







XIV OLIMPIADI ITALIANE DI ASTRONOMIA – SIRACUSA – 2014

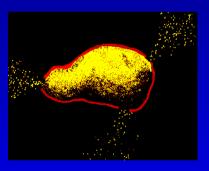
# La struttura delle comete

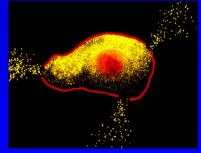
15 ottobre 2013

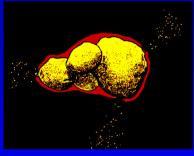
Prof. Manlio Bellesi

# LA STRUTTURA DELLE COMETE











Le comete sono residui inutilizzati del materiale "di costruzione" dei pianeti esterni

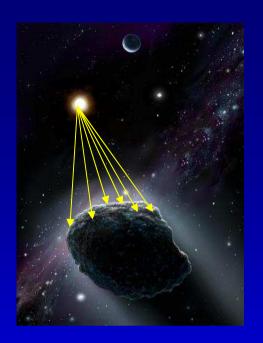
Si ritiene che la loro composizione sia molto simile a quella della nube protosolare

Lo stato di conservazione del materiale sembra ottimo e fa sperare di poter ottenere informazioni di importanza fondamentale per la comprensione del processo di formazione del Sistema Solare

Il loro caratteristico aspetto è un effetto transitorio che si verifica solo in prossimità del perielio

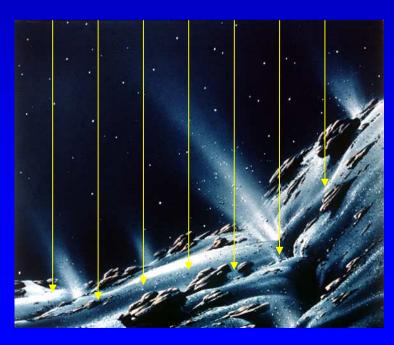
Responsabile è l'azione della radiazione del Sole, nonché del vento solare, sul NUCLEO, unica parte permanente della struttura





L'azione del Sole fa evaporare la crosta del nucleo, da cui fuoriescono gas e polveri. L'emissione riguarda solo alcune zone: ampie regioni del nucleo restano inerti

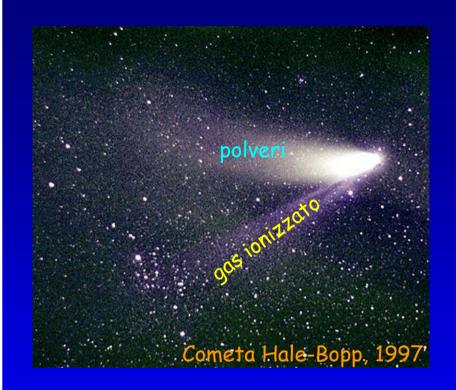
Il materiale espulso forma progressivamente le altre parti della cometa: code (una di gas ionizzati, una di polveri), chioma, corona

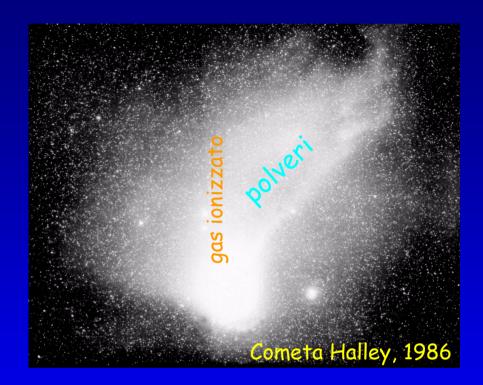




# Componenti di una cometa nube di idrogeno coda di gas coda di polvere chioma nucleo

#### Le due code sono diverse e il loro aspetto varia anche da cometa a cometa





La coda di polveri viene deviata dall'azione del vento solare: la pressione di radiazione agisce sui grani di polvere in maniera variabile a seconda delle loro dimensioni, della distanza dal Sole e della rotazione del nucleo

Le forme risultanti possono essere molto varie, ma la coda di polveri si allinea comunque in direzione opposta al Sole

## DISTRIBUZIONE DELLE COMETE

In ordine crescente di distanza dal Sole troviamo:

