il valore terrestre, un valore molto alto che limita la possibilità che le comete siano i principali serbatoi dell'acqua dei nostri oceani [A14].

3.2 Cometa 103P/Hartley 2

Recenti misure di D/H nell'acqua delle comete sono state acquisite dal telescopio Herschel, osservando una transizione di HDO per le due comete JFC, 103P/Hartley 2 e 45P/Honda-Mrkos-Pajdusakova, e per la cometa OCC, Garradd. Per la Hartley si è ricavato un rapporto D/H di

$(1.61 \pm 0.24) \times 10^{-4}$ dal rapporto $H_2^{16}O/H_2^{18}O$ (Hartogh et al., 2011). Per la Garradd un rapporto pari a $(2.06 \pm 0.22) \times 10^{-4}$, basandosi sul rapporto $HDO/H_2^{16}O$, e pari a

$(2.15 \pm 0.32) \times 10^{-4}$, usando il metodo di Hartogh et al. (2011). Infine per la 45P, rilevando le righe di HDO, si è ottenuto un limite superiore di 2×10^{-4} (Lis et al., 2013) [A3].

I rapporti D/H infatti per le comete OCC hanno in media un valore pari a $(2.96 \pm 0.25) \times 10^{-4}$, la cometa 103P/Hartley 2 invece è una delle poche che sembra mostrare un rapporto simile a quello degli oceani terrestri di $(1.558 \pm 0.001) \times 10^{-4}$ (Vienna Standard Mean Ocean Water, VSMOW). Questa differenza del rapporto D/H tra la 103P/Hartley 2 e le comete OCC porta a pensare che tale cometa forse non si sia formata in una regione molto lontana dal Sole, lo scenario più plausibile è che essa si sia formata nella fascia di Kuiper [A2].

3.3 Cometa Hale-Bopp

Il rapporto D/H nell'acqua per la cometa Hale-Bopp è stato misurato di circa 3.0×10^{-4} , consistente con i rapporti D/H delle comete Halley e Hyakutake [S8].

Il rapporto D/H, oltre che nell'acqua, è stato misurato anche nella specie DCN, ottenendo un valore di $(23 \pm 4) \times 10^{-4}$ (Meier et al., 1998b). Tale arricchimento di D è di circa 7 volte maggiore di quello misurato nell'acqua nella cometa e nelle altre comete OCC [A3] ed è inoltre maggiore di circa $92(+43/-29)$ volte il valore protosolare.

Nell'ISM il rapporto DCN/HCN si trova entro un intervallo di $(40-700) \times 10^{-4}$. La differenza nei valori del rapporto DCN/HCN per le comete e per l'ISM potrebbe suggerire che reazioni chimiche a basse temperature (30-35 K) siano avvenute nella nebulosa solare prima che queste molecole

fossero incorporate nelle comete (Mousis et al., 2000) e quindi che questi oggetti si siano formati nella regione esterna della nebulosa vicino alla regione di Urano-Nettuno [S8].

3.4 Cometa 67/P Churyumov-Gerasimenko

Le recenti ed accurate misure fatte da Rosetta, missione spaziale dell'ESA, sulla cometa 67/P Churyumov-Gerasimenko sono di particolare importanza per comprendere l'origine dell'acqua sulla Terra [S4].

Il rapporto D/H della cometa 67/P, misurato dallo spettrometro di massa ROSINA, è risultato pari a $(5.3 \pm 0.7) \times 10^{-4}$ [A17], che è circa tre volte quello degli oceani terrestri, molto più alto rispetto a quello delle comete della nube di Oort. Tale scoperta ha quindi fornito un duro colpo all'ipotesi che l'acqua terrestre sia di origine cometaria [S4].

3.5 Altre comete

Osservando le comete Hyakutake e Hale-Bopp, sono state rilevate righe di HDO, derivando valori del D/H consistenti con quello per la Halley (Tabella 2).

Questo studio conferma che, anche per la Hyakutake, il valore dell'acqua cometaria è circa 10 volte quello protosolare 0.21×10^{-4} .

Dalle osservazioni roto-vibrazionali di HDO, per la cometa 8P/Tuttle, cometa della famiglia di Halley, si è ottenuto un valore di D/H di $(4.09 \pm 1.45) \times 10^{-4}$.

Il rapporto OD/OH misurato nella cometa C/2002 T7 (LINEAR), cometa OCC, è di $(2.5 \pm 0.7) \times 10^{-4}$, mediante osservazioni di OH nell'ultravioletto.

Dalle osservazioni di una transizione di HDO, per la cometa 153P/Ikeya-Zhang, cometa di tipo Halley, si è ricavato un D/H pari a $< 2.5 \times 10^{-4}$, suggerendo per la prima volta una diversità isotopica dell'idrogeno nelle comete della nube di Oort (OCC) (Biver et al., 2006) [A3].

Nuovi esperimenti (Brown et al., 2012) sulla sublimazione dei ghiacci suggeriscono che i rapporti D/H, misurati nell'acqua evaporata delle comete, potrebbero essere più bassi del 70% o più rispetto al rapporto del nucleo. Di conseguenza i rapporti D/H nelle comete OCC potrebbero essere ancora più elevati del valore terrestre [A5].

3.6 Origine delle comete in base al rapporto D/H

L'elevato rapporto D/H misurato nelle comete si potrebbe spiegare come risultato di una mescolanza tra vapore d'acqua ricco di D, originato nella nube presolare o nel disco freddo esterno,

e materiale riprocessato nella parte calda più interna della nebula. Le comete quindi si sarebbero accresciute lontano dal Sole, dove i ghiacci si sono condensati, e sono rimaste per la maggior parte della loro vita fuori dall'orbita di Plutone. In base a questo scenario, la nube di Oort, riserva delle comete a lungo periodo e con il D/H più elevato, sarebbe popolata da oggetti scagliati per azione gravitazionale dalla regione di Urano-Nettuno, con un piccolo contributo anche dalla regione di Giove-Saturno (Dones et al., 2004; Brassier, 2008). La fascia di Kuiper, oltre Nettuno, riserva delle comete a breve periodo (JFC), è la componente del Disco Scatterato di popolazioni con orbite altamente eccentriche (Duncan e Levison, 1997).

Secondo il modello di Nizza, il Disco Scatterato è ciò che rimane di una popolazione più ampia scatterata dall'interazione del disco planetesimale primordiale con Nettuno in migrazione [A6].

Poiché le comete JFC si sono formate forse più lontano rispetto a quelle OCC, essendosi probabilmente formate da oggetti del Disco Scatterato, che si trova più lontano dal Sole rispetto alla regione di Urano-Nettuno, da cui si sarebbero formate invece le OCC, i rapporti D/H per le comete JFC dovrebbero essere più alti delle altre, cosa confermata dalle misure D/H per la 67/P, ma non per le comete Hartley e 45P (Tabella 2) [A3].

Una possibile spiegazione è che la distribuzione D/H nella nebulosa solare fosse eterogenea e che ghiaccio povero di D, condensato nella snow line, fosse stato trasportato all'esterno, nella regione di formazione delle comete, mediante diffusione turbolenta [A3]. Ciò spiegherebbe anche la differenza che c'è spesso tra le comete, con abbondanza di D data da $f=12$, e le condriti, con $f=29$, che si sono formate a 3-4 UA, molto più vicino al Sole rispetto alle comete, e che quindi dovrebbero avere meno D rispetto alle comete [A5].

Un'altra spiegazione potrebbe essere che le comete Hartley e 45/P si siano formate più vicino al Sole rispetto ad altre comete. Secondo recenti teorie proposte per le prime fasi di formazione del Sistema Solare (il Grand Tack scenario), quando i pianeti giganti erano ancora nel disco della nube di gas, c'era una distribuzione mista di comete e asteroidi, nati in diverse regioni, per i vari movimenti dei planetesimi tra interno ed esterno della nebulosa (Walsh et al., 2011). Le somiglianze tra i rapporti D/H delle due comete JFC, la Hartley e la 45/P, con i rapporti trovati nelle CC e la diversità isotopica osservata nelle comete JFC e OCC sembrerebbe essere in accordo con tale scenario [A3]. Potrebbe risultare concorde con ciò anche il fatto che la cometa 153P/Ikeya-Zhang ha un D/H di $< 2.5 \times 10^{-4}$, molto più basso rispetto al quello per le altre comete OCC.

