



Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei"

Corso di Laurea Triennale in

Astronomia

LA POLVERE COMETARIA E IL CONTRIBUTO DELLA MISSIONE ROSETTA

Relatore: Dott. Ivano Bertini
Correlatore: Dott.ssa Elisa Frattin

Laureanda: Francesca Longo
Anno Accademico 2018/2019

Indice

1	Il mezzo interstellare, disco protoplanetario e polvere cometaria	9
1.1	Il mezzo interstellare e le nubi molecolari	9
1.2	Le origini del materiale presolare	10
1.3	La formazione del disco protoplanetario	12
1.4	I meccanismi di formazione delle "pebbles"	14
1.5	Planetesimi e meccanismi di formazione	16
1.6	Le comete, la nube di Oort e il Disco Diffuso	18
2	Le comete e la missione Rosetta	21
2.1	Missioni Giotto, Stardust e Rosetta	21
2.2	I risultati prima e dopo la missione Rosetta	24
2.2.1	La composizione	25
2.2.2	La mineralogia	26
2.2.3	La composizione organica	29
2.2.4	La morfologia	30
2.2.5	La dimensione	33
3	Conclusioni	35
	Bibliography	37

Abstract

In questa tesi viene trattata la natura e l'origine del materiale cometario, allo scopo di descrivere la natura della polvere cometaria, ed inserirla nel più ampio quadro di evoluzione planetaria, dallo studio dell'origine nel mezzo interstellare fino alla attuale forma di polvere cometaria, attraverso le fasi di nube presolare e materiale del disco protoplanetario, sia dal punto di vista dinamico di formazione ed accrescimento dei grani di polvere, sia dal punto di vista composizionale, mineralogico, morfologico e dimensionale del materiale. Come fonte di dati sono state utilizzate le tre missioni Giotto, Stardust e Rosetta e le rispettive comete 1P/Halley, 81P/Wild 2 e 67P/Churyumov-Gerasimenko, poste poi in comparazione con la composizione solare e le condriti carbonacee.

Introduzione

In questa tesi si è voluto prendere in esame la polvere cometaria, le sue caratteristiche e le missioni che hanno dato un maggiore contributo allo studio delle comete, con osservazioni in situ e da remoto. E' stata posta particolare attenzione alla missione Rosetta, con obiettivo la cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. Essa è stata una missione innovativa, in grado, per la prima volta, di inseguire l'orbita cometaria e di sganciare un lander, Philae, sulla superficie..

Lo scopo di questa tesi, di carattere compilativo, è quello di descrivere la natura della polvere cometaria, ed inserirla nel più ampio quadro di evoluzione planetaria, confrontando i dati delle varie missioni con le caratteristiche della polvere interplanetaria e del mezzo interstellare. A tal proposito, nelle conclusioni si cercherà di determinare una relazione tra questi tre tipi polvere, che dia una visione completa dell'evoluzione del materiale.

I capitoli seguenti sono così strutturati:

Capitolo 1: nel primo capitolo verrà esposta la composizione dell'ISM, e quella delle nubi candidate a diventare sistemi planetari: le nubi molecolari. Per queste ultime verranno evidenziate le caratteristiche fisiche e saranno anche trattate in modo più approfondito la composizione chimica e le stelle generatrici del mezzo (gas e particelle di polvere) della nube presolare. Saranno successivamente esposti i meccanismi di formazione degli aggregati di dimensione maggiore al sub micrometrico e come questi abbiano portato alla formazione delle pebbles, aggregati di particelle di polvere. Si passerà poi a discutere i meccanismi di accrescimento dei planetesimi, i corpi che compongono poi i pianeti, ma che principalmente sono fonti di studio in quanto si sono preservati in asteroidi e comete. Nell'ultima parte saranno descritti gli asteroidi e le comete, in quanto materia di studio di questa tesi.

Capitolo 2: nel secondo capitolo verranno invece proposte le missioni più interessanti che hanno avuto come oggetto di studio le comete: Giotto, Stardust e Rosetta, e gli eventuali strumenti utilizzati per la rilevazione delle somiglianze della polvere cometaria con il mezzo interstellare e la nube solare. Sarà quindi principale materia di questa tesi evidenziare quali sono state le caratteristiche osservate dalle analisi sotto vari aspetti: composizione, mineralogia, morfologia e distribuzione delle dimensioni.

Capitolo 3: nel capitolo conclusivo verranno comparate le diverse caratteristiche descritte nella tesi, e posto in evidenza cosa queste hanno comportato: la natura primitiva delle comete.

Capitolo 1

Il mezzo interstellare, disco protoplanetario e polvere cometaria

In questo capitolo parleremo del materiale di cui sono composte le nubi molecolari da cui si originano i sistemi planetari. Questo materiale è parte del mezzo interstellare (*Interstellar Medium*, ISM). Discuteremo poi dell'origine del materiale che compone la nube molecolare, e in modo particolare quella della nube molecolare presolare, collegandoci infine, nell'ultima parte del capitolo, alle evidenze osservative riguardanti il materiale presolare, descrivendone le componenti e i meccanismi di formazione.

1.1 Il mezzo interstellare e le nubi molecolari

La materia barionica nelle galassie si suddivide in due classi: le stelle che sono materiale condensato, e il mezzo interstellare (ISM) che è materiale più o meno diffuso, caratterizzato da zone di diversa densità, temperatura e composizione.

Nella nostra Galassia, come descritto in Wooden, Charnley e Ehrenfreund 2004, l'ISM comprende circa il 10% in massa della materia ordinaria in forma di gas, le cui principali componenti elementari sono 71% idrogeno, 28% elio, 0.9% altri elementi, e di particelle di polvere di varia dimensione. Esso forma un disco oblatto, con un raggio di circa 25-30 kpc ed altezza di scala verticale di circa 400-600 pc. In volume, circa l'1-2% è occupato da nubi interstellari discrete che contengono metà della massa totale dell'ISM e sono principalmente concentrate lungo i bracci a spirale della Galassia, ma anche presenti nelle regioni intermedie tra i bracci e l'alone, sopra e sotto il piano del disco galattico.

Le componenti principali dell'ISM possono essere suddivise in cinque grandi categorie, che come citato all'inizio, si differenziano per temperatura, densità e composizione: il mezzo ionizzato caldo (*Hot Ionized Medium*, HIM) anche detto gas coronale, il mezzo ionizzato tiepido (*Warm Ionized Medium*, WIM) che contiene atomi ionizzati di idrogeno (H^+) che in letteratura è anche citato come gas ionizzato diffuso (*diffuse ionized gas*, DIG), il mezzo neutro tiepido (*Warm Neutral Medium*, WNM) che contiene atomi neutri di idrogeno (H o H^0), mezzo atomico neutro freddo (*atomic Cold Neutral Medium* CNM)

che sono le nubi diffuse, il cui elemento principale è l'idrogeno, ma anche molecole di idrogeno H_2 e in fine il mezzo molecolare neutro freddo (*molecular CNM*) dominato dalle molecole di idrogeno H_2 e che forma le cosiddette nubi molecolari o nubi oscure. La temperatura delle singole componenti che dà il nome alla definizione di mezzo caldo tiepido o freddo, deriva dal bilanciamento energetico tra radiazione proveniente da Supernovae (radiazione UV e onde di materia che fanno collidere le componenti del mezzo) e radiazione dispersa dalla nube stessa verso l'ambiente esterno, e può variare da 1000 K per quelle più calde, fino a poche decine di K per quelle più fredde.

Le nubi molecolari sono caratterizzate da temperature basse (tra i 10 e 20 K (Wooden, Charnley e Ehrenfreund 2004) e densità di circa 10^3 particelle·cm⁻³, sufficiente affinché gli atomi allo stato neutro collidano tra essi creando molecole semplici e catene complesse.

Le caratteristiche ambientali di queste nubi sono favorevoli alla formazione di nuove stelle solo se unite alla condizione necessaria che la massa della nube sia $M > 0.8 M_\odot$.

Una caratteristica fondamentale della polvere è che, mentre il gas risulta essere trasparente in quasi tutto lo spettro di radiazione, ed assorbe solo in alcuni range, che corrispondono alle bande di assorbimento delle varie componenti elementali e molecolari di cui è composto (assorbimento settoriale), le polveri assorbono la radiazione incidente in modo inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda, risultando quindi opache nell'UV e trasparenti verso IR e Radio: esse sono quindi uno schermo per le molecole nella nube, e rimangono quindi inalterate dalla radiazione distruttiva proveniente dalle vicine stelle. Tuttavia i raggi cosmici possono penetrare nella nube, distruggendo atomi e molecole, creando così ioni ed elettroni che scaldano leggermente la nube (Irvine e Lunine 2004).

Le polveri contenute nella nube sono inoltre fondamentali per la loro capacità di essere substrati favorevoli alla creazione di molecole: la loro superficie infatti, essendo porosa permette ad atomi e molecole di attaccarsi, creando nuovi legami con altri atomi o molecole già ancorati alla superficie, o che vi si attaccheranno, come fossero dei catalizzatori. Quindi risultano essere una zona fertile per la creazione di catene di molecole complesse come l'acqua, il metano, ma anche idrocarburi policiclici aromatici (PAHs) e amminoacidi, che sono i componenti base per le proteine, unità fondamentali della vita.

1.2 Le origini del materiale presolare

Prendiamo ora in analisi la composizione della nube molecolare che ha formato il Sistema Solare, nell'epoca precedente alla formazione del sistema stesso. Durante la formazione del Sole e dei pianeti, nella fase di collasso gravitazionale, 4.6 miliardi di anni fa, il materiale della nube molecolare presolare è stato distrutto o fortemente alterato. Una piccola frazione di questo materiale si è però conservato all'interno di corpi minori del Sistema Solare, ovvero negli asteroidi e nelle comete. In Irvine e Lunine (2004) e di Testi et al. (2014) si discute come le polveri possono avere origine nei venti di stelle in evoluzione (AGB (*Asymptotic Giant Branch*)), nei getti rilasciati

dall'esplosione di Supernovae o nelle Novae.

Tramite l'analisi del materiale presolare, di dimensione > 100 nm e alle volte > 1 μ m (Hoppe, 2010), si è potuti risalire all'evoluzione e alla nucleosintesi delle stelle generatrici, alla formazione dei grani negli involucri stellari, alla chimica e fisica del mezzo interstellare e dei tipi di stelle che possono aver contribuito alla formazione delle polveri che componevano la nube molecolare che generò il Sistema Solare.

Le polveri analizzate si compongono di carburo di silicio (SiC), grafite, nitrato di silicio (Si_3N_4), ossido refrattario e silicati. Per determinare l'origine degli aggregati Hoppe (2010) si servì della composizione e del rapporto isotopico. Ecco di seguito i principali luoghi di formazione degli aggregati:

- **Stelle AGB.** Le stelle AGB sono stelle con massa iniziale minore di $10 M_{\odot}$, e che hanno attraversato la fase in cui hanno esaurito tutto l'idrogeno e l'elio nel nucleo. Basandosi sugli isotopi di carbonio, azoto e silicio, i grani contenenti SiC, aventi basso rapporto isotopico $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, ma alto rapporto isotopico $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$, e basandosi poi sulla componente di Alluminio-26 derivante da decadimento di Magnesio-26 ($t_{1/2}$ di $7 \cdot 10^5$ anni), si è visto come la stella generatrice di questa polvere dovrebbe essere una AGB di massa compresa tra $1,5$ e $3 M_{\odot}$. Inoltre, questo materiale riporta evidenti tracce di un'origine avvenuta negli strati interni alla stella e che sono stati portati in superficie tramite il processo di dredge-up (processo che miscela il materiale negli strati interni della stella e li trasporta poi verso quelli più esterni e/o in superficie). Altri studi sempre sulla componente di silicio, hanno rivelato che altre stelle generatrici potrebbero essere stelle AGB con metallicità tra $1/3$ e $1/2$ di quella solare (Hoppe, 2010).
- **Supernovae.** Grani con evidente componente di ^{12}C e ^{15}N , ma rapporti isotopici $^{29}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ e $^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ inferiori a quelli solari, mostrano un'origine da Supernova di Tipo II. Dalle tracce del decadimento di ^{44}Ti in ^{44}Ca ($t_{1/2}$ di 60 anni), e quello di ^{49}V in ^{49}Ti ($t_{1/2}$ di 330 giorni), invece si è dedotto che il materiale deve aver subito profondi ed eterogenei rimescolamenti nei getti della Supernova. Altri grani ancora mostrano una componente arricchita di isotopi di molibdeno arricchito (^{95}Mo e ^{97}Mo), spiegabile solo con un forte shock di materia ricca di elio (Hoppe, 2010).
- la componente di silicati ed ossidi, molto abbondante, che al contrario di altri materiali, vengono preservati nelle meteoriti, e si trovano inalterati al momento dell'analisi, si divide in quattro gruppi:
 - **Gruppo 1.**
70% arricchiti di ^{17}O , con rapporto isotopico $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ circa pari a quello solare: derivano da AGB con metallicità solare (Hoppe, 2010).
 - **Gruppo 2.**
15% fortemente impoveriti dell'isotopo ^{18}O , e scarso arricchimento di ^{17}O , sono formati da AGB di piccola massa, oppure è stata proposta la formazione in vento stellare di post-AGB e da nuclei di nebulose planetarie (Hoppe, 2010).

– **Gruppo 3.**

Molto raro, presentano scarso arricchimento di ^{16}O , le cui origini si possono trovare in stelle di piccola massa, bassa metallicità e in Supernovae (Hoppe, 2010).

