



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Astronomia

Tesi di Laurea

Spettrofotometria della Cometa

67P/Churyumov-Gerasimenko da Immagini

OSIRIS della Missione Spaziale Rosetta

Relatore

Prof.ssa Monica Lazzarin

Correlatore

Dott.ssa Fiorangela La Forgia

Laureanda

Martina Raniolo

Anno Accademico 2017/2018

Abstract

Scopo del lavoro è l'analisi spettrofotometrica della superficie della cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko tramite immagini acquisite dalla sonda Rosetta. Le immagini sono state allineate e corrette per topografia. Sono stati quindi analizzati gli spettri in diverse zone della superficie che mostrano una complessiva omogeneità di composizione con lievi variegature tra il collo e i lobi della cometa.

Indice

1	La missione spaziale Rosetta	1
1.1	Il viaggio della sonda	3
1.2	Caratteristiche tecniche	5
1.3	Gli strumenti scientifici	6
2	Le comete	11
2.1	Classificazione dinamica	13
2.2	Proprietà fisiche	14
2.3	Luminosità e dimensioni	18
2.4	Spettri cometari	19
3	La cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko	23
3.1	Morfologia	24
3.2	Evoluzione superficiale	26
4	Analisi spettrofotometrica	29
4.1	Allineamento delle immagini	30
4.2	Trasformazione in riflettanza	31
4.3	Correzione topografica	31
4.4	Estrazione degli spettri	34
5	Discussione dei risultati	39
	Bibliografia	41

Capitolo 1

La missione spaziale Rosetta

La missione Rosetta è stata approvata nel novembre 1993 all'interno del programma spaziale Horizon 2000 dell'ESA come Cornerstone Mission, e lanciata il 2 marzo 2004.

Lo scopo della missione è lo studio dei corpi minori del Sistema Solare, in particolare comete e asteroidi, tramite il fly-by della cometa periodica 67P/Churyumov-Gerasimenko. Comete e asteroidi permettono di investigare le fasi primordiali di formazione ed evoluzione del Sistema Solare, essendo costituiti da materiale rimasto praticamente inalterato dalla formazione del Sistema Solare. Pertanto lo studio della loro morfologia, dinamica e composizione chimica permetterà di conoscere più in dettaglio le condizioni fisiche e chimiche che vi erano all'origine del Sistema Solare.

Si ritiene inoltre che le comete siano state veicolo per il trasporto di molecole organiche e di acqua, e quindi possibili responsabili dello sviluppo di forme di vita sulla Terra.

Il nome della missione deriva dalla famosa stele egizia, che riporta un decreto tolemaico trascritto in tre lingue diverse: geroglifico, egiziano demotico e greco, grazie alla quale è stato possibile decifrare gli antichi geroglifici egizi. Allo stesso modo l'auspicio è che la missione Rosetta possa svelare i misteri della formazione del sistema solare e le caratteristiche delle comete. Anche il nome del lander, Philae, non è casuale, ma deriva da un'isola sul Nilo in cui fu ritrovato un obelisco che insieme alla stele venne utilizzato per decifrare i geroglifici.

La missione Rosetta vanta alcuni primati nell'ambito delle missioni cometarie. È la prima missione, infatti, ad aver effettuato l'atterraggio controllato di un lander robotico sulla superficie di una cometa, la prima ad aver seguito la cometa lungo il suo viaggio al perielio, permettendo così di analizzare le trasformazioni di una cometa in prossimità del Sole, la prima ad essersi spinta quasi fino all'orbita di Giove usando dei pannelli solari come unica fonte di energia, e la prima ad ottenere immagini ad alta risoluzione della superficie di una cometa.

Varie altre missioni aventi come obiettivo lo studio di comete hanno preceduto la missione Rosetta, ne ricordiamo alcune di seguito.

La missione ICE, nota originariamente come International Sun/Earth Explorer 3 (ISEE-3), è stata lanciata il 12 agosto 1978. Come le precedenti ISEE-1 e ISEE-2 era proget-

tata per studiare le interazioni del campo magnetico terrestre con il vento solare, ma al termine della missione primaria la sua destinazione è stata modificata per l'esplorazione delle comete, ed è stata la prima missione in assoluto a raggiungere una cometa. La sonda è stata deviata verso la cometa Giacobini-Zinner avvicinandosi fino a 7860 km di distanza nel settembre 1985. L'anno seguente ha raggiunto anche la cometa 1P/Halley ad una distanza di 31 milioni di km dal nucleo.

Vega-1 e Vega-2 sono due sonde russe lanciate il 15 e 21 dicembre 1984. Entrambe, dopo aver rilasciato un lander sulla superficie di Venere, hanno iniziato a inseguire la cometa Halley. La minima distanza raggiunta da Vega-1 è stata di 8890 km, mentre Vega-2 si è avvicinata fino a 8030 km.

Le sonde giapponesi Sakigake e Suisei sono state lanciate il 7 gennaio e il 18 agosto 1985 con lo scopo, anch'esse, di raggiungere la cometa Halley durante la sua orbita nel Sistema Solare interno nel 1986. Suisei ha raggiunto la cometa ad una distanza di 151000 km, mentre Sakigake a 7 milioni di km di distanza.

La missione Giotto è stata lanciata il 2 luglio 1985 dall'ESA e tra le missioni cometarye volte allo studio della cometa Halley è stata quella che ha ottenuto il passaggio più vicino e le immagini più ravvicinate per quel tempo. La sonda si è avvicinata alla cometa ad una distanza minore di 600 km il 13 marzo 1986; le immagini hanno rivelato un oggetto molto scuro, con una forma simile a quella di una patata e con regioni attive caratterizzate da getti di gas e polveri.

Giotto è stata la prima missione a fotografare ben due comete, infatti il 10 luglio 1992 ha raggiunto la cometa Grigg-Skjellerup ad una distanza di 200 km. La sonda è stata messa in ibernazione il 23 luglio 1992, e continua ad orbitare attorno al Sole descrivendo circa sei rivoluzioni ogni sette anni. Attualmente, però, le comunicazioni con la sonda restano interrotte.

Deep Space 1 è una sonda del programma New Millenium della NASA. Scopo principale della missione è stato testare dodici nuove tecnologie sviluppate nel corso degli anni. Lanciata il 24 ottobre 1998 ha raggiunto l'asteroide 9969 Braille e successivamente la cometa Borrelly. La missione è terminata il 18 dicembre 2001.

Stardust è una missione della NASA lanciata il 7 febbraio 1999 volta al raggiungimento della cometa Wild 2, durante il quale sono state prelevate delle particelle di polvere dalla cometa e inviate a Terra nel 2006.

La stessa sonda ha raggiunto nel 2011 la cometa Tempel 1, in una successiva fase della missione rinominata Stardust-NExT.

Contour, Comet Nucleus Tour, lanciata il 3 luglio 2002 è una missione della NASA pensata per ampliare le conoscenze sui nuclei cometari tramite il raggiungimento di due comete. Durante l'avvicinamento della sonda all'orbita della cometa di Encke, tuttavia, i controller della NASA hanno perso i contatti con la sonda che alla fine è andata perduta.

La missione NASA Deep Impact è stata lanciata il 12 gennaio 2005, effettuando il fly-by della cometa Tempel 1 e registrandone immagini e dati. La sonda era costituita da una seconda navicella che è stata rilasciata sulla cometa nel luglio 2005, permettendo di analizzare la composizione dei detriti presenti sulla superficie cometaria.

EPOXI è un'estensione della missione Deep Impact, combinazione delle due missioni: DIXI, Deep Impact Extended Investigation Mission, e EPOCH, Extrasolar Planet Observation and Characterisation. Nel 2010 EPOXI ha effettuato il fly-by con la cometa 103P/Hartley e nel febbraio e aprile 2012 ha osservato da lontano la cometa Garradd, studiandone l'orbita e l'attività superficiale, nel 2013 ha osservato anche la cometa ISON. I contatti con la sonda sono stati interrotti nell'agosto 2013.

1.1 Il viaggio della sonda

La missione cometaria più recente e che ha portato a risultati sorprendenti è la missione spaziale Rosetta.

Prima di raggiungere la cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko ad una distanza di 5.25 AU (circa 790 milioni di km) dal Sole, Rosetta ha viaggiato nel Sistema Solare per dieci anni, orbitando quattro volte attorno al Sole. Per raggiungere una tale distanza Rosetta ha ricevuto delle spinte gravitazionali dalla Terra e da Marte attraversando la fascia principale degli asteroidi, compresa tra l'orbita di Marte e quella di Giove, due volte.



Figura 1.1: La sonda spaziale Rosetta.

Il lancio è avvenuto il 2 marzo 2004 da Kourou, nella Guiana Francese, con un Ariane 5G+.

Un anno dopo il lancio è avvenuto il primo fly-by con la Terra, durante il quale sono

stati effettuati dei controlli al carico e delle calibrazioni. Il 25 febbraio 2007 ha avuto luogo il secondo fly-by, stavolta con Marte, ad una distanza di circa 200 km ottenendo meravigliose immagini del pianeta e delle sue nubi. Il secondo e il terzo fly-by con la Terra sono avvenuti il 13 novembre 2007 e il 13 novembre 2009. Con l'ultimo fly-by la sonda ha ricevuto la spinta definitiva per raggiungere il target finale, la cometa 67P/Churyumo-Gerasimenko.

Il 5 settembre 2008 e il 10 luglio 2010 Rosetta si è avvicinata a due asteroidi, 2867 Steins e 21 Lutetia rispettivamente. Le dimensioni dell'asteroide 2867 Steins sono di circa 6 km, mentre 21 Lutetia è molto più grande, con delle dimensioni di 100 km è il più grande all'epoca osservato. La scelta degli asteroidi non è stata casuale, infatti Lutetia era un asteroide di grande interesse essendo un oggetto che avrebbe permesso l'utilizzo dello strumento RSI per la misura della massa (Par.1.3), ma soprattutto perché si tratta di un oggetto primitivo. Steins invece è stato scelto per la sua particolare classificazione spettrale, infatti è un asteroide di tipo E. Di questi asteroidi Rosetta ha studiato la dinamica del loro moto intorno al Sole, la mineralogia, la composizione superficiale, la morfologia e le proprietà fisiche.

La lunga durata della missione ha richiesto un periodo di ibernazione della sonda, che è andato da maggio 2011 a gennaio 2014. Questo ha permesso di limitare il consumo di energia e combustibile, nonché di minimizzare i costi. Durante questo periodo la sonda si direzionava una volta al minuto verso il Sole, in modo che i pannelli solari potessero ricevere quanta più luce possibile. Tutti i sistemi elettrici sono stati spenti, ad eccezione dei ricevitori radio, dei decodificatori di istruzioni e del generatore ausiliario di potenza. Dunque, richiedendo una elevata autonomia a bordo per mantenere la continuità delle operazioni è stato aumentato il tempo di vita della sonda. Durante l'ibernazione Rosetta ha raggiunto la massima distanza dal Sole, circa 800 milioni di km, e dalla Terra, circa un miliardo di km.

A marzo 2014 gli strumenti a bordo della sonda erano già accesi e il 27 marzo è stata ottenuta la prima immagine della cometa. Il 30 aprile la cometa era già attiva a una distanza di 4 AU dal Sole. A maggio 2014 la sonda ha iniziato una serie di manovre di frenata, ottenendo una velocità relativa di circa 25 m/s, così da raggiungere la velocità e l'orbita della cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. Infine, il 6 agosto 2014 Rosetta si è inserita in orbita intorno alla cometa con varie e complesse manovre di avvicinamento, la cometa si trovava ad una distanza di 3.6 AU dal Sole.

Essendo giunta ad una distanza di meno di 100 km dal nucleo della cometa Rosetta è stata in grado di analizzare l'asse di rotazione, la velocità angolare, l'orbita, la forma, la dimensione e altre caratteristiche di base. In questa fase l'orbiter ha creato una mappa dettagliata del nucleo così da selezionare un potenziale sito per l'atterraggio del lander Philae.

Il 12 novembre 2014 il lander è stato rilasciato da un'altezza di circa 20 km, con una velocità di caduta al suolo minore di 1 m/s. Il lander, pensato per ancorarsi al suolo, ha in realtà rimbalzato due volte e ha mandato immagini ad alta risoluzione e altre informazioni sulla natura della cometa.

Rosetta ha continuato a seguire la cometa per circa due anni, osservando i cambiamenti che interessavano la superficie cometaria con l'avvicinarsi al perielio, raggiunto nell'agosto 2015. Durante questa fase in cui la cometa era attiva la navicella si è dovuta

allontanare di diversi chilometri per evitare danni da parte delle code di polvere e gas attivatesi nel nucleo.

La missione Rosetta si è conclusa il 30 settembre 2016 con un atterraggio controllato della navicella sulla superficie della cometa. L'orbiter, quando era a pochi metri dal suolo, ha mandato dati e immagini finché non sono cessate le comunicazioni.

Responsabile del controllo e della determinazione dell'orbita della sonda è stato l'ESOC, European Space Operations Centre, sito a Darmstadt in Germania, dove hanno sede anche il MOC, Mission Operations Centre, e il SOC, Science Operations Centre, che si occupa della pianificazione ed esecuzione dell'acquisizione dati, della produzione dei dati grezzi e di tutti i dati ausiliari necessari al Principal Investigator.

1.2 Caratteristiche tecniche

Rosetta è costituita da una "scatola" di alluminio avente un peso di 2900 kg e con lati di 2.8 m \times 2.1 m \times 2.0 m. È composta da un orbiter, un'antenna di trasmissione, due pannelli solari e un lander.

L'orbiter è un parallelepipedo su cui sono montati gli equipaggiamenti, gli strumenti scientifici, l'antenna, il lander e i pannelli solari. Al centro dell'orbiter si trova il sistema principale di propulsione, montato attorno a un tubo verticale dove si trovano due grandi vasche per il propellente, una contenente il combustibile, l'altra l'ossidante. L'orbiter ha 24 propulsori per controllare la traiettoria, ciascuno di questi propulsori spinge la navicella con una forza di 10 Newton. Più della metà del peso della navicella al momento del lancio era dovuto al materiale propellente.