- La FASCIA DI EDGEWORTH-KUIPER (EK). Tra 30 e 50 UA (Unità Astronomiche. 1 UA = 149 600 000 Km). Appena oltre l'orbita di Nettuno. Plutone è il corpo più grande
- Gli OGGETTI TRANS-NETTUNIANI (TNO), il cui perielio è a 28-35 UA e l'afelio tra le 60 e le 1000 UA. Circa 10-30 miliardi di oggetti
- OGGETTI SPARSI DEL DISCO, con perielio oltre le 35 UA e afelio più lontano (esempi: Sedna, Eris). Probabile origine nella fascia EK, poi perturbati da Nettuno
- La NUBE DI OORT, fino agli estremi confini del Sistema Solare (circa 100 000 UA). Consistenza: ≈ 10<sup>12</sup> oggetti.



Artist's View of Watery Asteroid in White Dwarf Star System GD 61

NASA, ESA, M.A. Garlick (space-art.co.uk), University of Warwick, and University of Cambridge STScI-PRC13-38a

#### LE MOLECOLE INTERSTELLARI - 1

#### 7 atomi

CH<sub>3</sub>CCH methyl acetylene CH<sub>3</sub>CHO acetaldehyde CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub> methylamine CH<sub>2</sub>CHCN vinyl cyanide HC<sub>5</sub>N cyanobutadiyne  $C_6H_{1,3,5}$ -hexatriynl c- $C_2H_4O$  ethylene oxide CH<sub>2</sub>CHOH vinyl alcohol

#### 8 atomi

 $CH_3COOH$  acetic acid  $CH_3OCHO$  methyl formate  $CH_3C_3N$  cyanomethylacetylene  $CH_2$  (OH)CHO glycolaldehyde  $H_2C_6$  hexapentaenylidene HC6H triacetylene C2H6 ethane  $C_7H_{2,4,6}$ - heptatriynylidyne  $CH_2CHCHO$  propenal

### LE MOLECOLE INTERSTELLARI - 2

9 atomi

 $(CH_3)_2O$  dimethyl ether  $CH_3CH_2OH$  ethanol  $CH_3CH_2CN$  ethyl cyanide  $CH_3C_4H$  methylbutadiyne  $HC_7N$  cyanohexatriyne  $C_8H_{1,3,5,7}$ -octateraynyl

10 atomi

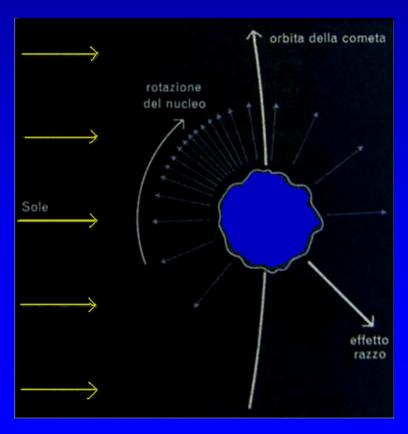
 $(CH_3)_2CO$  acetone  $HOCH_2CH_2OH$  ethylene glycol  $CH_3CH_2CHO$  propanal  $CH_3C_5N$  methylcyanodiacetylene

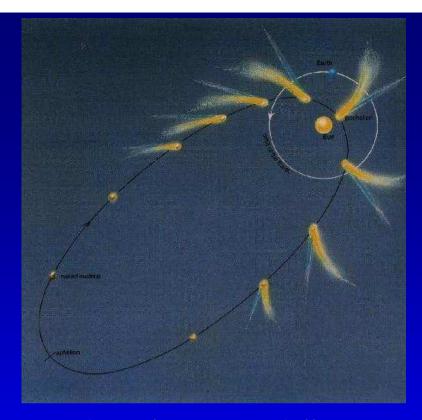
11 atomi HC<sub>9</sub>N cyanooctatetrayne

12 atomi  $C_6H_6$  benzene

13 atoms  $HC_{11}N$  cyanodecapentayne

La gravità solare e la pressione di radiazione dipendono entrambe da 1/r², dove r è la distanza dal Sole. L'orbita risultante NON è un'ellisse perfetta, anche a causa dei getti di gas che modificano la traiettoria del nucleo come un aereo a reazione





Il tasso di sublimazione della crosta superficiale è determinato dall'intensità dell'irraggiamento solare e dipende da r², dove r è sempre la distanza dal Sole.