Capitolo 4: IDPs e meteoriti

L'acqua e le molecole organiche sono state trovate nelle nubi prestellari, protostellari e nei dischi protoplanetari. La composizione isotopica dell'acqua e delle molecole organiche è fondamentale per comprendere l'evoluzione della materia in queste fasi iniziali. Si pensa che i cambiamenti isotopici nella fase di gas, tra gas e grani e alla superficie dei grani, possano avvenire nelle nubi prestellari o durante l'evoluzione protostellare e del disco, portando a un aumento di D nell'acqua e nelle materie organiche. Tali cambiamenti isotopici si conservano nei ghiacci così da poterli ritrovare nelle comete e meteoriti [A7].

Due tipi di meteoriti primitive sono state trovate avere valori del rapporto D/H molto elevati: le condriti LL3 e le condriti carbonacee (CC). L'arricchimento di D per le CC è un valore di f tra 15 e 25 e per le condriti LL3 è sopra i 44, ottenendo quindi come media generale $f=29$ [A5].

4.1 Particelle di polvere interplanetaria (IDPs)

Sin dal 1981 la NASA ha collezionato IDPs nella stratosfera, tra 17-19 km di altitudine, o nei ghiacci in Antartide (Noguchi et al., 2015) [A3], ottenendo rapporti D/H che variano nell'intervallo $0.9-40 \times 10^{-4}$ [A8].

Si pensa che queste polveri siano di origine asteroidale o cometaria. Una classe delle IDPs, le particelle anidre porose condritiche (CP-IDPs), si ritiene siano originate dalle comete, hanno infatti molte somiglianze, per quanto riguarda la mineralogia, con le comete 1P/Halley e Hale-Bopp [A3].

4.2 Micrometeoriti Ultracarbonacei Antartici (UCAMMs)

La composizione isotopica delle UCAMMs mostra valori molto elevati per i rapporti D/H, maggiori di 10-30 volte il valore VSMOW. Questa composizione potrebbe essere il segno di materia organica primitiva da regioni fredde e dense della nube protosolare o del disco protoplanetario [A3].

4.3 Meteoriti LL3

Il rapporto D/H misurato per le condriti ordinarie LL3 è molto elevato, $(7.3 \pm 1.2) \times 10^{-4}$, rispetto a quello protosolare di 0.3×10^{-4} . Si pensa che questo alto valore di D abbia origine nei grani che non sono stati riprocessati nella nebulosa, infatti, recenti studi suggeriscono che questi grani abbiano evitato il riprocessamento durante il collasso della nube presolare [A15].

Elevati valori di D/H nelle condriti Semarkona (condriti LL3) sono stati di recente misurati intorno a 18×10^{-4} , ciò potrebbe derivare da un'alterazione dei silicati con acqua ricca di D, proveniente

probabilmente dalle comete OCC (Piani et al., 2015) [A3].

4.4 Condriti Carbonacee (CC)

Le meteoriti che cadono sulla Terra si pensa siano originate da asteroidi della fascia principale. Le CC sono frammenti di asteroidi primitivi che non hanno subito differenziazione e quindi si pensa possano contenere una composizione chimica inalterata [A6]. Sono ricche di D e di minerali argillosi (i fillosilicati) e sostanze organiche (IOM)¹.

Dalla Figura 2 si può notare come le CC e le IDPs abbiano una distribuzione di valori D/H molto ampia. Per le CC si ha il picco attorno al valore terrestre $\sim 1.5 \times 10^{-4}$, ma si può arrivare anche ad un valore di 3.5×10^{-4} [A6].

In alcune meteoriti CI e CM, il materiale organico presente ha rapporto D/H tra 3.1 e 3.7×10^{-4} , per altre meteoriti CM il rapporto è tra 1.25 e 1.5×10^{-4} . I vari valori si potrebbero spiegare con una diversa provenienza delle condriti in funzione della distanza dal Sole, ipotesi che sembrerebbe essere confermata anche dalla distribuzione di IDPs (Figura 2).

Il rapporto D/H per la Terra è $(1.49 \pm 0.03) \times 10^{-4}$, valore simile a quello delle CC, ma più alti valori del rapporto D/H sono ottenuti nei minerali idrati in alcune condriti, dimostrando ancora che la composizione isotopica di acqua nelle condriti è molto eterogenea.

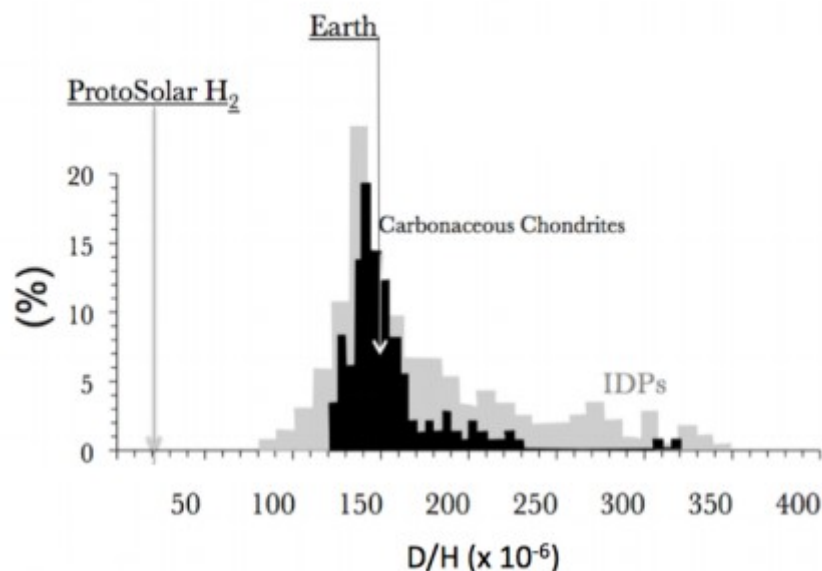


Figura 2: Rapporti D/H per le CC e le IDPs (F. Robert, 2013)

¹ Insoluble Organic Matter, componente di materia organica trovata nei primitivi materiali extraterrestri, come meteoriti carbonacee [S3]

4.4.1 Studio su due condriti carbonacee e una condrite ordinaria

Campione di condrite	D/H nei silicati idrati $\times 10^{-4}$	D/H nella IOM $\times 10^{-4}$	D/H nei fillosilicati $\times 10^{-4}$
Orgueil (CC)	(1.55 ± 0.14)	3.27 (Yang e Epstein, 1983) 3.07 (Alexander et al., 2007)	0.64-0.98
Renazzo (CC)	(2.38 ± 0.12)	4.83	2.62
Semarkona (LL3)	1.5 e 18	2.63 (Yang e Epstein, 1983) 5.17×10^{-4} (Alexander et al., 2007)	6.7-8.7

Tabella 3: Rapporti D/H per le condriti carbonacee, Orgueil e Renazzo, e per la condrite ordinaria Semarkona

In uno studio sono state analizzate due CC, Orgueil e Renazzo, e una condrite ordinaria, Semarkona.

Si trova che nelle CC, i silicati idrati omogenei isotopicamente sono mescolati con la materia organica ricca di D, ottenendo per la condrite Orgueil un rapporto D/H pari a $(1.55 \pm 0.14) \times 10^{-4}$ e per la Renazzo uno di $(2.38 \pm 0.12) \times 10^{-4}$. Nella condrite Semarkona invece i valori di D/H per i silicati idrati sono molto più eterogenei, vanno tra 1.5 e 18.0×10^{-4} , con un valore intermedio comune di 4.5×10^{-4} (Tabella 3).