Gli strumenti scientifici sono montati sulla parte superiore del parallelepipedo, mentre i sottosistemi sono montati alla base. Su un lato dell'orbiter è montata l'antenna di comunicazione, mentre sul lato opposto è montato il lander.

L'antenna di comunicazione ad alto guadagno è direzionabile, ha una forma biassiale, un diametro di 2.2 metri ed è sempre rivolta verso la Terra. Trasmette dati altamente compressi ad una velocità compresa tra 10 e 22000 bit al secondo. Le comunicazioni radio tra Rosetta e la Terra avvengono tramite l'antenna parabolica dell'ESA, sita a New Norcia, nell'Australia occidentale, avente un diametro di 35 metri. I segnali radio impiegano circa 50 minuti per raggiungere la sonda, perciò Rosetta è capace di guidarsi da sola. Dal 2005, inoltre, un'altra antenna parabolica di 35 metri, situata a Cerebros in Spagna, ha iniziato ad operare fornendo a Rosetta una maggiore copertura.

Spesso le comunicazioni in tempo reale non sono possibili a causa del moto di rotazione della Terra, e si verificano dei black-out quando la sonda passa dietro il Sole. Per ovviare a queste interruzioni di comunicazione, tuttavia, Rosetta è dotata di una memoria interna di circa 25 Gbits, capace di immagazzinare i dati e inviarli alla successiva opportunità.

I due pannelli solari si estendono come delle ali per 32 metri quadrati ciascuno. Ognuno di essi può ruotare di $\pm 180^\circ$ per ottenere il massimo dell'illuminazione solare, e sono costituiti da cinque pannelli composti da centinaia di migliaia di celle di silicene non riflettenti che generano fino a 8700 Watt vicino al Sole e circa 400 Watt nelle vicinanze

della cometa. Rosetta è la prima missione ad utilizzare i pannelli solari come unica fonte di energia allontanandosi così tanto dal Sole, invece di generatori termici a radioisotopi.

Il lander è montato su un pannello laterale dell'orbiter, le sue dimensioni sono minori di un metro cubo, pesa meno di 100 kg ed è fatto interamente di fibre di carbonio. Strutturalmente è composto da una base di supporto, una piattaforma per gli strumenti e da una costruzione poligonale. Alcuni degli strumenti si trovavano sotto una copertura rivestita con celle solari. Il lander è stato programmato per autoespellersi dal veicolo principale e spiegare i suoi tre piedi, atterrando in una regione della cometa preventivamente scelta sulla base delle immagini mandate da Rosetta a terra. È dotato inoltre di un arpione per restare ancorato alla cometa, infatti a causa del debole campo gravitazionale il lander pesava solo 0.3 grammi. I piedi erano in grado di sollevarsi, ruotare e inclinarsi per ridurre il rischio di rimbalzo e riportare sempre il lander in posizione verticale. I dati sono stati trasmessi dalla superficie della cometa a terra con un'antenna tramite l'orbiter. Il lander è stato realizzato da un consorzio europeo sotto la leadership del German Aerospace Research Institute. Altri membri del consorzio sono l'ESA e altri istituti di Austria, Finlandia, Francia, Ungheria, Irlanda, Italia e UK.

La sonda ha dovuto resistere a temperature estreme, per esempio quando si trovava in prossimità del Sole per prevenire il surriscaldamento ha usato dei radiatori che dissipavano il surplus di calore nello spazio. Questi erano posti in zone quasi sempre in ombra e rivolti in direzione opposta rispetto alla cometa per minimizzare gli effetti della polvere. In prossimità del Sistema Solare esterno, invece, gli hardware e gli strumenti scientifici dovevano essere tenuti a delle temperature più miti, specialmente nel periodo dell'ibernazione, affinché sopravvivessero alle temperature bassissime. Queste condizioni sono state ottenute utilizzando dei pannelli dipinti di nero, con degli isolamenti multistrato e riscaldatori elettrici posizionati in punti strategici.

1.3 Gli strumenti scientifici

Per studiare il nucleo della cometa e i getti di gas e polveri che ne derivano in prossimità del Sole, l'orbiter di Rosetta è dotato di undici strumenti scientifici, mentre il lander Philae è dotato di dieci strumenti per le misure riguardanti la superficie della cometa.

Gli strumenti montati sul pannello superiore dell'orbiter sono:

ALICE (Ultraviolet Imaging Spectrometer): strumento per l'analisi dei gas della chioma e della coda nel lontano ultravioletto, tra 70 e 205 nm, nonché della composizione superficiale del nucleo. Utilizzato anche per la misura del tasso di produzione della cometa di acqua, monossido e biossido di carbonio.

ALICE ha rivelato che la cometa è insolitamente scura nell'ultravioletto e ha permesso di rilevare nella chioma della cometa idrogeno e ossigeno.

CONSERT (Comet Nucleus Sounding Experiment by Radio wave Transmission): strumento utilizzato per effettuare la tomografia del nucleo della cometa, ottenuta analizzando come le onde radio vengono riflesse e scatterate dal nucleo. I diversi ritardi nella propagazione dei segnali saranno usati per determinare le proprietà dielettriche del materiale cometario.

I risultati ottenuti hanno mostrato che la porosità della cometa è dovuta al mescolamento di ghiaccio e particelle di polvere 'fluffy'.

COSIMA (Cometary Secondary Ion Mass Analyzer): strumento per l'analisi dei grani di polvere emessi dalla cometa, inclusa la loro composizione, è in grado di stabilire se la loro natura è organica o inorganica. È costituita da un raccogliatore di polveri, un cannone ionico e un microscopio ottico. La polvere della cometa è raccolta su un obiettivo che viene sistemato sotto un microscopio, i grani di polvere vengono poi bombardati con ioni di iodio dal cannone.

Il team a capo dello strumento COSIMA ha identificato e tabulato tutte le particelle rilevate dalle immagini, sono state identificate circa 6053 particelle.

GIADA (Grain Impact Analyzer and Dust Accumulator): misura la massa, la distribuzione di velocità e la quantità di moto dei grani di polvere provenienti dal nucleo e da altre direzioni (perché riflessi dalla pressione di radiazione del Sole), usando un sistema a grani ottici e un sensore meccanico di impatti. È anche dotata di cinque microbilance per la misura della quantità di polvere raccolta.

Il team GIADA ha rilevato che le particelle di polvere che hanno impattato sui suoi detector possono essere separate in due tipologie: le particelle 'compatte' con dimensioni nel range di 0.03-1mm, e gli 'aggregati soffici' con dimensioni più grandi, tra 0.2 e 2.5 mm.

MIDAS (Micro-Imaging Dust Analysis System): è uno strumento per l'analisi microstrutturale e statistica dell'ambiente di polvere intorno alla cometa. Fornisce informazioni sulla popolazione di particelle, sulle dimensioni, forma e volume. È basato sulla tecnica del microscopio a forza atomica e ha una risoluzione spaziale che arriva fino a 4 nm.

MIDAS ha evidenziato come i grani di polvere siano costituiti da numerosi grani più piccoli, e che risultano più allungati in una direzione rispetto alle altre.

MIRO (Microwave Instrument for the Rosetta Orbiter): utilizzato per determinare le abbondanze dei gas maggiormente presenti, il tasso di fuoriuscita del gas e la temperatura superficiale del nucleo. Permette di ricavare dati spettroscopici ad alta risoluzione nel submillimetrico, e misurazioni del continuo nel millimetrico.

Il team di MIRO ha presentato una mappa del vapore acqueo nella chioma della cometa.

OSIRIS (Optical Spectroscopic and InfraRed Remote Imaging System): è costituito da un sistema di imaging a doppia camera che opera nel visibile, nel vicino infrarosso e nel vicino ultravioletto. Le due camere NAC, Narrow Angle Camera, e WAC, Wide

Angle Camera, condividono le stesse elettroniche. La NAC è disegnata per produrre immagini ad alta risoluzione della superficie della cometa ed è dotata di 12 filtri che coprono il range spettrale da 250 a 1000 nm ad alta risoluzione spaziale; mentre la WAC ha un campo di vista molto ampio ($12^\circ \times 12^\circ$) e una buona pulizia da luce spuria, pensata per l'analisi di immagini di polvere e gas che si trovano in prossimità del nucleo, questa camera è dotata di 14 filtri nel range spettrale che va da 240 a 720 nm.

La WAC è stata costruita a Padova da un gruppo di ricercatori del Dipartimento di Astronomia, Ingegneria Meccanica ed Elettronica.

OSIRIS ha inviato a terra una grandissima quantità di immagini utilizzate per vari tipi di studi, tra cui la determinazione del modello matematico tridimensionale della cometa (modello di forma).

ROSINA (Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis): è costituita da due sensori per determinare la composizione dell'atmosfera e della ionosfera della cometa, la velocità delle particelle del gas, e le reazioni alle quali prendono parte.

ROSINA ha rilevato un aumento della pressione del gas intorno al nucleo con l'avvicinarsi della sonda alla cometa.

RCP (Rosetta Consortium Plasma): è un set di cinque sensori per la misura delle proprietà fisiche del nucleo, per esaminare la struttura interna della chioma, per monitorare l'attività cometaria e per studiare l'interazione della cometa con il vento solare. RCP è riuscito a rilevare una cavità diamagnetica con RCP-MAG.

RSI (Radio Science Investigation): è il sistema di comunicazione utilizzato da Rosetta per trasmettere e ricevere informazioni dalle stazioni a Terra. L'oscillazione della frequenza nei segnali radio della sonda viene utilizzata per misurare la massa e la gravità del nucleo della cometa, per dedurre la densità e la struttura interna, per definire l'orbita della cometa e per studiarne la chioma. RSI ha determinato la massa e la densità dell'asteroide Lutetia durante il fly-by del 2010.

Il team RSI è riuscito a escludere la possibilità che vi siano cavità all'interno nella struttura interna della cometa.

VIRTIS (Visible and InfraRed Thermal Imaging Spectrometer): è uno spettrometro ad immagini che combina tre canali di dati in un unico strumento. Mappa e studia la natura delle sostanze solide e la temperatura superficiale del nucleo. Inoltre identifica i gas cometari, le proprietà fisiche della chioma e ha aiutato a identificare i migliori siti per l'atterraggio del lander.

Lo strumento VIRTIS ha permesso di monitorare i cambiamenti nella luce riflessa dalla superficie in un range di lunghezze d'onda dal visibile all'infrarosso, come indicatore dei lievi cambiamenti sugli strati superficiali della cometa.

Gli strumenti del lander sono disegnati per misurare la composizione molecolare, mineralogica e isotopica della superficie della cometa e del materiale che si trova sotto

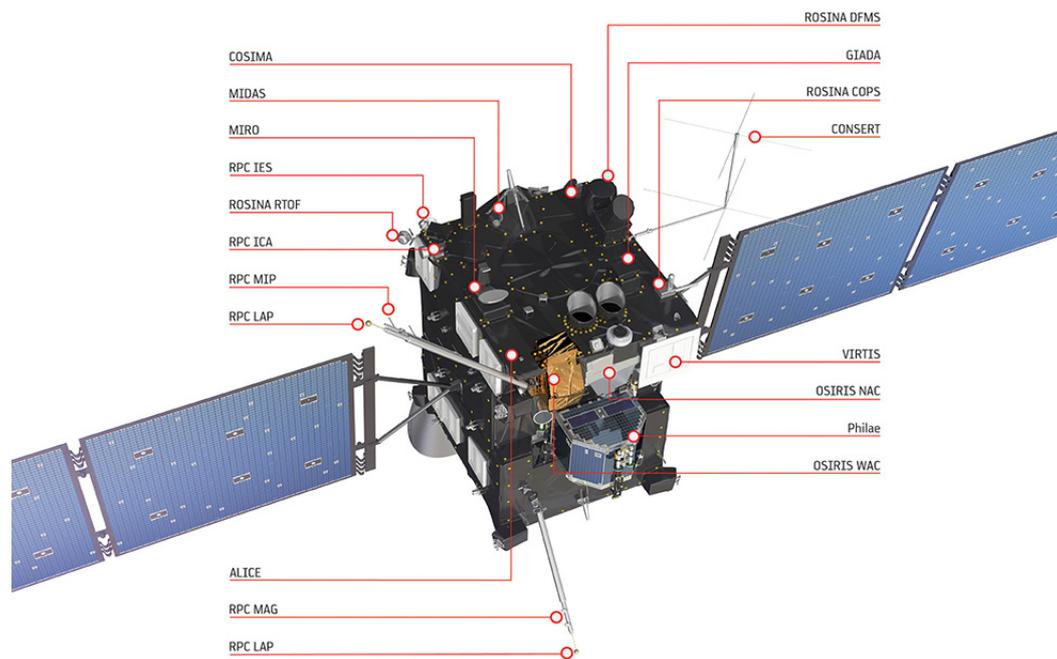


Figura 1.2: Schema degli strumenti scientifici a bordo della sonda Rosetta.

la superficie, ma anche per studiare proprietà superficiali come la densità, la porosità, la texture, la fase del ghiaccio e le proprietà termiche. Il dispositivo per la campionatura ha perforato la superficie per più di 20 cm, collezionando campioni da analizzare al microscopio. Gli strumenti del lander sono:

APXS: Alpha-p-X-ray spectrometer

CIVA: Panoramic and microscopic imaging system

CONSERT: COMet Nucleus Sounding Experiment by Radio-wave Transmission

COSAC: COMetary SAMpling and Composition

MODULUS PTOLEMY: Methods Of Determining and Understanding Light elements from Unequivocal Stable isotope composition

MUPUS: Multi-Purpose Sensors for Surface and Subsurface Science

ROLIS: Rosetta Lander Imaging System

ROMAP: Rosetta Lander Magnetometer and Plasma Monitor

SD2: Sample and Distribution Device

SESAME: Surface Electrical Sounding and Acoustic Monitoring Experiments

L'Agenzia Spaziale Italiana ha contribuito considerevolmente alla missione con degli strumenti per la mappatura della superficie, per studiarne la composizione e per analizzare le polveri che circondano la cometa.