Qualsiasi deviazione da questa legge riveste un notevole interesse, perché rispecchia i dettagli del processo di espulsione di gas e polveri dal nucleo, di cui ancora oggi non sappiamo quasi nulla

Il meccanismo di emissione del materiale dal nucleo è assai complesso: la radiazione solare incidente viene in parte riflessa e in parte assorbita

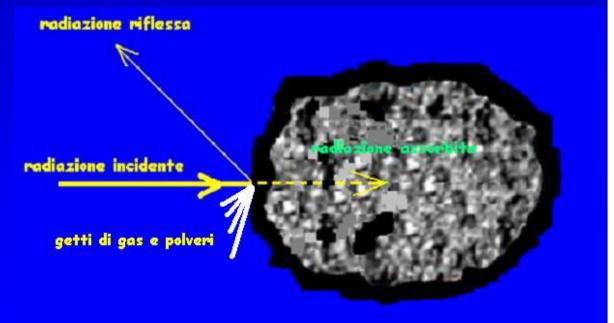
La riflessione dipende dall' albedo della superficie: l'assorbimento dipende dall'angolo di incidenza della radiazione e dalla temperatura T del nucleo

Una parte di quanto assorbito viene poi riemesso, a seconda della temperatura e delle proprietà strutturali del nucleo

L'energia assorbita viene utilizzata per la sublimazione della crosta, che lascia fuoriuscire gas e polveri dall'interno

La quantità di gas e polveri emessa è assai variabile e comunque massima vicino al perielio

Valori per la cometa Arend-Roland (vicino al perielio): gas 75 tonnellate/sec, polveri 60 tonnellate/sec



### LE PERDITE DI MASSA

Manca ancora una statistica attendibile e siamo quindi al livello di ipotesi, per quanto attendibili.

Alla distanza della Terra (1 UA = 150 milioni di km) una cometa "tipica" perde 10-100 tonnellate al secondo; per un intero passaggio si può arrivare a 100-1000 miliardi di tonnellate, quasi tutte emesse vicino al perielio...

...che corrisponde a circa l' 1% dell'intera massa del nucleo. Le comete hanno dunque vita molto breve su scala astronomica: da 10000 anni per le comete a corto periodo fino a qualche milione di anni per le più eccentriche.

Le emissioni del nucleo cessano rapidamente quando la cometa si allontana, in particolare alla distanza di circa 3 UA, che è la soglia di congelamento dell'H<sub>2</sub>O: esistono però eccezioni di comete attive a distanze maggiori.

Se ne deduce che il componente principale del nucleo è ghiaccio d'acqua (~80%). Sono presenti anche altri "ghiacci" come CO,  $CO_2$ ,  $CH_4$ , inglobati nella struttura a reticolo dei cristalli di ghiaccio d'acqua (CLATRATI) o sotto forma di composti idrati ( $CH_4\cdot 6H_2O$ ,  $CO_2\cdot 6H_2O$ )

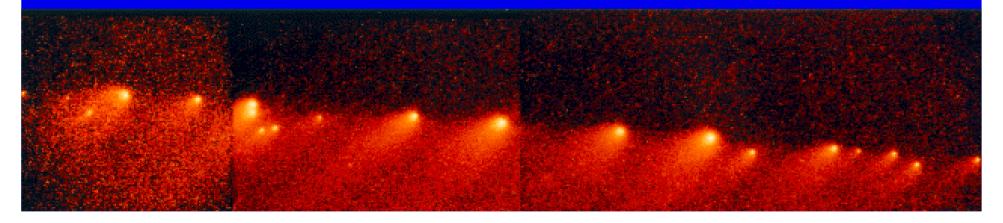
## STRUTTURA DEL NUCLEO - 1

È costituito da un conglomerato di ghiacci vari (soprattutto ghiaccio d'acqua) e grani di polvere, composti probabilmente di silicati e molecole organiche, anche complesse.