L'IOM nella condrite Orgueil è stata misurata dopo la demineralizzazione e si è ottenuto un valore di D/H intorno a 3×10^{-4} (Tabella 3). Nella condrite Renazzo, la materia organica isolata mediante il trattamento con l'acido è ricca di D e ha un rapporto D/H pari a 4.83×10^{-4} (Yang e Epstein, 1983).

Il rapporto D/H dei fillosilicati nella Orgueil è stato ricavato essere simile o più basso di quello terrestre, tra 0.64 e 0.98×10^{-4} (Alexander et al., 2012). I fillosilicati invece della condrite Renazzo hanno composizione più pesante e quindi un valore D/H maggiore e pari a 2.62×10^{-4} (Robert e Epstein, 1982).

Per le condriti Semarkona anche si hanno valori molto diversi per la materia organica: un rapporto D/H medio di 2.63×10^{-4} in Yang e Epstein (1983) e 5.17×10^{-4} in Alexander et al. (2007). La

differenza tra tali valori è però minore rispetto a quella ottenuta nei minerali idrati (Tabella 3).

Misure in-situ dei fillosilicati della condrite Semarkona danno valori del rapporto D/H tra 6.7 e 8.7 $\times 10^{-4}$.

Considerando che il frazionamento isotopico tra i fillosilicati e l'acqua sia trascurabile, le osservazioni implicano che l'acqua, da cui i fillosilicati si sono formati, era eterogenea isotopicamente e ha trasferito poi questa eterogeneità ai fillosilicati.

Le condriti Semarkona hanno sia alti che bassi valori di D/H, si può pensare che questo meteorite si sia accresciuto sia da condriti omogenee che da ghiaccio di acqua ricco di D [A7].

4.5 Eucriti

Le eucriti appartengono al gruppo delle meteoriti HEDs (howarditi, eucriti e diogeniti) e sono meteoriti di tipo basaltico, che si pensa provengano dall'asteroide Vesta. Le apatiti nelle eucriti sono state identificate con una scansione al microscopio elettronico e, utilizzando la spettrometria di massa (SIMS, secondary ion mass spectrometry), si sono ricavati i rapporti D/H, che variano in genere tra 1.19×10^{-4} e 1.57×10^{-4} (Tabella 4) [A18].

Recenti studi sulla composizione isotopica dell'idrogeno e sull'abbondanza di acqua nelle apatiti delle eucriti potrebbero dare informazioni sull'origine dell'acqua e sul tempo di accrezione dei corpi interni del Sistema Solare. Le eucriti infatti sembra si siano formate intorno a 4.56 miliardi di anni fa e i rapporti D/H nelle loro apatiti sono simili ai valori misurati nelle CC e sulla Terra, cosa che potrebbe indicare che l'acqua sia stata portata nei corpi interni del sistema da sorgenti come le CC o le eucriti [A19].

Il rapporto D/H delle apatiti però potrebbe non rappresentare quello del suo progenitore per la possibilità di degassamento avvenuto prima della cristallizzazione dell'apatite. Per tale motivo, si cercano di studiare i rapporti D/H delle fasi precedenti la cristallizzazione per determinare se il rapporto D/H dell'asteroide Vesta (considerato progenitore di queste meteoriti) sia compatibile con quello della Terra e delle CC [A20]. Analisi quindi su minerali anidri formati agli inizi delle fasi evolutive delle eucriti (come i pirosseni) sembrerebbero essere più utili degli studi su minerali formati dopo (come le apatiti) per comprendere la composizione isotopica dell'idrogeno e la quantità di acqua su Vesta [A19].

I valori D/H trovati in alcuni campioni di meteoriti (Tabella 4) mostrano un valore medio nei pirosseni delle eucriti intorno a 1.14×10^{-4} . I rapporti invece nei fosfati (che fanno parte delle apatiti) delle eucriti hanno una media di 1.24×10^{-4} . La discrepanza tra i due valori non è significativa, le misure sono cioè tra loro consistenti, poiché i due valori si trovano entro le relative

barre di errore [A19].

δD (%)	$D/H_{simple} = \left(\frac{\delta D}{1000} + 1\right) * D/H_{VSMOW}$
50 ± 40 / -210 ± 40	1.57×10^{-4} / 1.19×10^{-4}
-241 ± 64 (media nei pirosseni)	1.14×10^{-4}
-173 ± 72 (media nei fosfati)	1.24×10^{-4}

Tabella 4: Rapporti D/H per le eucriti, conversione di δD (valore trovato negli articoli di riferimento) in D/H tramite la formula $\delta D = [(D/H)_{sample} / (D/H)_{VSMOW} - 1] \times 1000$ usando $D/H_{VSMOW} = 1.5 \times 10^{-4}$. Gli errori per i valori del D/H sono molto elevati, a volte superano persino il valore ottenuto dalle misurazioni

4.6 Meteoriti: contaminazione terrestre e fattori che influenzano il rapporto D/H

È difficile stimare il rapporto D/H dei campioni di meteoriti a causa della contaminazione terrestre. Aria nel sistema di aspirazione durante le analisi, oli, acqua e resine epossidiche usate durante la lucidatura possono infatti contaminarli. Le resine possono essere molto significative come contaminanti, in quanto penetrano le microfessure dei meteoriti e non possono essere rimosse, pertanto spesso si utilizza preparare il campione usando il metallo indio invece della resina, appunto per evitare questa fonte di contaminazione [S7].

Oltre alla resina epossidica, un'altra sorgente di contaminazione terrestre nelle analisi dell'idrogeno nelle apatite è la superficie del pianeta. Tutti i campioni sono tenuti a 50° C nel vuoto per più di una settimana prima dell'analisi, dopo ciò vengono rivestiti d'oro e mantenuti in alto vuoto per altre 24 ore e subiscono anche presputtering². La contaminazione sulla superficie del campione può essere identificata dal processo di sputtering mano a mano che essa viene rimossa, ma non si osservano effetti significativi, quindi tale contaminazione non è importante.

Possibili fattori che possono modificare il rapporto D/H delle apatiti ignee durante i processi magmatici sono: degassamento, bombardamento da parte del vento solare e dei raggi cosmici.

- 1) La specie dominante di H che degassa dai magmi di eucrite è H_2 , perciò il rapporto D/H del magma è modificato durante il degassamento di un composto di H per la grande differenza di massa tra H_2 con e senza deuterio. Il degassamento può avvenire nel

² Polverizzazione catodica, sputtering: emissione di atomi, ioni o frammenti molecolari da un bersaglio, bombardato da un fascio di particelle energetiche, in genere ioni

progenitore durante la sua accrezione o durante il degassamento magmatico.

- 2) Il vento solare penetra per centinaia di nm nella superficie e la contaminazione potrebbe modificare il rapporto D/H dell'apatite se c'è scambio di OH nell'apatite con il vento solare. Due processi potrebbero far sì che l'idrogeno del vento solare modifichi i grani di apatite dell'eucrite. Uno è che ci sia assimilazione dell'idrogeno del vento solare da parte dell'apatite del progenitore dell'eucrite quando il magma sale in superficie. Oppure l'apatite potrebbe essere sottoposta al vento solare, una volta che l'eucrite si è staccata dalla superficie di Vesta o durante il suo viaggio nello spazio. Ciò però è improbabile, perché i campioni studiati sono piccoli frammenti e i processi di lucidatura rimuovono centinaia di nm e ciò è sufficiente a eliminare l'idrogeno del vento solare.
- 3) I raggi cosmici penetrano fino a 3 m nella superficie e il bombardamento produce D, aumentando il δD . Tale produzione di D può essere calcolata e rimossa, poiché è in funzione del tempo di esposizione e del flusso dei raggi cosmici. Il flusso di raggi cosmici su Vesta non si conosce, ma ci si aspetta sia minore di quello della Luna, vista la maggiore distanza dal Sole. Il tempo di esposizione delle eucriti è minore di quello dei campioni lunari e le apatiti studiate sono tutte ricche di acqua. Precedenti studi hanno mostrato che le apatiti lunari richiedono un'insignificante correzione per il bombardamento dei raggi cosmici, pertanto con un'esposizione più giovane e una quantità di acqua maggiore nelle apatiti eucriti, si può concludere che le correzioni per i raggi cosmici siano trascurabili.