Il trapano utilizzato per perforare la superficie della cometa è stato costruito dalla Galileo Avionica, come gli strumenti VIRTIS e GIADA. Anche la camera scientifica a grande campo WAC, parte del sistema ottico, OSIRIS, i sensori stellari, la camera di navigazione e il generatore fotovoltaico sono stati realizzati da gruppi italiani.

Capitolo 2

Le comete

Le comete sono classificate come corpi minori del Sistema Solare insieme agli asteroidi, alle meteoriti, ai centauro trans-nettuniani e agli oggetti di transizione, in opposizione ai corpi di dimensioni maggiori del Sistema Solare, i pianeti e il Sole.

Le comete sono corpi di piccole dimensioni, con nuclei tipicamente inferiori ai 50 km, costituite da ghiacci, per la maggior parte ghiaccio d'acqua, rocce e polveri. I ghiacci cometari si trovano per gran parte del tempo in forma amorfa e non cristallina, infatti il ghiaccio che si forma a basse temperature e pressioni, come quelle alle quali si formano le comete, è amorfo. Solo ad una temperatura di 137 K il ghiaccio amorfo si trasforma spontaneamente ed irreversibilmente in ghiaccio cubico. Si presume che se le comete non vengono riscaldate a 137K quando si trovano a grandi distanze dal Sole, allora devono aver preservato il ghiaccio nella forma amorfa. Il ghiaccio amorfo cristallizza, in una misura che dipende dall'orbita della cometa, quando sono esposte all'intensa radiazione solare. Ci si aspetta, dunque, che le comete vecchie siano costituite parzialmente o totalmente da ghiaccio cristallino, mentre le comete nuove contengano ghiaccio d'acqua amorfo.

Sebbene ci siano prove dell'esistenza delle comete da moltissimo tempo, solo negli ultimi 400 anni le comete sono state riconosciute come oggetti astronomici e non più come fenomeni atmosferici. Sicuramente la spinta definitiva in questo senso si può attribuire a Edmond Halley, il quale nel 18° secolo intuì che le comete sono corpi solidi del Sistema Solare. Grazie alla meccanica newtoniana, inoltre, Halley riuscì a dimostrare che le comete apparse nel 1531, 1607 e 1682 erano di fatto la stessa cometa che ritornava con un periodo di 75.5 anni e fu quindi intitolata proprio a suo nome.

Solo con il miglioramento delle tecniche e degli strumenti osservativi, di recente, sono state scoperte numerose comete più deboli. Tipicamente in un anno vengono scoperte da 12 a 15 nuove comete.

Le comete sono molto probabilmente planetesimi che si sono formati nel Sistema Solare esterno alla distanza dei pianeti Urano e Nettuno circa 4.6 miliardi di anni fa. A queste distanze (da 19 a 30 AU), infatti, le temperature sono abbastanza basse

da permettere la condensazione degli elementi volatili. Considerando che le comete si sono formate alla stessa epoca dei pianeti, anche queste giacciono all'incirca sullo stesso piano, l'eclittica.

Dal momento della formazione del Sistema Solare sono sopravvissute due classi di protocomete: quelle formatesi nel disco protosolare trans-nettuniano e quelle trasferite nella nube di Oort a causa delle perturbazioni orbitali dovute ai pianeti giganti.

Dunque le comete sono localizzate in due zone all'interno del Sistema Solare: la Kuiper Belt e la nube di Oort. La Kuiper Belt è una fascia che si estende oltre l'orbita di Nettuno, da 30 AU fino a 55 AU; mentre la nube di Oort ha una forma sferica e si estende ai confini del Sistema Solare tra 10^4 e 10^5 AU, all'interno della nube sono contenute più di due milioni di comete. La forma sferica della nube spiega come mai le comete a lungo periodo possano entrare nel Sistema Solare da qualunque direzione e quindi avere inclinazioni orbitali anche molto elevate.

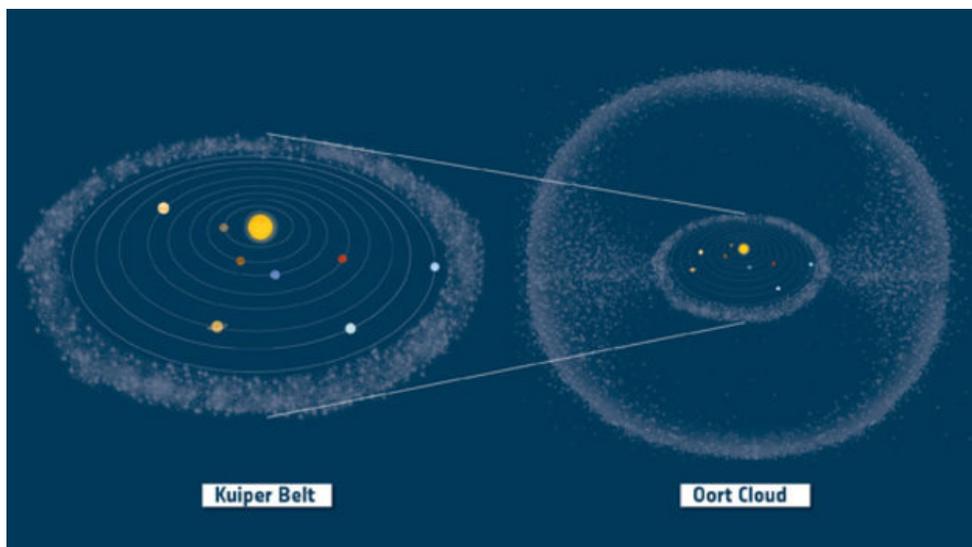


Figura 2.1: Kuiper Belt e nube di Oort

Gli step che portarono alla formazione dei planetesimi, o meglio dei cometesimi, sono:

- la coagulazione e l'accrescimento da grani di dimensioni submicroniche, supportate da moti browniani del gas nella nebulosa presolare;
- la formazione di particelle di tipo frattale con dimensioni che raggiungono il centimetro;
- il compattamento di particelle a velocità di deriva maggiori;
- la formazione di corpi di dimensioni maggiori tramite l'azione del gas;
- la collisione dei corpi a basse velocità e la formazione di corpi con dimensioni da 0.1 a 10 metri;

- il mescolamento radiale dovuto alla migrazione.

2.1 Classificazione dinamica

Una classificazione storica delle comete si basa sul loro periodo orbitale, pertanto si parla di comete a corto periodo, se il periodo orbitale è < 200 anni, e di comete a lungo periodo se il periodo orbitale è > 200 anni.

Le comete a corto periodo sono caratterizzate da orbite ellittiche con inclinazioni basse rispetto al piano equatoriale, descrivono l'orbita in verso progrado (solo il 7% ha un moto retrogrado), e presentano l'afelio tra 40 e 70 AU. Il 60% di queste comete ha un periodo orbitale compreso tra i 5 e i 6.5 anni.

Le comete a corto periodo sono ulteriormente suddivise in due gruppi: le *comete della famiglia di Giove* o *gioviane* e le *comete di tipo Halley*. Le comete della famiglia di Giove hanno un periodo orbitale < 20 anni, devono il loro nome al fatto di avere l'afelio vicino all'orbita di Giove e sono dinamicamente dominate dal pianeta. Presentano tipicamente il semiasse maggiore fra 3 e 4 AU, descrivono orbite prograde e con basse inclinazioni.

Le comete di tipo Halley, invece, hanno periodi orbitali tra i 20 e i 200 anni, inclinazioni che vanno da 0° a più di 90° , con un'inclinazione media di 41° e molte comete di questa famiglia hanno un moto retrogrado. Attualmente sono conosciute 89 comete di tipo Halley e 557 della famiglia di Giove.

Le comete a lungo periodo presentano periodi che possono raggiungere anche milioni di anni e pertanto hanno delle orbite altamente eccentriche. Le inclinazioni non presentano un andamento standard, il moto è spesso retrogrado e le orbite possono descrivere parabole, iperboli o ellissi molto eccentriche.

Anche le comete a lungo periodo sono ulteriormente suddivise in due gruppi, sulla base del valore assunto dal semiasse maggiore. Le comete con semiasse maggiore $>$ di 10000 AU sono le *new comet*, mentre quelle con semiasse $<$ di 10000 AU sono le *returning comet*. Alla base di questa classificazione vi è l'idea che il semiasse maggiore di una cometa diminuisca a seguito di successivi passaggi al perielio. È molto probabile infatti che le returning comet siano state prima delle new comet, che in seguito a precedenti passaggi vicino al Sole hanno diminuito il loro semiasse maggiore.

Una classificazione dinamica più moderna delle comete si basa, invece, sull'invariante di Tisserand, che consente il riconoscimento di una cometa periodica nei passaggi successivi al primo. Le comete, infatti, si ripresentano con i parametri orbitali mutati a causa della diminuzione della massa del nucleo cometario, per via della perdita di materiali che la cometa lascia lungo la sua orbita, e per le perturbazioni che i pianeti esercitano sulla cometa, in particolare Giove. Tisserand ha osservato che le maggiori perturbazioni sulle comete sono dovute a Giove, pertanto il moto della cometa si può considerare come un caso particolare del problema a tre corpi: Sole, Giove e cometa. L'invariante di Tisserand è definito come:

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2 \left[(1 - e^2) \frac{a_J}{a} \right]^{1/2} \cos(i) \quad (2.1)$$

dove a è il semiasse maggiore, e l'eccentricità e i l'inclinazione relativa all'orbita di un corpo perturbante di dimensioni maggiori, solitamente Giove, con semiasse maggiore a_J . Dunque l'invariante di Tisserand fornisce un test per verificare che oggetti visti in due successive apparizioni siano la stessa cometa.

La nuova classificazione con l'invariante prevede che le comete con $T_J < 2$ siano definite *eclittiche*, poiché presentano basse inclinazioni, mentre le comete con $T_J > 2$ sono denominate *quasi isotropiche*.

Le comete eclittiche sono ulteriormente divise in tre classi: quelle con $2 < T_J < 3$ sono le *comete della famiglia di Giove*, in quanto sono dinamicamente dominate dal pianeta; quelle con $T_J > 3$ sono chiamate *Encke-type* se $a < a_J$ (ovvero l'orbita è interna a quella di Giove) e *Chiron-type* se $a > a_J$ (l'orbita è esterna a quella di Giove).

Anche gli oggetti quasi isotropici sono suddivisi in due gruppi: le *new comet*, aventi il semiasse maggiore $a > 10000$ AU, e le *returning comet*, con $a < 10000$ AU. Le returning comet si dividono in *external* e *Halley-type*. Le Halley-type hanno un semiasse maggiore abbastanza piccolo da essere intrappolate in una risonanza di moto medio con un pianeta gigante, mentre se il semiasse maggiore è più grande di questo valore si hanno le external. Questa classificazione, essendo basata su parametri più oggettivi, è la più utilizzata.

Le comete della famiglia di Giove si pensa provengano dalla Kuiper Belt, o più precisamente dal Disco Scatterato ad essa associato. La nube di Oort, invece, è considerata la sorgente delle comete Halley-type e delle comete a lungo periodo.

Quando diventa possibile determinare l'orbita di una cometa, a seguito di successive osservazioni, le viene assegnato un numero definito dalla progressione storica delle scoperte, un nome e una lettera che indica una delle seguenti proprietà: P per le comete a corto periodo, C per le comete a lungo periodo, D comete estinte, A comete che hanno una possibile origine asteroidale, e X per le comete di cui non è stato possibile calcolare l'orbita.

2.2 Proprietà fisiche

I nuclei cometari sono degli oggetti molto piccoli composti da ghiacci e rocce, che si riscaldano in prossimità dei loro passaggi vicino al Sole, con la conseguente sublimazione dei materiali volatili e la fuoriuscita del gas. In questo modo si ha la formazione di una sorta di atmosfera dalla forma sferica, chiamata *chioma*, mentre la *coda* caratteristica delle comete si forma quando la radiazione e il vento solare interagiscono con la chioma. La chioma e la coda sono pertanto delle caratteristiche transitorie, che si presentano per qualche settimana o mese in prossimità del loro passaggio al perielio, e quando sono presenti la cometa viene detta attiva. La chioma e la coda hanno dimensioni di gran lunga più grandi di quelle del piccolo nucleo cometario e la loro luminosità è maggiore di quella della superficie del nucleo. Quando la cometa è lontana dal perielio, a una distanza maggiore di 5-6 AU, la chioma e la coda non sono accese, così la luminosità della cometa è dovuta solamente alla luce del Sole riflessa dal nucleo,

conferendo alle comete un aspetto asteroidale. Dunque l'aspetto e la brillantezza delle comete variano molto con la distanza dal Sole.

Il nucleo

Negli anni si sono susseguite varie teorie sui modelli di nucleo cometario, come il modello dei 'sandbanks' o dei 'rubble pile', ma il modello oggi più accreditato è quello del 'dirty snow ball' o modello di nucleo monolitico ghiacciato, proposto da Whipple nel 1950 e confermato dalle osservazioni della cometa Halley. Secondo questo modello i nuclei sarebbero dei conglomerati di ghiacci e materiale refrattario dalla struttura monolitica, e non un aggregato di piccole particelle solide senza coesione che si incontrano in vicinanza del perielio (sandbanks model) o da un insieme numeroso di rocce (rubble pile).

Riguardo la struttura interna, i nuclei non presentano una differenziazione radiale, cioè manca un interno stratificato come è tipico nei pianeti. La composizione, mediamente, rimane la stessa nel tempo, il rapporto polvere-gas non cambia da comete poco evolute a comete evolute, e anche le abbondanze atomiche e molecolari e la forza degli strati non cambiano con la profondità.