– **Gruppo 4.**

10% arricchiti di ^{18}O e con scarso (o moderato) arricchimento di ^{17}O , provengono da SNII. In alcuni casi si è notato che in questi grani vi è un forte arricchimento di ^{17}O , e per questi corpi è stato proposto l'origine da novae (Hoppe, 2010).

Non tutti i grani di silicati ed ossidi trasportano l'isotopo ^{26}Mg : i Gruppi 1, 2 e 4 possiedono un rapporto isotopico $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ da circa 10^{-4} fino a 10^{-2} , mentre il Gruppo 3 ha valori tra 10^{-3} fino a 0.2, che è il risultato di un rimescolamento del materiale preso dalle regioni esterne convettive della stella, trasportato in regioni interne più calde dove viene riprocessato e riportato poi nelle regioni esterne (*cool bottom processing (CBP)*, meccanismo che altera le abbondanze superficiali).

1.3 La formazione del disco protoplanetario

La formazione del protosole e della nube solare è la conseguenza del collasso gravitazionale di una nube molecolare densa, avvenuta nella regione di formazione stellare della nostra Galassia. Il problema della conoscenza di questo evento deriva dalla difficoltà di comprensione delle leggi fisiche che lo governano e che risulta essere un'evoluzione caotica, ma possono essere stimate attraverso l'osservazione della formazione di altre nuove stelle, insieme alla creazione di modelli di evoluzione.

Con le osservazioni in banda millimetrica si sono potuti osservare gli strati interni delle nubi molecolari, rivelando che le principali componenti sono molecole gassose di idrogeno, elio ed altri elementi, tra cui anche composti come il monossido di carbonio (CO). L'osservazione ha rivelato inoltre che circa l'1% della massa della nube è composta da grani di polvere di dimensione del sub- μm , di cui circa 1% presenta elementi più pesanti dell'elio (Boss 2004).

Come specificato nell'articolo appena citato sopra, una delle condizioni iniziali per poter studiare come si è evoluta la nube solare, è quella di osservare il nucleo di nubi molecolari dense che non presentano corpi visibili in infrarosso, in quanto l'osservazione di questi oggetti corrisponde all'osservazione della luce riemessa in infrarosso dalla stella appena formata, ovvero l'osservazione della fase successiva, quando la nube è già collassata al centro originando la protostella.

I centri di nubi che entrano nella fase di precollasso hanno una temperatura che oscilla tra i 7 e i 15 K, ed una densità molecolare tra le 10^3 e le 10^5 molecole·cm $^{-3}$, e una massa che può andare da poco meno di 1 $M_{\odot}$ fino a circa 100 $M_{\odot}$ (Boss 2004). Da osservazioni di nubi molecolari in collasso, si è potuta ricavare l'andamento della densità secondo un profilo di simmetria sferico, che mostra come la densità verso il nucleo della nube assuma un profilo piatto, cosa che non ci si aspettava avvenisse nelle nubi in cui non si è ancora formata la stella (Bacmann et al. 2000), mentre andando verso l'esterno

decrese rapidamente, interpretabile con una legge di potenza. La forma della nube in collasso sembra essere complessa, tuttavia buone approssimazioni sono state fatte in modo geometrico, identificando come la forma più semplice e che meglio si adatta ai modelli sia quella di un ellissoide prolato (Curry 2002), e che mantiene il ricordo della natura filamentare della nube originaria.

La nube al proprio interno mostra poi un importante campo di velocità, che deriva da moti turbolenti causati dal forte vento stellare, dal flusso uscente e dal campo magnetico (Boss 2004). Questa dinamica interna fa sì che le particelle sperimentino delle velocità di deriva, che porta i corpi alla rotazione attorno all'asse centrale della nube. Si trova che i tipici tassi di rotazione sono inferiori al livello necessario affinché la rotazione contrasti l'autogravità. La presenza di un momento angolare torcente è necessario per la formazione del disco circumstellare supportato dalla forza centrifuga (Boss 2004). Dunque le nubi molecolari dense sono soggette all'autogravità, combinata all'effetto di moti turbolenti, al campo magnetico, alla pressione termica del gas e alla forza centrifuga. I moti turbolenti vengono dissipati in un tempo pari al tempo di caduta libera (tempo di freefall, che è pari al tempo che impiega una nube, inizialmente a densità omogenea, a collassare formando una stella), ed è dell'ordine di 0.1 milioni di anni. Tuttavia la nube non collassa in questo tempo in quanto durante la dissipazione della turbolenza, il campo magnetico diventa importante per contrastare l'autogravità. Il campo di forza dominato quindi dall'azione magnetica dipende dalla densità con una potenza pari a $1/2$ (Mouschovias 1991).

Oltre a questa evoluzione, che ancora non chiarisce del tutto la dinamica di evoluzione, le osservazioni hanno rivelato che alcuni eventi agevolano la formazione della nuova stella, come ad esempio i fronti d'onde di compressione ed espansione generati da Supernovae vicine in esplosione (Preibisch e Zinnecker 1999). L'azione di una Supernova vicina alla nube presolare è stata proposta come una probabile sorgente di isotopi con breve tempo di decadimento, come l'alluminio-26, che esistevano nella fase giovane della nube (Cameron e Truran 1977).

Iniziato il collasso nella zona interna alla nube iniziano ad apparire movimenti a velocità supersoniche, e presto si genera un primo nucleo otticamente spesso della dimensione di circa 10 UA. La pressione centrale è dominata da quella delle molecole di idrogeno, ma una volta raggiunta la temperatura di circa 2000 K, queste molecole vengono dissociate, facendo così collassare di nuovo il nucleo, finché non viene generata la stella effettiva in grado di contrastare il collasso. Questa stella continuerà ad accrescere la propria massa con la nube che ancora è in contrazione, per circa un altro milione di anni.

Il materiale delle regioni esterne, a seguito della diminuzione dei moti turbolenti, che hanno quindi dissipato in parte l'energia cinetica iniziale delle particelle di gas e polvere, del momento torcente applicato alla nube in collasso e della distribuzione di perturbazione delle densità non uniforme, tende a disporsi sul piano di equilibrio, formando il disco protoplanetario.

A questo punto, la polvere e il gas si trovano a ruotare sul piano del disco appena formatosi, ma con due velocità relative diverse, di conseguenza la polvere percepisce una frizione da parte del gas che non dipende solo dalle velocità relative, ma anche dalla dimensione delle particelle. Le particelle che si trovano entro qualche UA dalla stella e che possiedono una dimensione maggiore del libero cammino medio delle

molecole di gas, intrappolano quest'ultime sulla propria superficie ed accrescono la propria dimensione (Testi et al. 2014). Vedremo nella sezione che segue quali sono i meccanismi che portano alla formazione degli aggregati, partendo da particelle di polvere di dimensione del μm fino a ottenere corpi di qualche metro.

1.4 I meccanismi di formazione delle "pebbles"

Prima di descrivere i meccanismi di aggregazione delle particelle vediamo quali sono le cause che portano due corpi a collidere: per corpi di dimensione inferiore a quella di un planetesimo (dell'ordine del km), l'azione gravitazionale è ininfluente, in quanto la velocità tipiche delle particelle è molto superiore a quella di fuga, come osservato nell'articolo di Blum (2018), e quindi le aggregazioni devono avvenire secondo altri meccanismi.

Weidenschilling (1977) e Weidenschilling e Cuzzi (1993) determinarono che le particelle di dimensione tra 10 e 100 μm collidono secondo le meccaniche del moto browniano, con una velocità tipicamente di circa $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Invece aggregati con dimensioni maggiori sono soggetti ad un sistematico movimento di drift dovuto al diverso accoppiamento con il gas: per questo motivo, particelle di dimensioni diverse hanno anche velocità diverse, e ciò porta ad urti tra le due classi di oggetti.

Una seconda causa di collisioni tra particelle è la sedimentazione delle particelle verso il piano del disco. Questo meccanismo è molto meno efficace allontanandosi dal piano del disco, e quando la densità del gas è più bassa. La terza causa, che permette l'evoluzione degli aggregati di polvere, è la presenza di turbolenze, che spinge le particelle a collidere. Dopo aver definito quali sono le possibili cause che portano le particelle a collidere, analizziamo i diversi tipi di urti che possono avvenire tra differenti tipi di particelle. Notiamo che, a seconda della dimensione delle due particelle che interagiscono, e a seconda delle loro velocità relative collisionali, si possono avere differenti tipi di urti:

Collisione tra particelle di dimensioni paragonabili

- **Incollamento.** Questo meccanismo avviene quando l'energia di collisione è minore delle forze di Van der Waals, ovvero a velocità inferiori di $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Güttler et al. 2010), e porta alla formazione di aggregati con diverse dimensioni frattali, ovvero sono più o meno compatti, a seconda della velocità di impatto.
- **Rimbalzo.** Avviene quando la quantità di energia dissipata non è sufficiente per incollare le due particelle (a velocità dell'ordine dei $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), ma nemmeno per far sì che si distruggano nella collisione; questo meccanismo porta alla graduale compattazione del materiale dei granuli.
- **Frammentazione.** A velocità superiori dell' $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, porta alla distruzione degli aggregati che collidono. Tanto maggiore era la velocità dell'aggregato

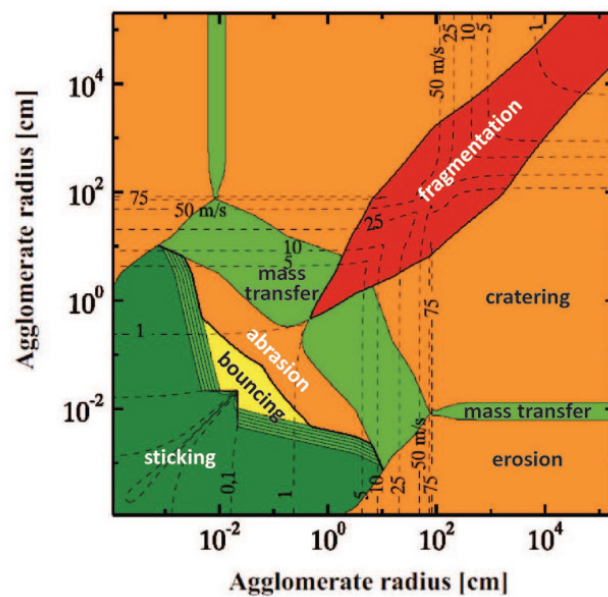


Figura 1.1: Meccanismi di aggregazione in base alla dimensione dei corpi che interagiscono, la cui dimensione è esposta sugli assi in cm. Linee tratteggiate: velocità di impatto

più grande che collide, tanto minore sarà la sua massa dopo l’urto, mentre la pendenza tra la distribuzione della dimensione dei frammenti e la velocità, segue una legge di potenza.

- **Abrasione.** Particelle a bassa velocità (sotto la soglia di quella di frammentazione, ma sopra a quella di rimbalzo) che collidono con aggregati simili, sono soggette a una graduale perdita di massa. Non si verifica sotto i 0.1 m/s, ma generalmente diventa più efficace con l’aumento di velocità. (Kothe) (2016) osservò che l’abrasione è un meccanismo debole nel complesso in quanto occorrono 1000 collisioni per frammentare l’aggregato.

Proiettile di piccole dimensioni contro target di grandi dimensioni

- **Trasferimento di massa.** Sopra al limite di frammentazione (velocità superiore a $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), il proiettile trasferisce in modo permanente dopo l’urto parte della sua materia sul target, accrescendone così la massa. L’efficienza di questo meccanismo arriva fino al 50%.
- **Creazione di crateri.** Con una velocità simile a quella del trasferimento di massa, il proiettile di dimensioni maggiori, impattando con il target, fa perdere a questo materia, lasciando come segno dei crateri. La massa persa dal target è funzione della velocità d’impatto del proiettile.
- **Erosione.** Simile al meccanismo che forma crateri sul target, ma con dimensioni del proiettile minori. L’effetto dell’erosione aumenta con l’aumentare della velocità d’impatto, ma diminuisce con l’aumentare delle masse che collidono. Questo meccanismo è stato osservato nelle collisioni tra particelle di

ghiaccio, di cui quella con dimensioni minori (proiettile) aveva dimensione del micrometro.

Güttler et al. (2010) presentarono il primo modello collisionale completo, distinguendo collisioni tra oggetti di dimensioni simile, e tra oggetti di dimensioni differente. Questo tipo di analisi è stata svolta su particelle micrometriche di monomeri di silicio. Tuttavia, lo studio si complica se si considerano specie chimiche diverse, con diverse abbondanze, diverse dimensioni e altre condizioni ambientali delle particelle che formeranno gli aggregati. Altri studi si sono svolti tenendo conto della temperatura dell'ambiente circostante, della presenza di ghiacci o della presenza di materiale organico, e quindi avendo delle modifiche che comportavano una mutazione della viscosità del materiale entro cui le particelle erano immerse e quindi rendono più o meno efficaci i meccanismi di evoluzione del materiale.

1.5 Planetesimi e meccanismi di formazione

Dopo aver descritto i meccanismi che portano all'accrescimento degli aggregati nel disco protoplanetario in formazione, il sistema è quindi pronto a formare planetesimi. Secondo l'articolo di Blum del 2018, esistono tre meccanismi che portano all'aggregazione di corpi maggiori (planetesimi) e che descriveremo in questo capitolo.