Tali processi non modificano quindi in modo significativo il rapporto D/H e perciò il rapporto trovato per i campioni di apatite delle eucriti sembra corrispondere a quello del progenitore [A21].

Capitolo 5: Altri corpi del Sistema Solare

5.1 Luna

La composizione isotopica è molto variabile, come si può notare dalla Figura 3 [A13].

Dalle missioni Apollo sono state ricavate le misure sugli isotopi dell'acqua e dell'idrogeno nel minerale idrato dell'apatite, proveniente dai campioni lunari [A11]. I valori di D/H di acqua nei grani di apatite dai basalti di mare lunare variano tra 2.09×10^{-4} e 3.02×10^{-4} , sono quindi più ricchi di D rispetto al valore dell'acqua sulla Terra. L'origine di questa elevata quantità di D potrebbe essere il processo di degassamento dell'acqua o dell'idrogeno o reazioni di disidratazione. Non tutte le apatite basaltiche dei mari lunari però contengono molta acqua e i più bassi contenuti di acqua sulla Luna sono stati trovati anche nell'apatite di terre lunari, il cui valore di D/H è tra

1.86×10^{-4} e 2.01×10^{-4} [A11].

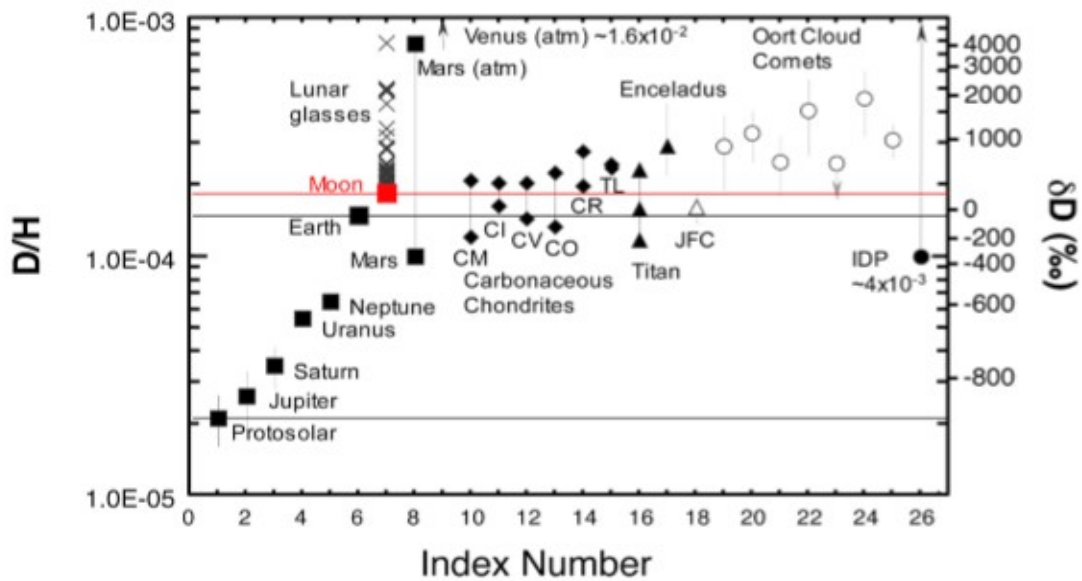


Figura 3: Rapporto D/H per i vetri vulcanici lunari

Un elevato valore di di D/H sulla Luna potrebbe derivare da diversi processi. Potrebbe esserci stato uno scambio intenso di elementi volatili tra la Terra e il disco protolunare, durante la formazione della Luna, quindi la Luna inizialmente avrebbe avuto un rapporto D/H simile a quello del mantello terrestre di 1.35×10^{-4} . Se fosse andata così, poi il D/H dell'acqua lunare potrebbe essersi modificato durante la fuga di H.

Un'altra possibilità è che un aumento di D sia stato dovuto agli impatti di comete o composti meteoritici organici, cosa che sembrerebbe essere compatibile con il fatto che il più alto valore di δD , misurato nei campioni di basalto di mare lunare, è simile a quello delle comete Hale-Bopp, Hyakutake e P/Halley [A11].

Il rapporto D/H potrebbe dipendere dal bombardamento del vento solare, dal bombardamento dei raggi cosmici e dal degassamento magmatico, che sembrano però avere effetti minimi.

L'alto contenuto di acqua e gli effetti minimi di radiazione cosmica e di degassamento sul rapporto D/H sono elementi che possono permettere di ricavare il δD primitivo dell'acqua lunare. Le inclusioni di fusione sono più utili da studiare rispetto ai vetri ottenuti dalle eruzioni lunari, perché sono intrappolate a pressione maggiore di quella dell'eruzione e sono protetti dal degassamento eruttivo dai loro cristalli, mantengono così la composizione primitiva. Il valore originale di D/H dell'acqua lunare quindi ottenuto è di 1.78×10^{-4} e si trova nell'intervallo delle CC, è più alto di quello terrestre ed è più basso di quello delle comete OCC [A13].

δD (%)	Campione	$D/H_{simple} = \left(\frac{\delta D}{1000} + 1\right) * D/H_{VSMOW}$
-100	Mantello Terra	1.35×10^{-4}
[+391, +1010]	Apatite dai basalti di mare lunare	$[2.09, 3.02] \times 10^{-4}$
[+240, +340]	Terre lunari	$[1.86, 2.01] \times 10^{-4}$
+187	Valore originale dell'acqua lunare	1.78×10^{-4}

Tabella 5: Rapporti D/H per la Terra e la Luna, conversione di δD (valore trovato negli articoli di riferimento) in D/H tramite la formula $\delta D = [(D/H)_{sample} / (D/H)_{VSMOW} - 1] \times 1000$ usando $D/H_{VSMOW} = 1.5 \times 10^{-4}$. Il valore VSMOW però è da tener presente che varia tra $0.75-1.65 \times 10^{-4}$ e $1.2-1.575 \times 10^{-4}$ [A11].

5.2 Marte

L'origine dell'acqua su Marte è molto dibattuta. Dall'analisi isotopica delle meteoriti marziane, si ricava un D/H pari a 3×10^{-4} per il mantello del pianeta, ciò potrebbe implicare un maggior contributo dell'acqua su Marte da parte delle comete rispetto a quello dato sulla Terra, infatti l'elevato arricchimento di D nel mantello di Marte potrebbe essere il risultato del riciclo a profondità di acqua atmosferica ricca di D [A16].

Su Marte, come anche su Venere, l'acqua è fotodissociata dai raggi UV in H e D, che vengono poi persi nello spazio. Poiché l'idrogeno fugge a un tasso più alto rispetto a quello del deuterio, le atmosfere dei due pianeti si sono arricchite di D durante gli ultimi 4.5 Ga tramite il processo di distillazione di Rayleigh³ [A8]. Il rapporto D/H atmosferico 8.1×10^{-4} , circa 6 volte il valore terrestre, è perciò più alto rispetto a quello del mantello [A16].

Marte ha un elevato valore di D/H, ma alcuni campioni marziani hanno un rapporto D/H simile a quello terrestre. Un'idea è che tale pianeta si sia accresciuto con un rapporto D/H simile a quello terrestre [A21], oppure un'altra ipotesi è che processi come degassamento vulcanico e perdita di atmosfera abbiano potuto modificare la composizione isotopica dell'atmosfera nel tempo.