I primi cambiamenti superficiali di un nucleo cometario avvengono quando la cometa si trova ancora nella nube di Oort per via dell'irraggiamento dovuto ai raggi cosmici galattici. I cambiamenti più importanti, però, si hanno nel corso dei passaggi successivi al perielio, infatti si costituisce progressivamente sulla superficie una crosta di materiale refrattario che si distribuisce in modo irregolare. Ciò che succede è che con la fuga dei gas dal nucleo, per azione del calore solare, le particelle più grosse non riescono a fuggire e ricadendo sul nucleo creano un accumulo nelle zone meno attive, formando una sorta di schermo isolante di spessore variabile che protegge i ghiacci sottostanti dalla radiazione incidente. La formazione progressiva della crosta può spiegare l'indebolimento dell'attività cometaria fino ad arrivare anche allo spegnimento definitivo della cometa. Lo spessore di questa crosta dipende da fattori come l'efficienza della sublimazione e l'età della cometa. Inoltre se lo spessore diventa più grande della capacità di penetrazione termica, l'efficienza della sublimazione diminuisce e la regione diventa passiva.

Sebbene vi siano ancora molte incertezze i modelli di nuclei cometari predicono la formazione di due tipi di mantello: un *mantello roccioso*, che si forma come conseguenza della sublimazione, e un *mantello di irradiazione*, sviluppato mentre la cometa si trova nella nube di Oort ed è inattiva.

Il processo di formazione del mantello roccioso segue quanto descritto sopra e probabilmente si forma durante il tempo impiegato dalla cometa a percorrere una singola orbita.

Per quanto riguarda il mantello di irradiazione sappiamo che il nucleo cometario consiste di ghiacci e rocce, e che l'azione dei raggi cosmici indebolisce i legami molecolari dei ghiacci sempre di più con il passare del tempo. Si formano così diversi composti del carbonio che contribuiscono alla formazione di un mantello dall'aspetto molto scuro. Questo processo continua finché non si raggiunge la saturazione, che avviene in circa 100 milioni di anni. I raggi cosmici hanno una profondità di penetrazione di circa un metro nei ghiacci, quindi si pensa che lo spessore dello strato di irradiazione corrispon-

da a questo valore.

La vera evoluzione termica di una cometa comincia quando entra nelle zone più interne del Sistema Solare, per questo le comete nuove o giovani vengono spesso descritte come oggetti primitivi che hanno subito cambiamenti piccoli o nulli durante la loro permanenza nelle regioni più esterne del Sistema Solare, e costituiscono una preziosa sorgente di materiale della nebulosa solare originaria. Le comete possono dunque terminare la loro esistenza o diventando inattive, tipo asteroidi, o spezzandosi in vari frammenti di vita breve.

La chioma

Quando il nucleo cometario si avvicina al Sole si circonda di una chioma per via dell'evaporazione degli elementi volatili dovuta al calore solare. I gas sfuggono all'attrazione gravitazionale del nucleo con una velocità di circa 0.5 km/sec, e formano una sfera intorno al nucleo, qui un gran numero di collisioni assicura l'equilibrio termico. Con l'aumentare della distanza dal nucleo, invece, la densità diminuisce sino a rendere inefficienti le collisioni e viene favorita la ionizzazione da parte dei fotoni UV solari. La chioma non è legata gravitazionalmente al nucleo, quindi cambia rapidamente in funzione dell'orbita e della distanza dal Sole, in particolare la sua estensione aumenta con l'avvicinamento al Sole fino a raggiungere anche qualche milione di chilometri.

La chioma diventa solitamente ben visibile quando sublimano il CO e la CO₂, successivamente sublima anche l'acqua, a circa 2.8 UA, e il CN a 3 UA. La componente di polvere riflette lo spettro continuo solare al quale si sovrappone uno spettro di forti righe e bande di emissione da parte dei gas neutri che formano la chioma (C₂, CN, NH₂, H₂O). Alla luce solare riflessa, la chioma di polvere aggiunge la propria emissività termica, che a causa della bassa temperatura è situata nel lontano IR.

È presente anche una chioma molto estesa di H che emette a 1212 Å (Ly-alpha), ma risulta invisibile da Terra, e un'altra chioma di OH avente un'estensione minore. Entrambe derivano dalla dissociazione delle molecole di acqua per assorbimento dei fotoni solari.

La chioma osservata è costituita principalmente da polvere (ovvero grani di materiale refrattario ricoperti da ghiacci), molecole, radicali neutri, specie atomiche e ioni molecolari che vengono rilasciati dalla chioma più interna con una velocità di circa 0.5-1 km/sec. Dall'analisi della composizione chimica della chioma è possibile dedurre la composizione chimica del nucleo, essendo questo inaccessibile dalle osservazioni. Le specie osservate in essa, *molecole figlie*, sono per la maggior parte frammenti molecolari provenienti da molecole più complesse costituenti il nucleo, *molecole madri*. Le molecole genitrici o madri vengono prodotte direttamente dalla sublimazione dei ghiacci nucleari, solitamente ghiaccio d'acqua, diossido di carbonio, metano, ammoniaca e altre molecole complesse. Le molecole figlie sono invece radicali neutri come CO, CN, C₂, OH, CH, NH₂. A grandi distanze dal nucleo, circa 10⁶-10⁷ km, si trovano gli elementi costituenti le sostanze volatili: C, H, O, N, Na, Si, Ca etc. L'H₂O è il costituente principale, circa 80-90%, e la successiva molecola più abbondante è il CO.

La sorgente del materiale osservato nella chioma è il nucleo, il gas viene rilasciato anche da grani strappati dal nucleo nel corso della loro sublimazione. L'attività del nucleo è caratterizzata dal numero di molecole emesse per unità di tempo Q, o tasso di pro-

duzione, il quale viene controllato dalla temperatura del nucleo. Se si considera una chioma a simmetria sferica circondante un nucleo di raggio R_n che emette in modo isotropo Q molecole per secondo, esse si allontaneranno con velocità v corrispondente alla temperatura di equilibrio della superficie nucleare.

$$Q = 4\pi R^2 n(R)v \quad (2.2)$$

è il numero totale di molecole che attraversa in un secondo una sfera di raggio R molto maggiore di R_n centrata sul nucleo. Con: $n(R)v$ numero di particelle attraversanti in un secondo una superficie di 1 cm^2 normale al raggio R , e $n(R)$ densità numerica alla distanza R .

Tipicamente la chioma viene suddivisa in tre regioni principali: la *chioma interna*, ovvero la zona di produzione, a simmetria sferica e poco estesa, con un raggio di circa 10^4 km; la *chioma visibile* o *radicale*, cioè la zona di espansione delle molecole figlie, l'estensione di questa zona è determinata dalla velocità e dal tempo di vita delle particelle, in media poco più di 10^5 km di raggio; e la *chioma atomica* o *UV*, ovvero la zona di distruzione per ionizzazione e scambio di carica con il vento solare, con dimensioni da 10^5 a 10^7 km circa.

Il meccanismo principale di produzione delle specie osservate nelle comete (CN, NH, CH, C₂, C₃, OH) è la fotodissociazione e fotoionizzazione delle molecole genitrici per irraggiamento solare, dando così origine alle molecole figlie che a loro volta vengono fotodissociate e fotoionizzate.

Questi processi dipendono dal campo di radiazione solare che li innesca, in particolare la variazione del flusso UV proveniente dal Sole è responsabile dei cambiamenti del tasso di dissociazione e ionizzazione dell'acqua e delle molecole figlie.

La coda

L'azione del vento solare sulla chioma produce tre code cometarie che puntano in direzione antisolare: la coda di ioni, di polvere e di Sodio.

La *coda di ioni* è formata dagli atomi ionizzati che si formano nella chioma quando la radiazione solare spezza le molecole madri e figlie e le ionizza. Il gas ionizzato viene spazzato in direzione antisolare dalla parte opposta a quella del moto della cometa e si estende radialmente per 10^7 - 10^8 km. Tale coda assume un colore tendente al blu per fluorescenza dei gas ionizzati, e lo ione dominante è il CO⁺.

La *coda di polvere* si estende per circa 10^7 km e assume un colore giallastro, dovuto alla diffusione della luce solare da parte della polvere. Viene generata dalla pressione di radiazione solare che spinge le particelle di polvere nella direzione opposta a quella del Sole, l'effetto del vento solare sulle particelle di polvere è minore di quello agente sul gas ionizzato, per questo motivo la coda di polvere è leggermente incurvata e si dispone a ventaglio sul piano orbitale.

La terza coda che risulta invisibile ad occhio nudo è la *coda di Sodio*. Si tratta di una coda dritta e stretta che si sovrappone alla coda di polvere, presumibilmente formata dalla dissociazione di alcune molecole contenenti sodio e che viene trascinata dalla pressione di radiazione.

Inoltre è stata osservata in alcune comete un'*anticoda*, ovvero una coda che si dispone

in direzione solare. Più precisamente la direzione dell'anticoda dipende dalla geometria del sistema Sole-cometa-Terra e può essere osservata quando l'orbita della cometa incrocia il piano orbitale della Terra.

2.3 Luminosità e dimensioni

Il flusso di luce incidente sulla superficie di una cometa viene diviso in due parti: la parte assorbita e la parte riflessa. Il flusso assorbito è responsabile dell'emissione di corpo nero da parte della cometa alla temperatura raggiunta in seguito al riscaldamento e cadrà nel lontano IR. Il flusso riflesso è scatterato dalla superficie del nucleo e dalla polvere, e costituisce lo spettro continuo della cometa, a cui si aggiungono le emissioni di gas nella chioma quando questa è attiva.

Per le comete distinguiamo tra *magnitudine totale*, che include tutti i fenomeni di radiazione causati dal passaggio al perielio, e *magnitudine nucleare*, dovuta solamente al nucleo. In particolare lontano dal Sole e quindi in assenza di attività, la magnitudine totale risulta uguale alla magnitudine nucleare, ed espressa da:

$$m_n = m_0 + 5 \log \Delta + 5 \log r \quad (2.3)$$

con Δ distanza geocentrica in AU, r distanza eliocentrica in AU, m_0 magnitudine nucleare alla distanza di 1 AU in assenza di attività.

Nel caso in cui la cometa sia attiva si ricorre a formule empiriche:

$$m = m_0 + 5 \log \Delta + 2.5n \log r \quad (2.4)$$

dove n dipende da fenomeni di riflessione, emissione, età della cometa, etc. e dalle osservazioni si è ottenuto che n varia tra 2 e 6, mentre per le comete vecchie tra 4 e 6. Per quanto concerne le dimensioni dei nuclei cometari non sono facili da ottenere da Terra, in quanto non si è in grado di risolvere otticamente i nuclei. La tecnica utilizzata è la fotometria a grandi distanze dal Sole, cosicché la temperatura del nucleo è abbastanza bassa da non permettere la sublimazione dei ghiacci, ovvero la formazione della chioma. La radiazione che si osserva a queste distanze deriva dalla riflessione da parte del nucleo della luce solare incidente.

Dalle osservazioni fotometriche segue che il raggio R del nucleo può essere ottenuto dalla relazione:

$$R^2 = r^2 A^{-1} \phi^{-1}(\alpha) 10^{0.4[V_s - (V_c - 5 \log \Delta)]} \quad (2.5)$$

dove: A è l'albedo del nucleo, $\phi(\alpha)$ è la funzione di fase, V_s è la magnitudine assoluta del Sole e V_c la magnitudine assoluta della cometa. L'albedo tipicamente non è una quantità nota per le comete, un intervallo di valori plausibili è $0.02 < A < 0.7$, corrispondenti rispettivamente all'albedo del ghiaccio d'acqua e del corpo più scuro del Sistema Solare. Con questa tecnica si è trovato per le comete un valor medio di R tra 1 km e 5 km.

Anche per quanto riguarda la determinazione della massa dei nuclei cometari non ci

sono tecniche dirette dato che, per le piccole dimensioni, non si è in grado di rilevare perturbazioni gravitazionali nei confronti di altri corpi del Sistema Solare. Anche in corrispondenza del massimo avvicinamento delle sonde, infatti, la perturbazione della loro traiettoria è solitamente troppo piccola per essere misurata. Uno dei metodi più utilizzati per dare una stima della massa cometaria è quello di assumere un valore plausibile per la densità, di solito attorno a 1 gr/cm^3 . Dunque per un nucleo sferico di raggio pari a 2 km, la massa M sarà circa $3 \times 10^{16} \text{ kg}$. In questo modo, si ritiene che le masse cometarie varino in un intervallo tra 10^{13} e 10^{19} kg .

La missione Rosetta ha permesso la determinazione della massa della cometa 67P/ che risulta $(1 \pm 0.1) \times 10^{13} \text{ kg}$ [1].

2.4 Spettri cometari

Attualmente le conoscenze riguardanti molti aspetti dei fenomeni cometari derivano direttamente dallo studio e analisi degli spettri delle comete.

Lo spettro di una cometa brillante è costituito da diversi tipi di emissione: un'emissione continua, detta *il continuo*, e da emissioni discrete, ovvero righe e bande, dovute sia ad atomi o molecole neutre, sia a ioni atomici o molecolari. Il continuo è un'emissione proveniente dalla regione centrale della cometa, è dovuto allo scattering e alla riflessione della radiazione solare da parte della polvere che i gas sublimati trascinano con sé allontanandosi dal nucleo. Vi si distinguono righe di assorbimento che possono essere identificate come righe di Fraunhofer solari. La distribuzione di intensità del continuo è praticamente uguale a quella dell'irraggiamento solare anche se spesso leggermente più arrossata. La larghezza del continuo corrisponde, sulla cometa, a un diametro che varia da cometa a cometa, da qualche migliaio a qualche decina di migliaia di chilometri, e che si estende nella direzione della coda di polvere. A grandi distanze eliocentriche, oltre le 3 AU, lo spettro di una cometa è costituito essenzialmente da radiazione continua, dal momento che la chioma inizia a formarsi a distanze $\leq 3 \text{ AU}$.

Le emissioni neutre, che provengono dalla chioma, si ripartiscono in modo quasi simmetrico rispetto al continuo: alcune come NH_2 , CH , C_3 si estendono per alcuni km, altre come CN si estendono a distanze maggiori dal nucleo. Le emissioni dovute agli ioni presentano, al contrario, una ripartizione nettamente asimmetrica, sono generate nella coda di plasma e sono molto più lunghe nella direzione opposta al Sole.