Collasso gravitazionale debole

Se la maggior parte della polvere è composta da materiale composto da silicio, allora il processo di aggregazione porta alla formazione di oggetti compatti, di dimensione del millimetro e del centimetro, se prima si è avuto un processo di collisione mediante "in-collamento" e "rimbalzo" tra aggregati frattali. Dopo questa prima fase di aggregazione, l'accrescimento è inibito dalla barriera di rimbalzo. La dimensione degli aggregati che ne risulta, dipende da:

- il numero di masse solari della nube iniziale;
- la distanza radiale dalla stella;
- la composizione della polvere.

Se consideriamo un aumento della distanza dalla stella, e aumentiamo il rapporto polvere-ghiaccio, si otterrà una minore dimensione massima dei grani (Lorek et al. 2017). Inoltre, gli aggregati più leggeri si allontaneranno dalla stella centrale. Sotto le condizioni che il numero di Stokes dei "pebbles" sia compreso tra 10^{-3} e 5 (Yang, Johansen e Carrera, 2017), che la metallicità del disco protoplanetario sia maggiore del valore di soglia della dipendenza dal numero di Stokes, e che il rapporto polvere-gas sia maggiore dell'unità, allora la streaming instability può concentrare, in alcune regioni, la nube di aggregati fino a farla collassare e formare planetesimi. Tuttavia perché questo meccanismo si attivi deve esserci una certa metallicità, ovvero un certo rapporto polvere-gas, che permetta ai "pebbles" di accumularsi in una data regione ove

poi si formerà il planetesimo; in questo modo, per la formazione del corpo maggiore, la regione di formazione deve impoverirsi del materiale gassoso, aumentando così la metallicità. È inoltre richiesta una certa pre-concentrazione di "pebbles".

Crescita per collisione

Dopo il raggiungimento della barriera di rimbalzo, il divario tra i meccanismi di frammentazione, trasferimento di massa e formazione di crateri viene superato. Il proiettile, formato con un processo distruttivo, trasferisce in modo costante la propria massa, andando così a formare una planetesimo. I corpi che si creano in questo modo sono aggregati compatti.

Formazione consistente con particelle sub-micrometriche di ghiaccio d'acqua

Esistono due grossi ostacoli che limitano l'accrescimento dei planetesimi: la bassa velocità sufficiente alla transizione dal meccanismo di adesione a quello di rimbalzo, che limita la dimensione degli aggregati, e la bassa energia di collisione richiesta per la compattazione. Nel modello di formazione dei planetesimi di Kataoka et al. (2013), viene assunto che il materiale di aggregazione sia dominato da particelle di ghiaccio d'acqua appiccicose, e che la dimensione radiale delle particelle progenitrici sia di $0.1 \mu\text{m}$. Si è calcolato che le zone in cui questo meccanismo produce aggregati di ghiaccio, sia a 5 UA e 8 UA. Dopo l'iniziale fase di aggregazione di frattali, segue un'azione di accrescimento dovuta alla pressione del gas e all'autogravità. Da simulazioni, si è ottenuto che le dimensioni dei nuovi aggregati di ghiaccio hanno un raggio di circa 10 km e densità di massa di circa 0.1 g/cm^{-3} . Lo studio di Krijt et al. (2015) relativo all'importanza dell'erosione degli aggregati di ghiaccio ha portato all'idea che questo effetto limiti l'accrescimento degli aggregati, se la soglia di erosione è inferiore alle velocità relative tipiche tra grandi e piccoli aggregati.

Ognuno dei modelli sopra descritti è soggetto a differenti proprietà del mezzo, e porta alla formazione di planetesimi che meglio si adeguano a questi scenari, con proprietà differenti, le quali comprendono la dimensione dei planetesimi risultanti, la frazione di volume occupato effettivamente dalla materia, la forza di tensione che tiene uniti gli aggregati nel corpo maggiore, la forza delle collisioni, la resistenza del flusso del gas e la conduttività termica.

In questo modo si è osservato che il meccanismo di accrescimento tramite gravitazione è valido solo per planetesimi di piccola dimensione, perché solo in questo modo i "pebbles" possono sopravvivere dopo il collasso gravitazionale, mentre per planetesimi di dimensione di circa 10 km è previsto come meccanismo di accrescimento simile a quello del trasferimento di massa (Blum 2018).

A questo punto, sul disco protoplanetario, seguendo meccanismi differenti, si ottiene che i "pebbles" si accorpano in strutture di dimensioni maggiori, più o meno compatte, che raggiungono dimensioni di qualche decina di km: queste aggregazioni prendono il

nome di planetesimi. La loro dimensione è ora sufficiente per seguire un accrescimento dominato dalla gravità: i planetesimi dunque attirano a sé particelle di polvere e gas rimasti, ripulendo il piano del disco protoplanetario, accrescendosi in massa, e formando veri e propri pianeti. Notiamo che, questi oggetti tendono ad accorparsi sul piano mediano del disco: è un effetto dovuto al loro aumento di massa. Infatti, sopra (e sotto) al piano del disco, la pressione tende a diminuire, e prevale la gravità, che porta quindi i planetesimi a disporsi sul disco (Blum e Wurm del 2008): vi è in questo modo una distinzione tra corpi leggeri, della dimensione del millimetro e del centimetro, che fluttuano sopra al piano, e che rendono il sistema otticamente spesso e non indagabile in IR, e i corpi pesanti, che tendono per gravità a depositarsi sul piano.

1.6 Le comete, la nube di Oort e il Disco Diffuso

Vedremo in questa sezione quali sono due resti della formazione dei planetesimi ovvero le comete, e le strutture che attualmente le ospitano: la nube di Oort e il Disco Diffuso.

Le comete sono corpi la cui dimensione può andare dal m fino a diversi km, composte da materiale refrattario, come silicati, e materiali volatili ghiacciati come clatrati di metano, di monossido di carbonio ed acqua. La composizione non è stratificata, ma i due tipi di materiali si trovano mescolati gli uni agli altri anche a diverse profondità, come osservato nella cometa 9P/Tempel 1. Su tale cometa, la sonda della missione Deep Impact ha osservato, a decine di metri di profondità, la presenza di ghiacci (di dimensione $1\ \mu\text{m}$): questo dimostra come le comete si siano generate nella nube solare ad una distanza tale da preservare allo stato solido i materiali volatili (Swamy 2010). Oltre le componenti inorganiche sono stati rivelati composti organici, come la formaldeide, e la glicina, un amminoacido (Levasseur-Regourd et al. 2018). Quest'ultimo è di certo la scoperta più interessante in quanto permette la speculazione sulla creazione delle basi della vita su altri corpi celesti. Sulla cometa 1P/Halley, la sonda Vega ha osservato una composizione simile a quella solare, indice del fatto che le comete sono antiche.

Le comete si possono dividere in due tipologie basandosi sulla loro orbita: le comete a corto periodo (inferiore a 200 anni), con afelio oltre l'orbita di Giove, che si pensa provengano dal Disco Diffuso, e le comete a lungo periodo (maggiore a 200 anni), con afelio oltre la regione dei pianeti esterni e che invece derivano dalla nube di Oort. La presenza dei pianeti gassosi comporta delle perturbazioni per le orbite delle comete, che possono stabilizzarsi, come per le comete a corto raggio che fanno parte della famiglia di Giove. Tutte le comete che sono state materia di studio di questa tesi sono comete periodiche, come indicato dalla "P" nella sigla del nome di ogni cometa.

La già citata nube di Oort è una nube di comete di forma sferica che si estende tra $20 \cdot 10^3$ e $100 \cdot 10^3$ UA dal Sole. Essa venne teorizzata per spiegare l'origine delle comete nella regione esterna della nube solare, ovvero le comete a lungo periodo.

Il disco Diffuso è una struttura composta da corpi ghiacciati, nella regione periferica del Sistema Solare. Si ritiene che i corpi che compongono questo disco provengano

dalla fascia di Kuiper e che a causa dell'interazione gravitazionale con i corpi maggiori del Sistema Solare, in particolar modo Nettuno, abbiano subito una deviazione della loro orbita. Le orbite dei corpi che compongono il Disco Diffuso sono instabili e tendono a portare questi corpi verso l'esterno del Sistema Solare, verso la nube di Oort. Secondo il modello di Nizza, che teorizza l'evoluzione del Sistema Solare nel periodo successivo alla dispersione del disco protoplanetario, la nube di Oort e il Disco Diffuso sono una conseguenza della migrazione dei pianeti giganti gassosi Giove, Saturno, Urano e Nettuno. Secondo questo modello, gli oggetti che si trovavano vicino a Giove, per effetto delle perturbazioni del pianeta in migrazione, vennero scagliati verso l'esterno, a formare quella che attualmente è la nube di Oort, mentre quei corpi che si trovavano vicino a Nettuno anch'esso in migrazione, interagendo con esso vennero lanciati verso la zona che ora è il Disco Diffuso (Levison et al. 2008). Sarà materia del prossimo capitolo lo studio più approfondito sulle comete e sulle missioni che hanno permesso di ampliare la conoscenza su di esse.

Capitolo 2

Le comete e la missione Rosetta

All'inizio di questo capitolo sarà esposta la missione Rosetta e due delle più importanti missioni che l'hanno preceduta: Giotto e Stardust. Sarà poi dedicato l'intero capitolo ai dati e alle scoperte ottenute da queste missioni.

2.1 Missioni Giotto, Stardust e Rosetta



Figura 2.1: Rappresentazione artistica della sonda Giotto.

La missione Giotto è stata una missione dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), volta allo studio della cometa 1P/Halley. Venne approvata nel 1980 dall'Agenzia, lanciata con un razzo Ariane 1 il 2 luglio del 1985 da Kourou (Guyana francese). Il programma di ricerca comprendeva due sonde sovietiche (Vega 1 e Vega 2), due sonde giapponesi (Sakigake e Suisei) e dalla sonda Giotto dell'ESA. Erano previste anche due sonde americane, che vennero però annullate dall'National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Tra gli strumenti a bordo di Giotto vi erano telecamera, spettrometri di massa, misuratori di impatto e di energia e analizzatori di ioni.

Il 4 marzo del 1986 Vega 1 fornì le prime immagini della cometa, svolgendo il proprio

flyby il 6 marzo, mentre quello di Vega 2 avvenne il 9 marzo. Il flyby di Giotto avvenne il 13 marzo, ad una distanza di 596 km dal nucleo della cometa, a 0.89 UA dal Sole e 0.98 UA dalla Terra.

Successivamente venne fatta tornare verso la Terra per un campionamento del campo magnetico terrestre, per poi lanciarla verso la cometa 26P/Grigg-Skjellerup, che raggiunse ad una distanza di 200 km il 10 luglio 1992, quando era ad una distanza di 1.01 UA dal Sole e 1.43 UA dalla Terra.

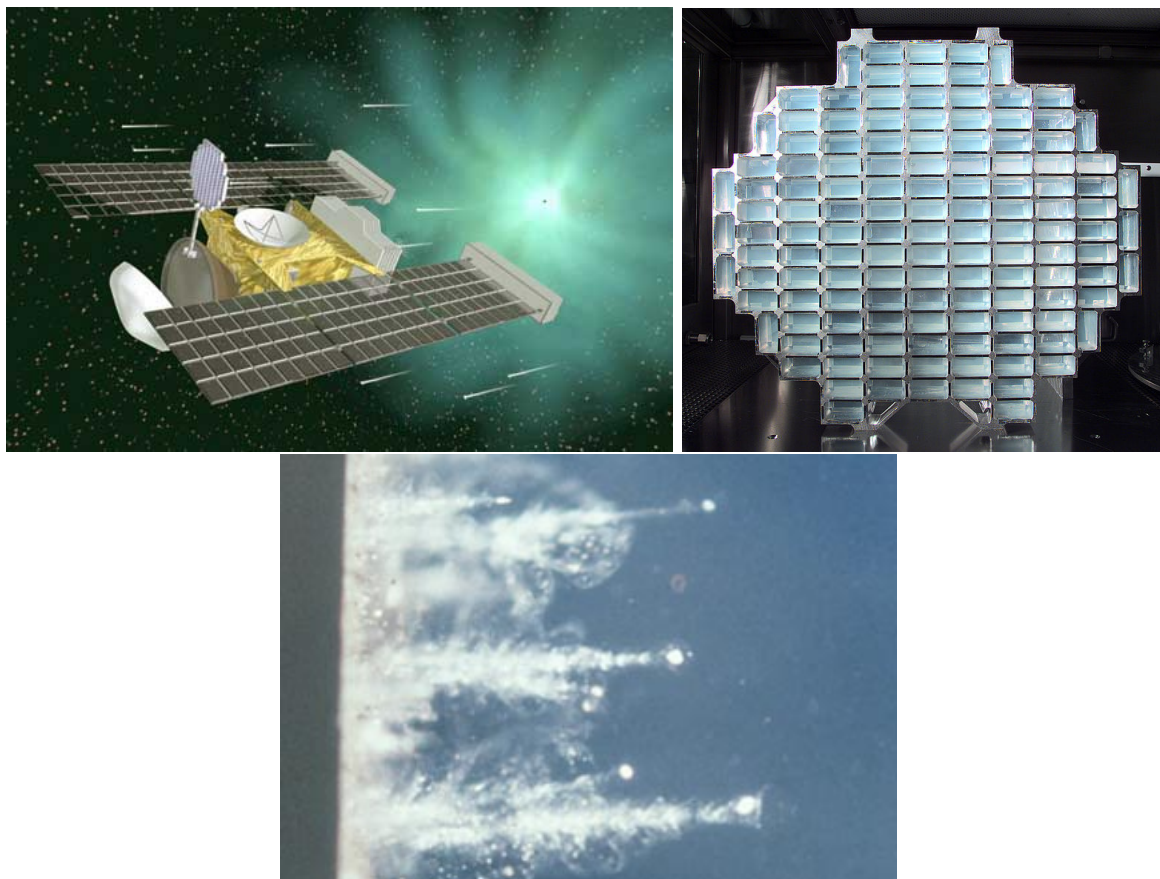


Figura 2.2: Alto sinistra: rappresentazione artistica della sonda Stardust, con in risalto il pannello di raccolta in aerogel. Alto destra: il pannello di aerogel utilizzato per la cattura delle particelle di polvere. Basso centro: particelle di polvere intrappolate nell'aerogel nella quale si osserva in modo chiaro la frammentazione del materiale.