Recenti analisi su un antico meteorite, ALH84001, di 4 miliardi di anni fa, e su un giovane meteorite Shergotty, di 0.7 miliardi di anni fa, hanno prodotto valori di D/H di 6×10^{-4} e

³ La distillazione frazionata è una particolare distillazione dove vengono separate più di due sostanze. Si basa su una serie di cicli di vaporizzazione-condensazione

8.4×10^{-4} rispettivamente. Ciò è stato interpretato come prova di due fasi dell'evoluzione per l'acqua su Marte: una significativa perdita iniziale nello spazio (3.9 miliardi di anni fa) e una modesta perdita nello spazio durante gli ultimi 4 Ga. Cosa confermata anche dalle misure in-situ del lander Curiosity delle specie isotopiche dell'acqua HDO e $H_2^{18}O$: i rapporti D/H sono molto alti e ciò indica una gran perdita di acqua [A22].

Le mappe del rapporto D/H hanno una diversa evoluzione anche in base alle stagioni, infatti si ottengono bassi valori per il rapporto nell'emisfero invernale (tra 1 e 3 VSMOW) e alti valori nell'emisfero primaverile. Gli effetti di pressione potrebbero produrre un frazionamento isotopico alla condensazione, creando quindi queste variazioni latitudinali.

Il cratere Gale, analizzato da Curiosity, ha valori del rapporto D/H tra 1 e 7 VSMOW e le condizioni locali e le stagioni possono influenzarlo, in quest'ultimo caso si può arrivare anche a valori di 9-10 VSMOW. La temperatura quindi è un parametro importante nei rapporti isotopici in atmosfera, ma anche l'umidità (il livello di condensazione), la presenza di particelle di polvere e processi di trasporto [A23].

δD (%)	$D/H_{simple} = \left(\frac{\delta D}{1000} + 1\right) * D/H_{VSMOW}$
3000	6×10^{-4}
4600	8.4×10^{-4}

Tabella 6: Rapporti D/H per Marte, conversione di δD (valore trovato negli articoli di riferimento) in D/H tramite la formula $\delta D = [(D/H)_{sample} / (D/H)_{VSMOW} - 1] \times 1000$ usando

$$D/H_{VSMOW} = 1.5 \times 10^{-4}$$

5.3 Venere

Si pensa che Venere in passato abbia avuto una significativa quantità di acqua sulla sua superficie. Per arrivare a tale conclusione si è analizzato il rapporto D/H, ricavato dalle misure di H_2O e HDO nell'atmosfera del pianeta. Tale rapporto risulta essere 100, 200 volte più grande di quello terrestre e ciò suggerisce che forse c'era una grande riserva di acqua nel passato che poi è evaporata per l'elevata temperatura del pianeta [L1]. Si stima che la stessa quantità di acqua presente oggi sulla Terra sia stata persa su Venere nei primi 500 milioni di anni, ciò osservando il rapporto D/H e il tasso di perdita.

Lo spettrometro SPICAV-SOIR della navicella spaziale dell'ESA Venus Express (2015) ha misurato

le linee di H_2O e HDO, trovando un rapporto D/H pari a 240 ± 25 volte quello degli oceani terrestri [A24].

5.4 Giove

Il rapporto D/H per Giove è stato calcolato dall'abbondanza di CH_3D :

$$D/H = 0.25 \times CH_3D / CH_4 .$$

Determinazioni del rapporto D/H dalle misure di CH_3D sono state fatte da Drossart et al. (1982), ottenendo un valore pari a $0.18(+0.14/-0.09) \times 10^{-4}$, e da Knacke et al. (1982), ricavando un valore di $(0.380 \pm 0.056) \times 10^{-4}$.

L'abbondanza di D nell'atmosfera di Giove si può ricavare anche dalle linee di HD. Trauger et al. (1973) hanno ottenuto un valore per il rapporto D/H di $(0.21 \pm 0.04) \times 10^{-4}$, McKellar, Goetz e Ramsay (1976) un valore di $(0.56 \pm 0.14) \times 10^{-4}$ e infine risultati di Trauger, Roesler e Mickelson (1977) danno un rapporto di $(0.51 \pm 0.07) \times 10^{-4}$.

Confrontando dunque i valori del rapporto D/H ottenuti dalle misure di HD e di CH_3D ci sono delle differenze, ma successivi studi di Encrenaz e Combes (1982), sulle linee di HD, danno un D/H di $0.16(+0.16/-0.10) \times 10^{-4}$ [A4].

5.5 Saturno

Gli spettri su Saturno sono stati ricavati da IRIS, strumento in infrarosso della sonda Voyager, e danno informazioni sulla composizione e dinamica dell'atmosfera del pianeta. La presenza delle nubi può limitare l'accuratezza dei risultati, le osservazioni da Terra infatti non hanno permesso di individuare una regione pulita da queste, mediante IRIS invece ciò è stato possibile ed è di particolare importanza come cosa, dal momento che il ghiaccio di ammoniaca esiste vicino a tutto il pianeta.

Dai risultati di IRIS si è ricavato, per Saturno, un rapporto D/H pari a $0.16(+0.13/-0.12) \times 10^{-4}$. Altre stime del rapporto D/H per Saturno sono state ottenute dall'abbondanza di HD. Trauger, Roesler e Mickelson (1977) hanno ottenuto un valore pari a $(0.51 \pm 0.07) \times 10^{-4}$ e Macy e Smith (1984) uno di $(0.80 \pm 0.47) \times 10^{-4}$.

Il rapporto D/H ottenuto da CH_3D differisce molto tra Giove, con un valore di circa 0.38×10^{-4} (Tabella 7), e Saturno, con $0.16(+0.13/-0.12) \times 10^{-4}$. Per l'abbondanza di catalizzatori come particelle di polvere, il frazionamento potrebbe essere innalzato su Giove rispetto a Saturno. In questo contesto, Lutz (1982) ha suggerito che il frazionamento potrebbe non raggiungere

l'equilibrio su Saturno ai livelli dove è misurato il CH_3D e ciò spiegherebbe la discrepanza tra il rapporto D/H ottenuto dalle misure di CH_3D e quello ottenuto da HD. Questo quindi porterebbe a una convezione meno efficiente nella troposfera di Saturno rispetto a quella di Giove [A25].

D/H per Giove dalle linee di $CH_3D \times 10^{-4}$	0.18(+0.14/−0.09) (Drossart et al., 1982)
D/H per Giove dalle linee di $CH_3D \times 10^{-4}$	(0.380±0.056) (Knacke et al., 1982)
D/H per Giove dalle linee di HD $\times 10^{-4}$	(0.21±0.04) (Trauger et al., 1973)
D/H per Giove dalle linee di HD $\times 10^{-4}$	(0.56±0.14) (McKellar, Goetz e Ramsay, 1976)
D/H per Giove dalle linee di HD $\times 10^{-4}$	(0.51±0.07) (Trauger, Roesler e Mickelson, 1977)
D/H per Giove dalle linee di HD $\times 10^{-4}$	0.16(+0.16/−0.10) (Encrenaz e Combes, 1982)
D/H per Saturno $\times 10^{-4}$	0.16(+0.13/−0.12) IRIS
D/H per Saturno $\times 10^{-4}$ da HD	(0.51±0.07) (Trauger, Roesler e Mickelson, 1977)
D/H per Saturno $\times 10^{-4}$ da HD	(0.80±0.47) (Macy e Smith, 1984)
D/H per Saturno $\times 10^{-4}$ da CH_3D	0.16(+0.13/−0.12)

Tabella 7: Rapporti D/H per Giove e Saturno

5.6 Satelliti di Saturno

5.6.1 Encelado

Getti di ghiaccio d'acqua dalla superficie di Encelado producono pennacchi di gas e particelle. La sorgente potrebbe essere una regione di acqua liquida sotto il ghiaccio o ghiaccio caldo riscaldato dalla dissociazione di clatrati idrati [A26].