Nella regione ultravioletta dello spettro sono visibili le righe di emissione di H, O, C, N, S e le bande di CS e CO.

Nel dominio ottico si osserva in generale la seguente evoluzione: a $r \sim 3 \text{ AU}$ appare la banda (0,0) del radicale CN a $\lambda = 3880 \text{ \AA}$, è la prima banda ad apparire negli spettri cometari e definisce l'estensione della chioma neutra. Per $2 < r < 3 \text{ AU}$ seguono le emissioni del C_3 e NH_2 , a $r < 1.5 \text{ AU}$ si hanno le emissioni del C_2 , OH, NH e CH. Le bande di emissione dell'OH a $\lambda = 3090 \text{ \AA}$ sono al limite delle osservazioni da Terra a causa dell'assorbimento da parte dell'ozono terrestre, tuttavia costituiscono le emissioni più forti e più estese. A $r < 1 \text{ AU}$ appaiono le righe dell'[OI] a $\lambda = 6300, 6364 \text{ \AA}$, e il doppietto del sodio atomico a $\lambda = 5890, 5896 \text{ \AA}$.

Si osservano anche delle righe metalliche come Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, K, Ca, ma solamente in un gruppo molto particolare di comete, dette *comete radenti* perché raggiungono distanze perieliche molto piccole, in particolare ≤ 0.02 AU. Anche alcuni elementi cosmicamente abbondanti come H, C, N e S sono presenti, ma generalmente sono individuabili solo nelle comete radenti. Vicino al Sole, infatti, il calore diviene sufficientemente intenso, $T > 10^3$ K, da sublimare la componente refrattaria della polvere e far apparire questi elementi metallici che, in condizioni normali, rimangono racchiusi nei grani di polvere principalmente sotto forma di silicati, e non sono osservabili come atomi singoli; fa eccezione il sodio forse perché contenuto in sostanze più facilmente dissociabili.

Lo spettro di una coda di plasma mostra soprattutto la presenza di specie ionizzate come H_2O^+ e CO^+ , che vengono deviate dalla chioma in direzione radiale antisolare, a causa dell'interazione con il vento solare. Di solito si osserva la formazione di tali code per $r \leq 2$ AU. Tra gli ioni osservati nella coda di plasma di una cometa, le emissioni del CO^+ sono quelle dominanti.

Nella regione infrarossa si osservano le bande del CN, emissioni da idrocarburi e la molecola CO_2 .

Osservazioni nel dominio che va dal millimetrico al radio hanno mostrato molecole più grandi e più complesse come: HCN, H_2CO , H_2S , SO_2 , etc. ve ne sono tante altre con maggior numero di atomi fino anche a componenti fondamentali per la vita come gli amminoacidi.

In conclusione:

- le molecole finora identificate sono composte principalmente da: H, C, O e N, gli elementi più abbondanti nell'universo;
- la maggior parte delle specie rilevate sono di natura organica, indicando l'importanza del carbonio nella costituzione delle comete;
- l'azoto è un elemento di difficile identificazione, in quanto la transizione di risonanza dell'azoto, a circa 1200 \AA , è molto vicina alla forte riga Lyman-alpha dell'idrogeno. Le forti emissioni del CN, tuttavia, suggeriscono la presenza di N;
- la maggior parte delle specie osservate sono radicali o ioni che sono fisicamente stabili, ma chimicamente molto reattivi, questo significa che non possono esistere come tali nel nucleo. Si ritiene pertanto che questi radicali siano i sottoprodotti della distruzione di molecole più complesse, da cui l'idea di molecole madri e figlie;
- il predominio di radicali implica basse densità nella chioma, quindi le collisioni in tale regione non sono molto importanti, mentre lo sono vicino al nucleo;
- sono stati osservati tutti gli elementi della fotodissociazione dell'acqua;
- le specie neutre sono state individuate in una regione più o meno sferica attorno al nucleo, che ha dimensioni tipiche di circa 10^5 km per tutte le specie, tranne che per l'idrogeno atomico la cui emissione Lyman-alpha si estende su una regione che è più di un ordine di grandezza superiore;

- gli ioni si trovano sia nella chioma che nella coda di plasma.

Sebbene queste siano caratteristiche comuni agli spettri vanno menzionate anche alcune differenze, ad esempio: l'importanza relativa del continuo rispetto alle emissioni discrete, che può essere completamente diversa in due comete osservate alla medesima distanza eliocentrica, indicando una maggiore o una minore quantità di polvere, oppure rapporti come C_3/CN , NH_2/C_2 , etc. che possono mostrare importanti variazioni da una cometa all'altra.

In ogni caso non sembrano esistere distinzioni spettrofotometriche essenziali tra comete di età dinamica diversa, sia che si tratti di comete nuove che di comete evolute. Esistono, infatti, spettri a debole continuo o a continuo intenso tanto tra le comete a periodo molto lungo, quanto tra le comete a corto periodo.

Capitolo 3

La cometa

67P/Churyumov-Gerasimenko

La cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko è stata scoperta nel 1969 da Klym Ivanovyč Čurjumov (Churyumov per translitterazione anglosassone) dall'analisi di una fotografia scattata presso l'Istituto di Astrofisica di Alma-Ata da Svetlana Ivanovna Gerasimenko, che stava studiando la cometa 32P/Comas Solá.

Si tratta di una cometa periodica del Sistema Solare classificata come cometa della famiglia di Giove. Presenta un nucleo avente dimensioni di $4.34 \text{ km} \times 2.60 \text{ km} \times 2.12 \text{ km}$, una massa di $1 \times 10^{13} \text{ kg}$ e una densità di 533 kg/m^3 , un valore minore della metà della densità dell'acqua e che è indice di una elevata porosità.

La cometa ha un periodo di rotazione di 12.4 ore, con verso di rotazione progrado, mentre il periodo di rivoluzione intorno al Sole è di 6.45 anni. L'orbita è ellittica con una eccentricità di 0.640 e una inclinazione di 7.04° . Inoltre il perielio è ad una distanza di 186 milioni di km (1.24 AU) dal Sole, mentre l'afelio è a 849.7 milioni di km (5.68 AU) dal Sole.

Proprietà	Simbolo	Valore
Dimensioni	-	$4.34 \text{ km} \times 2.60 \text{ km} \times 2.12 \text{ km}$
Massa	m	$1 \times 10^{13} \text{ kg}$
Densità	ρ	535 kg/m^3
Periodo di rotazione	P	12.4 h
Periodo di rivoluzione	T	6.45 anni
Inclinazione dell'orbita	i	7.04°
Eccentricità dell'orbita	e	0.640

Tabella 3.1: Proprietà fisiche della cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko.

3.1 Morfologia

La forma della cometa è uno degli aspetti più sorprendenti tra le scoperte fatte da Rosetta, presenta infatti due lobi uno di dimensioni maggiori e uno di dimensioni minori collegati tra loro da una struttura leggermente più sottile, comunemente denominati testa, collo e corpo della cometa.

Questa particolare struttura ha dato luogo a diverse ipotesi sulla possibile origine della cometa, e cioè se si tratta di un planetesimo primordiale o se il nucleo si è formato da un planetesimo in origine più grande. Un'altra questione ancora aperta è se la cometa sia il risultato dell'urto di due corpi inizialmente separati o, viceversa, se l'attuale struttura sia dovuta alla perdita di materiale superficiale in seguito ai successivi passaggi al perielio [1]. Dall'analisi delle immagini inviate da Rosetta prima del passaggio al perielio sono state individuate sulla superficie della cometa 19 regioni, sulla base di differenze morfologiche e strutturali. A queste regioni ne sono state aggiunte altre sette in seguito al passaggio della cometa all'equinozio (maggio 2015), che ha permesso di illuminare l'emisfero sud della cometa, fino ad allora rimasto in ombra. Dunque in totale sono state individuate 26 regioni, classificate con i nomi delle divinità egizie femminili nel lobo minore, e con quelli delle divinità maschili per il collo e il lobo maggiore.

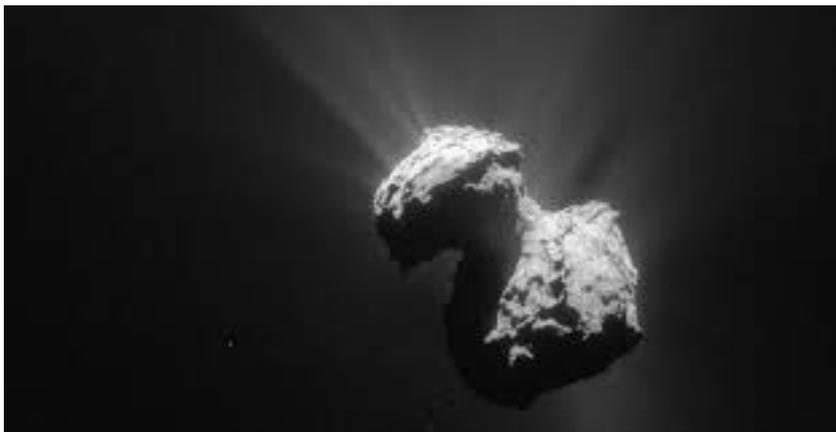


Figura 3.1: La cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko

A partire da maggio 2014 sono state acquisite le prime immagini ad alta risoluzione spaziale della cometa 67P/ ad una distanza dal centro della cometa di soli 20-30 km.

La superficie del nucleo mostra delle differenze morfologiche che possono essere classificate in tre categorie di terreno principali: le regioni consolidate, le regioni non-consolidate e le grandi depressioni irregolari [2].

Le regioni consolidate sono unità rocciose e coese che mostrano fratture nel terreno. Si distinguono zone fortemente consolidate con diversi gradi di fratture e zone consolidate più debolmente, facilmente sgretolabili, e con una elevata concentrazione di pozzi circolari che presentano all'interno depositi di massi. Questi pozzi sono possibili sorgenti dell'attività cometaria, tipicamente hanno un diametro che va dai 50 ai 300 m

e una profondità tra i 10 e i 200 m. Le regioni consolidate rappresentano la tipologia di terreno più comune in entrambi i lobi.

Le regioni non consolidate comprendono due sottocategorie di terreno: le zone ricoperte da polvere e i terreni lisci. Questi ultimi sono presenti nel lobo maggiore nelle regioni Imhotep e Anubis, e nel collo nella regione Hapi (Fig. 3.3). Lo strato di polvere che ricopre alcune zone, presente soprattutto nelle regioni Ash e Ma'at, è legato all'attività della cometa.

Infine vi sono tre grandi depressioni irregolari: nel lobo minore su Hatmehit e Nut, e nel lobo maggiore su Aten. All'interno di queste depressioni si trovano principalmente depositi di massi e vi è molto raramente uno strato di polvere. Queste tre depressioni presentano dimensioni, forme e rapporti diametro su profondità che non soddisfano le ipotesi di un impatto, mentre potrebbero rappresentare siti di esplosioni o di altri processi endogeni [2].

Altre caratteristiche riguardano la testa della cometa in cui sono state localizzate alte scogliere, e alcune piccole aree più brillanti che potrebbero essere ricche di ghiaccio.

Solo a maggio 2015, in corrispondenza dell'equinozio della cometa, l'emisfero sud è stato gradualmente illuminato e per la prima volta sono state acquisite le immagini di questa regione.

L'emisfero sud mostra un'evidente dicotomia con l'emisfero nord dovuta principalmente all'assenza di terreni lisci su grande scala, mantelli di polvere e grandi depressioni. L'emisfero sud, infatti, è principalmente caratterizzato dalle così dette regioni consolidate, ma anche da numerose e irregolari buche e nicchie presenti soprattutto sulle scogliere [3]. In generale l'emisfero sud risulta meno variegato dal punto di vista topografico e appare complessivamente piatto se confrontato con l'emisfero nord, ciò potrebbe essere una conseguenza diretta della forte azione solare alla quale è sottoposto durante il passaggio al perielio. Secondo Keller et al. (2015) [4], infatti, l'emisfero sud sarebbe sottoposto ad un tasso di erosione tre volte maggiore rispetto all'emisfero nord.

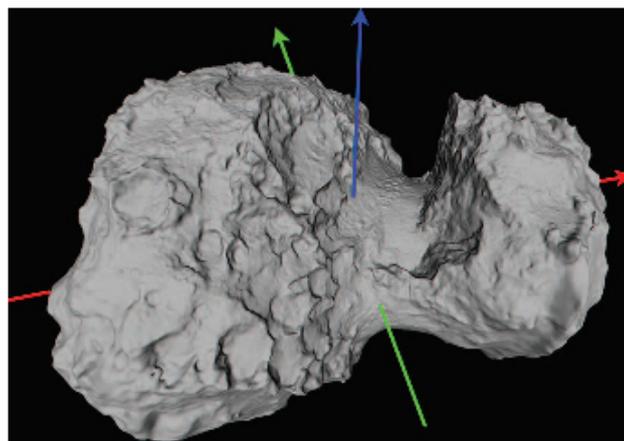


Figura 3.2: Modello di forma della cometa. In blu l'asse di rotazione z della cometa, le frecce rossa e verde sono gli assi x e y.

