



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "GALILEO GALILEI"

Laurea Triennale in Astronomia

---

TESI DI LAUREA

**Spettrofotometria della Cometa  
Churyumov Gerasimenko  
studiata dalla Missione Spaziale  
Rosetta**

*Relatrice:*

Prof.ssa Monica Lazzarin

*Correlatrice:*

Dott.ssa Fiorangela La Forgia

*Laureando:*

Davide Savio

---

ANNO ACCADEMICO 2019-2020

---

## Abstract

In questo lavoro verrà effettuata una review dei risultati ottenuti dalla missione spaziale Rosetta relativamente alla spettrofotometria della cometa Churyumov-Gerasimenko e quindi uno studio della sua composizione superficiale, analizzando i risultati dei vari strumenti come **OSIRIS** e **VIRTIS**.

## INDICE

---

1	Introduzione	5	
2	La missione spaziale Rosetta	6	
	2.1	Il viaggio decennale di Rosetta	6
	2.2	Dettagli Tecnici sulla Sonda	8
	2.3	Strumentazione	9
3	La Cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko	13	
	3.1	Morfologia superficiale	15
	3.2	L'emisfero nord	17
	3.3	L'emisfero sud	19
4	Spettrofotometria della cometa	21	
	4.1	Proprietà spettrofotometriche del nucleo	23
	4.2	Attività cometaria	27
	4.3	Spettrofotometria di Hapi	29
	4.4	Spettrofotometria di Seth	30
	4.5	Spettrofotometria di Ma'at e Hatmehit	33
	4.6	Spettrofotometria di Imhotep, Ash e Khepry	35
	4.7	Spettrofotometria di Anhur e Bes	38
	4.8	Spettrofotometria di Khonsu	40
	4.9	Risultati sulla composizione chimica	42
5	Conclusioni	46	

# INTRODUZIONE

---

## 1 INTRODUZIONE

La sonda Rosetta ha inseguito ed analizzato la cometa Churyumov-Gerasimenko per un periodo di circa due anni, dal mese di agosto del 2014 al mese di settembre del 2016, fornendo una mole elevata di dati. In questo lavoro verrà effettuata una review dei risultati ottenuti dagli strumenti OSIRIS e VIRTIS dell'orbiter Rosetta per quanto riguarda la spettrofotometria e la composizione superficiale del nucleo cometario. Dopo una iniziale presentazione della missione verranno riassunte le tappe principali del viaggio percorso dalla sonda per raggiungere la cometa ad una distanza eliocentrica superiore alle 3.6 UA. Saranno poi forniti i dettagli tecnici sulla sonda e sugli strumenti in essa presenti, con maggiore attenzione agli strumenti scientifici presenti sull'orbiter ed in particolare ad OSIRIS e VIRTIS. Nel capitolo seguente l'attenzione verrà spostata sulla cometa Churyumov-Gerasimenko. In particolare, dopo aver fornito informazioni sulle sue dimensioni fisiche e sui parametri orbitali, verrà discussa la peculiare morfologia del nucleo cometario. In seguito verrà data una descrizione della superficie del nucleo, con particolare riguardo alle tipologie di terreno e alle unità geologiche individuate dalla camera NAC di OSIRIS. Seguiranno poi due paragrafi dedicati alla descrizione morfologica delle regioni in cui è stata suddivisa la superficie cometaria nei due emisferi. Nel capitolo successivo verranno trattate la spettrofotometria e la composizione della superficie della cometa. Nel primo paragrafo verranno descritti i metodi e le operazioni eseguite per effettuare l'analisi spettrofotometrica. Nel secondo paragrafo saranno presentate le proprietà spettrofotometriche generali della cometa e nel terzo sarà trattata l'attività cometaria, per il suo importante ruolo nell'influenzare lo spettro della cometa durante l'orbita. Nei paragrafi successivi verranno presentati i risultati dell'analisi spettrofotometrica effettuata a livello locale nelle regioni che sono state studiate. L'ultimo paragrafo presenterà invece i risultati ottenuti dal punto di vista della composizione chimica, dagli strumenti OSIRIS e VIRTIS.

## LA MISSIONE SPAZIALE ROSETTA

---

### 2 LA MISSIONE SPAZIALE ROSETTA

La Missione spaziale Rosetta rientra nell'ambito del programma a lungo termine *Horizon 2000* dell'ESA ed è stata approvata nel novembre del 1993 come Cornerstone Mission. Essa ha visto la collaborazione tra l'ESA ed alcune agenzie spaziali nazionali europee, tra cui l'ASI, ed ha ricevuto un contributo anche da parte della NASA. Il suo principale scopo scientifico era quello di investigare sulle fasi primordiali del nostro Sistema Solare, attraverso osservazioni di corpi minori come asteroidi e comete. Le comete fanno parte di una famiglia di oggetti composti di un materiale che ha mantenuto quasi del tutto inalterate le sue caratteristiche dal momento della formazione del Sistema Solare, poiché, trovandosi in zone molto distanti dal Sole, ha trattenuto anche gli elementi più volatili. Per questo motivo, lo studio delle origini delle comete, della loro composizione chimica e della loro morfologia e dinamica fornisce la chiave d'accesso alla comprensione delle origini del Sistema Solare. Il nome dato alla missione è un riferimento a quello della *Stele di Rosetta*, lastra di basalto nero sulla quale è riportato lo stesso decreto di Tolomeo V, in tre lingue differenti (Geroglifico, Egiziano Demotico e Greco) e che permise di decifrare i geroglifici egizi, incomprensibili prima del suo ritrovamento. La scelta di questo nome voleva dunque sottolineare come l'importanza della Missione Rosetta nella comprensione delle origini del Sistema Solare fosse paragonabile a quella della Stele nella comprensione dei geroglifici. La missione prevedeva che la sonda Rosetta incontrasse la cometa mentre questa era ancora inattiva, ad una grande distanza eliocentrica, in modo tale da poterne studiare il nucleo. In seguito, la sonda avrebbe accompagnato la cometa lungo la sua orbita, al fine di caratterizzare lo sviluppo dell'attività cometaria prima e dopo il passaggio al perielio. L'analisi della traiettoria aveva inoltre mostrato che sarebbe stato possibile effettuare dei voli ravvicinati in prossimità di due asteroidi durante il tragitto della sonda. Una volta confermata la data del lancio, vennero scelti gli asteroidi 2867 *Steins* e 21 *Lutetia* come bersagli del fly-by e la cometa 67P/*Churyumov-Gerasimenko* come bersaglio principale della missione.

#### 2.1 *Il viaggio decennale di Rosetta*

La sonda Rosetta ha impiegato più di dieci anni a raggiungere la cometa 67P/*Churyumov-Gerasimenko*. Questo dato è dovuto al fatto che l'incontro con la cometa doveva avvenire ad una elevata distanza eliocentrica di circa 3.6 UA e inoltre la sonda, alimentata soltanto per mezzo

di pannelli solari, doveva raggiungere la velocità di circa  $55.000\text{km/h}$ , al fine di affiancare la cometa con una velocità relativa di circa  $1\text{m/s}$ . Per questo motivo, prima di posizionarsi sulla traiettoria definitiva verso la cometa, la sonda ha compiuto 4 rivoluzioni attorno al Sole ed ha effettuato tre fly-by con la Terra ed uno con Marte, per sfruttare l'effetto fionda gravitazionale ed incrementare così la sua velocità. Il viaggio ha avuto inizio il 2 marzo 2004, con il lancio della sonda Rosetta per mezzo di un razzo *Ariane 5G+*. Un anno dopo c'è stato il primo fly-by con la Terra, che è servito sia per sfruttare il gravity assist fornito dalla Terra, sia per calibrare e testare gli strumenti a bordo della sonda. Il 25 febbraio 2007 c'è stato il volo ravvicinato a Marte, ad una distanza minima di  $250\text{km}$  e il 13 novembre dello stesso anno c'è stato il secondo fly-by con la Terra. Il 5 settembre 2008 la sonda incontra l'asteroide 2867 Steins e lo fotografa, mostrando un oggetto dalla forma di diamante con piccoli crateri da impatto sulla superficie. Il 13 novembre 2009 è avvenuto il quarto assist gravitazionale, durante il terzo e ultimo volo ravvicinato alla Terra. Il 10 luglio 2010 Rosetta passa vicino all'asteroide 21 Lutetia, decisamente più grande del precedente, dalla forma irregolare e ricoperto di crateri, dopodiché si posiziona sulla traiettoria finale verso la cometa, prima di entrare in fase di ibernazione profonda per 31 mesi dal giugno del 2011 al gennaio del 2014, con lo scopo di limitare i consumi di energia e combustibile al minimo. Durante questi mesi la sonda si direzionava una volta al minuto verso il Sole per permettere ai pannelli di raccogliere più luce possibile. Inoltre tutti i sistemi elettrici erano stati spenti, ad eccezione del ricevitore radio, dei decodificatori di istruzioni e dell'energia di supporto. La sonda raggiunge la distanza massima di quasi 800 milioni di chilometri dal Sole ancora in fase di ibernazione. Il risveglio avviene il 20 gennaio 2014 e tra i mesi di maggio e agosto dello stesso anno Rosetta compie delle manovre preparatorie per l'incontro con la cometa, che avviene il 6 agosto ad una distanza di  $100\text{km}$  dal nucleo cometario e di 3.6 UA dal Sole. Ha quindi inizio una complessa sequenza di orbite della sonda attorno alla cometa per poterne studiare le caratteristiche di base, come la velocità di rotazione, la forma e le dimensioni; inoltre la sonda procede anche alla mappatura dettagliata della superficie con lo scopo di individuare un luogo adatto all'atterraggio del lander Philae. Il 15 settembre viene selezionato il punto di atterraggio, ed il 12 novembre il lander Philae viene rilasciato ad una distanza di  $22.5\text{km}$  dal nucleo della cometa con una velocità minore di  $1\text{m/s}$ . A causa di un malfunzionamento del sistema di ancoraggio, il lander rimbalza per ben due volte sulla superficie della cometa prima di fermarsi definitivamente al suolo, in una posizione diversa da quella stabilita e in condizioni di illuminazione solare molto scarsa. Nei mesi successivi l'orbiter ha continuato a studiare la cometa affiancandola lungo la sua orbita attorno al Sole, anche se la distanza dal nucleo della cometa è stata modificata, aumentando considerevolmente nel periodo di prossimità al perielio, raggiunto il 13 agosto 2015, poiché l'intensa

attività cometaria poteva rappresentare un rischio per la sicurezza della sonda. La missione termina il 30 settembre del 2016 quando l'orbiter è ormai privo di energia e viene pertanto fatto scendere sulla cometa con una manovra di atterraggio controllata durante la quale la sonda invia le ultime immagini ad un'altezza di pochi metri dal suolo.

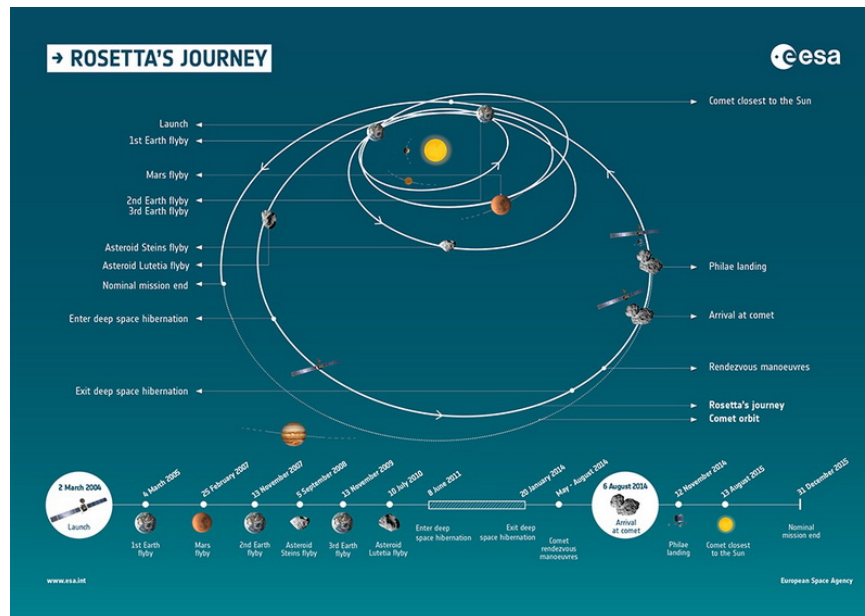


Figura 1: Ricostruzione del viaggio della sonda Rosetta e linea temporale con le tappe principali.

## 2.2 Dettagli Tecnici sulla Sonda

Lo spacecraft Rosetta consiste di due elementi di missione, l'orbiter Rosetta e il lander Philae comprendenti complessivamente un ammontare di 21 strumenti scientifici. Il design della sonda si basa su una scatola centrale alla quale sono attaccati due pannelli solari ed un'antenna. La scatola, di lati  $2.8m \times 2.1m \times 2.0m$ , è in alluminio ed ha un peso complessivo di  $3000kg$ , dei quali più della metà sono rappresentati dal materiale propellente al momento del lancio. Il propellente si trova all'interno di un tubo verticale in posizione centrale ed è raccolto in due serbatoi, rispettivamente uno per il combustibile ed uno per l'ossidante. L'orbiter è dotato di 24 propulsori, ognuno dei quali è in grado di fornire una spinta di 10 Newton necessaria a mantenere la traiettoria ed effettuare manovre di volo. A fornire l'energia alla sonda sono i due pannelli solari, attaccati alla scatola centrale, in grado di ruotare di 180 gradi. I pannelli si estendono ciascuno per una lunghezza di 14 metri esponendo alla luce solare una superficie complessiva di 64 metri quadrati. Essi sono composti da migliaia di celle di silicio non riflettenti, in grado di generare fino a 8700 Watt di potenza in prossimità del Sole e circa 400 Watt alla massima distanza raggiunta dalla sonda durante la missione. E' doveroso ricordare che Rosetta è stata la prima sonda ad oltrepassare la

Fascia Principale degli asteroidi servendosi solamente dell'energia fornita dalle celle solari. Su una delle facce laterali della scatola non occupate dai pannelli è montata un'antenna di comunicazione. Si tratta di un'antenna radio ad alto guadagno direzionale, del diametro di  $2.2m$  e dalla forma biassiale, costantemente orientata verso la Terra ed in grado di inviare pacchetti compressi di dati ad una velocità massima di  $22000$  bit al secondo. Le comunicazioni da Terra vengono inviate dall'antenna parabolica del diametro di  $35m$ , costruita dall'ESA in Australia Occidentale e si interrompono ogni volta che la sonda passa dietro al Sole durante il suo viaggio. Un limite ulteriore alle comunicazioni è rappresentato dalla rotazione terrestre, tanto che, per poter avere una copertura maggiore è stata costruita una seconda antenna parabolica di  $35m$  in Spagna. Rosetta invia i dati in tempo reale alla Terra e quando si verificano delle interruzioni nelle comunicazioni, i dati vengono immagazzinati dalla memoria interna di  $25Gbits$  di cui è fornita la sonda, in modo da poter essere inviati successivamente. Sulla faccia laterale opposta a quella dell'antenna è agganciato il lander Philae. Il lander, delle dimensioni di  $1.0m \times 1.0m \times 0.8m$ , è in carbonio ed ha un peso di circa  $100kg$ , un quarto dei quali sono rappresentati dagli strumenti scientifici di cui è dotato. Il suo obiettivo è quello di separarsi dalla sonda e posarsi sulla superficie della cometa al fine di eseguire diversi esperimenti in sito, per poi trasmettere i risultati scientifici alla Terra tramite l'antenna dell'orbiter. Sulla parte superiore della sonda è montata la strumentazione scientifica ed infine alla base si trovano tutti i sottosistemi.