La struttura dovrebbe essere porosa e poco compatta: spesso i nuclei si spezzano sotto l'azione di forze gravitazionali abbastanza intense. Tuttavia è raro che la distruzione sia completa (la cometa Shoemaker-Levy 9 si separa nel 1994 in 21 nuclei distinti prima dell'impatto finale con Giove).

Misure dirette della compattezza di nuclei cometari sono oggi ancora impossibili. Si usano allora metodi indiretti:

1) l'analisi delle interazioni mareali del Sole sulle comete che lo sfiorano al perielio (la famiglia Kreutzer, scoperta dalla sonda SOHO);



## STRUTTURA DEL NUCLEO - 2

- 2) L'analisi dei periodi di rotazione dei nuclei cometari (ancora pochi dati);
- 3) Lo studio delle traiettorie degli sciami meteoritici, associati a comete, quando giungono nell'atmosfera terrestre.

Valori ricavati: 100 - 10000 Newton/m², che corrispondono a un carico di rottura rispettivamente di 1 - 100 grammi per ogni cm². Le comete non sono quindi molto compatte, e la compressione dovuta alla loro stessa gravità non cambia sostanzialmente la situazione.

Anche se non c'è molta coesione il nucleo non è certo un mucchio di sassi, ma un corpo centrale ben definito. Le immagini delle sonde ne hanno evidenziato la forma irregolare, i getti di gas che escono apparentemente a caso dalla superficie, zone inattive di colore molto scuro, crateri, rilievi e depressioni.

A differenza dei pianeti, i nuclei cometari sono troppo piccoli (sotto i 100 km) per avere una struttura interna differenziata

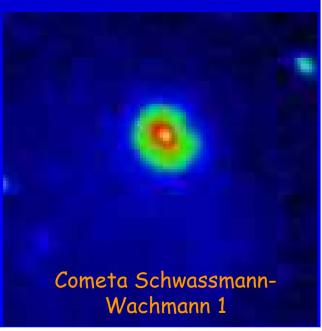
# GLI "OUTBURSTS" DEL NUCLEO

Si osservano spesso rapidi incrementi nell'emissione, detti OUTBURSTS, che possono accrescere la luminosità anche di 100 volte. Dopo il parossismo si forma una chioma temporanea che svanisce nel giro di poche settimane.

Una possibile spiegazione degli outbursts è che essi dipendano da reazioni chimiche esotermiche, che coinvolgono l'azione di radicali liberi su sacche di gas imprigionate sotto la crosta del nucleo: l'energia liberata potrebbe aumentare la pressione fino al verificarsi delle esplosioni. Per esempio, la transizione di fase dal ghiaccio amorfo a quello cristallino (a ~ 140K) è un processo che fornisce 24 calorie per ogni grammo.

Un'altra possibile sorgente di energia è la rapida sublimazione di  $CO_2$  o CO solidi imprigionati nel reticolo cristallino del ghiaccio d'acqua.

Può darsi che processi di tipo diverso siano all'opera su diverse comete, o anche sulla stessa cometa in tempi diversi



#### LE DIMENSIONI DEL NUCLEO

Da Terra non è possibile una misura diretta del raggio, troppo piccolo; si ricorre allora a misure fotometriche quando il nucleo NON è attivo, cioè lontano dal perielio.

Questo metodo dà valori compresi tra 1 e 10 km; si ritiene però che le dimensioni possano essere anche maggiori, fino a circa 100 km (per esempio la cometa Hyakutake).

La prima misura diretta è stata effettuata dalla sonda Giotto sul nucleo della cometa di Halley, che è apparso come una "patata" irregolare di 16 x 8 x 7,5 km. In passato il nucleo doveva essere più grande.



### TEMPERATURA E COLORE DEL NUCLEO

Misure della temperatura del nucleo hanno fornito valori di 300 K - 400 K (da 30° C a 130° C), ben più alti del valore teorico di 190 K (-80°C), che è stato calcolato sul tasso di evaporazione del ghiaccio cometario ad opera dell'irraggiamento del Sole.

Tale discrepanza potrebbe essere spiegata dalla presenza di una crosta superficiale molto scura, formata da un miscuglio di vari composti organici (kerogeno, CHON) "cotti" dalla radiazione solare.

Il risultato è che una cometa lontana dal Sole e inattiva appare più nera dell'inchiostro, nonostante sia in gran parte composta di ghiaccio d'acqua. Solo quando si avvicina al Sole le cose, almeno parzialmente, cambiano.