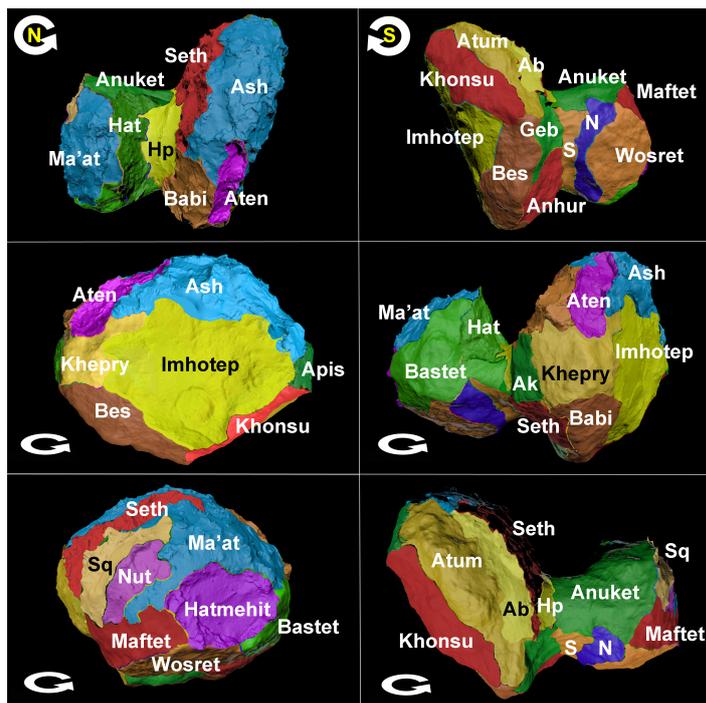


Figura 3.3: Suddivisione in regioni dell'emisfero nord e dell'emisfero sud della cometa.

3.2 Evoluzione superficiale

Rosetta ha inseguito la cometa 67P lungo la sua orbita, partendo da grandi distanze eliocentriche per arrivare fino al perielio e oltre, così è stato possibile esaminare l'evoluzione stagionale e diurna della superficie del nucleo lungo la sua orbita.

Dallo studio di Fornasier et al. (2016) [5] si trae che l'intero nucleo cometario con l'avvicinarsi al perielio diventa più blu, ovvero presenta una diminuzione della Spectral Slope (tale argomento si definirà e discuterà più approfonditamente nel Cap. 4). Le regioni con colori più blu sono probabilmente correlate con una maggiore abbondanza di ghiaccio d'acqua. Questo significa che sotto lo strato superficiale di polvere si trova del ghiaccio che diviene visibile quando la cometa è attiva e lo strato di polvere viene rimosso. La visibilità del ghiaccio d'acqua su tutta la superficie del nucleo suggerisce che il ghiaccio sia distribuito in maniera abbastanza omogenea su tutto il nucleo.

Allo stesso modo è stato osservato che quando l'attività della cometa diminuisce e non è più in grado di rimuovere lo strato di polvere, la cometa diventa più rossa, cioè aumenta la spectral slope.

Nell'articolo di Fornasier et al. (2016) [5] l'evoluzione dei colori è stata studiata misurando i cambiamenti della spectral slope, nel range tra 535 e 882 nm, quando la cometa si trovava tra le 3.6 AU e le 1.24 AU (perielio). Confrontando la spectral slope ottenuta ad agosto 2015 (post-perielio) con quella ottenuta ad agosto 2014, si vede chiaramente che il nucleo è diventato più blu, cioè la spectral slope è diminuita con l'avvicinarsi al perielio.

Di fatto si registra una diminuzione della spectral slope del 30 % passando da 3.6 a

1.24 AU. Dunque le variazioni dei colori del nucleo sono dovute alla presenza o meno del mantello di polvere e alla sublimazione e riconsolidazione del ghiaccio d'acqua, che dipendono a loro volta dalla distanza eliocentrica.

Nell'articolo viene esaminato anche l'apparire di alcuni chiazze di ghiaccio d'acqua, che compaiono e scompaiono in tempi scala piccoli rispetto ai cambiamenti stagionali legati all'illuminazione, indicando delle eterogeneità composizionali locali.

Avvicinandosi al perielio il nucleo ha mostrato anche dei cambiamenti diurni di colore su aree estese della superficie e la presenza di ghiaccio d'acqua in prossimità delle 'ombre mattutine'. Le zone che emergono dalle ombre risultano blu, ma appena vengono completamente illuminate si arrossano, il che corrisponde ad un aumento del valore della spectral slope. Questo fenomeno si ripete periodicamente ed è stato interpretato come dovuto alla presenza di una maggiore quantità di ghiaccio formatosi nella notte precedente [5].

Complessivamente la composizione superficiale del nucleo risulta dominata da materiale refrattario anidro, inoltre vi è un'abbondanza di ghiaccio su tutta la superficie, che il più delle volte è ricoperta da un sottile strato di polvere.

Riguardo l'attività della cometa, OSIRIS ha rilevato la presenza della chioma di polvere, già tra il 27 e il 30 aprile 2014, quando è stata registrata un'esplosione. Quando la cometa era lontana dal perielio e solo l'emisfero nord era illuminato la maggior parte dei getti provenivano dal collo, più precisamente dalla regione di Hapi, anche se sono state rilevate delle sorgenti minori in entrambi i lobi. I getti di polvere presentano delle variazioni diurne di intensità legate alle condizioni di insolazione e alla geometria di osservazione [1].

Successivamente i getti si sono intensificati e distribuiti su altre regioni della cometa, ad esempio Vincent et al. (2016) [6] hanno registrato una serie di 34 getti transienti di gas e polvere nei 3 mesi successivi al passaggio al perielio. È stato trovato che queste esplosioni si verificano ogni 2.4 rotazioni del nucleo e hanno una durata di pochi minuti. Si tratta di fenomeni confrontabili con quelli registrati su altre comete. Così è stato possibile classificare questi getti di polvere in tre tipologie principali: i getti stretti, i pennacchi larghi e una combinazione di entrambi.

Le esplosioni si verificano anche presto al mattino e dopo il mezzogiorno locale, indicando due possibili processi: le esplosioni che avvengono al mattino potrebbero essere innescate da rapidi cambiamenti della temperatura, mentre le esplosioni del pomeriggio sono più probabilmente legate al riscaldamento diurno o stagionale che raggiunge gli elementi volatili che si trovano più in profondità nel nucleo. Un'altra tipologia di getti di polvere potrebbe presentarsi in seguito al collasso di una scogliera [6].

Capitolo 4

Analisi spettrofotometrica

L'analisi spettrofotometrica condotta si è basata sullo studio di undici immagini della cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, indicate in Tab. 4.1, ottenute con la camera NAC dello strumento OSIRIS, con diversi filtri a banda larga aventi lunghezza d'onda centrale compresa nel range tra 250 e 1000 nm.

Le immagini sono state acquisite in un intervallo di tempo di 3 minuti, dalle 7.18 alle 7.21 del 16 maggio 2015, quando la sonda si trovava ad una distanza di 126.44 km dal centro della cometa, mentre la cometa si trovava ad una distanza eliocentrica di 1.63 AU e percorrendo la propria orbita si avvicinava al perielio, raggiunto a fine agosto 2015.

Le immagini utilizzate per l'analisi sono delle immagini 'Level 4', indicando con questa dicitura che le immagini originali sono state soggette a una serie di calibrazioni. In particolare le immagini ottenute direttamente dai pacchetti di dati scaricati dalla sonda sono le immagini 'Level 0', le 'Level 1' sono calibrate con le informazioni dell'header, mentre le 'Level 2' e le 'Level 3' sono calibrate radiometricamente e per distorsione geometrica, rispettivamente. Le 'Level 4' sono le immagini utilizzate per produrre il modello di forma della cometa [7], per questo hanno un livello di informazioni geometriche aggiuntive che le caratterizzano, tra le quali mappe di coordinate e angoli di illuminazione.

Set	Tempo di acquisizione		Filtro	Lunghezza d'onda centrale
1	2015-05-16	7:18:49	22	649.2 nm
2	2015-05-16	7:19:00	23	535.7 nm
3	2015-05-16	7:19:11	24	480.7 nm
4	2015-05-16	7:19:23	27	701.2 nm
5	2015-05-16	7:19:34	28	743.2 nm
6	2015-05-16	7:19:46	41	882.1 nm
7	2015-05-16	7:19:57	51	805.3 nm
8	2015-05-16	7:20:09	61	931.9 nm
9	2015-05-16	7:20:21	71	989.3 nm
10	2015-05-16	7:20:34	15	269.3 nm
11	2015-05-16	7:21:08	16	360.0 nm

Tabella 4.1: Immagini OSIRIS utilizzate per l'analisi spettrofotometrica.

4.1 Allineamento delle immagini

Sebbene l'arco di tempo in cui sono state acquisite le immagini sia di soli tre minuti, in questo intervallo la cometa avrà effettuato una piccola rotazione attorno al proprio asse e allo stesso tempo anche la sonda avrà cambiato posizione, ragion per cui il punto di vista nelle varie immagini sarà leggermente diverso. Per poter estrarre degli spettri fotometrici corretti risulta quindi fondamentale che tutte le immagini siano adeguatamente allineate in modo che il punto di vista sia lo stesso.

Pertanto la prima operazione eseguita sulle immagini è stata il 'warping', ovvero il ricampionamento delle immagini nei vari filtri con una scelta come immagine di riferimento. L'immagine scelta come riferimento è quella presa col filtro 41 alle 7:19:46, cioè circa a metà dell'intervallo temporale di acquisizione delle 11 immagini.

La procedura del warping consiste nel ricampionare l'immagine tramite una interpolazione, così da far coincidere le coordinate di ogni immagine con quelle dell'immagine di riferimento. Il ricampionamento di ciascuna immagine è stato effettuato utilizzando un numero adeguato di punti di controllo selezionati come punti di riferimento e scelti in modo da essere equamente distribuiti sulla porzione visibile della superficie della cometa. Una stima della bontà dell'allineamento di due immagini a livello delle coordinate fisiche è stata ottenuta calcolando il coefficiente di correlazione tra le coordinate x , y e z nell'immagine di riferimento e quelle ricampionate nell'immagine da allineare, nel caso in cui venivano considerati: 100, 169 e 225 punti di controllo (Tab. 4.2). Il miglior coefficiente di correlazione è stato ottenuto per 169 punti, quindi la procedura è stata reiterata utilizzando questo numero di punti di controllo.

Inoltre calcolando il coefficiente di correlazione per le coordinate x , y e z delle immagini originali e confrontandolo con quello delle immagini allineate si ottiene un coefficiente di correlazione migliore per le immagini allineate, cioè si nota un effettivo miglior allineamento dovuto all'operazione del warping.

Punti di controllo	Corr. coord. x	Corr. coord. y	Corr. coord. z
100	0.998662	0.998334	0.999506
169	0.999153	0.999005	0.999667
225	0.998945	0.998626	0.999545

Tabella 4.2: Coefficiente di correlazione per le coordinate x, y e z.

4.2 Trasformazione in riflettanza

Il passo successivo al warping di ciascuna immagine con quella di riferimento, è stato la trasformazione in riflettanza delle immagini, in quanto le immagini acquisite sono calibrate in radianza (o flusso), cioè in unità di W/m^2sr . La trasformazione in riflettanza è necessaria per riuscire ad avere informazioni sulla tipologia di superficie riflettente.

Il flusso di luce riflesso dalla cometa è dovuto alla radiazione proveniente dal Sole che viene in parte assorbita e in parte diffusa dalla superficie cometaria. Trasformare in riflettanza significa normalizzare il flusso osservato a quello solare ricevuto dalla cometa. La riflettanza o riflettività è una quantità adimensionale definita come:

$$I/F(\lambda) = \frac{\pi I_{meas}(\lambda)}{F_{Sun}(\lambda)} \quad (4.1)$$

dove: $I_{meas}(\lambda)$ è la radianza misurata, e F_{Sun} è la radiazione solare che incide sulla superficie cometaria alla distanza eliocentrica della cometa, definita come:

$$F_{Sun} = \frac{F_{central}}{R^2} \quad (4.2)$$

$F_{central}$ è il flusso del Sole misurato alla lunghezza d'onda centrale di ogni filtro ed R è la distanza eliocentrica della cometa, che nel caso specifico vale 1.63 AU (non c'è una significativa variazione tra la prima e l'ultima immagine del set osservativo considerato). Sia $I/F(\lambda)$ che $F_{Sun}(\lambda)$ assumono un valore diverso per ogni filtro fotometrico.

A questo punto le immagini allineate e trasformate in riflettanza sono state ordinate per valori della lunghezza d'onda crescente e raggruppate in un'immagine multispettrale, detta cubo spettrale, utilizzata da questo momento in poi per l'analisi spettrofotometrica.

4.3 Correzione topografica

Un altro passaggio fondamentale per poter effettuare l'estrazione degli spettri è la correzione topografica. Si tratta di riportare su un piano ("appiattare") tutta la porzione di superficie tridimensionale della cometa visibile nelle immagini selezionate, in modo da correggere la differenza esistente tra le zone pianeggianti e quelle in rilievo,

poiché ovviamente queste zone diffondono diversamente la luce incidente. Di fatto viene realizzata una mappa degli angoli di illuminazione e osservazione cosicché avendo una descrizione di come questi variano da punto a punto lungo la superficie, siamo in grado di stabilire se le differenze rilevate in riflettività siano legate alle caratteristiche superficiali della cometa o alle condizioni fisiche di osservazione. La riflettanza dipende dall'angolo di fase α definito come l'angolo compreso tra il raggio di incidenza e il raggio di emissione, aventi origine rispettivamente sul Sole e sulla cometa, e dagli angoli di incidenza i e di emissione e , definiti rispettivamente come l'angolo formato dalla normale alla superficie della cometa, nel punto considerato, con il raggio di incidenza e con il raggio di emissione (Fig. 4.1). Gli angoli di incidenza, emissione e fase, dipendono quindi per definizione dalla normale locale e pertanto variano da punto a punto sulla superficie cometaria. Per questo vengono realizzate delle mappe dell'angolo di incidenza e dell'angolo di emissione. Il calcolo di i , e ed α per ogni pixel richiede un modello matematico tridimensionale della superficie cometaria ad alta risoluzione, detto modello di forma ??, per tener conto correttamente della topografia locale. Tali mappe erano disponibili nelle immagini utilizzate, che come detto in precedenza sono delle immagini level 4 e contengono proprio questo tipo di informazioni geometriche aggiuntive.