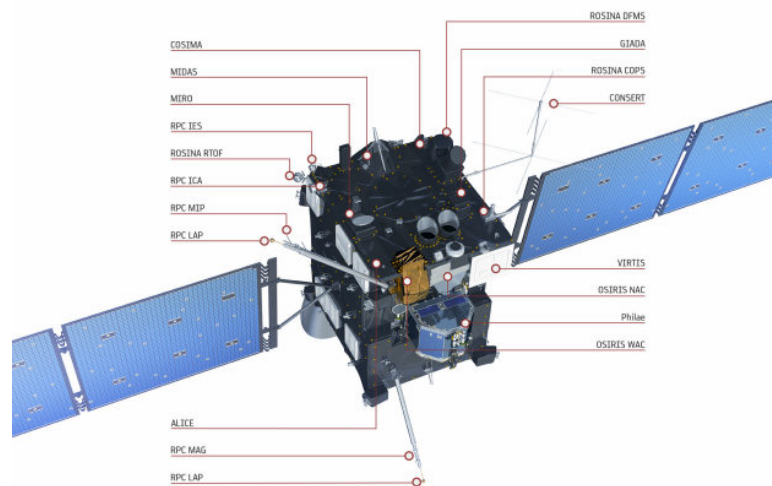


Figura 2: Riproduzione della sonda Rosetta. Sono indicati in figura tutti gli strumenti presenti.

### 2.3 Strumentazione

Per la missione Rosetta sono stati costruiti 21 strumenti scientifici. Di questi strumenti, 11 trovano alloggio sull'orbiter ed hanno il compito di



osservare il nucleo della cometa e studiare la sua attività dall'alto, mentre gli altri 10 sono collocati sul lander ed hanno il compito di studiare la cometa dalla superficie. Il lander Philae è dotato di uno spettrometro chiamato **APXS** che serve ad analizzare la composizione chimica della superficie sottostante al lander e le eventuali alterazioni durante il passaggio al perielio ed è dotato inoltre di uno strumento per la ricerca e l'identificazione delle molecole organiche complesse, il cui nome è **COSAC**. Al lander appartiene anche **PTOLEMY**, un vero e proprio laboratorio in miniatura, costituito da un cromatografo dei gas e uno spettrometro di massa, utilizzati per la ricerca di molecole chimiche complesse. Lo strumento **SD2** è invece utilizzato per perforare il suolo ad una profondità massima di  $23\text{cm}$  ed introdurre all'interno di Philae i campioni raccolti, per permettere agli altri strumenti di analizzarli. Per misurare la densità e le proprietà termiche e meccaniche del suolo, viene utilizzato lo strumento **MUPUS**, simile ad un martello, mentre la radio sonda **CONSERT** viene utilizzata per studiare la struttura interna del nucleo cometario. Un set di strumenti chiamati **SESAME** misurano le polveri rilasciate dalla cometa al fine di studiare le proprietà elettriche e meccaniche, mentre il magnetometro **ROMAP** studia il campo magnetico della cometa e la sua interazione col vento solare. Il lander è dotato inoltre di **CIVA**, uno strumento composto da microcamere che realizzano foto panoramiche ed uno spettrometro che studia composizione, struttura e albedo della superficie. Durante la discesa di Philae sulla cometa, lo strumento **ROLIS** ha fornito dati ed immagini, per poi scattare delle foto ad alta risoluzione del luogo dell'atterraggio. Lo strumento **CONSERT** è presente anche sull'orbiter Rosetta e collabora con il suo omonimo installato sul lander nell'esperimento di tomografia ad onde radio. Dal modo in cui le onde vengono riflesse e diffuse, questo strumento riesce a determinare le proprietà dielettriche del materiale cometario. Su Rosetta è inoltre operativo **RSI**, uno strumento che sfrutta le oscillazioni in frequenza dei segnali radio della sonda per misurare la massa e la gravità della cometa, per poi determinare densità e struttura interna del nucleo. Lo spettro delle microonde nel millimetrico e sub-millimetrico viene studiato da **MIRO**, il cui scopo è quello di misurare la temperatura vicino al nucleo cometario per fare stime sulle proprietà termiche ed elettriche della superficie. Su questo strumento è presente anche uno spettrometro che permette di quantificare l'acqua, il monossido di carbonio, l'ammoniaca e il metanolo presenti nella chioma cometaria. Sull'orbiter è presente un altro spettrometro, **ALICE**, il quale si occupa delle regioni spettrali del lontano ed estremo ultravioletto. Il suo compito principale è quello di caratterizzare la composizione del nucleo e della chioma cometaria tramite osservazioni nell'intervallo tra i  $70\text{nm}$  e i  $205\text{nm}$ , ma deve anche determinare il tasso di produzione, variabilità e struttura delle molecole d'acqua, di monossido di carbonio e di anidride carbonica. Allo studio delle particelle di polvere sono dedicati diversi strumenti, come **MIDAS**, che sfrutta la tecnica del microscopio a forza atomica per analizzare la

struttura dei grani di polvere fino ad una risoluzione spaziale di  $4nm$  e ne fa un'analisi statistica; **GIADA**, che utilizza sia un sistema di rilevamento ottico che un sensore d'impatto meccanico per analizzare velocità, dimensioni e momento delle particelle di polvere nella chioma cometaria e **COSIMA**, che raccoglie i grani di polvere, li posiziona sotto ad un microscopio e li bombardava con degli ioni di Indio sparati da un cannone ionico per poi analizzare gli ioni secondari prodotti e determinare così la natura organica o inorganica della polvere. Lo strumento **ROSINA** si serve di due spettrometri di massa per studiare le particelle del gas nell'atmosfera e nella ionosfera della cometa. Grazie a due manometri riesce anche a determinare la velocità e la densità del gas cometario misurandone la pressione. All'orbiter Rosetta appartiene anche un set di cinque strumenti, detti **RPC**, progettati per effettuare misurazioni complementari nella zona interna della chioma cometaria. Tra i loro compiti ci sono lo studio delle proprietà fisiche del plasma circumcometario e delle particelle ioniche in esso presenti e la determinazione del valore del campo magnetico nelle zone d'interazione tra cometa e vento solare. Gli ultimi due strumenti presenti sull'orbiter, **OSIRIS** e **VIRTIS**, meritano una trattazione più ampia. **VIRTIS** è uno spettrometro che combina in un unico strumento tre canali di dati. Due di questi canali sono dedicati alla mappatura spettrale e sono collocati in un sottosistema ottico per la mappatura, indicato con  $(-M)$ . Il terzo canale, dedicato esclusivamente alla spettroscopia, è collocato in un sottosistema ottico ad alta risoluzione, indicato con  $(-H)$ . I due sottosistemi si trovano entrambi in una struttura comune a forma di scatola, raffreddata a  $130K$  da una superficie radiante, che è montata su di un supporto assieme a due set di componenti elettroniche e due refrigeratori criogenici. Il modulo ottico, composto dalla scatola e dal supporto, si trova all'interno della sonda in modo tale che gli assi ottici del sottosistema siano ortogonali alla parete della sonda orientata verso il nadir della cometa. Il sistema ottico del canale per la mappatura consta in un telescopio *Shafer* collegato con una fenditura ad uno spettrometro a reticolo *Offner*. Il telescopio Shafner consiste in 5 specchi di alluminio montati su un banco ottico. Lo spettrometro Offner consiste in uno specchio relè ed un reticolo di diffrazione sferico convesso, entrambi in vetro. Il canale  $(-M)$  utilizza un dispositivo di accoppiamento di carica (CCD), per rilevare le lunghezze d'onda tra i  $0.25$  e  $1.00$  micrometri ed una matrice del piano focale ad infrarossi (IRFPA), per le lunghezze d'onda tra i  $0.95$  e i  $5.00$  micrometri. Il CCD è raffreddato a  $155K$ , mentre la IRFPA è raffreddata a  $70K$ . Il canale  $(-H)$  è uno spettrometro *Echelle*. La luce incidente viene raccolta da uno specchio parabolico fuori asse e poi viene collimata da un secondo specchio dello stesso tipo, prima di entrare in un prisma a dispersione incrociata. Quando esce dal prisma, la luce viene diffratta da una griglia di riflessione piatta che diffonde la luce in una direzione perpendicolare a quella di dispersione del prisma. Il reticolo a bassa densità di scanalature è un elemento Echelle dello spettrometro e raggiunge una altissima risoluzione

spettrale. Anche questo canale sfrutta una IRFPA per le rilevazioni tra i 2 e i 5 micrometri, raffreddata a 70K. Lo strumento VIRTIS è utilizzato per mappare la superficie cometaria, studiare la natura delle sostanze solide presenti su di essa e per determinare la temperatura del nucleo, inoltre permette di studiare le proprietà fisiche della chioma e di identificare i gas presenti. **OSIRIS** è invece uno strumento di imaging a doppia camera che si occupa dello spettro del visibile, del vicino infrarosso e del vicino ultravioletto. Esso consiste in due camere, montate esternamente alla sonda ed isolate termicamente, una scatola contenente le componenti elettroniche condivise dalle camere, posizionata all'interno della sonda e dotata di una griglia di raffreddamento e due scatole elettroniche per la lettura dei sensori poste all'interno della sonda, ciascuna il più vicino possibile alla sua camera in modo da ridurre la lunghezza del cablaggio per le interconnessioni. Le due camere di cui è dotato sono la **NAC** e la **WAC**. La prima è una camera ad angolo stretto, con un campo di vista di  $2.2^\circ \times 2.2^\circ$  ed un sistema di specchi con una lunghezza focale di 72cm, progettata per produrre immagini del nucleo della cometa con una risoluzione spaziale elevata ed è dotata di 12 filtri selezionabili che coprono lo spettro elettromagnetico dai 250nm ai 1000nm, ottimizzati per lo studio della mineralogia del nucleo. La seconda è una camera grandangolare, con un campo di vista di  $11.6^\circ \times 12.1^\circ$ , un sistema di specchi con lunghezza focale di 13cm ed una buona capacità di scartare la luce diffusa, che le consente di fotografare anche la polvere ed il gas che circondano la superficie della cometa. La WAC è dotata di 14 filtri che possono selezionare le lunghezze d'onda tra i 240nm e i 720nm. Tra gli obiettivi di OSIRIS ci sono la determinazione accurata delle dimensioni, della forma e del volume del nucleo, la ricerca di segni che aiutino a comprendere la formazione della cometa, lo studio delle caratteristiche topografiche e del processo fisico ad esse associato, la mappatura della variegatura superficiale, lo studio del grado di disomogeneità fornito dal colore e della mineralogia superficiale, la determinazione del tasso di perdita di massa e delle forze non gravitazionali presenti e l'analisi delle variazioni a breve termine e delle esplosioni.

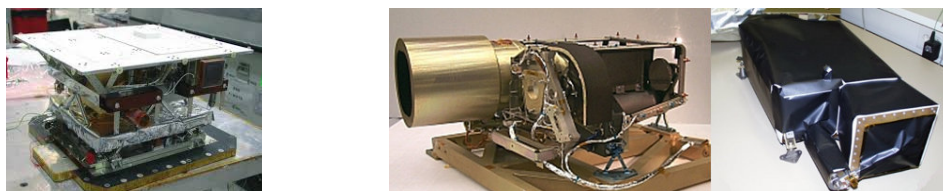


Figura 3: Lo strumento VIRTIS (a sinistra) e le camere NAC e WAC di OSIRIS (a destra).

### 3 LA COMETA 67P/CHURYUMOV-GERASIMENKO

La cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko è stata scoperta nel settembre del 1969 dall'astronomo sovietico Klym Ivanovyč Čurjumov analizzando una foto scattata dall'osservatorio astronomico di Almaty, in Kazakistan, dalla sua collega Svetlana Ivanovna Gerasimenko, la quale stava studiando la cometa 32P/Comas Solá. La scelta di questa cometa come obiettivo della missione non è stata casuale, infatti la Churyumov-Gerasimenko è una cometa periodica che ha compiuto più orbite attorno al Sole dal momento della scoperta, mostrando segni di attività. Appartiene alla famiglia delle comete gioviane, un gruppo di comete il cui periodo di rivoluzione è inferiore ai 20 anni. Queste comete hanno origine comune nella *Fascia di Kuiper*, oltre l'orbita di Nettuno e migrano all'interno del Sistema Solare a seguito di collisioni o per effetto di perturbazioni gravitazionali e nel momento in cui incontrano Giove, le loro orbite vengono fortemente influenzate. Prima che Rosetta la incontrasse da vicino, la cometa 67P era stata osservata nel 2003 dal telescopio spaziale *Hubble* e grazie alle immagini raccolte si era ipotizzato che avesse una forma ellissoidale. La reale forma del nucleo della Churyumov-Gerasimenko è nota solo dall'agosto del 2014, quando è stata finalmente raggiunta dalla sonda Rosetta. Si tratta di un oggetto caratterizzato da due lobi di diverse dimensioni uniti tra di loro da una struttura più sottile. Non è ancora certo quale meccanismo sia responsabile di questa conformazione del nucleo della cometa. Potrebbe trattarsi di una cometa binaria di contatto prodotta dalla fusione di due distinti oggetti primordiali, oppure dei resti di un antico planetesimo riaggregatisi dopo una collisione distruttiva, oppure ancora di un planetesimo che ha espulso del materiale dopo ripetuti passaggi al perielio.[1] Il maggiore dei due lobi, le cui dimensioni sono di  $4.10\text{km} \times 3.52\text{km} \times 1.63\text{km}$ , viene definito *corpo*, il lobo minore ha invece dimensioni di  $2.50\text{km} \times 2.14\text{km} \times 1.64\text{km}$  ed è chiamato *testa*, mentre la sottile porzione che li unisce è detta *collo*. [2] Il collo rappresenta solo il 7% del volume complessivo del nucleo, il cui valore è di  $(18.56 \pm 0.02) \text{km}^3$ . La stima più precisa ottenuta per la massa della cometa è invece di  $(9.97150 \pm 0.00015) \times 10^{12} \text{kg}$ . Da questi valori di volume e massa si ricava una densità di  $(537.8 \pm 0.6) \text{kg/m}^3$ , che ci suggerisce che il nucleo debba avere una porosità molto elevata. Infatti, se si prendono in considerazione le densità dei ghiacci, principalmente d'acqua, e le densità di un nucleo compatto di polveri in un intervallo tra  $2000$  e  $3500 \text{kg/m}^3$ , si deduce un valore di porosità compreso tra il 65% e il 79%, con un rapporto tra la massa delle polveri e la massa dei ghiacci compreso tra 3 e 7. Pertanto il nucleo è un oggetto estremamente