La missione Stardust è una missione della NASA, che oltre all'analisi della cometa 81P/Wild 2 aveva il compito di raccogliere materiale della polvere cometaria, ed inviarlo a terra in una speciale capsula. Venne lanciata nel 1999 con il razzo Delta II, e grazie all'effetto fionda gravitazionale raggiunse la cometa, effettuando un flyby, il 2 gennaio del 2004.

Oltre alla raccolta dati su 81P/Wild 2, Stardust compì un flyby a 3300 km sull'asteroide 5535 Annefrank il 2 novembre 2002, e una raccolta di materiale interstellare.

Dopo l'invio del materiale a terra, la missione Stardust venne prolungata come Stardust NExT, con l'obiettivo di un sorvolo ravvicinato della cometa 9P/Tempel, già obiettivo di un'altra missione (Deep Impact). Il sorvolo avvenne il 14 febbraio del

2011 e durò fino al 24 marzo dello stesso anno. In seguito la sonda venne disattivata dopo essere stata posta su di un'orbita di sicurezza.

Lo strumento per cui è famosa Stardust è il raccoglitore in aerogel, composto da un pannello composto di celle rettangolari riempite con ossido di silicio avente una struttura spugnosa, con un'alta percentuale in volume di vuoto (immagine a destra della figura 2.2). Grazie a questo materiale, le particelle che impattano con l'aerogel, affondano nel materiale spugnoso e ne rimangono intrappolate. Questo particolare strumento ha permesso di portare materiale a terra per poter essere studiato. Tuttavia, sebbene questo nuovo modo di affrontare il problema dell'analisi della polvere cometaria fosse portasse un grande avanzamento nello studio diretto della polvere, esso presentò diversi problemi in quanto le particelle catturate, apparivano alterate dall'impatto con l'aerogel, risultando mutate sia nella composizione elementare, che talvolta venne trascurata, sia nella morfologia, in quanto le particelle risultavano esplose o frammentate, come mostrato nella figura 2.2.

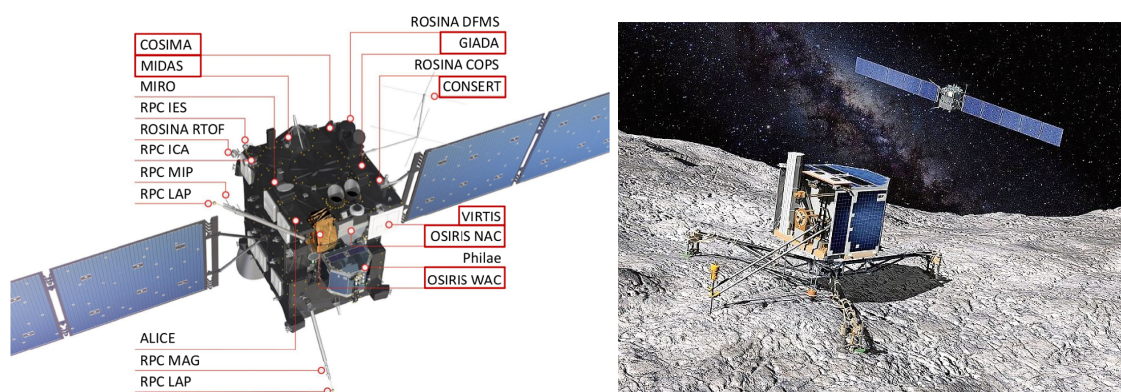


Figura 2.3: A sinistra: la sonda Rosetta con evidenziati i vari strumenti a bordo. A destra: rappresentazione artistica della sonda Rosetta e del lander Philae atterrato sulla cometa 67P/C-G.

La missione Rosetta è una missione dell'ESA, che aveva come obbiettivo lo studio della cometa della famiglia di Giove 67P/Churyumov-Gerasimenko. Il lancio viene effettuato il 2 marzo del 2004, un anno in ritardo a causa di problemi con il vettore Ariane 5+. Dopo dieci anni di volo, Rosetta arriva a 100 km dal suo obiettivo il 6 agosto del 2014, ed inizia a sondare la superficie della cometa alla ricerca di una zona adatta all'atterraggio del lander Philae, che avverrà il 12 novembre dello stesso anno, dopo un volo durato circa 7 ore, in condizioni difficili. Tra il 14 e il 15 novembre, il lander viene messo in ibernazione e riattivato il 14 giugno del 2015.

Il 30 settembre del 2016 Rosetta viene fatta impattare sulla superficie della cometa, e definitivamente spenta.

Gli strumenti che Rosetta aveva a bordo comprendevano:

- LANDER PHILAE, strumento lanciato sulla superficie della cometa, ed utilizzato per l'analisi della superficie. Venne preferito lo studio in situ del materiale cometario in quanto il rientro a terra di una capsula, come per Stardust, era troppo costoso. Tra gli strumenti a bordo del lander c'erano:
 - CONSERT (Comet Nucleus Sounding Experiment by Radiowave Transmission) è un radar bistatico posto sia su Rosetta che su Philae che misura la

porosità e la dimensione dei vuoti all'interno dei nuclei (dei due lobi) a diversi metri di profondità.

- COSAC (Cometary Sampling and Composition experiment), per l'analisi della composizione del gas.
- COSIMA (Cometary Secondary Ion Mass Analyser) che raccoglie e analizza con uno spettrometro di massa la composizione della polvere e la dimensione delle particelle con un microscopio COSISCOPE di risoluzione $14\text{ }\mu\text{m}$. Con questo strumento si ottengono dunque informazioni sulla composizione elementale ed isotopica della polvere, sulla composizione molecolare e le caratteristiche morfologiche, di particelle che vanno da una dimensione di $14\text{ }\mu\text{m}$ fino a $10^2\text{ }\mu\text{m}$.
- GIADA (Grain Impact Analyser and Dust Accumulator) che misura la sezione d'urto ottica, velocità e momento di particelle con dimensione da 0.1 a 1 mm ed accumula il flusso di particelle di dimensione minore di $5\text{ }\mu\text{m}$. Quindi con questo strumento si ottengono informazioni sulla proprietà fisica delle particelle in tempo reale (momento, velocità e sezione d'urto), e attraverso il flusso delle particelle e la loro massa, si comprendono la forma, la densità e il luogo di formazione nel nucleo, previa opportuna calibrazione con dati di laboratorio.
- MIDAS (Micro-Imaging Dust Analysis System) che comprende un microscopio a forza atomica per misurare la forza di Van der Waals, e una camera che produce immagini 3D della superficie, con un range da 10 nm a $1\text{ }\mu\text{m}$. In questo modo vengono determinate dimensione, forma e morfologia delle particelle.
- OSIRIS (Optical Spectroscopic and Infrared Remote Imaging System), un sistema di camere scientifiche, che produce immagini per l'indagine della polvere e dei detriti, di dimensioni variabili e a distanza dalla sonda variabile. L'osservazione è svolta sia sul nucleo che sulla chioma, con filtri diversi. Per il materiale della chioma (gas e particelle di polvere) vengono così ottenuti anche dimensione, velocità, tasso di rotazione, colore e funzione di fase.
- ROSINA (Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis) composto da due spettrometri di massa e un sensore di pressione, per l'analisi della temperatura, della velocità di gas e ioni, della densità e del flusso del gas.

2.2 I risultati prima e dopo la missione Rosetta

Vediamo adesso cosa è stato scoperto dagli studi precedenti alla missione Rosetta e dopo di questa. Ci concentreremo su quattro fattori fondamentali per lo studio

delle polveri: composizione, morfologia, mineralogia e dimensione. Questi fattori permettono di definire le condizioni fisiche e chimiche della loro formazione.

2.2.1 La composizione

Lo studio della composizione chimica degli oggetti del Sistema Solare permette di definire quanto l'oggetto sia primitivo rispetto alla formazione del Sistema. Il punto di riferimento per definire quanto antico sia un oggetto nel Sistema è la composizione della fotosfera solare, che ha composizione molto simile a quella della nube solare.

Dallo studio di meteoriti, si è osservato che, le Condriti Carbonacee (CI) sono gli oggetti più primitivi: chimicamente hanno elementi con un'abbondanza entro il 10% rispetto a quella solare (Lodders del 2010), eccetto per gli elementi leggeri (H, C, O, N) ed i gas nobili, che mostrano un'abbondanza inferiore, e quindi dimostrano come le condriti si siano formate nella zona interna del Sistema Solare, ad una temperatura maggiore. Viceversa, ci si aspetta che le comete si siano formate nella zona più esterna del Sistema Solare, a più basse temperature, e quindi presentino un'alta abbondanza di elementi leggeri, rispetto alle CI e più simile alla fotosfera solare.

Prima della missione Rosetta, le missioni Giotto e Vega 1 fornirono i primi risultati sulla composizione della cometa 1P/Halley: essa era formata da un mix di materiale composto da silicati ed organici (Lawler e Brownlee del 1992). Rispetto alle condriti CI, la polvere della cometa era arricchita di H, C e N, e quindi molto meno alterata e molto più primitiva (Jessberger, Christoforidis e Kissel del 1988).

La missione Stardust, grazie allo studio svolto con lo spettrometro di massa sulla chioma della cometa 81P/Wild 2, rivelò l'importanza della componente organica nel materiale cometario mentre lo studio del materiale intrappolato nell'aerogel riportato a terra dalla capsula, risultarono inconcludenti: il materiale risultava alterato dall'urto ad alta velocità ($6.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) con l'aerogel, e quindi non adatto alle analisi chimiche e fisiche (Brownlee 2014; Keller et al. 2006; Sandford et al. 2010). Non vennero rivelati elementi come C ed N, e le misure fatte sugli elementi volatili come S dimostrarono un'apparente vaporizzazione e ridistribuzione in un alone attorno alla traccia lasciata dalla particella nell'aerogel. Ciò che si riuscì ad osservare dagli altri elementi era che le particelle di polvere così modificate erano apparentemente simili alle condriti CI (Ishii et al. 2008; Flynn et al. 2006; Ishii et al. 2008; Lanzirotti et al. 2008; Leroux et al. 2008; Stephan et al. 2008).

La missione Rosetta ha avuto come obiettivo 67P/Churyumov-Gerasimenko (67P/C-G) che fa parte delle comete della famiglia di Giove (JFC). La raccolta di particelle di polvere, svolta a diverse distanze dal nucleo cometario e dal Sole, ha rivelato l'esistenza di differenti classi morfologiche.

Per lo studio della composizione è stato utilizzato lo strumento COSIMA, che ha collezionato per 26 mesi particelle di polvere di dimensione variabile dai 10 ai 1000 μm (Merouane et al. 2017). La velocità d'impatto di queste particelle con lo strumento era minore di $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Rotundi et al. 2015), quindi molto inferiore rispetto agli impatti

tra particelle e il pannello di aerogel di Stardust, e di conseguenza la composizione chimica e la struttura fisica è stata preservata il più possibile per le analisi, a differenza di quanto accaduto per la precedente missione. I risultati ottenuti da COSIMA hanno confermato che, la cometa presenta una rozza similitudine con le condriti, fatta eccezione per le abbondanze di C e N, e che a grandi linee conferma quanto ottenuto per le comete 1P/Halley e 81P/Wild 2: l'abbondanza di C/Si è molto simile a quella protosolare (C/Si per le CI è molto inferiore) (Lodders 2010), mentre per quanto riguarda l'abbondanza di N/C la cometa presenta somiglianza con le condriti CI, e risulta molto impoverita rispetto alla condizione protosolare (Fray et al. 2017; Lodders 2010; Alexander et al. 2012).

Altri elementi sono stati misurati, come Si, Na, Ca ed Mg e sono riportati nella figura 2.4: essi mostrano come le comete 67P/C-G e 1P/Halley abbiano simile composizione per quanto riguarda gli elementi Si e Na, ma l'abbondanza di Ca ed Mg in 67P/C-G è inferiore, e non è ancora stato compreso il motivo.

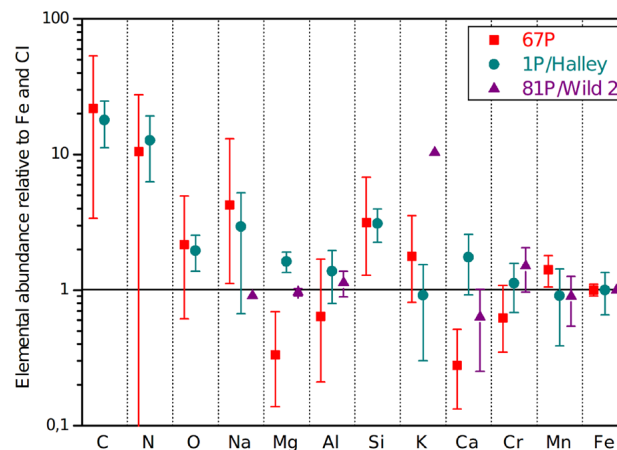


Figura 2.4: Comparazione delle abbondanze osservate nelle tre comete 67P/C-G, 1P/Halley e 81P/Wild 2. Da notare l'assenza del dato di comparazione della cometa 81P/Wild 2 nelle abbondanze di C, N, O, Na ed Si, probabilmente dovuto alla non accettabilità dei dati risultanti dalle particelle catturate dall'aerogel.