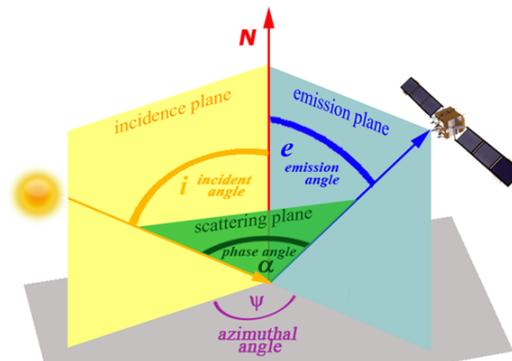


Figura 4.1: Schema degli angoli di incidenza, di emissione e di fase.

In questa analisi è stata trascurata la dipendenza dall'angolo di fase, il cui valore, sia all'interno della singola immagine che tra un'immagine e l'altra, subisce delle variazioni minime se rapportate alle variazioni degli angoli di incidenza e di emissione, rimanendo l'angolo di fase medio 63.16° . Inoltre in questo lavoro si vuole analizzare l'andamento della riflettanza e non dell'albedo.

Per poter avere una accurata correzione topografica sono state escluse dall'analisi le zone non illuminate ($i > 90^\circ$) e quelle non osservabili ($e > 90^\circ$).

Sono state teorizzate varie espressioni che descrivono come varia la riflettanza lungo la superficie, in funzione di angolo di emissione e di incidenza, ad angolo di fase costante, queste sono chiamate *disk function* D . La prima di queste ad essere stata ipotizzata è

la funzione di Lommel-Seeliger:

$$D_{LS} = \frac{2 \cos i}{\cos i + \cos e} = \frac{2 \cos(\alpha - \gamma)}{\cos \gamma - \cos(\alpha - \gamma)} \quad (4.3)$$

si tratta di una delle espressioni più semplici per la disk function, ma largamente utilizzata. Una funzione empirica un po' più precisa è quella di Minnaert:

$$D_M = (\cos i)^k (\cos e)^{(k-1)} = (\cos \beta)^{(2k-1)} \frac{((\cos((\alpha/2) - \gamma))^2 - (\sin(\alpha/2))^2)^k}{\cos(\alpha/2) \cos \gamma} \quad (4.4)$$

dove k è il parametro di Minnaert, funzione dell'albedo e dell'angolo di fase. Successivamente è stata proposta anche una funzione che fosse una combinazione lineare della funzione di Lommel-Seeliger con le leggi dello scattering di Lambert:

$$D_{LZ+L}(\alpha, \beta, \gamma) = L(\alpha) \frac{2 \cos(\alpha - \gamma)}{\cos(\alpha - \gamma) + \cos \gamma} + (1 - L(\alpha)) \cos \beta \cos(\alpha - \gamma) \quad (4.5)$$

Per questa analisi è stata adottata una funzione leggermente diversa, la forma priva di parametri della funzione di Akimov [8], definita come:

$$D(\alpha, \beta, \gamma) = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\left[\frac{\pi}{\pi - \alpha} \left(\gamma - \frac{\alpha}{2}\right)\right] \frac{\cos(\beta)^{\alpha/(\pi - \alpha)}}{\cos(\gamma)} \quad (4.6)$$

dove α è l'angolo di fase, β e γ vengono chiamate coordinate fotometriche, o anche latitudine e longitudine fotometrica, rispettivamente. Le loro espressioni dipendono dagli angoli di incidenza, di emissione e di fase, e si derivano da:

$$\cos i = \cos \beta \cos(\alpha - \gamma) \quad (4.7)$$

$$\cos e = \cos \beta \cos \gamma \quad (4.8)$$

Tutte le disk function citate sono state testate per la correzione fotometrica della superficie della cometa ?? ed è stato trovato che la funzione priva di parametri di Akimov descrive l'andamento della riflettanza meglio delle funzioni di Lambert e Minnaert, e quasi altrettanto bene quanto funzioni più complesse, quanto quella di Hapke (1993) [9]. Il vantaggio della funzione di Akimov sta proprio nell'essere una funzione priva di parametri liberi, che richiederebbero di imporre altre condizioni ed introdurrebbero necessariamente maggiori incertezze.

Per eliminare gli effetti della topografia, dell'illuminazione e dell'osservazione, quindi la riflettanza è stata corretta, pixel per pixel, con la disk function di Akimov. In particolare a partire dalle mappe dell'angolo di fase, di incidenza e di emissione è stata costruita una mappa della disk function $D(\alpha, i, e, \lambda)$, e la riflettanza corretta è stata poi calcolata come:

$$I/F_{Acorr,\lambda} = \frac{I/F_{meas,\lambda}}{D(\alpha, i, e, \lambda)} \quad (4.9)$$

dove $I/F_{meas,\lambda}$ è la riflettanza osservata.

Successivamente le coordinate cartesiane x , y e z sono state trasformate nelle coordinate sferiche raggio, latitudine e longitudine, e sono state create delle mappe di latitudine

e longitudine. A questo punto al cubo costituito dalle undici immagini allineate sono stati aggiunti i vari layer contenenti i parametri geometrici utilizzati nell'analisi. Quindi sono state aggiunte le mappe degli angoli di incidenza, emissione e fase dell'immagine di riferimento, la distanza dalla cometa, le coordinate x , y e z dell'immagine di riferimento e le mappe di latitudine e longitudine. Alla fine il cubo completo presenta 20 layer e può essere utilizzato per estrarre gli spettri.

4.4 Estrazione degli spettri

Per estrarre lo spettro della cometa sono state considerate sei zone in latitudine e longitudine, due su ciascuno dei due lobi e due sul collo della cometa, per l'esattezza viene individuato un box di 16×16 pixel e per ogni box viene misurato il valore medio in riflettanza per ognuno dei filtri (Fig. 4.2).

Per ogni regione ne risulta uno spettro a bassa risoluzione, cioè un grafico della riflettività (I/F) in funzione della lunghezza d'onda del filtro (λ).

Colore box	Latitudine	Longitudine	Pendenza spettrale
Verde	74.69°	16.69°	14.9 %/100 nm
Blu	79.77°	24.29°	14.6 %/100 nm
Nero	34.60°	4.64°	14.1 %/100 nm
Rosso	29.96°	10.96°	13.9 %/100 nm
Giallo	15.64°	14.08°	14.2 %/100 nm
Grigio	10.33°	26.83°	15.2 %/100 nm

Tabella 4.3: Latitudine, longitudine e pendenza spettrale delle posizioni individuate dai box.

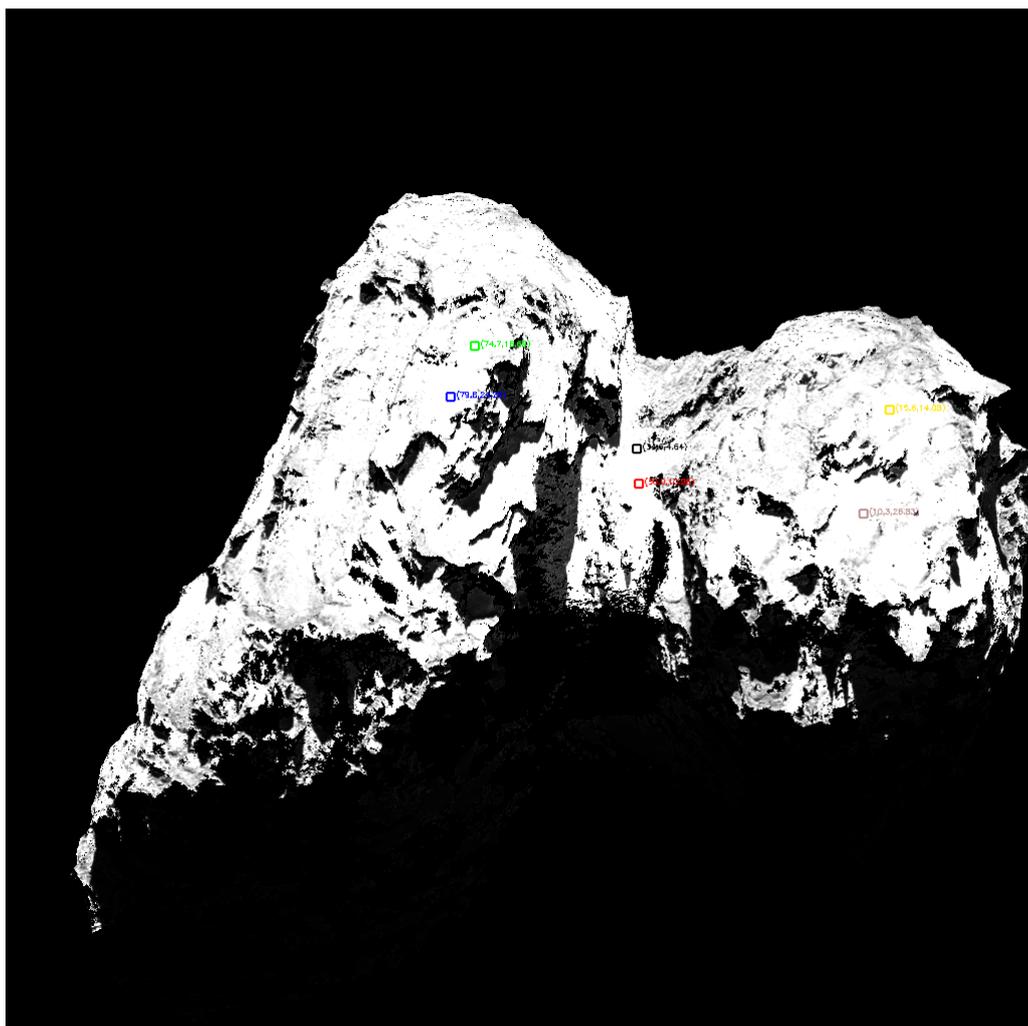


Figura 4.2: Posizione dei box sulla superficie cometaria.

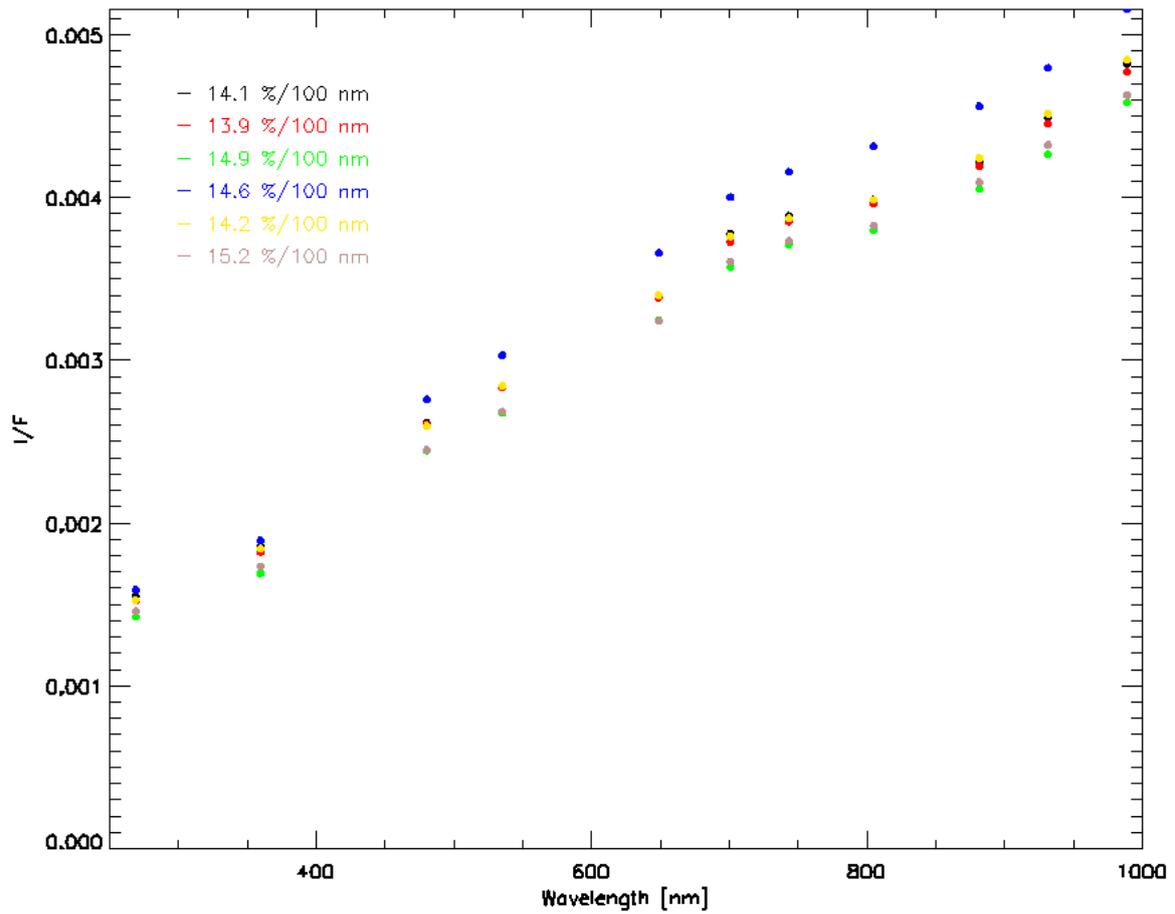


Figura 4.3: Spettro a bassa risoluzione della cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, ottenuto con la correzione di Akimov per la riflettività in tutti i filtri.

Sono stati realizzati anche degli spettri normalizzati, cioè ottenuti dividendo per il valore della riflettanza ad una particolare lunghezza d'onda, nel caso specifico per il valore a $\lambda=535.7$ nm. Gli spettri normalizzati mostrati in Fig. 4.4, permettono di confrontare efficacemente la pendenza relativa nelle diverse regioni selezionate sulla superficie della cometa.