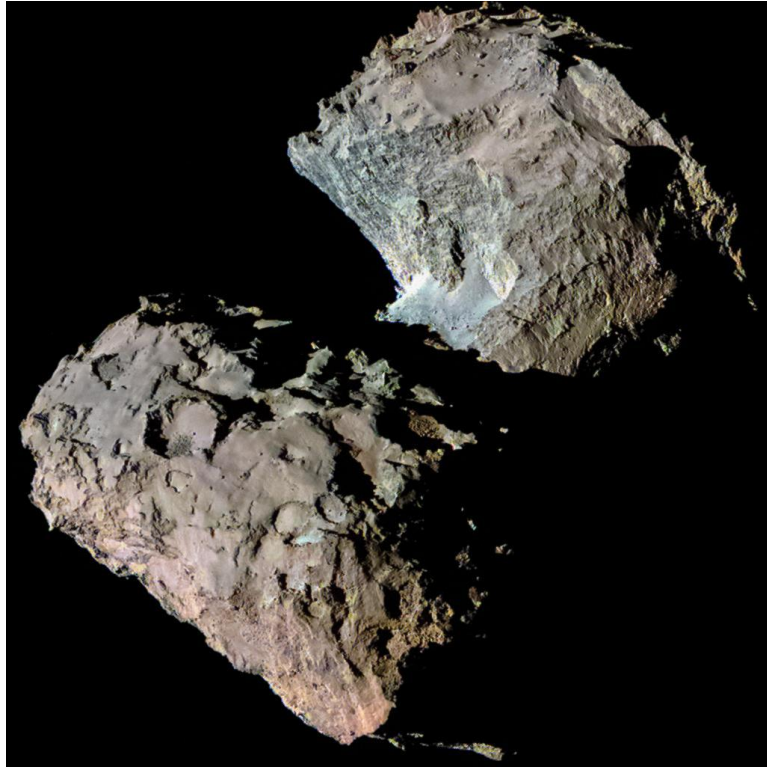


Figura 4: Immagine a due colori del nucleo della cometa Churyumov-Gerasimenko.

poroso, ricco di polveri e con pochi ghiacci.<sup>[3]</sup> Complessivamente la cometa mostra segni di attività geologica, quali erosione, attività tettonica e *outgassing*. L'erosione è legata principalmente alla sublimazione dei ghiacci. L'attività tettonica è intesa come quel processo di stiracchiamento che coinvolge il nucleo su larga scala, provocando deformazioni della superficie. Il termine *outgassing* fa invece riferimento a quei processi con cadenza stagionale o diurna durante i quali si verifica l'espulsione di materiale contenuto sotto la superficie, tramite la sublimazione di sostanze volatili. La cometa ha un periodo di rotazione medio di 12.404 ore, ma questo valore varia considerevolmente durante la sua orbita a causa delle torsioni indotte da forze non gravitazionali, da un massimo di 12.430 ore ad un minimo di 12.305 ore, registrato in corrispondenza del perielio.<sup>[4]</sup> L'orbita della cometa è inclinata di 7.0402 gradi rispetto all'eclittica ed è un'ellisse con eccentricità di 0.6411, i cui perielio e afelio distano rispettivamente 1.242 UA e 5.6824 UA dal Sole. L'inclinazione di 52 gradi dell'asse di rotazione della cometa, combinata con il coincidere del solstizio dell'emisfero sud con il passaggio al perielio, induce una forte variazione stagionale dell'insolazione. In corrispondenza del perielio, quando l'insolazione raggiunge il valore massimo, l'emisfero sud è illuminato, mentre i punti più a nord dell'emisfero settentrionale risultano completamente oscurati. Anche la forma bi-lobata, con il collo centrale che forma una grande concavità, implica delle variazioni diurne consistenti nell'illuminazione. Combinando l'effetto diurno con quello

stagionale, si ottiene un gradiente termico molto elevato nell'emisfero sud della cometa, che induce degli stress termici. Ciò ha delle conseguenze dirette sull'erosione, legata alla sublimazione dei ghiacci, che risulta essere ben quattro volte più intensa nell'emisfero sud rispetto all'emisfero nord.[5]

### 3.1 *Morfologia superficiale*

A livello superficiale, la cometa presenta una eterogeneità geologica, con diverse tipologie di terreno. Le principali tipologie individuate comprendono terreni consolidati, terreni non consolidati e depressioni su larga scala. I terreni consolidati sono delle aree in cui le polveri sono assenti ed il terreno esposto mostra un aspetto roccioso, con una integrità in grado di sostenere scogliere, sporgenze e fratture. I fenomeni fisici all'origine delle fratture sembrerebbero essere lo shock termico e l'affaticamento termico, ma sono stati proposti anche processi alternativi come l'attività tettonica indotta dallo stress torsionale dovuto alla rotazione.[2] I terreni consolidati sono i più comuni e si distinguono in fortemente consolidati e debolmente consolidati. I terreni debolmente consolidati sono quelli che si sgretolano più facilmente e per questo motivo è possibile trovare su di essi depositi di detriti. I depositi di detriti sono degli accumuli di materiale incoerente formati alla base delle pareti scoscese, nei punti che corrispondono alla massima pendenza gravitazionale, a seguito dell'erosione delle scogliere. Essi sono catalogati in tre tipologie in base alla loro granulometria e alle regioni che li hanno prodotti. La prima tipologia sono i *ghiaioni*, cioè accumuli di materiale granulare in prossimità dei quali si possono trovare dei massi con diametri compresi tra i 2 e i 18 metri. Questi depositi sono distribuiti uniformemente alla base delle pareti rocciose e sono frutto dell'erosione delle stesse. La seconda tipologia sono i depositi dovuti all'accumulo gravitazionale, che sono composti da massi con diametri compresi tra i 2 ed i 30 metri, mescolati a materiale più sottile. Le sorgenti di questi depositi sono le *nicchie*, ovvero le scarpate semicircolari formatesi dal distaccamento di materiale dalle pareti. La terza e ultima tipologia sono i *diamicton*, depositi di materiale non smistato di cui non è chiara la sorgente. I depositi di detriti vengono spesso osservati all'interno di buche di forma circolare dai diametri compresi tra i 50m e i 300m e profonde fino a 200m, chiamate *pozzi*. Sulle pareti rocciose e sulle scarpate presenti sui terreni consolidati sono visibili dei linamenti che possono estendersi fino a 400m parallelamente l'uno all'altro. Il fatto di aver osservato questi lineamenti anche sulle pareti interne dei pozzi ha portato ad ipotizzare che il nucleo della cometa abbia una struttura interna stratificata.[2] I terreni non consolidati rappresentano il 20% della superficie cometaria e si possono distinguere in terreni lisci e aree ricoperte di polvere. I terreni lisci sono quelli in cui la superficie della cometa appare priva di asperità o ruvidezza, essendo coperta da depositi sufficientemente spessi di particelle sottili.

Le aree ricoperte di polvere sono invece porzioni della superficie sulle quali si sono formati depositi di polveri dall'aspetto granulare, composte da granelli dello spessore di qualche centimetro. Le regioni ricoperte di polvere si trovano solamente nell'emisfero settentrionale della cometa. Questa dicotomia tra i due emisferi è riconducibile alla forte differenza stagionale dell'attività cometaria. Sembra infatti, che il materiale più pesante espulso dall'emisfero meridionale durante il passaggio al perielio, venga redistribuito sulla superficie dell'altro emisfero, che in questa fase è inattivo, creando depositi di polveri. [6] Infine, le depressioni su larga scala sono regioni della superficie occupate da estese depressioni irregolari, presenti soltanto nell'emisfero nord. Anche all'interno delle depressioni si trovano depositi di detriti e molto raramente depositi di polvere. La forma e il rapporto tra il diametro e la profondità di queste depressioni escludono l'ipotesi che si possa trattare di crateri da impatto. Sembra invece più probabile che esse siano dovute ad esplosioni o processi endogeni. Altre formazioni geologiche identificate solo sull'emisfero settentrionale sono i pinnacoli, strutture asimmetriche con altezze che variano dai 10 ai 200 metri e diametri alla base che possono arrivare fino a 300m. Accanto ai pinnacoli si osservano delle macchie più brillanti, associate a riserve di ghiaccio della cometa. [7] Seguendo i grandi confini

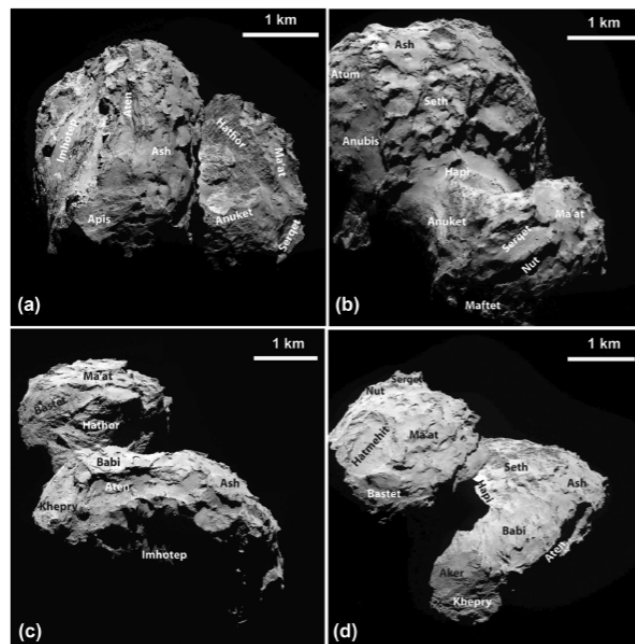


Figura 5: Il nucleo della cometa Churyumov-Gerasimenko a differenti angolazioni.

topografici e morfologici che separano tra di loro le diverse tipologie di terreno è stato possibile individuare complessivamente 26 regioni sulla superficie della cometa, 19 delle quali nell'emisfero nord e 7 nell'emisfero sud. Ad ognuna delle regioni individuate è stato assegnato il nome di una divinità egizia, scegliendo i nomi delle divinità femminili per le

regioni situate sulla testa (Hathor, Anuket, Ma'at, Serqet, Nut, Maftet, Bastet, Hatmehit, Neith e Wosret) e i nomi delle divinità maschili per le regioni situate sul corpo (Aker, Khepry, Imhotep, Aten, Ash, Seth, Babi, Apis, Atum, Anubis, Bes, Khonsu, Geb e Anhur) e sul collo (Hapi e Sobek).

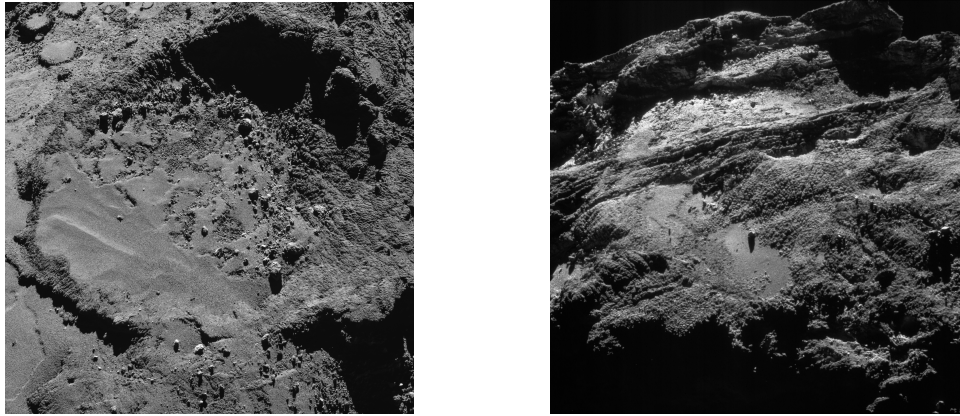


Figura 6: Esempi delle superfici del nucleo cometario nell'emisfero nord (a sinistra) e nell'emisfero sud (a destra).

### 3.2 *L'emisfero nord*

L'emisfero nord della cometa è il primo ad essere stato studiato dalla sonda Rosetta, poiché fino al mese di marzo del 2015 era il solo ad essere illuminato dal Sole. Tramite la NAC dello strumento OSIRIS è stato possibile ottenere delle immagini dettagliate e ad alta risoluzione della superficie che hanno permesso di identificare su di esso ben 19 regioni morfologiche, 10 delle quali si trovano sul corpo, 8 sulla testa ed una sul collo della cometa. Sul corpo della cometa si trovano 5 regioni consolidate, 4 regioni non consolidate ed 1 depressione. Alle regioni consolidate appartengono Aker, Khepry, Apis, Atum e Seth, delle quali le prime 4 sono fortemente consolidate mentre Seth è debolmente consolidata. Aker ha un suolo scuro, con differenti gradi di ruvidità e caratterizzato da fratture angolari della lunghezza di 200m. Khepry ha un suolo più chiaro, molto ruvido e caratterizzato da piccole buche con depositi di particelle sottili all'interno. Apis è una regione piatta e liscia su cui sono presenti numerosi lineamenti che formano una trama di crepe poligonali. Atum è una regione estremamente complessa dai confini mal definiti, con pochi massi, qualche piccola depressione che mostra lineazione e montagnole irregolari. Seth ha un terreno più fragile e soggetto a crolli, è cosparso di nicchie circolari o semicircolari e presenta in alcuni punti delle crepe poligonali. Si trovano inoltre dei pozzi, disposti a formare catene, che mostrano segni di attività. Alle regioni non consolidate appartengono Imhotep e Anubis, che presentano un terreno liscio e Babi ed Ash, che sono aree ricoperte di polvere. Imhotep è la regione geologicamente più eterogenea della cometa, con aree di terreno estremamente



liscio, che probabilmente hanno subito recentemente un processo di *re-surfacing*, circondate da depositi di detriti racchiusi da creste stratificate. Su di essa si osservano anche montagnole coniche e pozzi, che sono probabilmente il risultato di un meccanismo simile a quello dei vulcani di fango. Anubis presenta alcuni massi sparpagliati, resti di depositi di detriti ed un terreno liscio che in alcune aree mostra delle pieghe e delle figure lineari simili a terrazzamenti. Babi è una regione ricoperta di polvere che in alcuni punti lascia esposto il sottostante mantello stratificato di materiale fragile e presenta una *mesa* a forma di diamante circondata da depositi di detriti e massi più chiari. Ash è il principale deposito di particelle sottili del corpo cometario e mostra l'unico cratere da impatto identificato sulla superficie della cometa. La depressione presente sul lobo maggiore si chiama Aten e si è probabilmente formata per mezzo di un evento molto violento di breve durata. All'interno di Aten è possibile osservare un numero elevato di frane e di ghiaioni.[7] Sulla testa della cometa si trovano altre 5 regioni consolidate, 1 regione non consolidata e 2 depressioni. Le regioni consolidate sono Hator, Anuket, Serqet, Maftet e Bastet e in questo caso sono tutte fortemente consolidate. Hator è una ruvida scogliera alta 900m, priva di polveri e ricoperta di fratture lineari, che mostra depositi da caduta e insennature con terrazzamenti longitudinali. Anuket è una regione complessa, il cui suolo ha un peculiare aspetto che lo rende simile alla cera fusa e su cui è presente una frattura lunga 500m. Serqet è una piccola area di terreno piano e liscio con pochi massi, circondata da una cresta aguzza. Maftet è una regione dal suolo ruvido su cui si trovano cumuli sparsi di detriti, circondati da piccole depressioni irregolari. Su questa regione sono presenti pozzi attivi attorno ai quali si osserva del materiale che sembra essere sollevato da un processo di scorrimento fluido verso l'esterno, simile a quello dei vulcani di fango. Bastet ha un suolo ruvido, che mostra dei lineamenti orientati e sul quale si trova qualche masso. La regione non consolidata si chiama Ma'at ed è un'area ricoperta di polvere da cui affiorano alcune vette del materiale sottostante e sulla quale è possibile osservare depositi di particelle sottili disposti a formare delle onde. Le depressioni sono chiamate Nut e Hatmehit. Nut è una piccola depressione formata dall'erosione di Serqet e sulla quale si osservano molti massi. Hatmehit è una depressione ben definita, riempita di materiale a grana sottile, il cui fondale è attraversato da una cresta curvilinea.[7] A completare la mappa dell'emisfero nord è la stretta regione non consolidata Hapi, situata sul collo della cometa. Hapi ha un suolo liscio e dall'aspetto polveroso, sul quale si trovano grossi massi disposti linearmente. Questa regione si è rivelata molto attiva, con fenomeni di outgassing osservati durante tutto il periodo precedente al passaggio al perielio.[7]