Quindi i risultati mostrano come vi sia una possibile composizione omogenea della polvere dei nuclei, e come le tre comete analizzate sembrano avere un'origine comune da corpi primitivi che globalmente avevano abbondanze solari, fatta eccezione per quanto riguarda l'abbondanza del N che anche se arricchito nelle CI, esso è fortemente impoverito per quanto riguarda l'abbondanza solare.

2.2.2 La mineralogia

La mineralogia è l'analisi della componente inorganica della polvere. Uno dei primi studi sulla mineralogia, che ha portato a dati utili è stato fatto con lo Spitzer Space Telescope (SST) che in banda infrarossa ha osservato i getti di materia della cometa 9P/Tempel 1 (Lisse et al. 2006), in modo tale da identificare i silicati presenti e le loro relative proporzioni, grazie alla comparazione con dati di laboratorio. In questo modo si è osservato che il 18.2% delle emissioni proviene da forsterite (minerale silicatico

con ioni silicatici separati), 10% da silicati amorfi, 18.8% da solfuro di magnesio e di ferro, 8.2% da argilla, 6.8% da diopside (pirossene della famiglia dei inosilicati), 5.9% orto enstatite, 5.0% da fayalite (complementare alla fosferite, basato sulla quantità di ferro-magnesio), 4.7% da carbonati, 40% da carbonio amorfo, 2.3% da idrocarburi policiclici aromatici (PAHs) ionizzati, e 2.9% da cristalli di ghiaccio d'acqua ed il restante acqua gassosa (Lisse et al. 2006).

La capsula contenente il raccoglitore di Stardust ha portato a terra particelle di polvere cometaria di dimensioni da meno di 1 μm a 100 μm (Brownlee 2014), permettendo uno studio accurato diretto sul materiale della cometa 81P/Wild 2. Il materiale refrattario ha mostrato una lieve alterazione dovuta alla cattura nell'aerogel avvenuta a velocità elevate, come descritto prima, ma anche per una conseguente interazione dello stesso aerogel, tuttavia il 5% della raccolta studiata fino ad ora mostra:

- circa metà dei silicati di 81P/Wild 2 è in forma cristallina, mentre quasi tutti i silicati di origine interstellare sono amorfo (Westphal et al. 2009; Stodolna et al. 2014).
- tra i minerali cristallini i più abbondanti sono olivine, pirosseni e solfuri di ferro.
- circa 1% delle particelle sono assemblaggi di materiale refrattario che ricorda le inclusioni di calcio-alluminio (CAIs) delle meteoriti condriti, che potrebbero essere condensate ad alte temperature e potrebbero essere stati i primi solidi a formarsi nelle zone fredde interne alla nube solare (Brownlee et al. 2006; Zolensky et al. 2006; Joswiak et al. 2017).
- nel materiale refrattario si sono osservate tracce del raffreddamento del materiale dopo una fusione: vagamente ricordano le condrule trovate nelle meteoriti condriti. Questo materiale al quale ancora non si sa dare un'origine, non ha certamente avuto una la stessa origine delle CAIs, in quanto dalla datazione dell'alluminio-26, esso sembra più giovane delle CAIs di un milione di anni. (Ogliore et al. 2015; Nakamura et al. 2008; Kööp et al. 2016; Gainsforth et al. 2015).
- le particelle raccolte nell'aerogel mostrano una struttura granulare fine, ed i monomeri di questa matrice hanno dimensione inferiore al μm . Questa struttura durante l'impatto con l'aerogel non si è preservata bene, ma dalle tracce dell'impatto nell'aerogel si è osservata la presenza di olivine, pirosseni e solfuri di ferro, molto simile alla composizione delle CI (Leroux et al. 2008; Leroux 2012; Leroux e Jacob 2013).
- sono state osservate particelle di metalli ferro-nichel insolite, almeno fino a una dimensione di 20 μm : ricordano le meteoriti ureiliti, meteoriti composte da materiale proveniente dalla fusione di silicati, in un ambiente arricchito di carbonio (Westphal et al. 2012; Humayun et al. 2015).
- una piccola quantità di materiale, risultato di una alterazione acquosa, è stata identificata nei campioni della cometa, come magnetite (Stodolna, Jacob e Leroux 2012), carbonati (Flynn 2008; Flynn et al. 2009; Mikouchi et al. 2007; Wirick et al. 2007; Leroux 2012), cubanite, associati con pyrrhotite e pentlandite (Berger et al.

2011). Non sono stati però trovati silicati idrati, ovvero questo materiale non ha subito alterazione acquosa, cioè non ha sperimentato la presenza di acqua allo stato liquido durante la sua formazione.

Da questi dati risulta evidente che i processi di formazione devono essere stati molto complessi, producendo forse anche una vaporizzazione e ricondensazione del materiale della nube solare nelle regioni interne, che ha trasformato il materiale interstellare in nube e polvere cometaria.

Nella 81P/Wild 2 sono evidenti le tracce di una composizione simile a quella dell'interno del Sistema Solare, tuttavia sono presenti anche delle evidenti discrepanze con le meteoriti:

- la dimensione degli aggregati cristallini è significativamente inferiore a quella nelle meteoriti (micro-CAIs, micro-condrulle).
- le micro CAIs trovate nella cometa non coprono l'intero intervallo di volatilità delle CAIs trovato invece nelle meteoriti, ma sono concentrate alla fine della distribuzione, dove sono molto più volatili (Joswiak et al. 2017).
- le microcondrulle della cometa sono molto arricchite di Fe-O come le condrulle di tipo II, mentre nelle meteoriti sono prevalenti le tipo I, povere di Fe-O (Nakamura et al. 2008; Gainsforth et al. 2015).
- le olivine trovate nella cometa mostrano un'origine in un largo campione di materiale del disco protosolare (Frank, Zolensky e Le 2014).
- nella cometa il pirossene è abbondante quanto l'olivina, in contrapposizione con le condriti carbonacee dove domina l'olivina.
- poche particelle presolari sono state trovate in 81P/Wild 2, ma potrebbe essere un errore di raccolta, in quanto l'aerogel può aver distrutto il materiale presolare raccolto (Floss et al. 2013; Croat et al. 2015). Tenuto conto di questo errore, l'abbondanza di materiale presolare è stata stimata a 600-800 ppm, compatibile con il materiale del Sistema Solare primitivo (McKeegan et al. 2006; Stadermann et al. 2008; Messenger et al. 2009; Floss et al. 2013; Leitner, Hoppe e Heck 2010, 2012).
- lo stato di ossidazione del ferro trovato nel materiale cometario, non è mai stato osservato in altre famiglie di meteoriti sebbene l'alterazione acquosa renda difficile questa comparazione (Westphal et al. 2009; Leroux, Roskosz e Jacob 2009; Ogliore et al. 2010; Westphal et al. 2017).

Appaiono quindi evidenti delle differenze tra la cometa 9P/Tempel e la cometa 81P/Wild 2, sotto l'aspetto della mineralogia: concentrandosi nell'intervallo infrarosso tra i 10 e i 50 μm , la differenza più evidente è la presenza di silicati idrati della prima cometa, mentre nella seconda non sono stati rilevati. Per questo ci possono essere tre possibili spiegazioni: lo spettro di 9P/Tempel può essere spiegato senza i solfuri idrati, in quanto potrebbero non rappresentare le caratteristiche dell'intero spettro in funzione della forma e della dimensione, oppure potrebbero riflettere la distribuzione su dimensione micrometrica di campioni catturati con l'aerogel da Stardust, oppure

potrebbe essere una particolare caratteristica della cometa 81P/Wild 2.

Altra differenza tra le due comete è l'abbondanza di olivina rispetto al pirossene (Dobrica et al. 2009).

Lo studio della mineralogia su 67P/Churyumov-Gerasimenko svolto da Rosetta con COSIMA ha rivelato spettroscopicamente che la superficie della cometa è coperta da materiale opaco, probabilmente solfuro di ferro (Quirico et al. 2016), compatibile con le analisi di dimensione e densità fatte da GIADA. Tuttavia COSIMA non ha rivelato silicati idrati nelle particelle di polvere della cometa (Bardyn et al. 2017; Stenzel et al. 2017). Mentre per quanto riguarda la ricerca di silicati idrati sulla cometa non ha portato alla rivelazione di essi (Bardyn et al. 2017), le analisi hanno portato alla consapevolezza che la polvere cometaria è altamente diversa e che comprende componenti inaspettati (Wooden, Ishii e Zolensky 2017).

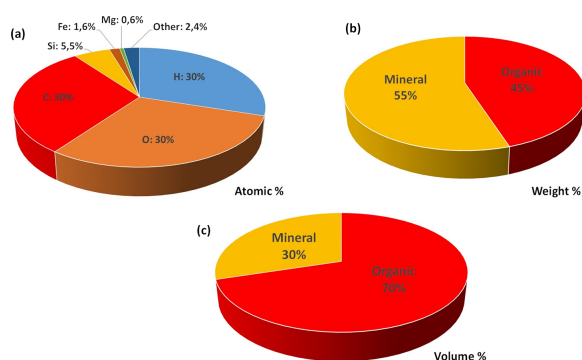


Figura 2.5: Composizione chimica della cometa 67P/C-G. (a) Abbondanze relative, in numero di atomi, della polvere (rapporto isotopico assunto H/C=1). La misura è stata fatta con COSIMA, ma le abbondanze di elementi come S e Ni sono assunte pari a quelle solari in quanto non quantificate. (b) Rapporto tra materiale organico e inorganico, assumendo che C, H, O ed N sono gli elementi di base per costituire il primo tipo, mentre il resto degli elementi, e in alcuni casi anche O sono considerati elementi di basi del secondo tipo. (c) Relative abbondanze in volume di materiale organico ed inorganico.

2.2.3 La composizione organica

Il materiale organico, ovvero i composti formati da C, H, N ed O, presente nelle comete si può dividere in due gruppi: volatili e refrattari, dove i primi sono immagazzinati in ghiacci (clatrati idrati) di H_2O , CO_2 e CO, mentre i secondi sono la componente solida, la polvere e il materiale che compone il nucleo. La componente volatile può essere rilasciata in atmosfera cometaria qualora la cometa orbiti in regioni vicino al Sole, permettendo la sublimazione dei clatrati idrati, oppure può essere trasportata dai getti di polvere che fuoriescono dalla cometa, durante la fase attiva del nucleo.

Con lo spettrometro di massa a bordo del lander Philae, si sono potute rivelare molecole che non erano mai state osservate prima sulle comete, su 67P/C-G: acetone, acetamide, proprionaldeide, isocianato di metile sono stati trovati con lo strumento COSAC (Goesmann et al. 2015), e tracce di catene polimeriche di formaldeide sono stati trovati dallo strumento Ptolemy (Wright et al. 2015). Risultati analoghi sono stati ottenuti da ROSINA (Altwegg et al. 2017). Dunque i tre strumenti hanno riportato risultati simili tra loro relativi alle molecole composte da CHON che sublimano a 275

K. Altri rilevamenti di ROSINA hanno mostrato tracce di toluene e, molto importante, di glicina uno degli amminoacidi più semplici, unità fondamentale delle proteine. L'osservazione di questo amminoacido è una chiave molto importante per lo studio della formazione della vita: sulla base di ritrovamenti di amminoacidi in polvere cometaria, sono state sviluppate diverse teorie, che ipotizzano come questi composti complessi siano giunti fino a terra, e abbiano permesso lo sviluppo della vita primordiale.

La distribuzione di questo materiale ha portato a supporre che esse siano state rilasciate dalle particelle di polvere riscaldate in atmosfera cometaria, piuttosto che una diretta sublimazione dal nucleo (Altwegg et al. 2016). Già con le osservazioni della cometa 1P/Halley si era notato come una significativa frazione di materiale organico della polvere cometaria rimanesse in fase solida a qualunque distanza e temperatura raggiunta dai getti di particelle di polvere del nucleo (Fomenkova, Chang e Mukhin 1994; Kissel e Krueger 1987), ma l'analisi del materiale riportato a terra dalla cometa 81P/Wild 2 fu ostacolata dalla grande abbondanza di C intrappolato nell'aerogel. Nonostante ciò, dalle poveri analizzate si osservò che il materiale organico poteva essere suddiviso in tre categorie: la prima è simile ai composti di materia organica insolubile (IOM) osservati nelle meteoriti carbonacee, la seconda è il materiale refrattario altamente aromatico contenuto in nanogobuline (de Gregorio et al. 2011), e la terza è materiale organico volatile alifatico (Sandford et al. 2006). Inoltre è stata osservata la glicina generata in particelle di polvere (Elsila, Glavin e Dworkin 2009).