Nucleo della cometa Borrelly (2001 – Sonda Deep Space 1)

# DENSITÀ E ROTAZIONE DEL NUCLEO

Anche le misure di densità sono molto difficili da eseguire. La procedura più seguita è quella di ottenere prima una stima della massa del nucleo sfruttando l'effetto perturbativo delle forze non gravitazionali (quelle dovute all'emissione di gas e polveri) che agiscono sul nucleo modificandone l'orbita. Per ottenere poi la densità occorre un valore attendibile delle dimensioni del nucleo... e non è difficile immaginare quanto grande sia l'errore sulla misura finale.

Valori ricavati: 0,1 g/cm<sup>3</sup> (cometa Kopff), 0,54 g/cm<sup>3</sup> (cometa Tempel 2), 0,19 g/cm<sup>3</sup> (cometa Giacobini-Zinner). Numeri bassi come questi indicano una struttura quasi spugnosa.

Le misure di rotazione dei nuclei cometari forniscono valori compresi tra alcune ore e alcuni giorni: ma la loro attendibilità è ancora incerta



#### COMPOSIZIONE CHIMICA DEL NUCLEO

Lo studio si basa soprattutto sull'analisi spettroscopica della chioma. Le abbondanze chimiche, almeno per la cometa di Halley, risultano molto simili a quelle solari, con l'eccezione dell'idrogeno (meno del Sole) e del carbonio, che sembra in gran parte segregato sotto forma di composti organici complessi (CHON).

Particolare interesse riveste lo studio delle abbondanze isotopiche.

Il rapporto <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C SEMBRA più basso del corrispondente valore per il mezzo interstellare. Ciò suggerisce che l'equazione

"materiale cometario = nebulosa protosolare = materiale interstellare"

debba essere guardata con notevole scetticismo. Occorrono comunque ancora ulteriori dati.



Nel gennaio 2004 la sonda Stardust passò attraverso la coda della cometa Wild 2, e molte particelle solide di polvere furono catturate grazie ai bocchi di "AEROGEL" che equipaggiavano la sonda.

Ogni particella colpiva il bersaglio di aerogel a circa 6 km/s, scavando una traccia in cui finivano depositati i suoi frammenti.

Si trovarono così molte molecole organiche come la glicina (un aminoacido base della vita)

Nell'aerogel furono rinvenuti anche GRANI di polvere probabilmente provenienti della nebulosa protosolare, composti da materiali altamente refrattari, che dovrebbero originarsi durante l'esplosione di una supernova.



#### ABBONDANZE ISOTOPICHE E CHIMICHE

Sembra che il rapporto più basso <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C rilevato per la materia interstellare (la cui misura ha fatto uso principalmente di osservazioni effettuate nella banda delle radiofrequenze, ancora da convalidare pienamente) sia causato da un incremento dell'isotopo più pesante nelle nubi interstellari, causato dall'immissione di materiale stellare elaborato dal ciclo CNO

Gli altri valori delle abbondanze isotopiche (con l'eccezione del rapporto deuterio/idrogeno D/H, che merita un discorso a parte) sono più o meno allineati con i valori solari: in particolare,  $^{16}O/^{18}O$ ,  $^{32}S/^{34}S$ .

È praticamente impossibile elencare in poco spazio tutti composti organici individuati nelle comete.

A parte i soliti CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub> ricordiamo:

CH,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_6$ , CN, HCNO, HCNO,  $H_2CO$ ,  $CH_3OH$ , CS,  $CS_2$ , OCS.

Tra le varie specie non organiche citiamo:

NH, NH<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, NO, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, Ca, Ni, Fe, Cr, Mn, Co, Cu, S<sub>2</sub>, K, Na.



# IL RAPPORTO D/H (1)

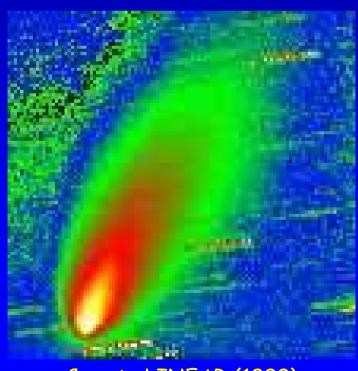
Vale la pena soffermarsi su un aspetto di estremo interesse, che è imperniato sulla misura del rapporto isotopico D/H tra deuterio e idrogeno.