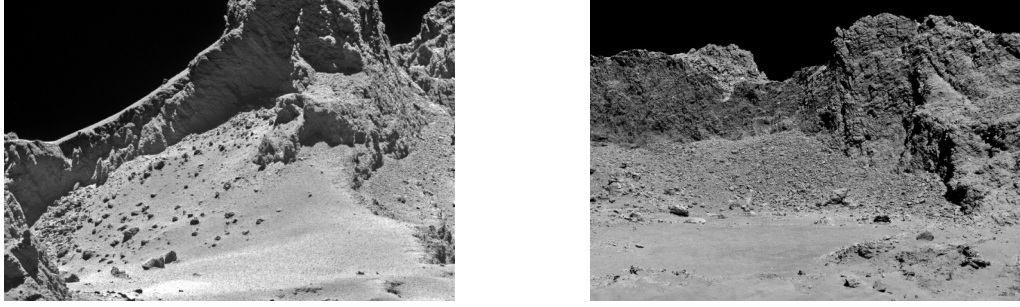


Figura 7: Dettaglio della superficie dell'emisfero nord, in cui si vedono alcune delle differenti tipologie di terreno presenti.

### 3.3 *L'emisfero sud*

Dal mese di marzo del 2015 ha iniziato ad essere gradualmente illuminato anche l'emisfero sud della cometa e ciò ha permesso alla NAC di OSIRIS di completare la mappatura della superficie cometaria. Su questo emisfero sono state individuate altre 7 regioni, 4 delle quali sul corpo della cometa, 2 sulla testa ed una sul collo. La particolarità di questo emisfero è che tutte le regioni osservate su di esso appaiono consolidate. Sul corpo si trovano 2 regioni fortemente consolidate, 1 regione debolmente consolidata ed 1 regione mista. Le regioni fortemente consolidate sono Bes e Geb. Bes ha una superficie ruvida sulla quale è possibile trovare terrazzamenti, pozzi, fratture, depositi di detriti e piccole aree lisce. Geb è una regione che occupa parte della scogliera principale del lobo maggiore ed ha una superficie ricoperta di fratture che le conferiscono una trama poligonale. La regione debolmente consolidata è Anhur. Anhur occupa la parte rimanente della scogliera principale ed ha una superficie più friabile con numerosi pozzi, insenature, depositi di detriti e aree coperte da massi. La regione mista è Khonsu. La superficie di Khonsu è stratificata e su di essa è possibile trovare grandi massi, piccole fosse contenenti depositi di materiale sottile ed anche delle peculiari strutture a forma di pankake che affiorano dal terreno. [6] Le 2 regioni Neith e Wosret osservate sulla testa e la regione Sobek osservata sul collo, sono tutte fortemente consolidate. Neith occupa la ripida scogliera principale del lobo minore ed ha una superficie ruvida. Wosret ha una superficie appiattita sulla quale si possono incontrare aree fortemente fratturate e regioni in cui il terreno è pieno di buche. Questa regione è attraversata da due fasce di materiale stratificato, grossomodo parallele al confine tra i due emisferi, e da fratture lineari lunghe 300m vicine alla scogliera di Neith. Sobek è una stretta regione che unisce i due lobi. Sulla sua ruvida superficie sono presenti alcuni depositi di detriti provenienti dalle scogliere circostanti e si possono osservare alcuni terrazzamenti. [6]

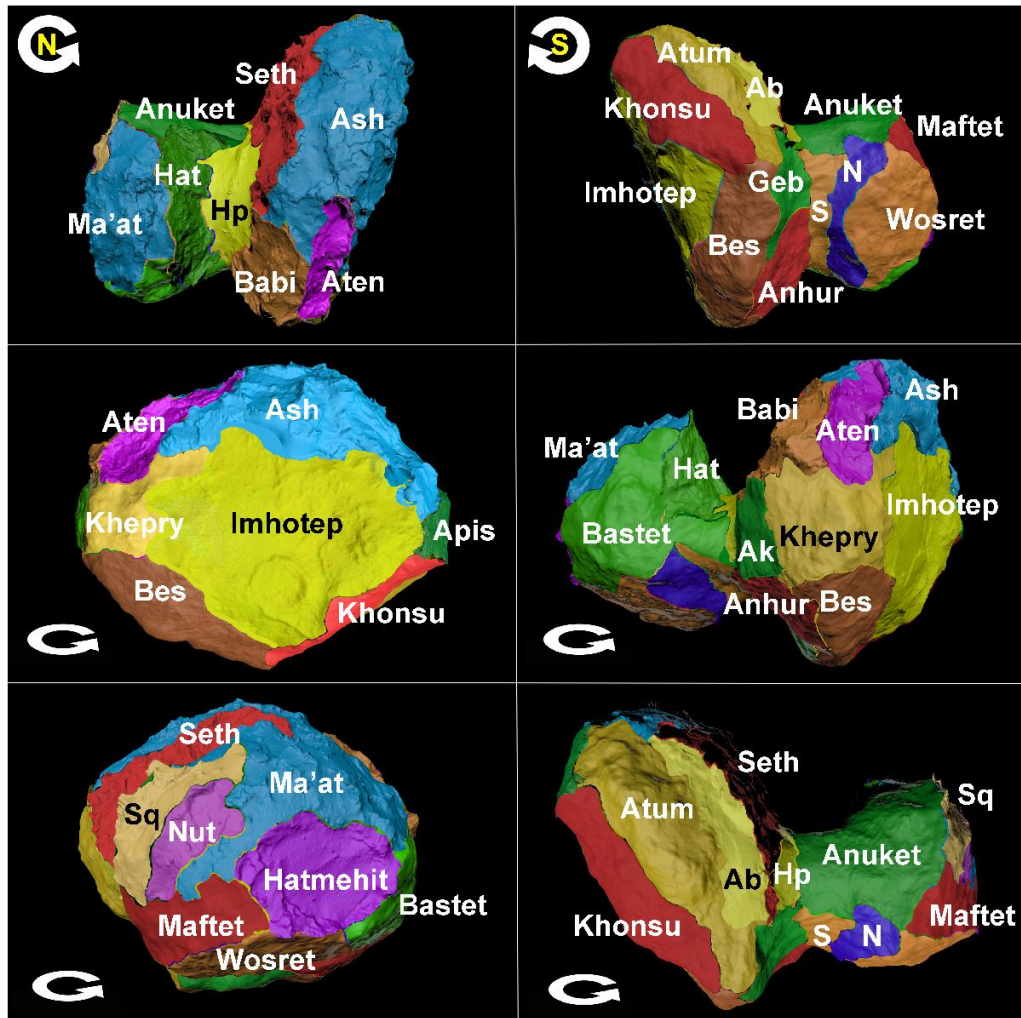


Figura 8: Mappa della superficie del nucleo cometario con le 26 regioni identificate.

Durante i mesi in cui la sonda Rosetta ha accompagnato la cometa Churyumov-Gerasimenko lungo la sua orbita attorno al Sole, lo strumento OSIRIS ha continuato ad osservare e mappare la superficie del nucleo cometario con una elevata risoluzione spaziale, producendo una grande mole di immagini, grazie alle quali è stato possibile procedere ad un'analisi spettrofotometrica. L'analisi delle proprietà fotometriche e la spettrofotometria del nucleo cometario hanno permesso di studiare la sua eterogeneità, sia in termini dell'albedo, che della composizione chimica. Per poter arrivare a questo, tutte le immagini di OSIRIS, ricevute in pacchetti compressi di dati, hanno dovuto prima seguire un processo di calibrazione a più livelli. Le immagini che la sonda ha inviato a Terra sono infatti ancora grezze e per questo vengono dette immagini di livello 0. Una volta che sono state calibrate con le informazioni dell'header diventano immagini di livello 1. Queste immagini vengono poi corrette tramite la sottrazione dei *bias*, dei rumori di lettura, della *dark current* e dei pixel inutilizzabili ed in seguito subiscono una calibrazione radiometrica che le rende immagini di livello 2. L'ulteriore calibrazione per distorsione geometrica le porta al livello 3.[\[8\]](#) Da queste è poi possibile ottenere immagini di livello 4, associando ad ogni singolo pixel le coordinate di longitudine e latitudine, che permettono di localizzarlo esattamente sulla superficie della cometa, e gli angoli di illuminazione. Le immagini ottenute in diversi filtri non sono simultanee ma sequenziali, a causa della rotazione combinata della sonda e della cometa. Prima di procedere nello studio spettrofotometrico è dunque necessario un processo di *coregistrazione*, che trasformi le immagini provenienti da differenti set di dati in un sistema coordinato. Per fare questo si prendono le immagini ottenute con i diversi filtri, se ne sceglie una di riferimento e si allineano ad essa tutte le altre. Dopodiché si procede ad una calibrazione in flusso assoluto che converte le unità digitali in  $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot sr^{-1}$ , riferite alla lunghezza d'onda centrale di ogni filtro utilizzato. I fattori di calibrazione assoluti sono stati determinati utilizzando come spettri standard di flusso quelli della stella Vega e del Sole.[\[9\]](#) Per ciascun pixel di ogni immagine viene in seguito calcolato un fattore adimensionale, chiamato *riflettanza*, tramite la formula:

$$I/F(\lambda) = \frac{\pi \cdot I(\lambda)}{F_{\odot}(\lambda)} \quad (1)$$

dove  $I(\lambda)$  è la radianza, cioè la radiazione riflessa dalla superficie cometaria, misurata in  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ , mentre  $F_{\odot}(\lambda)$  è l'irradianza solare,

misurata in  $W \cdot m^{-2}$  ed ottenuta come rapporto tra il flusso del Sole riferito alla lunghezza d'onda centrale di ogni filtro, in maniera tale da essere consistente con i fattori di calibrazione assoluti, e la distanza eliocentrica della cometa al quadrato. La riflettanza è molto utile, perché permette di risalire alle caratteristiche della superficie, assumendo valori prossimi allo 0, nel caso di superfici molto scure, e valori prossimi ad 1, nel caso di superfici molto chiare, inoltre il suo valore cambia in base al filtro fotometrico che si utilizza.<sup>[9]</sup> A questo punto, le immagini coregistrate e convertite in riflettanza vengono riordinate per valori di lunghezza d'onda crescente e raggruppate in modo da formare un'immagine multi-spettrale, chiamata cubo spettrale.<sup>[10]</sup> L'ultima operazione da compiere prima di poter estrarre gli spettri è la correzione topografica, un procedimento che rende bidimensionale la superficie tridimensionale della cometa, la quale è caratterizzata da rilievi ed asperità che diffondono la luce in modo non omogeneo. Questo passaggio serve per poter stabilire se le variazioni in riflettanza misurate sono dovute alla tipologia di terreno presente oppure ad una eterogeneità nella composizione chimica del suolo. Per poter eseguire questa operazione è necessario conoscere gli angoli di illuminazione, cioè l'angolo d'incidenza  $i$ , di emissione  $e$  e di fase  $\alpha$  in ogni punto della superficie. L'angolo d'incidenza è definito come l'angolo compreso tra la direzione dei raggi solari incidenti e la normale alla superficie nel punto d'incidenza. L'angolo di emissione è definito come l'angolo compreso tra la normale e la direzione di emissione dei raggi. Infine l'angolo di fase è quello compreso tra raggio d'incidenza e raggio d'emissione. Questi tre angoli dipendono dal punto che si sta considerando sulla superficie e sono disponibili solamente per le immagini di livello 4. Una volta che si dispone degli angoli di illuminazione e della riflettanza è possibile determinare una funzione di fase con l'integrazione del disco, detta *Disk Function*, che descriva la dipendenza della riflettanza dai 3 angoli. La più semplice funzione di fase di cui si dispone è la Legge di Lommel-Seelinger definita dalla formula:

$$D(i, e) = \frac{2\cos(i)}{\cos(i) + \cos(e)} \quad (2)$$

in cui compaiono le funzioni coseno degli angoli d'incidenza ed emissione definiti in precedenza. Questa legge deriva dalla teoria del trasferimento radiativo applicata al caso della diffusione singola di una superficie ricoperta di particolato e si è dimostrata adatta alla descrizione di superfici lisce e con albedo bassa, come quelle degli asteroidi di tipo C e dei nuclei cometari, sulle quali prevale la diffusione singola specialmente a piccoli angoli di fase.<sup>[9]</sup> Per eseguire la correzione topografica è sufficiente dividere la riflettanza misurata per la Disk Function di Lommel-Seelinger. Oltre alla Legge di Lommel-Seelinger esistono altri tipi di Disk Function, come la Legge di Minnaert o la Disk Function di Akimov, per citarne alcune. La funzione di Akimov ammette una versione indipendente da parametri, derivata a livello teorico nel caso di una

superficie estremamente ruvida e leggermente ondulata. Questa versione della Disk Function è stata preferita in alcuni studi di spettrofotometria ad alta risoluzione concentrati su regioni specifiche della superficie del nucleo cometario, per il fatto di essere indipendente dalle condizioni di illuminazione e di osservazione.[\[10\]](#) La sua forma è descritta dalla formula:

$$D(\alpha, \beta, \gamma) = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{\pi - \alpha}\left(\gamma - \frac{\alpha}{2}\right)\right) \frac{(\cos\beta)^{\alpha/(\pi-\alpha)}}{\cos\gamma} \quad (3)$$

dove  $\beta$  e  $\gamma$  rappresentano rispettivamente la coordinata fotometrica di latitudine e di longitudine e risultano a loro volta dipendere dagli angoli di fase, incidenza ed emissione secondo le seguenti relazioni:

$$\cos(i) = \cos\beta\cos(\alpha - \gamma) \quad (4)$$

$$\cos(e) = \cos\beta\cos\gamma \quad (5)$$

Analogamente al caso precedente, la correzione topografica si ottiene dividendo la riflettanza per la Disk Function di Akimov.[\[10\]](#) Alla fine di tutti questi passaggi si ottiene un cubo spettrale contenente immagini coregistrate, convertite in riflettanza e corrette topograficamente che possono dunque essere utilizzate per estrarre lo spettro della cometa. Per ottenere uno spettro dell'intero nucleo cometario conviene determinare lo spettro in diverse regioni, in modo da avere informazioni provenienti da entrambi i lobi e dal collo. Gli spettri ottenuti da regioni diverse della superficie cometaria avranno delle pendenze differenti tra di loro. Per poter quantificare queste differenze, gli spettri devono essere prima normalizzati, cioè divisi per la riflettanza ottenuta in una certa lunghezza d'onda.[\[10\]](#) La lunghezza d'onda che si sceglie di solito è quella su cui è centrato il filtro verde (F23) della NAC, cioè  $535.7nm$ . In seguito, per ogni spettro normalizzato si determina la pendenza spettrale  $S$ , misurata in  $\%/100nm$  e definita come:

$$S = \frac{I/F_{NIR} - I/F_{F23}}{I/F_{F23}} \frac{10^4}{\lambda_{NIR} - \lambda_{F23}} \quad (6)$$

in cui  $I/F_{NIR}$  ed  $I/F_{F23}$  rappresentano la riflettanza calcolata rispettivamente a  $\lambda_{NIR}$  e  $\lambda_{F23}$ , che sono la lunghezza d'onda del vicino infrarosso e la lunghezza d'onda di F23 definita in precedenza. La pendenza spettrale esprime la dipendenza della riflettanza dalla lunghezza d'onda ed in particolare, a valori elevati della pendenza spettrale corrispondono spettri arrossati, cioè spettri la cui pendenza aumenta con l'aumentare della lunghezza d'onda.