Dalle analisi della polvere raccolta da Stardust, sembrerebbe che la cometa abbia un contenuto povero di carbonacee rispetto a quanto detto delle comete in precedenza, tuttavia questo impoverimento potrebbe essere dovuto all'alta velocità di impatto delle particelle di polvere contro l'aerogel del raccoglitore (Brownlee 2014), oppure uno sfortunato caso di campionamento di una regione povera di carbonacee ma che non rappresenta la totalità della composizione della cometa (Westphal et al. 2017; Zubko et al. 2012).

Il materiale catturato nella chioma di 67P/C-G, ha invece preservato la propria struttura e la propria natura in quanto la raccolta è stata effettuata a bassa velocità (circa $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) rispetto a quella effettuata da Stardust su 81P/Wild 2 (a circa $6.1 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$), ed è stato sondato da COSIMA per tutti i 26 mesi dell'intera missione: il risultato che si è ottenuto è che il C nella polvere è presente in forma di macromolecole che supportano uno spettro simile alle ISO trovate nelle condriti carbonacee (Fray et al. 2016). In massa, l'abbondanza di queste macromolecole è stato osservato essere grossomodo il 45% della massa delle particelle, indipendentemente dalla dimensione, dalla forma e dal periodo di raccolta (Bardyn et al. 2017). A causa della risoluzione spaziale dello strumento ($40 \mu\text{m}$), solo questo tipo di macromolecole sono state osservate direttamente. Questa grande quantità di materiale organico era stata predetta, in modo indiretto, dalla densità di particelle di materiale organico ($(52\pm 8)\%$ in volume, Fulle et al. 2017).

2.2.4 La morfologia

Conoscere la morfologia della polvere è importante per poterne descrivere la struttura e la forma, che sono la chiave per conoscere alcuni parametri, come la porosità. Da osservazioni polarimetriche si è notato come questi corpi siano composti da due

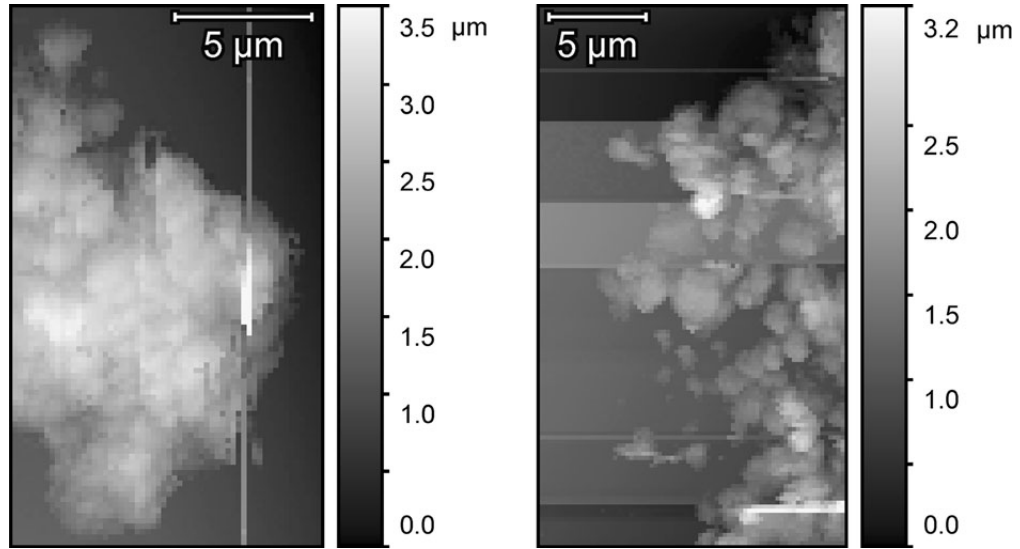


Figura 2.6: A sinistra: particella di polvere compatta osservata con MIDAS si presenta come un corpo unico. A destra: particella "fluffy" che evidenzia la presenza di una sottostruttura composta di particelle più piccole di dimensione frattale $D_f=1.7\pm0.1$, interpretata come aggregazione per collisione o come resti di una collisione con rimbalzo.

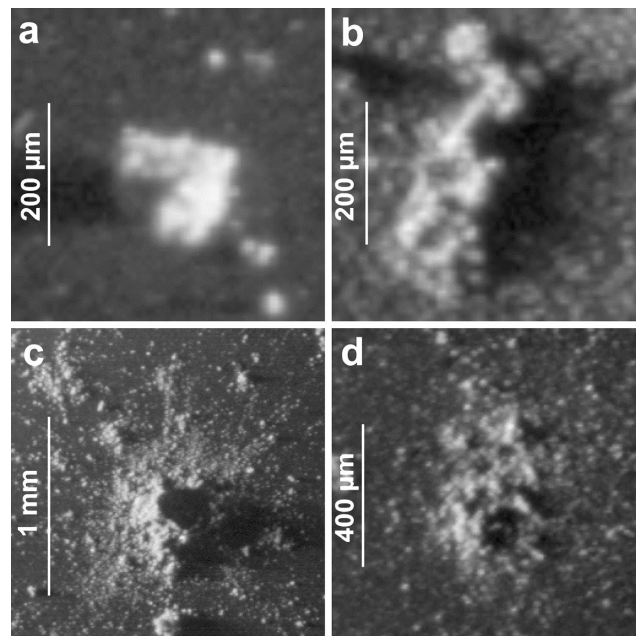


Figura 2.7: Particelle collezionate da COSIMA, di cui si nota bene la morfologia: (a) particelle compatte coagulate in modo ben definito; (b) particella che sembra formata da una matrice di oggetti minori; (c) cumulo di detriti di particella frammentata; (d) aggregato in frantumi ampiamente distribuito.

componenti: particelle compatte e particelle aggregate porose. Il materiale portato a terra da Stardust, sebbene fosse alterato strutturalmente, ha reso evidente come la polvere cometaria sia composta da aggregati (Brownlee 2014). Rosetta è stata la prima missione a dare una stima più accurata della morfologia.

MIDAS ha fornito informazioni topografiche con osservazioni in un intervallo da 1 a 50 μm di dimensione (Bentley et al. 2016), di cui un esempio è mostrato nella figura 2.6, mentre COSIMA ha collezionato immagini risolte in un intervallo da 30 μm a 1 mm (Hilchenbach et al. 2016) di cui alcuni esempi sono mostrati nella figura 2.7: i due strumenti fornirono il campionamento meno alterato su larga scala (da 1 μm a 1 mm), in quanto viaggiavano alla stessa velocità del loro obiettivo (Fulle et al. 2015), ad una distanza dal nucleo minore di 500 km (Bentley et al. 2016; Merouane et al. 2016). I due esperimenti identificarono particelle con dei contorni ben definiti: il più piccolo oggetto osservato da MIDAS era 1 μm di dimensione (Bentley et al. 2016), mentre quello più grande osservato da COSIMA era di 350 μm di dimensione: in entrambi i casi osservarono una sottostruttura nelle particelle (Mannel et al. 2016; Langevin et al. 2016), che MIDAS riuscì ad individuare fino a 25 nm. In questo modo, le particelle osservate in modo ben definito sono state chiamate "aggregati compatti". COSIMA analizzò poi la struttura attraverso l'uso di forze elettrostatiche, e osservò la frantumazione degli aggregati in particelle più piccole (Hilchenbach et al. 2017). MIDAS non osservò particelle di dimensione inferiore a 1 μm , forse perché il campione era affetto da bias o forse perché c'era una carenza di particelle di dimensione minore nella zona di raccolta (Bockelée-Morvan et al. 2017).

Dunque, a MIDAS e COSIMA osservano una struttura complessa su un intervallo da 1 μm a 1 mm, fondamentale per comparare il materiale cometario con quello interplanetario e con le micrometeoriti.

A questa scala, la porosità della polvere può essere comparata con quella del nucleo (CONSERT: porosità tra 60% e 80% (Kofman et al. 2015; Herique et al. 2016) del lobo minore) e contribuisce a mantenere bassa la densità totale della cometa (530 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Pätzold et al. 2016; Jorda et al. 2016)).

Il risultato fondamentale ottenuto da COSIMA e MIDAS è stato quello di identificare una struttura gerarchica nella polvere cometaria.

Porosità

L'esistenza di una microporosità è stata osservata con COSIMA, dal libero cammino medio dei fotoni negli accumuli di frammenti che è dell'intervallo di 25 μm : la microporosità osservata era maggiore del 50% (Langevin et al. 2017). Con MIDAS si sono osservate le sub-componenti degli aggregati, con una microporosità maggiore di quella osservata da COSIMA, con una dimensione frattale di $D_f = 1.7 \pm 0.1$ (Mannel et al. 2016), il cui filling factor in volume, rivela una porosità del 99% (Fulle e Blum 2017). Nell'articolo di Lévassieur-Regourd et al. (2018) le particelle con microporosità maggiore del 90% sono dette "fluffy", in opposizione a quelle definite "compatte", che secondo COSIMA hanno una microporosità tra il 34% e gli 85%.

La morfologia della cometa 67P/C-G, in termini di componenti fluffy e compatte, è simile a quanto osservato nel materiale raccolto della cometa 81P/Wild 2 (Brownlee

2014): le tracce lasciate nell'aerogel sono compatibili con l'impatto di aggregati compatti (Burchell et al. 2008), mentre le bolle sono compatibili con l'esplosione di particelle fluffy (Trigo-Rodríguez et al. 2008).

Altra conferma è fornita da GIADA (Della Corte et al. 2015) che osserva le due famiglie di particelle.

I minerali non porosi che compongono gli aggregati con una dimensione inferiore al mm, sono una necessaria conseguenza della condensazione avvenuta nel centro della nube solare, che conferma la completa miscelazione fino a 30 UA nel primo milione di anni (Ciesla 2011), come già dedotto dai dati ottenuti con Stardust (Brownlee 2014).

A differenza delle osservazioni di Stardust, il cui materiale trovato era molto simile alle CI (Brownlee 2014), la composizione di 1P/Halley e di 67P/C-G ha abbondanza simile a quella solare (Lodders 2003; Bardyn et al. 2017; Jessberger 1989). In accordo con quanto osservato da COSIMA le abbondanze medie in volume delle polvere e del nucleo della cometa sono: $(4 \pm 1)\%$ di solfiti, $(20 \pm 8)\%$ di ghiaccio, $(22 \pm 2)\%$ di silicati e $(54 \pm 5)\%$ di idrocarburi (Fulle et al. 2017).

2.2.5 La dimensione

Come già detto in precedenza, Rosetta ha investigato il materiale cometario in un intervallo di dimensione da $1 \mu\text{m}$ (Bentley et al. 2016) a 1 m (Fulle et al. 2016), ma le osservazione di particelle di dimensione inferiore al μm sono molto deboli. Queste particelle di dimensione inferiore sono quelle che vanno a comporre gli aggregati di polvere e lo si è visto dalle analisi svolte da Stardust (Brownlee 2014) e da MIDAS (Bentley et al. 2016) sulle rispettive comete. Dall'aerogel di Stardust si è supposto la presenza di queste particelle dalle analisi dei piccoli crateri che non presentavano una aggregazione (Hörz et al. 2006), mentre con MIDAS le particelle sub- μm sono state associate a frammentazione di particelle di dimensione maggiore (Bentley et al. 2016). Attraverso i crateri osservati sui raccoglitori di Stardust si è notato come questi siano consistenti con un flusso di particelle sub- μm , che con la frammentazione di particelle maggiori che però presentano una struttura frattale di dimensione $D_f \leq 2$. Rosetta è stata la prima missione che ha misurato in modo accurato la distribuzione di dimensione della polvere in una cometa, e per la prima volta è stato possibile ottenere informazioni sulla micoporosità del materiale analizzato.

Le varie abbondanze relative delle componenti dipendono dalla distribuzione di dimensione, che si suppone segua una legge di potenza. Prima dell'equinozio 2015 le polveri seguivano una distribuzione a legge di potenza con indice $\alpha = -3$ che implicava il contributo di particelle dell'ordine di grandezza del millimetro. Dopo l'equinozio il materiale rilasciato dal nucleo seguiva una legge di potenza con indice $\alpha = -4$, dunque più ripida, che prevedeva la presenza di un maggior numero di particelle piccole, probabilmente più primitive, immesse nella chioma dalla crescente attività cometaria al perielio (Fulle et al. 2016; Merouane et al. 2017).

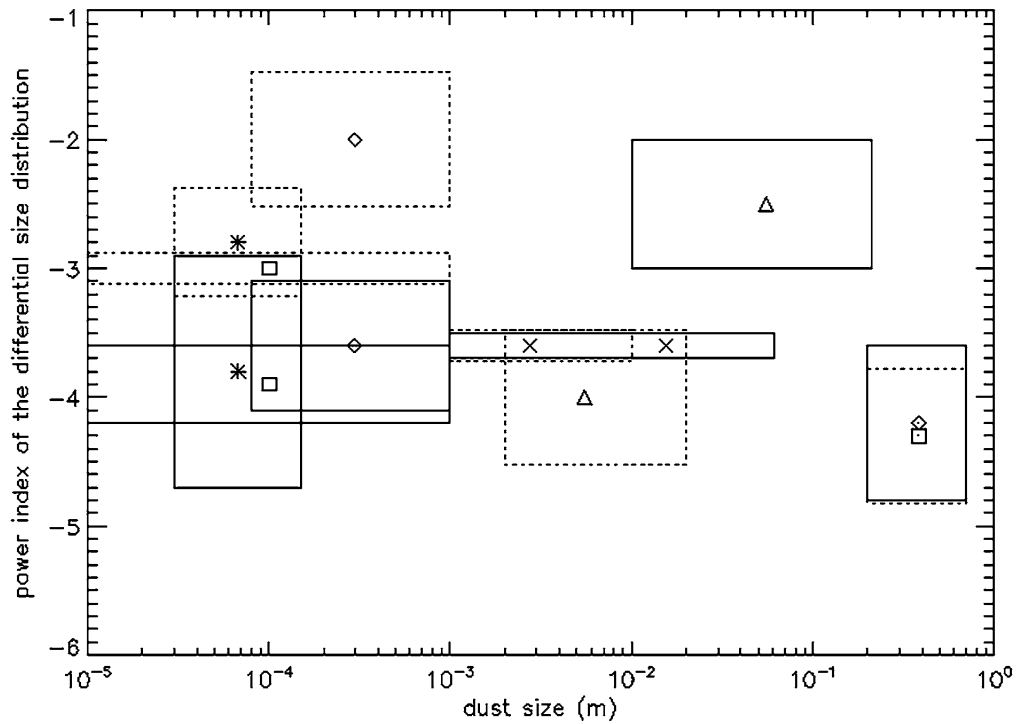


Figura 2.8: Indice di potenza della differente distribuzione di dimensione della polvere in 67P/C-G. Punto-linea: indice di potenza prima dell'equinozio del 2015. Linea continua: indice di potenza dopo l'equinozio del 2015, fino a subito dopo il perielio del 2015.