Lo strumento INMS a bordo della navicella spaziale Cassini ha misurato il rapporto D/H nell'acqua nei grani di ghiaccio presenti nei pennacchi di vapore di Encelado (Waite et al., 2009) [A27], ottenendo circa $2.9(+1.5/−0.7) \times 10^{-4}$. Tale valore è stato determinato dalle osservazioni di

H_2 e HD ed è due volte quello terrestre 1.56×10^{-4} , 10 volte quello della nebulosa protosolare di $(0.21 \pm 0.04) \times 10^{-4}$ e in particolare è vicino a quello delle comete. Ciò si potrebbe spiegare con l'ipotesi secondo la quale Encelado si sia accresciuto da planetesimi formati nel Sistema Solare più

esterno, piuttosto che nella sub-nebulosa di Saturno [A26].

5.6.2 Titano

Vari metodi sono stati usati per determinare il rapporto D/H nell'atmosfera di Titano.

Usando le abbondanze di H_2 e HD misurate con uno spettrometro si è ricavato un rapporto pari a $(1.35 \pm 0.30) \times 10^{-4}$, misure fatte nell'IR con lo strumento CIRS della navicella spaziale Cassini danno un valore del rapporto pari a $(1.59 \pm 0.33) \times 10^{-4}$. L'accuratezza delle misure del rapporto D/H ottenuta nell'IR con NIFS (Near-Infrared Integral Field Spectrometer), spettrometro posto sul telescopio Gemini North di 8m, è più alta di quella delle misure precedenti e si è ottenuto un valore di $(1.43 \pm 0.16) \times 10^{-4}$. I valori quindi cambiano in base ai metodi diversi usati.

Se Titano si fosse formato nelle vicinanze di Saturno, accrescendosi mediante planetesimi ghiacciati, il suo rapporto D/H dovrebbe essere maggiore di quello protosolare, proprio per l'elevata quantità di D in questi planetesimi. Tale idea sembra essere convalidata dalle misure ottenute [A1]. Il rapporto D/H osservato su Titano è infatti leggermente più alto rispetto a quello di Saturno e ciò potrebbe indicare proprio il fatto che i planetesimi da cui Titano si è accresciuto provenissero dalle regioni più esterne del Sistema Solare e non dalla sub-nebulosa saturniana [A26].

D/H per Encelado $\times 10^{-4}$	$2.9(+1.5/-0.7)$ da H_2 e HD
D/H per Titano $\times 10^{-4}$	(1.35 ± 0.30) da H_2 e HD
D/H per Titano $\times 10^{-4}$	(1.59 ± 0.33) CIRS
D/H per Titano $\times 10^{-4}$	(1.43 ± 0.16) NIFS

Tabella 8: Rapporti D/H per Encelado e Titano

5.7 Urano e Nettuno

Stime del rapporto su Urano dalle linee HD variano tra 0.2 e 0.6×10^{-4} (Macy e Smith, 1978; Trafton e Ramsey, 1980). Altre analisi da Bergh et al. (1984) invece, fatte sull'abbondanza di CH_3D , danno un rapporto D/H di $0.90(+0.90/-0.45) \times 10^{-4}$ [A25].

Urano e Nettuno hanno grandi nuclei ghiacciati. I loro rapporti D/H sono più alti di quelli di Giove e Saturno e una spiegazione per ciò è basata sui modelli di formazione dei due pianeti, secondo cui i nuclei si sarebbero accresciuti da planetesimi ghiacciati con alto valore D/H [A8]. Hubbard e MacFarlane (1980) infatti sostengono che il rapporto D/H su Urano e Nettuno dovrebbe essere circa quattro volte il valore primordiale per gli effetti forti del frazionamento nei ghiacci a bassa temperatura [A25].

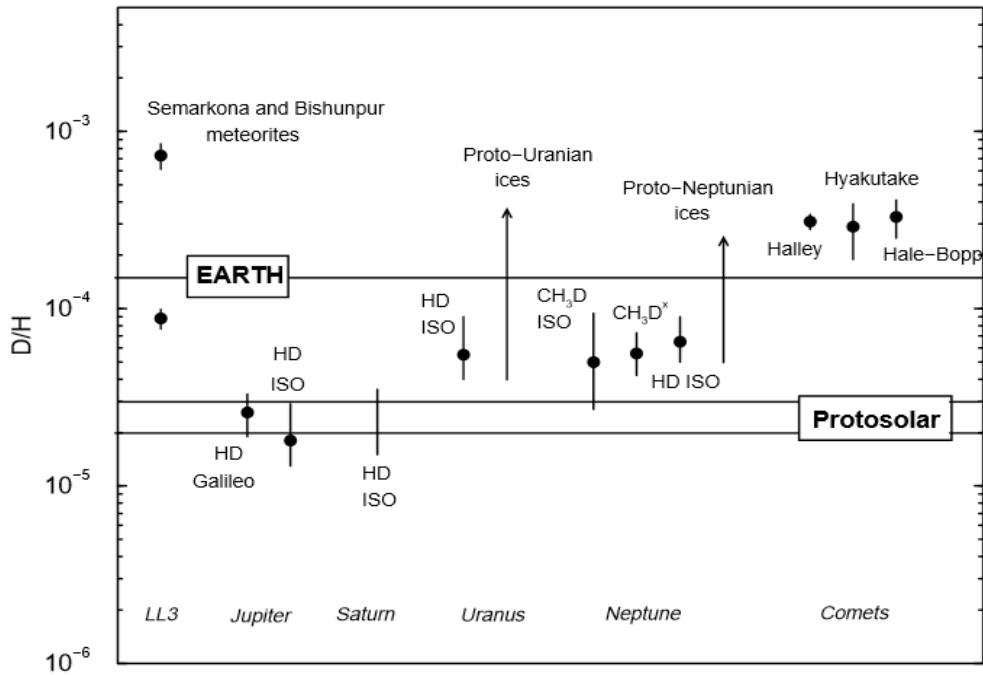


Figura 4: Rapporti D/H per meteoriti, comete, Terra e ghiacci dei protoplanetesimi (Bockelée-Morvan et al., 1998)

I valori di D/H nell'idrogeno molecolare misurati nelle atmosfere esterne dei due pianeti ghiacciati sembrerebbero essere il risultato della mescolanza del rapporto D/H nell'idrogeno originario della nebulosa con quello nei ghiacci ricchi di D, contenuti nei planetesimi che hanno formato i nuclei di tali pianeti. Considerando che un completo scambio isotopico sia avvenuto almeno una volta nella storia di tali pianeti tra H e ghiacci, i rapporti D/H dei ghiacci protouraniani e protonettuniani si possono ricavare dalle proporzioni dei due componenti deuterati (Lécluse et al., 1996).

Adottando il modello di Podolak et al. (1995) per l'interno di Nettuno e considerando il rapporto D/H dell'atmosfera determinato da Orton et al. (1992) da misure di CH_3D pari a

$$0.56(+0.17/-0.14) \times 10^{-4} \text{ [L4]}, \text{ si ottiene un rapporto D/H per i ghiacci protonettuniani di } 0.90(+0.45/-0.34) \times 10^{-4} \text{ [A14]}.$$

Mentre secondo i primi modelli (Podolak et al., 1995), i rapporti D/H dei ghiacci protouraniani e protonettuniani erano più bassi di quelli delle comete [A15], suggerendo che questi oggetti si fossero formati in momenti diversi o in una regione diversa da quella di Urano-Nettuno [A10], secondo i modelli recenti (Podolak et al., 2000) tali valori di D/H concordano con quelli cometari (Figura 4) [A15]. L'idea quindi che si ottiene è che gli oggetti che hanno formato i nuclei di Urano e Nettuno si siano originati da grani di ghiaccio microscopico formati simultaneamente e nella stessa posizione nella nebulosa iniziale [A10].