#### 4.1 Proprietà spettrofotometriche del nucleo

Il primo studio fotometrico del nucleo della cometa Churyumov-Gerasimenko è stato eseguito utilizzando un set di immagini raccolte da OSIRIS tra il

21 luglio ed il 6 agosto 2014, mentre la sonda Rosetta si stava avvicinando alla cometa. Utilizzando il filtro verde della NAC è stato calcolato il flusso del nucleo e, dopo aver fatto l'assunzione che la chioma cometaria contribuisse per l'1.5% al flusso totale, è stata determinata la magnitudine assoluta della cometa, risultata pari a  $H_V = (15.74 \pm 0.02)mag$ . La curva di fase associata a questa magnitudine ha rivelato una forte dipendenza della luminosità dall'angolo di fase. La pendenza del tratto lineare della curva di fase ha un valore  $\beta = (0.047 \pm 0.002)mag/^\circ$  per angoli di fase superiori a  $7^\circ$  ed è molto simile a quello medio trovato per le comete della famiglia di Giove.[9] Utilizzando poi un set di immagini ottenute con 20 filtri delle camere NAC e WAC su un intervallo di lunghezze d'onda compreso tra  $250nm$  e  $1000nm$  è stato determinato lo spettro del nucleo cometario. Questo spettro appare arrossato e mostra solo una banda di assorbimento a  $290nm$ , dovuta probabilmente al ghiaccio di  $SO_2$ . [9] La pendenza dello spettro ha una forte dipendenza dall'angolo di fase, infatti cresce dall'11% misurato ad  $\alpha = 1.3^\circ$  fino al 16% ad  $\alpha = 53.9^\circ$ . Questo andamento viene detto *arrossamento di fase* e può essere dovuto sia al grande contributo della diffusione multipla ad angoli di fase elevati, sia ad un effetto legato alla ruvidità della superficie.[9] Uti-

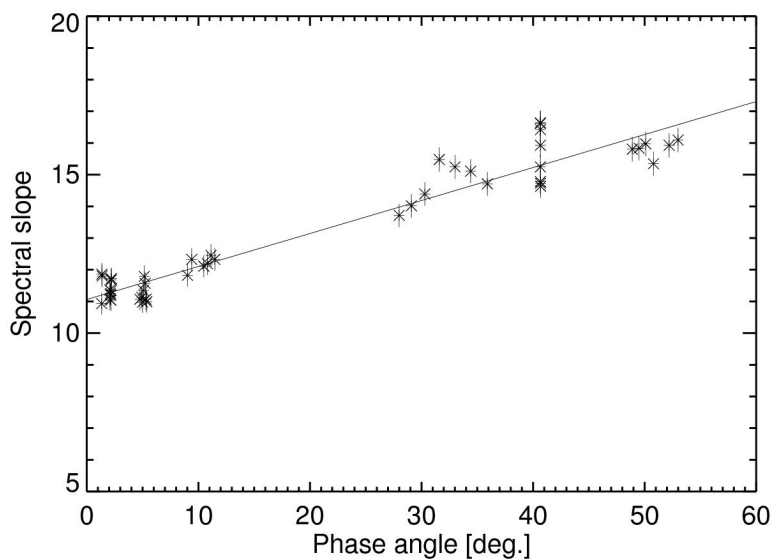


Figura 9: Pendenza spettrale media del nucleo cometario nell'intervallo tra  $535nm$  e  $882nm$  in funzione dell'angolo di fase.

lizzando 8 filtri in un intervallo compreso tra i  $325nm$  ed i  $1000nm$  è stato poi realizzato un modello della riflettanza misurata. Dal modello si è capito che l'aumento della luminosità osservato ad angoli di fase minori di  $7^\circ$  è dovuto all'effetto di opposizione di *shadow-hiding*. Anche l'andamento dell'albedo geometrica ricavata alle diverse lunghezze d'onda viene riprodotto bene dal modello e in particolare si trova che il valore a  $649nm$  è di  $0.065 \pm 0.02$ . Una simile albedo indica che il nucleo della Churyumov-Gerasimenko è molto scuro in termini assoluti, ma comunque luminoso se confrontato con quello delle altre comete osservate.[9] Sulla superficie della cometa si osservano variazioni in termini di albe-

do, con un incremento massimo del 16% sulla regione Hapi ed un decremento circa del 9% sulla regione Apis. Queste variazioni possono essere

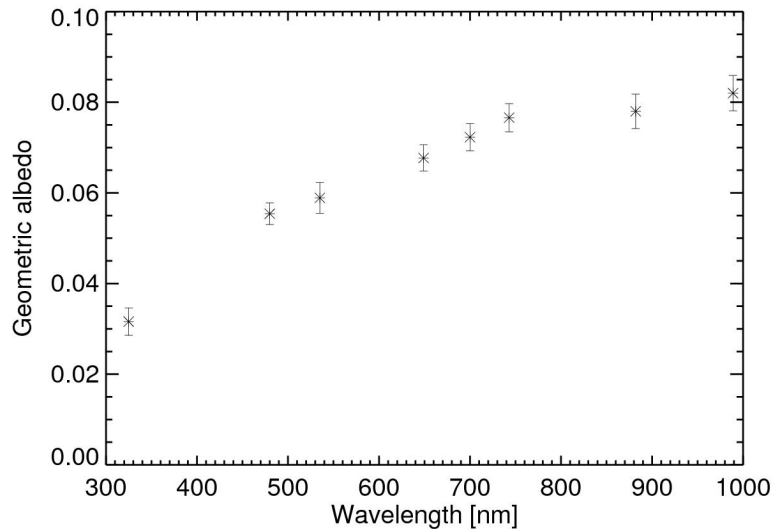


Figura 10: Albedo geometrica del nucleo cometario.

dovute sia alla differente tessitura del terreno, sia alla diversa composizione chimica. Con le immagini acquisite nei primi giorni di agosto del 2014, caratterizzate da una risoluzione spaziale compresa tra i  $2.1m/px$  e i  $2.4m/px$  è stato possibile effettuare uno studio spettrofotometrico più dettagliato della superficie. In particolare sono state identificate 4 regioni spettrofotometriche, suddivise in base al valore della pendenza spettrale. Le regioni con una pendenza spettrale bassa, compresa tra l'11% e il 14%, vengono definite blu. Quelle con una pendenza spettrale compresa tra il 14% ed il 18% sono dette moderatamente rosse. Le regioni con pendenza spettrale superiore al 18% vengono invece definite rosse. Il quarto tipo di regione spettrofotometrica ha una distribuzione sulla superficie legata all'attività cometaria. Queste regioni hanno una pendenza spettrale simile a quella delle regioni moderatamente rosse, ma il loro spettro presenta un eccesso di flusso alle lunghezze d'onda di  $701nm$ ,  $743nm$  e  $989nm$ , probabilmente legato alle emissioni nella chioma cometaria dovute alle specie  $H_2O^+$  e  $NH_2$ .<sup>[11]</sup> In generale si osserva una correlazione tra la pendenza spettrale e la tipologia di terreno, infatti i terreni più rossi sono quelli consolidati, mentre quelli più blu sono quelli non consolidati.<sup>[10]</sup> Le variazioni locali in termini di colore sono però dovute anche alla composizione chimica, si osserva infatti che le regioni blu sono più ricche di ghiaccio, mentre in quelle rosse prevalgono i composti organici.<sup>[11]</sup> Anche per la riflettanza si osserva una correlazione col tipo di terreno. Il valore maggiore corrisponde ai depositi di materiale sottile, mentre il valore minore si registra sui terreni consolidati. La riflettanza diminuisce gradualmente dai ghiaioni ai diamicton, passando per i depositi dovuti all'accumulo gravitazionale. Non si esclude però che le variazioni in riflettanza osservate a livello locale possano essere legate alla composizione chimica, infatti il suo valore aumenta an-



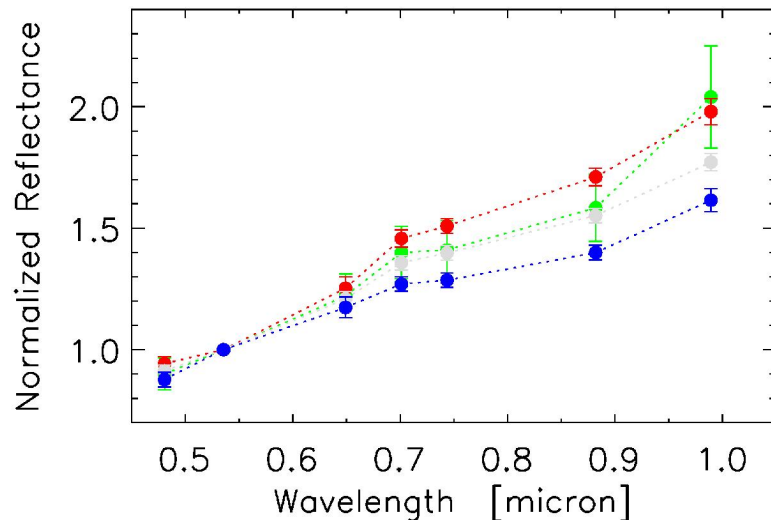


Figura 11: Grafico della riflettanza in funzione della lunghezza d'onda delle 4 regioni spettrofotometriche, normalizzata a  $535nm$ . Il rosso ed il blu si riferiscono alle regioni rosse ed alle regioni blu rispettivamente, mentre le regioni moderatamente rosse e la quarta tipologia sono rappresentate in grigio ed in verde.

che del 2% in corrispondenza dei massi di ghiaccio.<sup>[10]</sup> Sul nucleo della cometa si presenta quindi in generale un andamento opposto tra la pendenza spettrale e la riflettanza, nel senso che le regioni più blu sono le più luminose, mentre le più rosse sono le più scure. Esiste poi una correlazione tra la pendenza spettrale e la stratificazione della cometa. Si osserva infatti una graduale diminuzione dell'arrossamento dello spettro cometario passando dagli strati a maggiore elevazione a quelli ad elevazione minore. Per spiegare questo andamento sono stati proposti due scenari. Il primo prevede che la cometa abbia subito una differenziazione durante la fase di accrezione, che ha disposto il materiale dalle differenti caratteristiche su diversi strati. In seguito, la cometa avrebbe subito dei processi di erosione non omogenei sulla superficie che hanno causato l'affioramento del materiale interno. Il secondo invece prevede che il nucleo abbia una composizione omogenea e che le differenze osservate siano legate invece al processo evolutivo. Sembra infatti che l'aspetto scuro degli strati esterni sia dovuto ad un periodo di esposizione maggiore rispetto a quelli più interni che hanno invece un aspetto più chiaro, perché la loro superficie è stata esposta in un'epoca più recente ed ha quindi un aspetto più giovane. Questo secondo scenario sembra il più plausibile.<sup>[12]</sup> <sup>[13]</sup> Non sembra invece esistere una correlazione tra la distribuzione delle sostanze volatili e gli strati cometari, infatti le sostanze volatili sono state individuate sulla superficie indipendentemente dall'elevazione del suolo.

## 4.2 Attività cometaria

Lo spettro della cometa viene influenzato fortemente dall'attività cometaria ed evolve nel tempo in funzione di questa. Nei mesi in cui la cometa si avvicina al Sole, si nota infatti una progressiva diminuzione della pendenza spettrale media di tutta la superficie del nucleo cometario, seguita da un minimo in corrispondenza del perielio ed un successivo aumento nei mesi in cui la cometa si allontana. L'attività cometaria infatti è responsabile della rimozione, durante la fase di avvicinamento, della polvere che copre il nucleo cometario e del conseguente affioramento degli strati di ghiaccio sottostanti, che conferiscono alla cometa un aspetto più blu.<sup>[11]</sup> Quando la cometa supera il perielio e torna ad allontanarsi dal Sole, l'attività cometaria si affievolisce e non è più in grado di rimuovere la polvere, che perciò ricade sulla superficie, rendendola più scura. Di conseguenza, a distanze eliocentriche superiori alle 2 UA lo spettro torna ad essere arrossato.<sup>[14]</sup> L'analisi delle pendenze spettrali si rivela un metodo utile per identificare le regioni attive sulla superficie. Si verifica infatti una correlazione tra le pendenze spettrali e l'attività cometaria. Le superfici del nucleo che hanno una pendenza spettrale compresa tra 8%/100nm e 13%/100nm sono attive e su di esse sono presenti numerosi pozzi, nicchie e macchie luminose. Le superfici con una pendenza spettrale superiore a 15%/100nm sono inattive. I valori intermedi di pendenza spettrale, compresi tra 13%/100nm e 15%/100nm, si misurano sulle superfici in corrispondenza delle quali è possibile osservare depositi di materiale sottile prodotto da altre regioni attive o sulle quali sono presenti depositi di ghiaccio di dimensioni ridotte.<sup>[15]</sup> L'attività cometaria è principalmente legata alla sublimazione delle sostanze volatili presenti nel terreno. Tra giugno e ottobre del 2015 sono stati identificati con precisione più di 200 jets, alcuni dei quali della durata di qualche minuto soltanto. La distribuzione sulla superficie delle cometa di questi jets ha dimostrato che non c'è un legame con la tipologia di terreno, ma piuttosto con le condizioni di illuminazione locale da parte del Sole. Infatti, le sorgenti dei jets sono localizzate alle pendici delle scogliere e delle scarpate o all'interno di pozzi ed altre cavità, come le nicchie, che siano in grado di fornire ombra al terreno. Alcuni jets sono meno intensi ed hanno un andamento periodico nel tempo, dovuto alle condizioni di illuminazione del terreno, che inducono un ciclo di sublimazione e ricondensazione del ghiaccio. Le sorgenti di questo tipo di jets si trovano solitamente nei pozzi o nelle nicchie. In alcuni casi le sorgenti dei jets hanno un aspetto luminoso ed uno spettro più blu rispetto a quello del terreno circostante e ciò implica che in corrispondenza delle sorgenti vi sia un arricchimento locale di sostanze volatili.<sup>[16]</sup> I terreni ricchi di sostanze volatili hanno una riflettanza maggiore rispetto a quella degli altri terreni ed il suo valore aumenta con la lunghezza d'onda. Di conseguenza un terreno su cui siano presenti sostanze volatili ha un albedo maggiore. VIRTIS ha confermato la presenza di ghiaccio d'acqua