Sull'asse delle ascisse è esposta la dimensione degli strumenti, sull'asse delle ordinate è invece esposta l'incertezza dell'indice di potenza.

Asterisco: COSIMA; Rombo: GIADA; Triangolo: OSIRIS che osserva particelle singole nella chioma; gli altri punti non sono oggetto di studio di questa tesi.

Capitolo 3

Conclusioni

Lo scopo di questa tesi è quello di inserire la comete nell'evoluzione del Sistema Solare, e di confrontare le evidenze ottenute dallo studio della polvere con quelle note del mezzo del disco protoplanetario e del mezzo interstellare.

Abbiamo visto come l'ISM sia composto principalmente da materiale volatile e abbia come componenti principali gli atomi leggeri. Questi stessi elementi sono anche quelli che appaiono più abbondanti nel Sole, in quanto esso si è formato da una nube immersa nell'ISM in una regione della Galassia ricca di gas e polvere. Durante tutta l'evoluzione, come descritto nel primo capitolo, il materiale della nube solare ha subito delle alterazioni, più o meno profonde, a seconda della posizione in cui si trovava nella nube, e rispetto alla zona di formazione del Sole: le regioni interne, vicine alla stella hanno visto evaporare gran parte del materiale volatile a causa dell'elevata temperatura, mentre le regioni esterne hanno visto il materiale condensare ed aggregarsi, secondo meccanismi e dinamiche complesse.

Dalle osservazioni delle tre comete, 1P/Halley, 81P/Wild 2 e 67P/C-G, e per alcuni aspetti anche 9P/Tempel, si può concludere che questi corpi sono i più primitivi del Sistema Solare, in quanto possiedono una composizione vicina a quella solare, e hanno avuto origine all'interno della nube solare, internamente al disco protoplanetario. Dalle composizioni chimiche possiamo ricavare che, mentre la componente refrattaria suggerisce una formazione da grani del disco protoplanetario, il materiale volatile indica che le comete si sono arricchite di questi elementi nella regione esterna del disco protoplanetario, dove l'influenza della protostella non ha potuto vaporizzare il materiale. In questo modo le comete hanno preservato una composizione simile a quella solare, come si nota dalle analisi effettuate in situ e da remoto. E' interessante notare la presenza di materiali organici sulle comete, in quanto queste molecole si compongono prevalentemente di C, H, O ed N, materiali che sono principali componenti della fotosfera solare. Essi si sono preservati probabilmente grazie alla elevata distanza dal Sole e probabilmente si sono potuti trasformare in molecole sempre più complesse grazie ai diversi fattori ambientali, tra cui le radiazioni UV. In termini di complessità, è di rilevante interesse la rivelazione della glicina, amminoacido semplice, che permette la formazione di proteine (non ancora rivelate), unità fondamentale per la vita, su corpi che non sono pianeti, e lascia quindi aperta la questione astrobiologica di come la vita si sia generata sulla Terra.

La morfologia invece indica come nel passaggio da nube solare a disco protoplanetario e poi a disco planetario, le componenti delle comete sono state soggette ad interazioni con una velocità di circa $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ al momento della nube presolare, e di circa $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ nel disco protoplanetario, permettendo così alle particelle di aggregarsi per collisione in aggregati sempre maggiori, per la quale poi valgono altri meccanismi di aggregazione. Queste collisioni hanno permesso alle particelle di includere tra loro anche porzioni di vuoto, generando aggregati "fluffy", come osservato nella banda infrarossa, mentre urti più energetici formavano un corpo più compatto. La componente non porosa, di piccole dimensioni, è una conseguenza della condensazione del materiale al centro della nube solare, in quanto questa è morfologicamente simile alle condriti carbonacee, corpi supposti essere tra i più primitivi. In questo modo si nota come il materiale cometario derivi da una evoluzione complessa, la quale ha generato corpi aventi una struttura gerarchica, contenente al proprio interno una struttura frattale, che testimonia la natura primitiva delle comete.

Bibliografia

- [1] C. M. O'D. Alexander et al. «The Provenances of Asteroids, and Their Contributions to the Volatile Inventories of the Terrestrial Planets». In: *Science* 337.6095 (ago. 2012), p. 721.
- [2] Kathrin Altwegg et al. «Organics in comet 67P - a first comparative analysis of mass spectra from ROSINA-DFMS, COSAC and Ptolemy». In: *MNRAS* 469 (lug. 2017), S130–S141.
- [3] K. Altwegg et al. «Prebiotic chemicals–amino acid and phosphorus–in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko». In: *Science Advances* 2.5 (mag. 2016), e1600285–e1600285.
- [4] A. Bacmann et al. «An ISOCAM absorption survey of the structure of pre-stellar cloud cores». In: *A&A* 361 (set. 2000), pp. 555–580.
- [5] Anaïs Bardyn et al. «Carbon-rich dust in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko measured by COSIMA/Rosetta». In: *MNRAS* 469 (lug. 2017), S712–S722.
- [6] Mark S. Bentley et al. «Aggregate dust particles at comet 67P/Churyumov-Gerasimenko». In: *Nature* 537.7618 (set. 2016), pp. 73–75.
- [7] Eve L. Berger et al. «Evidence for aqueous activity on comet 81P/Wild 2 from sulfide mineral assemblages in Stardust samples and CI chondrites». In: 75.12 (giu. 2011), pp. 3501–3513.
- [8] J. Blum. «Dust Evolution in Protoplanetary Discs and the Formation of Planetesimals. What Have We Learned from Laboratory Experiments?» In: *Space Science Reviews* 214.2 (mar. 2018), p. 52.
- [9] J. Blum e G. Wurm. «The growth mechanisms of macroscopic bodies in protoplanetary disks.» In: *ARA&A* 46 (set. 2008), pp. 21–56.
- [10] D. Bockelée-Morvan et al. «Comet 67P outbursts and quiescent coma at 1.3 au from the Sun: dust properties from Rosetta/VIRTIS-H observations». In: *MNRAS* 469 (lug. 2017), S443–S458.
- [11] A. P. Boss. «From molecular clouds to circumstellar disks». In: *Comets II*, M. C. Festou, H. U. Keller, and H. A. Weaver (eds.), University of Arizona Press, Tucson, 745 pp., p.67-80. A cura di Michel C. Festou, H. Uwe Keller e Harold A. Weaver. 2004, p. 67.
- [12] Don Brownlee. «The Stardust Mission: Analyzing Samples from the Edge of the Solar System». In: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 42.1 (mag. 2014), pp. 179–205.
- [13] Don Brownlee et al. «Comet 81P/Wild 2 Under a Microscope». In: *Science* 314.5806 (dic. 2006), p. 1711.

- [14] M. J. Burchell et al. «Characteristics of cometary dust tracks in Stardust aerogel and laboratory calibrations». In: *Meteoritics and Planetary Science* 43.1 (feb. 2008), pp. 23–40.
- [15] A. G. W. Cameron e J. W. Truran. «The Supernova Trigger for Formation of the Solar System». In: 30.3 (mar. 1977), pp. 447–461.
- [16] F. J. Ciesla. «Residence Times of Particles in Diffusive Protoplanetary Disk Environments. II. Radial Motions and Applications to Dust Annealing». In: *ApJ* 740.1 (ott. 2011), p. 9.
- [17] T. K. Croat et al. «Survival of refractory presolar grain analogs during Stardust-like impact into Al foils: Implications for Wild 2 presolar grain abundances and study of the cometary fine fraction». In: *Meteoritics and Planetary Science* 50.8 (ago. 2015), pp. 1378–1391.
- [18] Charles L. Curry. «Shapes of Molecular Cloud Cores and the Filamentary Mode of Star Formation». In: *ApJ* 576.2 (set. 2002), pp. 849–859.
- [19] Bradley T. de Gregorio et al. «Correlated microanalysis of cometary organic grains returned by Stardust». In: *Meteoritics and Planetary Science* 46.9 (set. 2011), pp. 1376–1396.
- [20] V. Della Corte et al. «GIADA: shining a light on the monitoring of the comet dust production from the nucleus of 67P/Churyumov-Gerasimenko». In: *A&A* 583 (nov. 2015), A13.
- [21] E. Dobrica et al. «Connection between micrometeorites and Wild 2 particles: From Antarctic snow to cometary ices». In: *Meteoritics and Planetary Science* 44.10 (nov. 2009), pp. 1643–1661.
- [22] J. E. Elsila, D. P. Glavin e J. P. Dworkin. «Cometary glycine detected in samples returned by Stardust». In: *Meteoritics and Planetary Science* 44.9 (ott. 2009), pp. 1323–1330.
- [23] Christine Floss et al. «The Abundance of Presolar Grains in Comet 81P/Wild 2». In: *ApJ* 763.2, 140 (feb. 2013), p. 140.
- [24] G. J. Flynn et al. «Dust production from the hypervelocity impact disruption of the Murchison hydrous CM2 meteorite: Implications for the disruption of hydrous asteroids and the production of interplanetary dust». In: 57.2 (feb. 2009), pp. 119–126.
- [25] George James Flynn. «Physical, Chemical, and Mineralogical Properties of Comet 81P/Wild 2 Particles Collected by Stardust». In: *Earth Moon and Planets* 102.1-4 (giu. 2008), pp. 447–459.
- [26] George J. Flynn et al. «Elemental Compositions of Comet 81P/Wild 2 Samples Collected by Stardust». In: *Science* 314.5806 (dic. 2006), p. 1731.
- [27] N. M. Fomenkova, S. Chang e L. M. Mukhin. «Carbonaceous components in the comet Halley dust.» In: 58.20 (ott. 1994), pp. 4508–4512.
- [28] David R. Frank, Michael E. Zolensky e Loan Le. «Olivine in terminal particles of Stardust aerogel tracks and analogous grains in chondrite matrix». In: 142 (ott. 2014), pp. 240–259.
- [29] Nicolas Fray et al. «High-molecular-weight organic matter in the particles of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko». In: *Nature* 538.7623 (ott. 2016), pp. 72–74.

- [30] Nicolas Fray et al. «Nitrogen-to-carbon atomic ratio measured by COSIMA in the particles of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko». In: *MNRAS* 469 (lug. 2017), S506–S516.
- [31] M. Fulle e J. Blum. «Fractal dust constrains the collisional history of comets». In: *MNRAS* 469 (lug. 2017), S39–S44.
- [32] M. Fulle et al. «Density and Charge of Pristine Fluffy Particles from Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko». In: *ApJ* 802.1, L12 (mar. 2015), p. L12.
- [33] M. Fulle et al. «Evolution of the Dust Size Distribution of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from 2.2 au to Perihelion». In: *ApJ* 821.1 (apr. 2016), p. 19.
- [34] M. Fulle et al. «The dust-to-ices ratio in comets and Kuiper belt objects». In: *MNRAS* 469 (lug. 2017), S45–S49.
- [35] Zack Gainsforth et al. «Constraints on the formation environment of two chondrule-like igneous particles from comet 81P/Wild 2». In: *Meteoritics and Planetary Science* 50.5 (mag. 2015), pp. 976–1004.
- [36] Fred Goesmann et al. «Organic compounds on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko revealed by COSAC mass spectrometry». In: *Science* 349.6247 (lug. 2015), p. 2.689.
- [37] C. Güttler et al. «The outcome of protoplanetary dust growth: pebbles, boulders, or planetesimals?. I. Mapping the zoo of laboratory collision experiments». In: *A&A* 513 (apr. 2010), A56.
- [38] A. Herique et al. «Cosmochemical implications of CONSERT permittivity characterization of 67P/CG». In: *MNRAS* 462 (nov. 2016), S516–S532.
- [39] Martin Hilchenbach et al. «Mechanical and electrostatic experiments with dust particles collected in the inner coma of comet 67P by COSIMA onboard Rosetta». In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A* 375.2097, 20160255 (mag. 2017), p. 20160255.
- [40] M. Hilchenbach et al. «Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko: Close-up on Dust Particle Fragments». In: *ApJ* 816.2, L32 (gen. 2016), p. L32.
- [41] P. Hoppe. «Measurements of presolar grains». In: *Nuclei in the Cosmos*. Gen. 2010, p. 21.
- [42] Friedrich Hörz et al. «Impact Features on Stardust: Implications for Comet 81P/Wild 2 Dust». In: *Science* 314.5806 (dic. 2006), p. 1716.
- [43] M. Humayun et al. «Preliminary Analysis of Simeio: A Low Ni-Ir Kamacite Grain of Unusual Origin from Comet Wild2». In: *Lunar and Planetary Science Conference*. Mar. 2015, p. 2298.
- [44] W. M. Irvine e J. I. Lunine. «The cycle of matter in our galaxy: from clouds to comets». In: *Comets II*, M. C. Festou, H. U. Keller, and H. A. Weaver (eds.), University of Arizona Press, Tucson, 745 pp., p.25-31. 2004, p. 25.
- [45] H. A. Ishii et al. «Recovering the elemental composition of comet Wild 2 dust in five Stardust impact tracks and terminal particles in aerogel». In: *Meteoritics and Planetary Science* 43.1 (feb. 2008), pp. 215–231.
- [46] Hope A. Ishii et al. «Comparison of Comet 81P/Wild 2 Dust with Interplanetary Dust from Comets». In: *Science* 319.5862 (gen. 2008), p. 447.
- [47] E. K. Jessberger. «Halley's grains, interplanetary and interstellar dust». In: *Meteoritics* 24 (dic. 1989), p. 281.
- [48] E. K. Jessberger, A. Christoforidis e J. Kissel. «Aspects of the major element composition of Halley's dust». In: *Nature* 332.6166 (apr. 1988), pp. 691–695.