Sintetizzato in modeste quantità all'inizio della storia dell'Universo, il deuterio mostra una distribuzione di abbondanza BIMODALE tra i corpi

del Sistema Solare.

Per esempio, il rapporto D/H delle (poche) comete analizzate finora è circa 10 volte quello "primitivo" stimato per la nebulosa protosolare.

L'arricchimento sembra dipendere dalla maggiore efficacia di alcune reazioni ioniche e molecolari generatrici di deuterio nell'ambiente del nucleo (bassa temperatura + alta densità).



Cometa LINEAR (1999)

# IL RAPPORTO D/H (2)

Continuando nei confronti ci si accorge che il rapporto D/H è molto più basso per le comete che per Giove e Saturno (anche in questo simili al Sole).

Ciò può suggerire una domanda importante: che risultati dà il confronto tra il D/H dei nuclei cometari e quello dell'acqua degli oceani terrestri?

L'importanza della questione nasce da un problema non ancora risolto dai modelli di formazione del Sistema Solare.

La teoria "canonica" prevede che il disco che ha formato i pianeti avesse distribuzione di temperature decrescenti partendo dal centro (protosole) e andando verso l'esterno.



# IL RAPPORTO D/H (3)

Nella zona dove si è formata la Terra la temperatura doveva aggirarsi sui 600 Kelvin (~330°C), un valore che non poteva in alcun caso permettere la condensazione del vapore acqueo.

Ma allora, da dove viene l'acqua degli oceani della Terra?

Potrebbe darsi che molti impatti cometari abbiano arricchito di acqua un pianeta in precedenza asciutto: in tal caso il rapporto D/H dovrebbe essere simile.



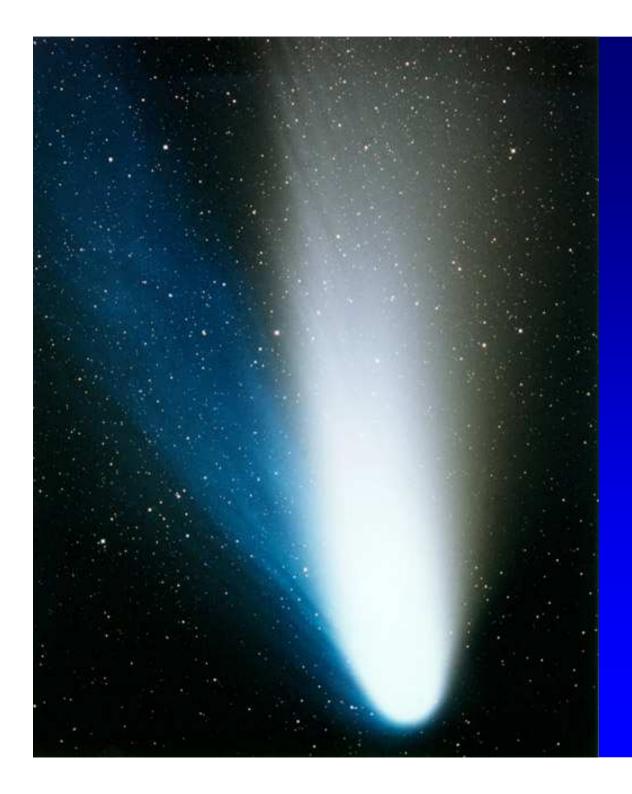
# IL RAPPORTO D/H (4)

I risultati (parziali) finora ottenuti si possono riassumere nella seguente tabella:

Oggetto	D/H
Terra	1,5.10-4
C. Halley	3,16 · 10-4
C. Hyakutake	2,82 · 10-4

Gli oceani terrestri sembrano più impoveriti di deuterio rispetto ai nuclei cometari. La questione, tuttavia, rimane ancora APERTA e i dati sono tuttora in discussione. Le missioni spaziali del prossimo futuro daranno un contributo fondamentale per la soluzione di questo problema (e di tutti gli altri...)





# FINE