Figura 12: Alcune immagini che mostrano l'attività della cometa Churyumov-Gerasimenko.

osservando le bande di assorbimento a  $1.05\mu m$ ,  $1.25\mu m$ ,  $1.5\mu m$  e  $2.0\mu m$ , inoltre ha mostrato la presenza di ghiaccio di  $CO_2$  dedotta dalle bande di assorbimento a  $1.97\mu m$ ,  $2.01\mu m$ ,  $2.07\mu m$ ,  $2.7\mu m$  e  $2.78\mu m$ . [17] Anche se la sostanza volatile più abbondante nella chioma cometaria è l'acqua, sulla superficie della cometa non è presente in grande quantità. In generale l'abbondanza di ghiaccio è di pochi punti percentuali ed assume valori superiori al 20% solo localmente in alcune aree delle regioni Anhur, Bes, Khonsu, Imhotep e nel sito Aswan di Seth. [14] Il ghiaccio d'acqua è comunque presente su tutto il nucleo cometario, nascosto sotto gli strati di polvere e dentro il materiale consolidato. Sulla superficie della cometa sono state individuate 57 macchie luminose dovute alla presenza di sostanze volatili nel terreno. Le macchie osservate si possono dividere in 4 tipologie a seconda che siano isolate o raggruppate e in base alla loro posizione. Le prime due tipologie si riferiscono entrambe a macchie luminose isolate, ma ciò che le distingue è la posizione in quanto le prime si trovano sui terreni lisci, mentre le seconde si osservano in prossimità di strutture consolidate dalle forme irregolari. Alla terza tipologia appartengono le macchie luminose che si osservano sui massi ed infine alla quarta tipologia appartengono le macchie che formano dei raggruppamenti. Le macchie della prima tipologia sono state osservate sulle regioni Imhotep, Hapi, Anhur e Bes ed alcune di queste sono apparse sulla superficie cometaria 5 mesi prima del passaggio al perielio a seguito della rimozione, da parte dell'attività cometaria, degli strati di polvere che le ricoprivano. Queste macchie hanno un'albedo del 30% ed il ghiaccio in esse presente non è fresco, ma ha subito il processo di sublimazione e condensazione durante la precedente orbita cometaria. Poiché la sublimazione del ghiaccio è stata osservata anche alla distanza eliocentrica di 3.8 UA, le macchie di questa tipologia devono essersi formate nel periodo in cui la cometa passava all'afelio, per mezzo della condensazione del ghiaccio che era sublimato in precedenza. Sopra le macchie si è poi formato un deposito di particelle sottili a seguito della

ricaduta al suolo del materiale che era stato espulso dall'attività cometaria. Infine, quando la cometa è tornata ad avvicinarsi al perielio, la polvere è stata rimossa e ciò ha reso visibile le macchie sottostanti. Le macchie della seconda tipologia sono state osservate indipendentemente dalla distanza eliocentrica della cometa e non sembra quindi esserci una correlazione con l'attività cometaria. Infatti, il ghiaccio in esse presente è fresco e meno contaminato ed inoltre la loro albedo è superiore al 50%. Queste macchie sono difficili da osservare perché si trovano spesso in luoghi in cui la superficie del nucleo non viene illuminata e, nel momento in cui vengono illuminate dal Sole, sublimano completamente in pochi minuti. Anche le macchie della terza tipologia sono state osservate indipendentemente dalla distanza eliocentrica della cometa. Queste macchie si trovano sui massi ed hanno un periodo di vita lungo pur essendo esposte alla luce solare. La maggiore durata nel tempo è dovuta alla grande abbondanza di ghiaccio in esse contenuto, responsabile anche di un'albedo del 70%. Le macchie della quarta tipologia sono disposte in gruppi ed hanno un periodo di vita lungo a grandi distanze eliocentriche, dove sono state osservate sia in fase di avvicinamento che in fase di allontanamento dal Sole. Tuttavia queste macchie sono troppo piccole per sopravvivere alla sublimazione e questo spiega perché non siano state osservate in prossimità del perielio.<sup>[17]</sup> A seguito dell'attività cometaria, durante i mesi in cui Rosetta ha accompagnato la cometa sono stati osservati numerosi cambiamenti locali della superficie del nucleo. Tra i cambiamenti osservati ci sono crolli di scogliere e formazioni di scarpate, comparsa di nuovi massi o spostamento e scomparsa di massi esistenti e resurfacing di alcune aree della superficie. Il cambiamento più importante resta comunque la rimozione della polvere ed il suo trasferimento dall'emisfero sud all'emisfero nord. Si stima infatti che almeno il 20% della polvere sollevata dall'attività cometaria nell'emisfero meridionale ricada direttamente sulla superficie dell'altro emisfero causando un trasferimento di massa tra i due emisferi. Anche se l'emisfero sud ha un terreno consolidato, sulla sua superficie è comunque presente uno strato di polvere il cui spessore varia in funzione dell'attività cometaria conferendo un aspetto generalmente più rosso a distanze eliocentriche superiori alle 2 UA. Nonostante il numero elevato di eventi osservati, la morfologia globale del nucleo cometario non ha subito modifiche importanti e ciò ha portato ad ipotizzare che la cometa sia stata modelata in una fase precedente della sua vita.<sup>[18]</sup>

### 4.3 Spettrofotometria di Hapi

La prima regione a suscitare interesse scientifico è stata Hapi. Su questa regione sono stati infatti osservati pozzi attivi già alla distanza eliocentrica di 3.6 UA che hanno continuato a produrre jets con cadenza periodica. Le prime immagini utilizzate per l'analisi spettrofotometrica sono state acquisite durante la prima settimana di agosto del 2014 e a queste è sta-

ta aggiunta anche l'osservazione effettuata con 9 filtri della NAC, in un intervallo tra  $360\text{nm}$  e  $989.3\text{nm}$ , il 22 agosto dello stesso anno. Le immagini dell'ultimo set sono caratterizzate da una risoluzione spaziale di  $1.21\text{m}/\text{px}$  ed un angolo di fase di  $34.84^\circ$ . Gli spettri ottenuti sulla superficie della regione hanno pendenze spettrali comprese tra  $8\%/100\text{nm}$  e  $11\%/100\text{nm}$  nelle aree attive e tra  $11\%/100\text{nm}$  e  $14\%/100\text{nm}$  nel terreno circostante. Questo fa di Hapi la regione più blu dell'intero nucleo cometario oltre che la più luminosa in termini di albedo, con un incremento del 16% rispetto al valore medio della cometa. [15] Le proprietà fotometriche osservate sono legate all'elevata attività della regione, che a sua volta è dovuta all'abbondanza di ghiaccio presente sulla sua superficie. Hapi si trova infatti sul collo della cometa e, a causa della particolare morfologia del nucleo, la sua superficie viene spesso posta in ombra dalla vicina regione Hathor. Inoltre, essa non viene illuminata dal Sole nel momento del passaggio al perielio a causa degli effetti stagionali. Per queste due ragioni il ghiaccio d'acqua presente sulla sua superficie riesce a conservarsi più a lungo nel tempo. [9] L'elevata attività di questa regione è responsabile anche di un intenso trasporto della polvere sulle regioni vicine. Inoltre sulla superficie di Hapi sono state osservate delle increspature simili a quelle prodotte dai moti eolici. [18]

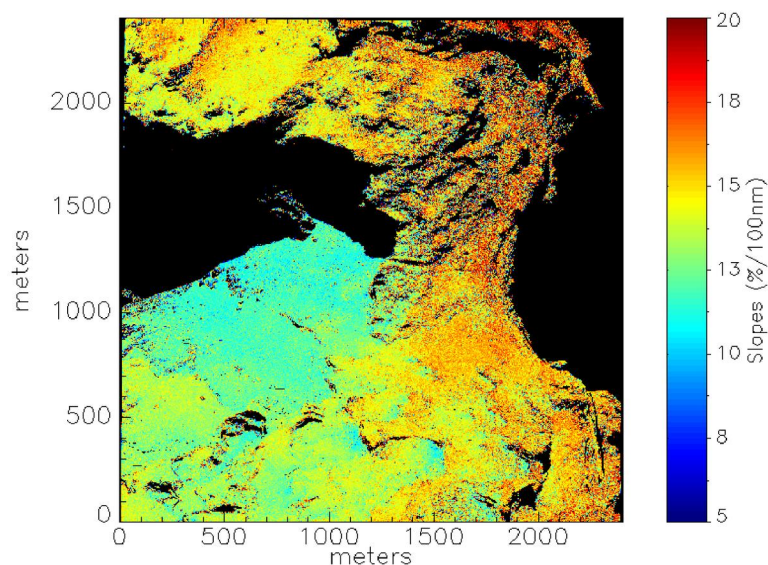


Figura 13: Mappa della pendenza spettrale sul collo cometario che mostra l'aspetto blu di Hapi.

#### 4.4 Spettrofotometria di Seth

Sulla superficie di Seth si osserva una eterogeneità di colori dovuta alle differenti tipologie di terreno e strutture geologiche presenti, quali pozzi, nicchie e terrazzamenti. In questa regione si trova Aswan, uno tra i siti inizialmente candidati come luoghi di atterraggio del lander Philae e probabilmente il più interessante dal punto di vista scientifico

tra quelli proposti. Aswan occupa il più grande terrazzamento presente sulla regione, esteso su di un'area di  $0.68\text{km}^2$  e delimitato da una ripida parete rocciosa con diverse nicchie ed altri terrazzamenti più piccoli. In prossimità di questo sito si trovano delle fratture ed un pozzo dal diametro di 200 metri e profondo  $180\text{m}$ , che ha mostrato attività producendo numerosi jets. Per analizzare Aswan sono stati utilizzati due set contenenti 10 immagini ottenute con 5 differenti filtri dalla NAC nei giorni 19 e 22 di settembre del 2014, quando Rosetta si trovava ad una distanza di circa  $28\text{km}$  dal suolo cometario. Entrambi i set di immagini sono caratterizzati da una risoluzione spaziale di  $0.50\text{m}/\text{px}$ , inoltre presentano angoli di fase molto simili, compresi tra  $68.82^\circ$  e  $72.04^\circ$ . Con una simile risoluzione spaziale è possibile distinguere chiaramente sulla superficie di Aswan figure delle dimensioni di  $2.0\text{m}$ , anche se l'elevato angolo di fase permette di scendere fino a  $1.0\text{m}$  sfruttando le ombre allungate prodotte dalla superficie.[\[20\]](#) La mappa morfologica della zona ha permesso di individuare 27 aree dalla simile storia geologica, dette pertanto regioni d'interesse. Gli spettri di queste regioni, normalizzati a  $480.7\text{nm}$  risultano molto simili tra di loro tranne che per la lunghezza d'onda di  $535.7\text{nm}$ , in cui si osserva una variazione della pendenza spettrale, dovuta forse al ridotto numero di filtri utilizzati. Le pendenze spettrali delle differenti tipologie di terreno nelle regioni d'interesse appaiono molto simili tra loro e sono comprese in un intervallo tra il  $15\%/100\text{nm}$  e il  $16\%/100\text{nm}$ , indicando una omogeneità mineralogica. Alcune aree in prossimità del pozzo mostrano invece pendenze spettrali minori, comprese tra il  $13\%/100\text{nm}$  e il  $14\%/100\text{nm}$  e sono riconducibili all'attività del pozzo.[\[20\]](#) La morfologia di Aswan è stata fortemente modificata al seguito del crollo della scogliera, che ha causato la perdita di una massa di  $10^6\text{kg}$  ed ha esposto il materiale interno più ricco di ghiaccio d'acqua.[\[18\]](#) Sulla regione Seth si osservano diverse aree attive

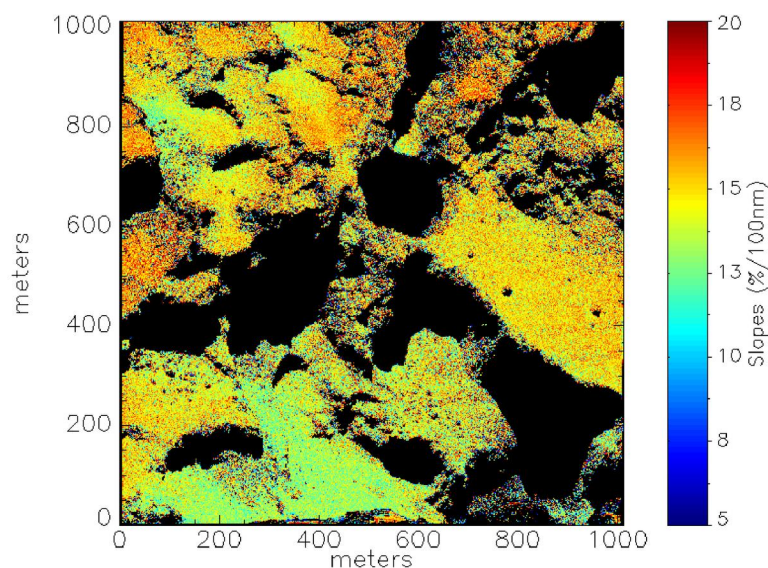


Figura 14: Mappa della pendenza spettrale della regione Seth.