- [49] L. Jorda et al. «The global shape, density and rotation of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from preperihelion Rosetta/OSIRIS observations». In: 277 (ott. 2016), pp. 257–278.
- [50] D. J. Joswiak et al. «Refractory materials in comet samples». In: *Meteoritics and Planetary Science* 52.8 (ago. 2017), pp. 1612–1648.
- [51] Akimasa Kataoka et al. «Fluffy dust forms icy planetesimals by static compression». In: *A&A* 557 (set. 2013), p. L4.
- [52] Lindsay P. Keller et al. «Infrared Spectroscopy of Comet 81P/Wild 2 Samples Returned by Stardust». In: *Science* 314.5806 (dic. 2006), p. 1728.
- [53] J. Kissel e F. R. Krueger. «Organic dust in comet Halley». In: *Nature* 328.6126 (lug. 1987), p. 117.
- [54] Wlodek Kofman et al. «Properties of the 67P/Churyumov-Gerasimenko interior revealed by CONSERT radar». In: *Science* 349.6247 (lug. 2015), p. 2.639.
- [55] Levke Kööp et al. «A link between oxygen, calcium and titanium isotopes in ²⁶Al-poor hibonite-rich CAIs from Murchison and implications for the heterogeneity of dust reservoirs in the solar nebula». In: 189 (set. 2016), pp. 70–95.
- [56] S. Kothe. «Mikrogravitationsexperimente zur Entwicklung eines empirischen Stoßmodells für protoplanetare Staubagglomerate». 2016.
- [57] S. Krijt et al. «Erosion and the limits to planetesimal growth». In: *A&A* 574 (feb. 2015), A83.
- [58] Y. Langevin et al. «Optical properties of cometary particles collected by the COSIMA mass spectrometer on-board Rosetta during the rendezvous phase around comet 67P/Churyumov-Gerasimenko». In: *MNRAS* 469 (lug. 2017), S535–S549.
- [59] Y. Langevin et al. «Typology of dust particles collected by the COSIMA mass spectrometer in the inner coma of 67P/Churyumov Gerasimenko». In: 271 (giu. 2016), pp. 76–97.
- [60] A. Lanzirotti et al. «Chemical composition and heterogeneity of Wild 2 cometary particles determined by synchrotron X-ray fluorescence». In: *Meteoritics and Planetary Science* 43.1 (feb. 2008), pp. 187–213.
- [61] Mark E. Lawler e D. E. Brownlee. «CHON as a component of dust from comet Halley». In: *Nature* 359 (ott. 1992), pp. 810–812.
- [62] J. Leitner, P. Hoppe e P. R. Heck. «First Discovery of Presolar Material of Possible Supernova Origin in Impact Residues from Comet 81P/Wild 2». In: *Lunar and Planetary Science Conference*. Mar. 2010, p. 1607.
- [63] J. Leitner et al. «Laboratory Analysis of Presolar Silicate Stardust from a Nova». In: *ApJ* 754.2, L41 (ago. 2012), p. L41.
- [64] Hugues Leroux. «Fine-grained material of 81P/Wild 2 in interaction with the Stardust aerogel». In: *Meteoritics and Planetary Science* 47.4 (apr. 2012), pp. 613–622.
- [65] Hugues Leroux e Damien Jacob. «Fine-grained material encased in microtracks of Stardust samples». In: *Meteoritics and Planetary Science* 48.9 (set. 2013), pp. 1607–1617.

- [66] Hugues Leroux, Mathieu Roskosz e Damien Jacob. «Oxidation state of iron and extensive redistribution of sulfur in thermally modified Stardust particles». In: 73.3 (feb. 2009), pp. 767–777.
- [67] H. Leroux et al. «A TEM study of thermally modified comet 81P/Wild 2 dust particles by interactions with the aerogel matrix during the Stardust capture process». In: *Meteoritics and Planetary Science* 43.1 (feb. 2008), pp. 97–120.
- [68] Anny-Chantal Levasseur-Regourd et al. «Cometary Dust». In: *Space Science Reviews* 214.3, 64 (apr. 2018), p. 64.
- [69] Harold F. Levison et al. «Origin of the structure of the Kuiper belt during a dynamical instability in the orbits of Uranus and Neptune». In: 196.1 (lug. 2008), pp. 258–273.
- [70] C. M. Lisse et al. «Spitzer Spectral Observations of the Deep Impact Ejecta». In: *Science* 313.5787 (ago. 2006), pp. 635–640.
- [71] Katharina Lodders. «Solar System Abundances and Condensation Temperatures of the Elements». In: *ApJ* 591.2 (lug. 2003), pp. 1220–1247.
- [72] Katharina Lodders. «Solar System Abundances of the Elements». In: *Astrophysics and Space Science Proceedings* 16 (gen. 2010), p. 379.
- [73] T. Mannel et al. «Fractal cometary dust - a window into the early Solar system». In: *MNRAS* 462 (nov. 2016), S304–S311.
- [74] Kevin D. McKeegan et al. «Isotopic Compositions of Cometary Matter Returned by Stardust». In: *Science* 314.5806 (dic. 2006), p. 1724.
- [75] Sihane Merouane et al. «Dust particle flux and size distribution in the coma of 67P/Churyumov-Gerasimenko measured in situ by the COSIMA instrument on board Rosetta». In: *A&A* 596, A87 (dic. 2016), A87.
- [76] Sihane Merouane et al. «Evolution of the physical properties of dust and cometary dust activity from 67P/Churyumov-Gerasimenko measured in situ by Rosetta/COSIMA». In: *MNRAS* 469 (lug. 2017), S459–S474.
- [77] S. Messenger et al. «Discovery of Presolar SiC from Comet Wild-2». In: *Lunar and Planetary Science Conference*. Mar. 2009, p. 1790.
- [78] T. Mikouchi et al. «Mineralogy and Crystallography of Comet 81P/Wild 2 Particles». In: *Lunar and Planetary Science Conference*. Mar. 2007, p. 1946.
- [79] Telemachos Ch. Mouschovias. «Magnetic Braking, Ambipolar Diffusion, Cloud Cores, and Star Formation: Natural Length Scales and Protostellar Masses». In: *ApJ* 373 (mag. 1991), p. 169.
- [80] Tomoki Nakamura et al. «Chondrulelike Objects in Short-Period Comet 81P/-Wild 2». In: *Science* 321.5896 (set. 2008), p. 1664.
- [81] R. C. Ogliore et al. «Comparison of the oxidation state of Fe in comet 81P/Wild 2 and chondritic-porous interplanetary dust particles». In: *Earth and Planetary Science Letters* 296.3-4 (ago. 2010), pp. 278–286.
- [82] Ryan C. Ogliore et al. «Oxygen isotopic composition of coarse- and fine-grained material from comet 81P/Wild 2». In: 166 (ott. 2015), pp. 74–91.
- [83] M. Pätzold et al. «A homogeneous nucleus for comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from its gravity field». In: *Nature* 530.7588 (feb. 2016), pp. 63–65.
- [84] Thomas Preibisch e Hans Zinnecker. «The History of Low-Mass Star Formation in the Upper Scorpius OB Association». In: *AJ* 117.5 (mag. 1999), pp. 2381–2397.

- [85] E. Quirico et al. «Refractory and semi-volatile organics at the surface of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko: Insights from the VIRTIS/Rosetta imaging spectrometer». In: 272 (lug. 2016), pp. 32–47.
- [86] Alessandra Rotundi et al. «Dust measurements in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko inbound to the Sun». In: *Science* 347.6220 (gen. 2015), aaa3905.
- [87] Scott A. Sandford et al. «Assessment and control of organic and other contaminants associated with the Stardust sample return from comet 81P/Wild 2». In: *Meteoritics and Planetary Science* 45.3 (mar. 2010), pp. 406–433.
- [88] Scott A. Sandford et al. «Organics Captured from Comet 81P/Wild 2 by the Stardust Spacecraft». In: *Science* 314.5806 (dic. 2006), p. 1720.
- [89] F. J. Stadermann et al. «Stardust in Stardust—The C, N, and O isotopic compositions of Wild 2 cometary matter in Al foil impacts». In: *Meteoritics and Planetary Science* 43.1 (feb. 2008), pp. 299–313.
- [90] Oliver J. Stenzel et al. «Similarities in element content between comet 67P/Churyumov-Gerasimenko coma dust and selected meteorite samples». In: *MNRAS* 469 (lug. 2017), S492–S505.
- [91] T. Stephan et al. «TOF-SIMS analysis of cometary particles extracted from Stardust aerogel». In: *Meteoritics and Planetary Science* 43.1 (feb. 2008), pp. 285–298.
- [92] Julien Stodolna, Damien Jacob e Hugues Leroux. «Mineralogy and petrology of Stardust particles encased in the bulb of track 80: TEM investigation of the Wild 2 fine-grained material». In: 87 (giu. 2012), pp. 35–50.
- [93] Julien Stodolna et al. «Characterization of preserved primitive fine-grained material from the Jupiter family comet 81P/Wild 2 - A new link between comets and CP-IDPs». In: *Earth and Planetary Science Letters* 388 (feb. 2014), pp. 367–373.
- [94] K. S. Krishna Swamy. *Physics of Comets (3rd Edition)*. 2010.
- [95] L. Testi et al. «Dust Evolution in Protoplanetary Disks». In: *Protostars and Planets VI*. Gen. 2014, p. 339.
- [96] J. M. Trigo-Rodríguez et al. «Bulbous tracks arising from hypervelocity capture in aerogel». In: *Meteoritics and Planetary Science* 43.1 (feb. 2008), pp. 75–86.
- [97] S. J. Weidenschilling. «Aerodynamics of solid bodies in the solar nebula.» In: *MNRAS* 180 (lug. 1977), pp. 57–70.
- [98] S. J. Weidenschilling e Jeffrey N. Cuzzi. «Formation of Planetesimals in the Solar Nebula». In: *Protostars and Planets III*. Gen. 1993, p. 1031.
- [99] A. J. Westphal et al. «Mixing Fraction of Inner Solar System Material in Comet 81P/Wild2». In: *ApJ* 694.1 (mar. 2009), pp. 18–28.
- [100] A. J. Westphal et al. «Simeio: An Ultra Ni-Poor Metal Particle from Comet 81P/Wild2». In: *Meteoritics and Planetary Science Supplement* 75, 5309 (set. 2012), p. 5309.
- [101] A. J. Westphal et al. «The future of Stardust science». In: *Meteoritics and Planetary Science* 52.9 (set. 2017), pp. 1859–1898.
- [102] S. Wirick et al. «Carbonates Found in Stardust Aerogel Tracks». In: *Lunar and Planetary Science Conference*. Mar. 2007, p. 1534.
- [103] D. H. Wooden, S. B. Charnley e P. Ehrenfreund. «Composition and evolution of interstellar clouds». In: *Comets II*, M. C. Festou, H. U. Keller, and H. A. Weaver

- (eds.), *University of Arizona Press, Tucson*, 745 pp., p.33-66. A cura di Michel C. Festou, H. Uwe Keller e Harold A. Weaver. 2004, p. 33.
- [104] D. H. Wooden, H. A. Ishii e M. E. Zolensky. «Cometary dust: the diversity of primitive refractory grains». In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A* 375.2097 (mag. 2017), p. 20160260.
 - [105] I. P. Wright et al. «CHO-bearing organic compounds at the surface of 67P/Churyumov-Gerasimenko revealed by Ptolemy». In: *Science* 349.6247 (lug. 2015), p. 2.673.
 - [106] C. -C. Yang, A. Johansen e D. Carrera. «Concentrating small particles in protoplanetary disks through the streaming instability». In: *A&A* 606 (ott. 2017), A80.
 - [107] Michael E. Zolensky et al. «Mineralogy and Petrology of Comet 81P/Wild 2 Nucleus Samples». In: *Science* 314.5806 (dic. 2006), p. 1735.
 - [108] E. Zubko et al. «Evaluating the carbon depletion found by the Stardust mission in Comet 81P/Wild 2». In: *A&A* 544, L8 (ago. 2012), p. L8.