D/H per Urano da HD $\times 10^{-4}$	0.2-0.6 (Macy e Smith, 1978; Trafton e Ramsey, 1980)
D/H per Urano da $CH_3D \times 10^{-4}$	0.90(+0.90/-0.45) (Bergh et al., 1984)
D/H per Nettuno da $CH_3D \times 10^{-4}$	0.56(+0.17/-0.14) (Orton et al., 1992)
D/H per i ghiacci protonettuniani $\times 10^{-4}$	0.90(+0.45/-0.34) (secondo il modello di Podolak et al., 1995)

Tabella 9: Rapporti D/H per Urano, Nettuno e per i ghiacci protonettuniani

Capitolo 6: Discussione

Se si osserva il rapporto D/H all'interno del Sistema Solare, si nota che i valori sembrerebbero aumentare con la distanza dal Sole, questo per la reazione reversibile avvenuta nella nebulosa solare primordiale: $H_2O + HD \leftrightarrow HDO + H_2$. A $T > 500$ K il rapporto D/H è basso, si ha $f=1$, a temperature intermedie $200 \text{ K} < T < 500 \text{ K}$ è elevato, con $f \leq 3$, e a $T < 200$ K la reazione è troppo lenta affinché ci sia scambio isotopico tra H_2O e H_2 . La formazione dei ghiacci delle comete però avviene a temperature più basse, come si spiega quindi l'elevato arricchimento di D nelle comete? Ciò è probabile sia dovuto alla diffusione turbolenta, all'interno della nebulosa protosolare, dei grani di ghiaccio ricchi di D che la costituivano, avvenuta durante le fasi di formazione del Sistema Solare. Questi grani, che si sono formati a temperature intermedie, sarebbero stati così scagliati all'esterno del Sistema Solare e unendosi tra di loro avrebbero formato le comete, che avrebbero quindi acquisito l'elevata quantità di D presente nei grani.

Se però si osservano in dettaglio i rapporti D/H degli oggetti nel Sistema Solare (Tabella 10 riassuntiva), si nota che non è del tutto corretta l'assunzione secondo la quale i valori crescano con la distanza eliocentrica. Alcune condriti infatti mostrano valori del D/H molto elevati, simili a quelli delle comete, cosa che è incompatibile con il fatto che esse si siano formate a 3-4 UA e quindi molto vicino al Sole rispetto alle comete. Questo problema potrebbe essere risolto con le migrazioni planetarie, che avrebbero scagliato all'interno e all'esterno del sistema vari oggetti, creando quindi un gradiente per il rapporto D/H abbastanza eterogeneo.

Oggetto	Posizione eliocentrica (UA)	D/H $\times 10^{-4}$
Big Bang (teorico)		0.3
ISM		~ 0.16
Venere	0.723	~ 160
Terra (VSMOW)	1	1.558 ± 0.001
Luna	(distanza Terra-Luna ~ 0.03)	$1.86 / \sim 9$
Marte	1.524	3 (mantello) / 8.1 (atmosfera)
Giove (e anche nebulosa protosolare)	5.209	~ 0.25
Saturno	9.539	0.16 / 0.50
Encelado	(distanza Saturno-Encelado ~ 0.002)	2.9 (+1.5/-0.7)
Titano	(distanza Saturno-Titano ~ 0.008)	1.43 ± 0.16
Urano	19.18	0.2-0.6
Nettuno	30.06	0.56 (+0.17/-0.14)
Comete OCC	$> 10^4$	~ 3
Comete JFC	50-55 (fascia di Kuiper)	$< 2 / 5.3$
IDPs e micrometeoriti Antartici		0.9-40
CC	[2, 3.3] (fascia degli asteroidi)	1.25-3.5

Tabella 10 riassuntiva: Rapporti D/H per i vari oggetti del Sistema Solare

Con le migrazioni si spiegherebbero anche i vari valori del rapporto D/H tra le comete JFC (la 67/P ha un valore più elevato del tipico 3×10^{-4} adottato per le comete OCC e invece la Hartley e la 45P hanno valori $< 2 \times 10^{-4}$) e tra le due popolazioni di comete, quelle OCC e quelle JFC. Le comete JFC probabilmente si sono formate più lontano rispetto a quelle OCC, da oggetti del Disco Scatterato, che si trova più lontano dal Sole rispetto alla regione di Urano-Nettuno, da cui si sono formate invece le OCC. Le comete JFC quindi dovrebbero avere rapporti D/H più elevati rispetto alle OCC, dalle considerazioni prima fatte, ma non sempre questo accade. Una spiegazione, come detto, potrebbe essere che la distribuzione di D/H nella nebulosa solare fosse eterogenea, oppure altra ipotesi è che le comete Hartley e 45P si siano formate più vicino al Sole.

Un'altra prova del fatto che la nebulosa solare fosse eterogenea potrebbe essere data dal fatto che il rapporto D/H per Encelado è maggiore di quello per Titano, se invece dipendesse dalla distanza eliocentrica si dovrebbe avere il contrario, dato che Titano è più distante rispetto ad Encelado.

La disomogeneità della nebulosa solare inoltre si nota dal fatto che il rapporto D/H di Giove è

0.25×10^{-4} ma, se si dovesse avere un D/H maggiore allontanandosi dal Sole, ciò non tornerebbe.

Si pensa inoltre che tale valore sia il rapporto D/H della nebulosa protosolare e quindi che si sia mantenuto costante su Giove sin dalla sua formazione. Il motivo per cui si ritiene che proprio il valore di Giove sia quello della nebulosa protosolare è che Giove è molto massivo e ha acquisito la maggior parte degli elementi del gas primordiale quando la nebulosa si è dissolta.

Capitolo 7: Conclusione

A conclusione di questo lavoro si può dire che l'origine dell'acqua sulla Terra è ancora molto da investigare. Una buona parte di essa potrebbe derivare dalla nebulosa protosolare e poi eventi successivi, come bombardamenti di comete e asteroidi e fenomeni di frazionamento isotopico, come la fuga atmosferica (l'idrogeno fugge più velocemente del deuterio, poiché più leggero, e ciò si traduce in un aumento del rapporto D/H), potrebbero aver modificato la quantità di acqua presente sulla Terra e quindi il rapporto D/H.

Poiché le eucriti e una buona parte delle CC hanno valori D/H simili a quello terrestre, si pensa che gli asteroidi potrebbero essere le principali fonti di acqua sulla Terra e in misura minore le comete, che invece presentano valori D/H più del doppio di quello terrestre, anche se due comete JFC hanno valore simile a quello terrestre. Tuttavia la statistica cometaria è ancora molto bassa e quindi al momento non è possibile escluderle del tutto come fonti di acqua sulla Terra.

È necessario quindi continuare gli studi sul rapporto D/H per le comete e gli asteroidi e confrontare tali valori con quelli degli altri oggetti del Sistema Solare, soprattutto con il valore terrestre.

Bibliografia

Libri:

- [L1] C. Guaita (2016), *L'esplorazione delle comete: Da Halley a Rosetta*, Hoepli
- [L2] T. Encrenaz et al. (2004), *The Solar System*, Springer, p. 304
- [L3] F. Bagenal, T. E. Dowling e W. B. McKinnon (2004), *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*, Cambridge University Press, pp. 68-69
- [L4] R. Kallenbach, T. Encrenaz, J. Geiss, K. Mauersberger, T. Owen, F. Robert, *Solar System History from Isotopic Signature of Volatile Elements*, Volume Resulting from an ISSI Workshop 14-18 January 2002, Bern, Switzerland, p. 129

Articoli:

- [A1] L. Kedziora-Chudczer, J. Bailey e J. Horner (2013), *Observations of the D/H ratio in Methane in the atmosphere of Saturn's moon, Titan – where did the Saturnian system form?*, arXiv:1302.4503v1, [astro-ph.EP], (19), (Feb)
- [A2] P. Hartogh et al. (2011), *Ocean-like water in the Jupiter-family comet 103P/Hartley 2*, in “Nature”, Vol. 478, doi:10.1038/nature10519, (13), (October), pp. 218-220
- [A3] D. Bockelée-Morvan et al. (2015), *Cometary Isotopic Measurements*, Springer, Space Sci Rev 197, doi:10.1007/s11214-015-0156-9, pp. 47-83
- [A4] V. Kunde et al. (1982), *The tropospheric gas composition of Jupiter's north equatorial belt (NH_3 , PH_3 , CH_3D , GeH_4 , H_2O) and the Jovian D/H isotopic ratio*, The Astrophysical Journal, 263, (1), (December), pp. 443-467
- [A5] F. Robert, D. Gautier e B. Dubrulle (2000), *The Solar System D/H ratio: observations and theories*, Space Science Reviews 92, pp. 201-224
- [A6] C. Ceccarelli (2014), *Deuterium Fractionation: the Ariadne's Thread from the Pre-collapse Phase to Meteorites and Comets today*, arXiv:1403.7143v1, [astro-ph.EP], (27), (Mar), pp. 1-24
- [A7] L. Piani, F. Robert e L. Remusat (2015), *Micron-scale D/H heterogeneity in chondrite matrices: a signature of pristine solar system water*, Earth and Planetary Science Letters, 415, pp. 154-164
- [A8] F. Robert, *Solar System Deuterium/Hydrogen Ratio*, pp. 341-351
- [A9] T. Albertsson, D. Semenov e Th. Henning (2014), *Chemodynamical deuterium fractionation in the early solar nebula: the origin of water on Earth and in asteroids and comets*, The Astrophysical Journal, 784:39, (20), (March), pp. 1-11
- [A10] F. Hersant, D. Gautier e Jean-Marc Huré (2001), *A two-dimensional model for the primordial nebula constrained by D/H measurements in the Solar System: implications for the formation of giant planets*, The Astrophysical Journal, 554, (10), (June), pp. 391-407

- [A11] J. P. Greenwood et al. (2011), *Hydrogen isotope ratios in lunar rocks indicate delivery of cometary water on the Moon*, *Nature Geoscience*, Vol. 4, (February), (published online 9 January 2011, doi:10.1038/NGEO1050), pp. 79-82
- [A12] A. Izidoro et al. (2013), *A Compound model for the origin of Earth's water*, arXiv:1302.1233v2, [astro-ph.EP], (26), (Feb), pp.1-56
- [A13] A. E. Saal et al. (2013), *Hydrogen Isotopes in Lunar Volcanic Glasses and Melt Inclusions Reveal a Carbonaceous Chondrite Heritage*, *Scienceexpress*, 10.1126/science.1235142, (9), (May)
- [A14] D. Bockelée-Morvan et al. (1998), *Deuterated Water in Comet C/1996 B2 (Hyakutake) and Its implications for the Origin of Comets*, *Icarus* 133, art. n°IS985916, pp. 147-162
- [A15] O. Mousis et al. (2000), *Constraints on the Formation of Comets from D/H Ratios Measured in H₂O and HCN*, *Icarus*, 148, doi:10.1006/icar.2000.6499, pp. 513-525
- [A16] F. Robert (2001), *The Origin of Water on Earth*, in “*Science*”, Vol. 293, (10), (August), pp. 1056-1058
- [A17] K. Altwegg et al. (2014), *67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with high D/H ratio*, *Scienceexpress*, 10.1126/science.1261952, (11), (December)
- [A18] Y. Guan et al. (2015), *SIMS analysis of OH and D/H of apatites from eucrites*, 78th Annual Meeting of the Meteoritical Society
- [A19] A. Stephant et al. (2016), *D/H ratios and water contents in eucrite minerals: implications for the source and abundance of water on Vesta*, 79th Annual Meeting of the Meteoritical Society
- [A20] A. R. Sarafian et al. (2017), *Volatile concentrations and H-isotope composition of unequilibrated eucrites*, *Lunar and Planetary Science XLVIII*
- [A21] A. R. Sarafian et al. (2014), *Early accretion of water in the inner solar system from a carbonaceous chondrite-like source*, *Science*, 346, doi:10.1126/science.1256717, (31), (Oct)
- [A22] C. R. Webster et al. (2013), *Isotope Ratios of H, C, and O in CO₂ and H₂O of the Martian Atmosphere*, in “*Science*”, Vol. 341, doi:10.1126/science.1237961, (19), (July), pp. 260-263
- [A23] G. L. Villanuevas et al. (2015), *Strong water isotopic anomalies in the martian atmosphere: Probing current and ancient reservoirs*, in “*Science*”, Vol. 348, issue 6231, (10), (April), pp. 218-221
- [A24] C. C. C. Tsang et al. (2017), *Observing the Venus atmosphere with Nasa's SOFIA airborne telescope: measurements of cloud-top H₂O, HDO and SO₂*, *Lunar and Planetary Science XLVIII*
- [A25] R. Courtin et al. (1984), *The composition of Saturn's atmosphere at northern temperate latitudes from Voyager IRIS spectra: NH₃, PH₃, C₂H₂, C₂H₆, CH₃D, CH₄*,

and the Saturnian D/H isotopic ratio, *The Astrophysical Journal*, 287, (15), (December), pp. 899-916

[A26] J. H. Waite Jr et al. (2009), *Liquid water on Enceladus from observations of ammonia and ⁴⁰Ar in the plume*, in "Nature", Vol. 460, doi:10.1038/nature08153, (23), (July), pp. 487-490

[A27] O. Mousis et al. (2009), *A primordial origin for the atmospheric methane of Saturn's moon Titan*, arXiv:0908.0430v1, [astro-ph.EP], (4), (Aug)

Sitografia

[S1] U. Genovese (2015), *Le incerte origini dell'acqua sulla Terra*, [https://tuttidentro.eu/2015/01/01/le-incerte-origini-dellacqua-sulla-terra/]

[S2] E. Menietti (2014), *Da dove viene l'acqua della Terra*, *Scienza*, (11), (Dicembre), [http://www.ilpost.it/2014/12/11/acqua-terra-comete-rosetta-67p/]

[S3] Insoluble Organic Matter, da Springer Link, *Encyclopedia of Astrobiology*, [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-3-642-11274-4_849]

[S4] (2014), *Rosetta fuels debate on origin of Earth's oceans*, (10), (Dec), [http://sci.esa.int/rosetta/55116-rosetta-fuels-debate-on-origin-of-earths-oceans/]

[S5] [https://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiEmJGgrt_WAhXJBBoKHTIuCSUQFgg4MAI&url=http%3A%2F%2Fpeople.unipmn.it%2Fmimmone%2FCorsi%2FParkeggio%2Fmimmone_ppt%2FMCTA%25203%2520-%2520analisi%2520isotopica.ppt&usg=AOvVaw2tTzNxecuKlMopdv14_7gr]

[S6] C. Q. Choi (2014), *Most of Earth's Water Came from Asteroids, Not Comets*, (10), (December), *Space.com*, [https://www.space.com/27969-earth-water-from-asteroids-not-comets.html]

[S7] (2012), *Campioni di meteoriti fornire la prova definitiva di acqua e tipi di rocce su Marte*, [http://nunaunet.it/index.php?option=com_content&view=article&id=1678:campioni-di-meteoriti-fornire-la-prova-definitiva-di-acqua-e-tipi-di-rocce-su-marte]

[S8] (1998), *Mars Global Surveyor*, in "Science", Vol. 279, issue 5357, pp. 1605, (13), (Mar), [http://science.sciencemag.org/content/279/5357/twis]

[S9] R. Spiga (2017), *Cercando l'origine dell'acqua tra stelle e diamanti*, (20), (Giugno), [https://www.scienzainrete.it/articolo/cercando-lorigine-dellacqua-tra-stelle-e-diamanti/rossella-spiga/2017-06-20]

[S10] M. Panetto (2016), *La Terra raccontata dai diamanti*, Università degli studi di Padova, (22), (Dicembre), [http://www.unipd.it/ilbo/terra-raccontata-dai-diamanti]

[S11] (2014), *Deuterium-to-Hydrogen ratio in the Solar System*, (10), (Dec), [http://sci.esa.int/rosetta/55118-deuterium-to-hydrogen-ratio-in-the-solar-system/]