sia in corrispondenza dei pozzi che sulle nicchie. L'analisi di queste aree è stata condotta con due set di immagini acquisite nei giorni 22 agosto e 20 settembre del 2014. Tra le immagini del primo e del secondo set si ha un miglioramento della risoluzione spaziale che passa da  $1.21m/px$  a  $0.52m/px$  come conseguenza della minore distanza dell'orbiter dalla cometa, mentre gli angoli di fase passano da  $34.84^\circ$  a  $62.76^\circ$ . Le pendenze spettrali delle aree attive risultano comprese in un intervallo tra  $8\%/100nm$  e  $13\%/100nm$ . In generale i pozzi risultano più blu, con pendenze spettrali comprese tra  $8\%/100nm$  e  $11\%/100nm$ , mentre le nicchie attive hanno pendenze leggermente maggiori, comprese tra  $10\%/100nm$  e  $13\%/100nm$ . Il terreno che circonda le aree attive presenta invece pendenze spettrali comprese tra  $13\%/100nm$  e  $19\%/100nm$ .<sup>[15]</sup> In un'area di Seth a confine con la regione Anubis si trovano delle nicchie di forma circolare. Queste nicchie sono state analizzate prima del passaggio al perielio, con un set di immagini acquisite il 14 novembre 2014, ad una distanza eliocentrica di 2.97 UA e dopo il passaggio al perielio, con un set di immagini acquisite il 23 luglio 2016 ad una distanza eliocentrica di 3.44 UA. Il primo set contiene immagini ottenute con 7 filtri della NAC ad un'altezza di 44.8km dalla superficie, caratterizzate da una risoluzione spaziale di  $0.84m/px$  ed angoli di fase di  $90^\circ$ . La zona presa in esame appare moderatamente rossa, con valori di pendenza spettrale di  $(16.6 \pm 1.4)\%/100nm$ . Il valore medio di pendenza spettrale trovato è inferiore rispetto a quello di  $19\%/100nm$  ottenuto analizzando le immagini della stessa zona acquisite durante la prima settimana di agosto, a causa dell'aumento dell'attività cometaria nella regione. Il secondo set contiene invece immagini ottenute con 3 filtri della NAC ad una distanza di 7.8km dalla superficie, caratterizzate da una risoluzione spaziale di  $0.15m/px$  ed angoli di fase di  $89^\circ$ . In questa seconda analisi si nota che la superficie ha una maggiore eterogeneità in termini di colore rispetto al caso precedente. Infatti, sulla zona in esame si notano alcune aree più luminose e blu, dovute ad un arricchimento locale in termini di ghiaccio. Il valore della pendenza spettrale è di  $(16.8 \pm 2.6)\%/100nm$  e quindi, nonostante le differenze di colore osservate, il valore medio aumenta di poco, mentre la dispersione aumenta significativamente di un fattore circa 2. L'aumento del valore medio della pendenza spettrale è in accordo con l'andamento dello spettro cometario in funzione della distanza eliocentrica, infatti il secondo set di immagini è stato acquisito ad una distanza maggiore rispetto al primo e ciò implica che l'attività della cometa fosse minore. L'aumento della variazione di colore superficiale, e quindi della dispersione attorno al valore medio, è dovuto alla rimozione della polvere superficiale durante il passaggio al perielio, che ha rivelato lo strato sottostante più ricco di ghiaccio.<sup>[14]</sup>

#### 4.5 Spettrofotometria di Ma'at e Hatmehit

La regione Ma'at si trova sulla testa della cometa ed è l'unica ad avere un terreno non consolidato su questo lobo. Sulla superficie di questa regione si trovano alcuni pozzi e nicchie attive. Un'analisi spettrofotometrica della regione è stata eseguita con un set di immagini acquisite il 12 settembre 2014, quando la cometa si trovava ad una distanza eliocentrica di 3.44 UA. Le immagini utilizzate sono caratterizzate da una risoluzione spaziale di  $0.55m/px$  ed angoli di fase di  $70.45^\circ$ . Questa analisi ha dimostrato che la regione ha una superficie eterogenea in termini di colore, con pendenze spettrali minori in corrispondenza delle aree attive e pendenze spettrali maggiori nelle aree circostanti. I pozzi hanno pendenze spettrali comprese tra  $8\%/100nm$  e  $11\%/100nm$ , mentre le nicchie attive hanno pendenze leggermente maggiori, comprese tra  $10\%/100nm$  e  $13\%/100nm$ . I valori di pendenza spettrale ottenuti per le aree in cui non si osserva attività cometaria hanno pendenze spettrali che arrivano fino a circa  $19\%/100nm$ . Questi valori così diversi di pendenza spettrale fanno di Ma'at una regione spettrofotometrica mista. [15]

In un'area pianeggiante di Ma'at si trova il sito che era stato designato

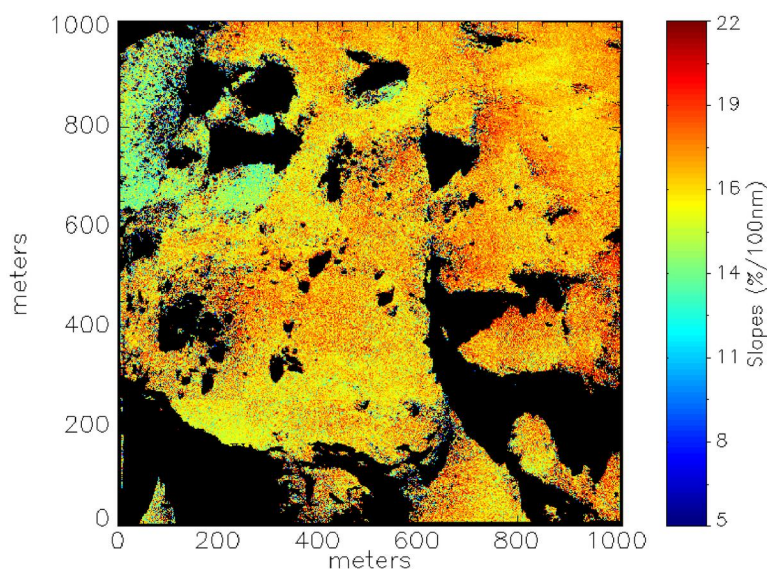


Figura 15: Mappa della pendenza spettrale della regione Ma'at.

come luogo di atterraggio del lander Philae. Questo sito, denominato Agilka, è stato analizzato con un set di immagini ottenute tra il 14 e il 20 settembre 2014 con 5 filtri della NAC. Queste immagini hanno risoluzioni spaziali comprese tra  $0.53m/px$  e  $0.57m/px$  e inoltre hanno angoli di fase che coprono un intervallo tra  $62.05^\circ$  e  $69.43^\circ$ . L'albedo geometrica di Agilka ha un valore di 0.067 e risulta quindi leggermente maggiore rispetto all'albedo media del nucleo cometario, in quanto sulla superficie di Agilka prevalgono particelle sottili, responsabili di una maggiore diffusione della luce. [10] Oltre al sito Agilka è stata analizzata anche un'ampia area circostante, che comprende una parte della regione Ma'at,



l'intera regione Hatmehit e alcune porzioni di Maftet, Nut e Bastet. La pendenza spettrale media ottenuta su questa area è di  $15.2\%/100nm$  ad  $\alpha = 64^\circ$  e denota un forte arrossamento di fase, consistente con quello del nucleo cometario. All'interno dell'area in esame si osserva una variazione del  $5\%/100nm$  della pendenza spettrale tra la zona appartenente alla regione Ma'at, che appare più blu, e la zona di confine tra Hatmehit e Bastet, che è invece la più rossa. I depositi di particelle sottili nella regione di Ma'at sono i più blu osservati, con pendenze spettrali che variano tra  $13\%/100nm$  e  $14.5\%/100nm$  da nord a sud. Gli spettri ottenuti sulle differenti tipologie di terreno non mostrano figure spettrali e ciò rende difficile l'interpretazione dal punto di vista chimico, perché tali spettri sono compatibili con quelli prodotti da molte specie chimiche differenti. Grazie a VIRTIS però è stata osservata una larga banda nell'infrarosso tra  $2.9\mu m$  e  $3.6\mu m$  su tutta la superficie presa in esame e questa potrebbe implicare la presenza di composti organici come poliaromatici solidi mescolati a solfuri e leghe metalliche di Fe-Ni. Si osserva inoltre una leggera inflessione negli spettri a circa  $535nm$ , con una profondità del 2%, che può essere interpretata come una figura di assorbimento dovuta al trasferimento di cariche dello ione  $Fe^{3+}$  presente nei silicati.[10] Il graduale arrossamento dello spettro all'interno della regione è quindi dovuto alla presenza di composti organici primitivi in corrispondenza della zona di confine tra la depressione Hatmehit e la regione Bastet. Anche in termini di albedo si riscontra una forte variazione del 15% all'interno dell'area esaminata. Si osservano poi dei massi in cui la riflettanza aumenta localmente del 2%, che potrebbero contenere ghiaccio d'acqua.[10] Appena oltre la depressione di Hatmehit, sul confine con la

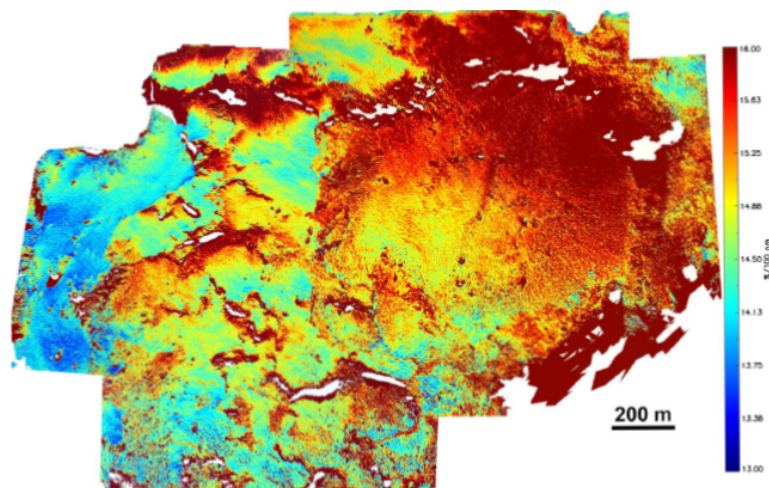


Figura 16: Mappa della pendenza spettrale nell'area che circonda il sito Agilka. Da sinistra a destra, passando dalla regione Ma'at alla regione Hatmehit si ha una variazione dal  $13\%/100nm$  che corrisponde alle zone blu, al  $18\%/100nm$  delle aree più rosse al confine con Bastet.

regione Bastet, si trova Abydos, il sito su cui si è fermato il lander Phi-

lae. La superficie di Abydos è di  $0.02\text{km}^2$  ed è occupata da un ghiaione, il quale viene alimentato dall'erosione di due fragili regioni circostanti stratificate e contenenti fratture dalle quali si distaccano i detriti. Questo sito ha un'albedo media del 5.8% alla lunghezza d'onda di  $480.7\text{nm}$  e del 7.4% a  $649.2\text{nm}$ , consistente con il valore medio ottenuto per la cometa. La pendenza spettrale media della zona è del  $13.5\%/100\text{nm}$  e la mappa di arrossamento aumenta gradualmente passando dalle zone ricoperte da materiale sottile alle ruvide zone consolidate che mostrano l'arrossamento maggiore, in accordo con i risultati ottenuti sul resto della superficie del nucleo. [19]

#### 4.6 Spettrofotometria di Imhotep, Ash e Khepry

La regione Imhotep si trova sul corpo della cometa ed ha una superficie variegata. All'interno della regione si osserva un bacino dai bordi più chiari rispetto al terreno ruvido circostante, inoltre si possono trovare delle macchie luminose isolate e delle figure circolari dall'aspetto molto scuro. La regione ha anche mostrato segni di attività in corrispondenza di alcune cavità nel terreno. La prima analisi di Imhotep è stata effettuata con un set di immagini acquisite il 5 settembre 2014 ad una distanza eliocentrica di 3.43 UA. Queste immagini sono caratterizzate da una risoluzione spaziale di  $0.76\text{m}/\text{px}$  ed angolo di fase  $\alpha = 57.76^\circ$ . L'analisi ha rivelato una eterogeneità in termini di pendenza spettrale, con valori compresi tra  $8\%/100\text{nm}$  e  $11\%/100\text{nm}$  in corrispondenza delle macchie luminose isolate e valori tra  $13\%/100\text{nm}$  e  $22\%/100\text{nm}$  nel terreno circostante. [15] In una ristretta area sulla superficie di Imhotep

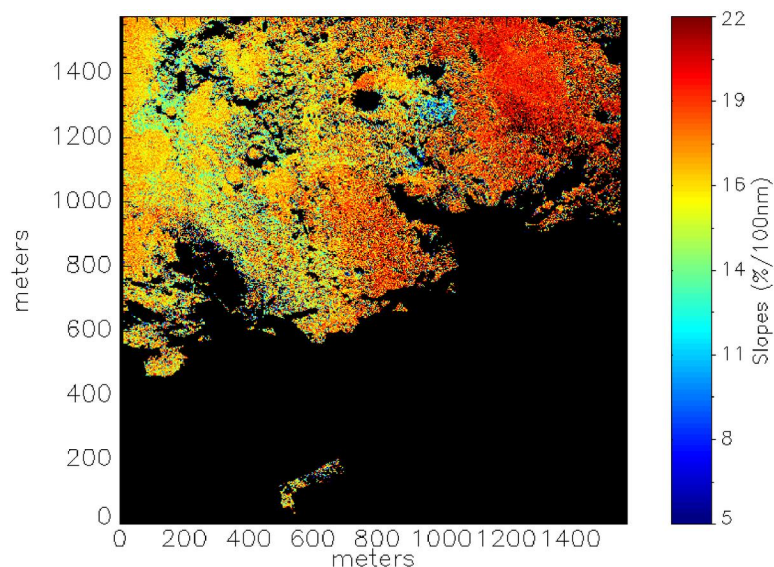


Figura 17: Mappa della pendenza spettrale della regione Imhotep.

su cui si trovano dei massi più luminosi, è stata osservata una banda di assorbimento a circa  $700\text{nm}$  che fa pensare alla presenza di minerali idrati o fillosilicati. I fillosilicati si formano quando i minerali anidri

come l'olivina e il pirosseno vengono esposti all'acqua liquida. Questo processo è comune per le condriti carbonacee, tuttavia sulla cometa non si verificano le condizioni per la formazione dei fillosilicati. Ciò fa pensare che i massi luminosi contenenti minerali idrati si siano formati nel disco primordiale che ha dato origine al Sistema Solare e che siano stati poi incorporati dalla cometa durante la sua formazione. A favorire questa ipotesi sono anche l'aspetto e la distribuzione sulla superficie di questi massi, che non sarebbero compatibili con l'erosione. Se i massi in questione hanno effettivamente un'origine esterna alla cometa allora essi possono fornire informazioni importanti sulle altre popolazioni di corpi presenti nell'ambiente in cui si sono formate le comete.<sup>[15]</sup> Il 14 febbraio 2015 Rosetta ha effettuato un fly-by ad una distanza compresa tra i 5.7km e i 6.7km dalla superficie cometaria, in corrispondenza di una zona di confine tra le regioni Imhotep e Ash. In questa occasione la NAC ha acquisito un set di immagini ad angoli di fase compresi tra 0° e 33°, con una risoluzione spaziale molto elevata di 0.11m/px. Per l'analisi spettrofotometrica sono state utilizzate 23 serie di immagini ottenute con 3 filtri e 2 serie di immagini ottenute con 11 filtri. Il valore medio della riflettanza, ricavato col filtro arancione a 649.2nm, è di  $(6.15 \pm 0.07) \times 10^{-3}$  sull'intera regione, con un incremento del 20% in corrispondenza delle zone più chiare ed una diminuzione del 10% sui massi più scuri. Nell'intervallo tra 535.7nm e 743nm la pendenza spettrale media risulta del  $(17.7 \pm 1.0)\%/100nm$ , con variazioni tra 15%/100nm e 23%/100nm ad angoli di fase di 1° e pertanto la regione osservata risulta una delle più rosse dell'intero nucleo cometario.<sup>[21]</sup> In particolare, sulla regione Ash è stata analizzata una area d'interesse su cui erano presenti alcuni massi scuri circondati da macchie più chiare. La pendenza spettrale dei massi arriva ad un massimo di 22.5%/100nm, mentre le macchie più chiare hanno pendenze spettrali di 20%/100nm, maggiori di quella del terreno circostante che è di 19%/100nm. Queste macchie hanno sia una riflettanza bassa che un effetto di opposizione ad angoli di fase piccoli poco pronunciato, pertanto si esclude che esse contengano ghiaccio d'acqua. Per risalire alla composizione del terreno di questa area sono stati realizzati alcuni modelli. Tutti i modelli di composizione contenenti ghiaccio d'acqua divergono dalle osservazioni, mentre quello che prevede un miscuglio di toline e nero di carbonio riproduce meglio le proprietà fotometriche osservate. Per spiegare la presenza delle macchie più luminose si è ipotizzato che alcuni dei massi scuri presenti su Ash si siano frantumati a seguito dello stress termico, liberando sul terreno frammenti dei minerali in essi contenuti responsabili quindi dell'aspetto più chiaro del terreno. In seguito sia i massi che le macchie più chiare sarebbero state ricoperte dalla polvere di natura organica e questo spiegherebbe l'aspetto arrossato dello spettro.<sup>[21]</sup> Sulla regione Imhotep sono state analizzate due aree contenenti terreno stratificato e materiale affiorante, che presentano entrambe uno spettro variegato, con pendenze spettrali comprese tra 15%/100nm e 21.7%/100nm. In queste