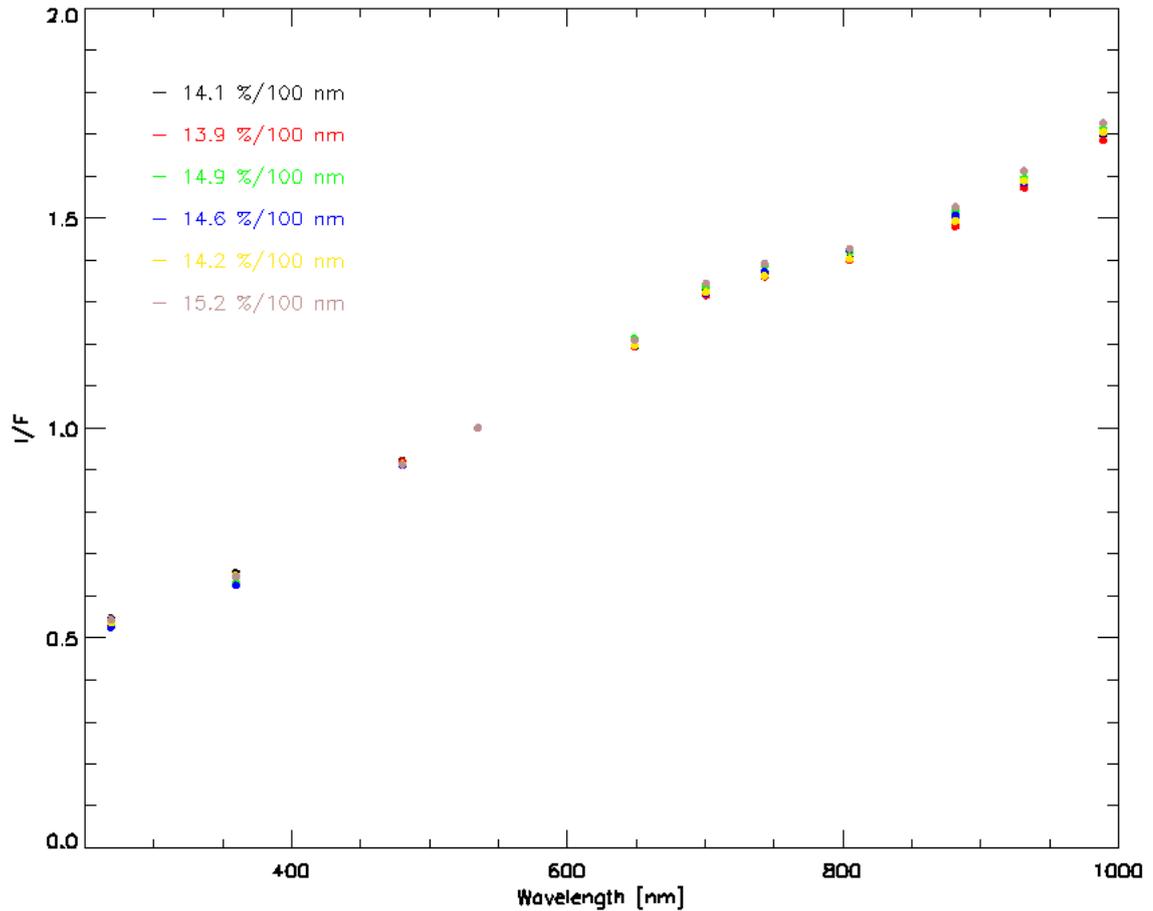


Figura 4.4: Spettro a bassa risoluzione normalizzato a 535.7 nm (filtro verde).

Un metodo per valutare quantitativamente le differenze in pendenza relativa tra i diversi spettri è quello di utilizzare la Spectral Slope S , misurata in $\%/100$ nm, e definita come:

$$S = \frac{I/F_{\lambda_{NIR}} - I/F_{\lambda_{Green}}}{I/F_{\lambda_{Green}}} \frac{100 \cdot 100}{\lambda_{NIR} - \lambda_{Green}} \quad (4.10)$$

dove: I/F_{NIR} e I/F_{Green} indicano la riflettanza nel vicino infrarosso (535.7 nm) e nel verde (882.1 nm).

I valori della Spectral Slope sono riportati in Tab. 4.2 e permettono di fare un confronto della pendenza spettrale tra le posizioni prese nei due lobi e sul collo.

La mappa della pendenza spettrale, mostrata in Fig. 4.5, è stata ottenuta tramite l'Eq. 4.10 applicata non solo ai valori rilevati all'interno dei box, ma pixel per pixel sull'intera superficie cometaria. I diversi valori assunti da S sono evidenziati con una scala di colore crescente dal blu al rosso, dove il blu corrisponde a valori bassi di S e il rosso a valori più alti. Si nota che i valori misurati di S all'interno dei box (Tab. 4.2) si collocano circa a metà di questa scala di colore.

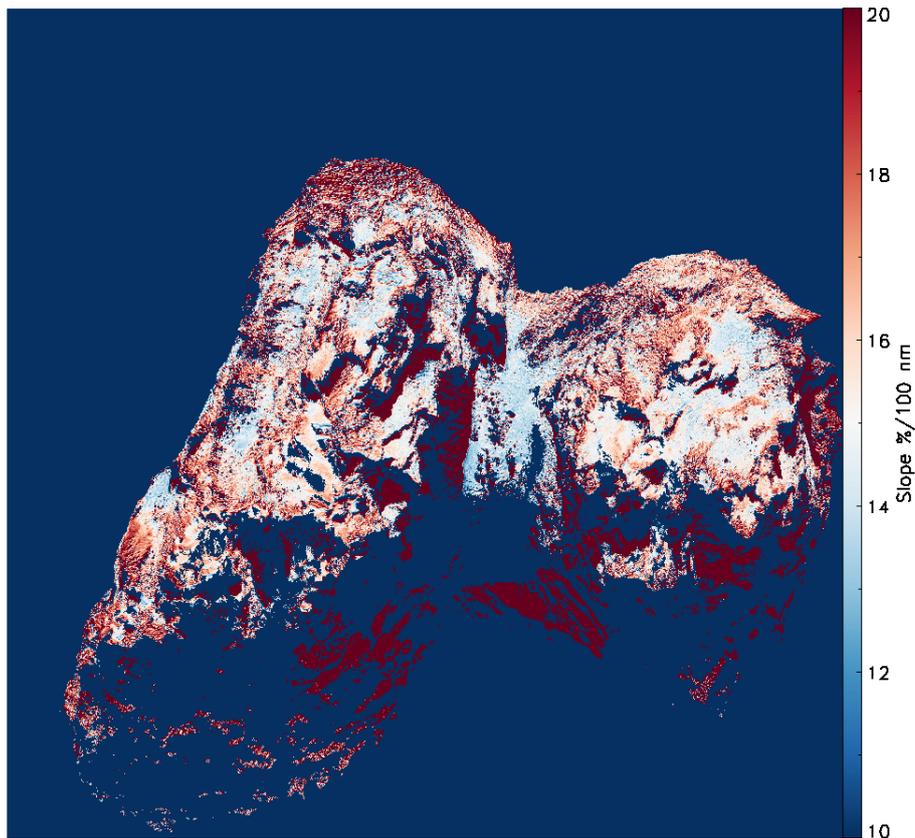


Figura 4.5: Mappa della pendenza spettrale della cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. La barra dei colori scelta evidenzia in blu le zone con una pendenza più bassa della media, mentre in rosso le regioni con una pendenza maggiore della media.

Capitolo 5

Discussione dei risultati

Lo scopo di questo lavoro è l'analisi degli spettri fotometrici della superficie della cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, ottenuti mediante la camera NAC dello strumento ottico OSIRIS a bordo della sonda Rosetta. A tale scopo è stato utilizzato un set di undici immagini 'Level 4', prese in diversi filtri a banda larga (30-80 nm) aventi lunghezza d'onda compresa nel range tra 250 e 1000 nm. Le immagini sono state acquisite il 16 maggio 2015, in un intervallo temporale di tre minuti, dalle 7.19 alle 7.21, quando la sonda si trovava ad una distanza di 126.44 km dalla cometa. Per analizzare la possibile variegazione superficiale cometaria sono stati presi in analisi sei box distribuiti sulle regioni principali della cometa, ovvero i due lobi e il collo.

Gli spettri sono mostrati in Fig. 4.3 e hanno un andamento lineare con pendenza maggiore rispetto ad uno spettro solare e non mostrano particolari bande di assorbimento. Tali spettri sono compatibili con i numerosi studi effettuati sulla superficie cometaria ad epoche differenti (agosto 2014, novembre 2014) [5] [9]. Gli spettri a bassa risoluzione della Fig. 4.3 mostrano una leggera variabilità nell'andamento della riflettività, che assume il valore più alto di riflettività per il box blu (79.77° , 24.29°) sul corpo della cometa e il valore più basso nel box grigio (10.33° , 26.83°) sulla testa. La superficie cometaria ha mediamente valori di riflettività molto bassi, dell'ordine dello 0.003 a 535.7 nm, che per i valori di angolo di fase (63.2°) a cui si trovava la cometa per il set osservativo considerato, è anche compatibile con gli studi precedenti effettuati [2] [3]. Valori così bassi di riflettività indicano che la superficie cometaria è composta di materiali molto scuri, probabilmente organici con una bassa quantità di volatili che sono complessivamente mascherati dai refrattari.

Globalmente la cometa presenta una complessiva omogeneità superficiale. Questo andamento è confermato dagli spettri normalizzati alla lunghezza d'onda di 535.7 nm (Fig. 4.4), dove non vi è una differenza significativa nelle pendenze registrate per le varie regioni analizzate sulla testa, sul collo e sul corpo.

I valori calcolati per la pendenza spettrale S , riportati in Tab. 4.1, mostrano una variabilità tra 13.9 %/100 nm (box rosso) e 15.2 %/100 nm (box grigio), rispettivamente sul collo e sulla testa della cometa. Questi valori sono compatibili con quelli ottenuti nello studio di Fornasier et al. (2016), in cui venivano studiate le variazioni globali della spectral map quando la cometa si trovava a grandi e a piccole distanze eliocentri-

che, e anche con quelli ottenuti da La Forgia et al.(2015) per lo studio sul legame tra la geomorfologia del terreno e la fotometria del sito di atterraggio del lander Philae, Agilkia.

Dalla mappa della spectral slope (Fig. 4.5) si nota chiaramente che le zone caratterizzate da scogliere e rilievi appaiono più rosse, cioè mostrano un valore della spectral slope più alto, queste zone sono principalmente localizzate nei due lobi della cometa [2]. Viceversa le zone caratterizzate da terreni lisci appaiono più blu, assumendo valori più bassi della spectral slope.

La variazione osservata nei valori della spectral slope può essere interpretata come indice di una possibile variegazione nella composizione chimica.

L'aspetto blu del collo, principalmente nella regione di Hapi viene associato alla presenza di maggiori quantità di ghiaccio d'acqua misto a polveri. La presenza di ghiaccio, infatti, era già stata identificata in alcune chiazze mobili in prossimità delle ombre, attraverso uno spettro infrarosso ottenuto con lo strumento VIRTIS [5] [10]. Un'altra motivazione potrebbe essere legata all'azione dello "space weathering" (ovvero i processi di erosione cui sono sottoposti i corpi privi di atmosfera come le comete, principalmente dovuti alla collisione di raggi cosmici galattici e solari, irradiazione e sputtering delle particelle del vento solare o il bombardamento di meteoriti e micrometeoriti) che ha agito in quantità diverse sulle zone in rilievo rispetto alle zone lisce, alterando il loro aspetto spettrale. Questa ipotesi è stata validata da alcuni esperimenti fatti in laboratorio (Moroz et al. 2004) che hanno mostrato come la materia organica possa mostrare una diminuzione della pendenza spettrale se sottoposta a dei bombardamenti con gli ioni, utilizzati per simulare l'azione dello space weathering.

Un'ulteriore alternativa risulta legata alla granulosità del materiale superficiale cometario. Materiali uguali infatti formati da particelle di dimensioni differenti risultano avere proprietà spettrali differenti, pertanto le variazioni spettrali osservate potrebbero essere dovute anche ad una differente dimensione dei grani di polvere che ricoprono le varie regioni considerate.

Bibliografia

- [1] H. Sierks et al. «On the nucleus structure and activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko». In: *Science* 347.1, aaa1044 (gen. 2015), aaa1044. DOI: 10.1126/science.aaa1044.
- [2] M. R. El-Maarry et al. «Regional surface morphology of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from Rosetta/OSIRIS images». In: *Astronomy and Astrophysics* 583, A26 (nov. 2015), A26. DOI: 10.1051/0004-6361/201525723.
- [3] M. R. El-Maarry et al. «Regional surface morphology of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from Rosetta/OSIRIS images: The southern hemisphere (Corrigendum)». In: *Astronomy and Astrophysics* 598, C2 (feb. 2017), p. C2. DOI: 10.1051/0004-6361/201628634e.
- [4] H. U. Keller et al. «Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko: Non-Gravitational Forces Based on its Detailed Shape». In: *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #47*. Vol. 47. AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts. Nov. 2015, p. 500.09.
- [5] S. Fornasier et al. «Rosetta's comet 67P/Churyumov-Gerasimenko sheds its dusty mantle to reveal its icy nature». In: *Science* 354 (dic. 2016), pp. 1566–1570. DOI: 10.1126/science.aag2671.
- [6] J.-B. Vincent et al. «Summer fireworks on comet 67P». In: *Monthly Notices of the RAS* 462 (nov. 2016), S184–S194. DOI: 10.1093/mnras/stw2409. arXiv: 1609.07743 [astro-ph.EP].
- [7] F. Preusker et al. «The global meter-level shape model of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko». In: *Astronomy and Astrophysics* 607, L1 (nov. 2017), p. L1. DOI: 10.1051/0004-6361/201731798.
- [8] Y. Shkuratov et al. «Optical measurements of the Moon as a tool to study its surface». In: *Planetary Space Science* 59 (ott. 2011), pp. 1326–1371. DOI: 10.1016/j.pss.2011.06.011.
- [9] F. La Forgia et al. «Geomorphology and spectrophotometry of Philae's landing site on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko». In: *Astronomy and Astrophysics* 583, A41 (nov. 2015), A41. DOI: 10.1051/0004-6361/201525983.
- [10] M. C. De Sanctis et al. «The diurnal cycle of water ice on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko». In: *Nature* 525 (set. 2015), pp. 500–503. DOI: 10.1038/nature14869.