aree sono stati osservati anche alcuni massi molto scuri, che mostrano un effetto di opposizione minore ad angoli di fase piccoli e risultano quasi indistinguibili dal terreno circostante.[21] Tra il mese di agosto del 2014 ed il mese di agosto del 2015, l'arrossamento di fase della regione Imhotep è diminuito come conseguenza dell'attività cometaria, dal valore di  $0.104\%/100nm/^\circ$  fino a  $0.041\%/100nm/^\circ$ . Durante questi mesi di avvicinamento al perielio, la superficie di Imhotep ha inoltre subito numerosi cambiamenti. Su di essa ha agito intensamente il trasporto delle polveri, che ha rimosso fino a  $4m$  di polvere ed ha reso visibili sulla superficie di Imhotep due figure circolari dai diametri di  $240m$  e  $140m$  ed altezze comprese tra  $3m$  e  $7m$ , nella zona centrale interessata da un terreno liscio. Queste figure circolari hanno mostrato un grande tasso di espansione, superiore ai  $18cm/h$ . Un tasso di espansione così elevato non può essere dovuto solo alla sublimazione e viene dunque spiegato con la bassa forza di tensione superficiale del materiale, unita ai processi esotermici di cristallizzazione del ghiaccio e la destabilizzazione dei clatrati.[18] Dopo il passaggio al perielio, quando la cometa si trovava ad una distanza eliocentrica superiore alle  $2.76$  UA, l'orbiter Rosetta ha effettuato un secondo fly-by, avvicinandosi fino a  $30km$  dalla superficie cometaria, in corrispondenza della zona di transizione tra Imhotep e Khepry. Le immagini dell'area in questione sono state acquisite dalla NAC con 11 filtri, tra il 9 ed il 10 aprile 2016, ad angoli di fase compresi tra  $\alpha = 0.1^\circ$  ed  $\alpha = 10^\circ$  e con una risoluzione spaziale massima di  $0.53m/px$ . In questa zona il terreno è prevalentemente consolidato e presenta alcune nicchie e terrazzamenti. L'area che appartiene alla regione Imhotep si trova ad una elevazione minore rispetto a quella di Khepry, alla quale è collegata con pendii e scarpate, e presenta anche un terreno non consolidato, sul quale è possibile trovare alcuni depositi di detriti che vengono alimentati dalle regioni circostanti. Nell'area analizzata si ottiene uno spettro molto simile per le due regioni, con una pendenza spettrale media di  $(17.985 \pm 0.004)\%/100nm$  ad un angolo di fase  $\alpha = 0.1^\circ$ . Si osservano però alcune variazioni locali di pendenza spettrale, con zone che appaiono dal 10% all'87% più blu e zone fino al 19% più rosse. Sulla superficie sono infatti presenti alcune macchie luminose, la maggiore delle quali ha un'area di  $140m^2$ , che presentano valori di pendenza spettrale inferiori al  $10\%/100nm$  dovuti alla presenza di ghiaccio d'acqua. Si osservano poi altre figure luminose sulle scarpate ed in prossimità di strutture consolidate, con pendenze spettrali inferiori a  $14\%/100nm$ . Sono inoltre presenti dei terreni consolidati e dei diamicton dall'aspetto più rosso, che comprendono alcuni massi molto scuri con pendenze spettrali che arrivano fino al  $19.7\%/100nm$ . Tra i massi osservati ve ne sono alcuni dal comportamento fotometrico peculiare, poiché hanno pendenze spettrali simili a quelle del terreno circostante, ma hanno valori di riflettanza inferiori del 20%. In generale questa zona di transizione presenta un terreno molto scuro con una pendenza spettrale media di  $(21.6 \pm 2.9)\%/100nm$  in un intervallo tra  $535nm$  e  $743nm$

e di  $(17.8 \pm 2.2)\%/100nm$  tra  $535nm$  e  $882nm$ , ad  $\alpha = 62^\circ$ .<sup>[22]</sup> Inoltre, il valore dell'arrossamento di fase misurato sulla regione Imhotep durante questa analisi è di  $0.064\%/100nm/^\circ$ , compatibile con quello ottenuto durante il fly-by del 14 febbraio 2015, anche se si osserva una maggiore eterogeneità in termini di colore. Il modello di composizione che meglio riproduce le proprietà fotometriche osservate in questa seconda analisi prevede una miscela di carbone, toline e ghiaccio d'acqua. L'arrossamento di fase dipende dalla composizione del terreno e la sua presenza ed intensità vengono influenzati sia dalle particelle di carbone, che costituiscono l'agente scurente, sia dai composti organici come le toline. L'abbondanza del ghiaccio d'acqua, necessaria per riprodurre le macchie luminose osservate, varia invece tra l'1% ed il 5% nel caso di quelle meno luminose e può salire fino al 25% nel caso di quelle più blu.<sup>[22]</sup>

#### 4.7 Spettrofotometria di Anhur e Bes

Le regioni Anhur e Bes si trovano nell'emisfero sud della cometa ed hanno delle superfici molto più irregolari e fratturate rispetto a quelle delle altre regioni. Su di esse agiscono forti stress termici dovuti alla vicinanza della cometa al Sole nel periodo in cui vengono illuminate e pertanto queste regioni sono risultate molto attive durante il passaggio al perielio, con numerosi jets ed esplosioni. Anhur e Bes sono state osservate da OSIRIS per un periodo di tempo compreso tra marzo 2015 e luglio 2016. Tra il 27 aprile ed il 2 maggio 2015 sono state visibili due macchie rispettivamente 4 e 6 volte più luminose del terreno su cui si trovano, ciascuna estesa per circa  $1500m^2$  sulla superficie di entrambe le regioni. Lo spettro di queste macchie luminose è piatto ed ha un comportamento completamente diverso da quello del terreno circostante, compatibile con la presenza di ghiaccio d'acqua in percentuali tra il 20% ed il 32%.<sup>[23]</sup> Nell'area di Anhur in cui è stata osservata la macchia luminosa di ghiaccio d'acqua, VIRTIS aveva rivelato in precedenza la presenza di una piccola quantità di ghiaccio di  $CO_2$ , estesa su una superficie di  $4800m^2$ . Questa macchia è comparsa il 21 marzo ed è sublimata in meno di 3 settimane, perciò si ritiene che avesse uno spessore inferiore a  $5.6cm$ . Il fatto di aver osservato nella stessa area due differenti sostanze volatili implica che esse siano condensate a diverse distanze eliocentriche, formando quindi due strati separati.<sup>[23]</sup> Oltre che nelle macchie principali, il ghiaccio è stato rilevato anche nelle zone d'ombra del terreno consolidato e all'interno dell'unico pozzo attivo presente nell'emisfero sud, dal diametro di  $100m$ , situato nella regione Anhur. La più intensa esplosione osservata da Rosetta è avvenuta il 12 agosto 2015 ed ha avuto origine nella regione Anhur. Questa gigantesca esplosione ha rimosso una quantità stimata di  $1.8 \times 10^6kg$  di polvere dalla cometa ed è apparsa 1.7 volte più luminosa del nucleo cometario.<sup>[18]</sup> Sulla superficie di Anhur e Bes si osservano variazioni locali di pendenza spettrale dovute alla composizione, con valori inferiori in corrispondenza delle aree contenenti ghiaccio e valo-

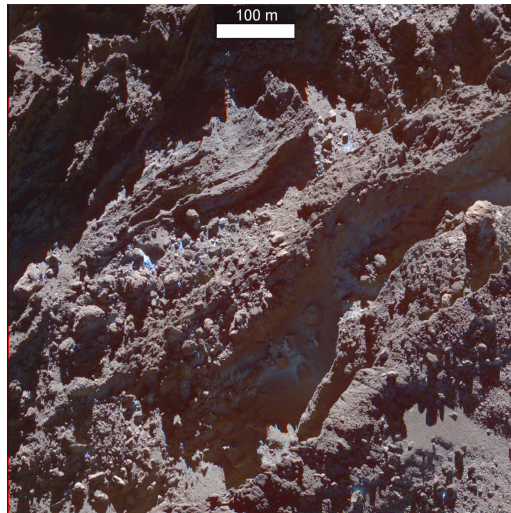


Figura 18: Dettaglio della superficie di Anhur che mostra un terreno fratturato, con molti massi, depositi di detriti e macchie contenenti ghiaccio.

ri maggiori nelle aree circostanti. Il valore della pendenza spettrale in generale diminuisce durante l'avvicinamento della cometa al Sole e poi torna ad aumentare nei mesi successivi al passaggio al perielio. Questo andamento è comune a quello dell'intero nucleo ed è legato all'attività cometaria. Confrontando le pendenze spettrali ottenute il 2 maggio 2015 ed il 27 gennaio 2016 sulle regioni, si nota un arrossamento ad angoli di fase di  $62^\circ$ , con un aumento del valore da  $14.9\%/100nm$  a  $16.4\%/100nm$ . Lo stesso andamento si verifica per le pendenze spettrali ottenute dalle osservazioni di giugno 2015 e quelle di giugno 2016 ad angoli di fase  $\alpha = 87^\circ$ , con un incremento dal  $15.9\%/100nm$  al  $17.5\%/100nm$ . [23]

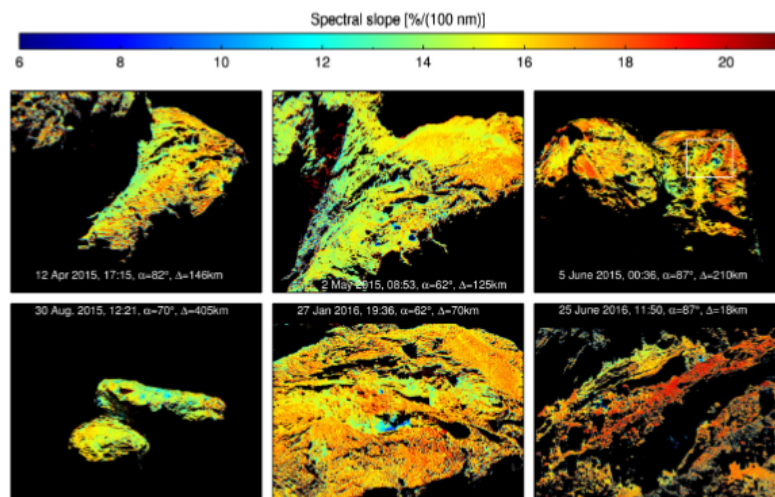


Figura 19: Mappe che mostrano l'evoluzione spettrale delle regioni Anhur e Bes.

#### 4.8 Spettrofotometria di Khonsu

La regione Khonsu si trova nell'emisfero sud della cometa ed è una delle più particolari sia in termini di geomorfologia sia in termini di spettrofotometria. La sua superficie presenta terreni molto ruvidi con numerosi massi e materiale affiorante di forma irregolare ed anche alcuni terreni lisci. Durante i mesi in cui è stata osservata, su questa regione sono avvenuti due cambiamenti degni di nota. Il primo è la comparsa di un nuovo masso dal diametro di  $50m$  ed il secondo è lo spostamento di  $140m$  di un masso dal diametro di  $30m$  già esistente. Per l'analisi spettrofotometrica di Khonsu sono state utilizzate immagini acquisite il 2 maggio 2015, quando la cometa si trovava ad una distanza eliocentrica di  $1.73$  UA ed il 10 febbraio 2016, quando invece si trovava ad una distanza eliocentrica di  $2.33$  UA, rispettivamente prima e dopo il passaggio al perielio. Il primo set contiene immagini acquisite ad un angolo di fase  $\alpha = 60.48^\circ$ , caratterizzate da una risoluzione spaziale di  $2.29m/px$ , mentre il secondo set contiene immagini con una migliore risoluzione spaziale di  $0.89m/px$ , acquisite ad un angolo di fase di  $65.20^\circ$ . La pendenza spettrale media della regione ha un valore di  $(15.5 \pm 0.4)\%/100nm$  ad  $\alpha = 60.48^\circ$  ed un valore di  $(16.5 \pm 0.4)\%/100nm$  ad  $\alpha = 65.2^\circ$ , che evidenzia un leggero arrossamento di fase. Il comportamento fotometrico osservato è dovuto alla presenza di composti organici nel terreno e la regione Khonsu può essere classificata come moderatamente rossa.[\[24\]](#) Sono state quindi selezionate 4 aree sulla superficie di questa regione e

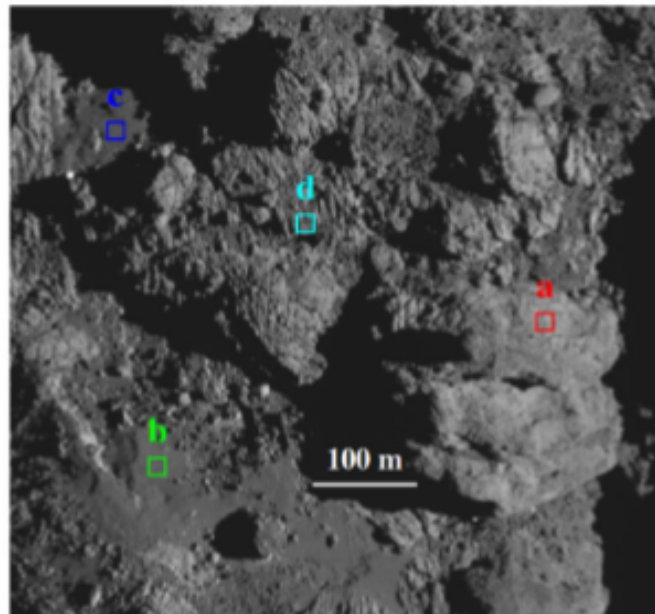


Figura 20: Dettaglio della superficie di Khonsu che mostra le 4 aree selezionate per l'analisi spettrofotometrica. Si notino i diversi terreni e la struttura a pankake.

su di esse è stata eseguita un'analisi utilizzando 11 filtri della NAC per ciascuna. La prima area comprende parte di una struttura consolidata dalla peculiare forma di pankake, la seconda e la terza area contengono entrambe un terreno liscio, ma nel primo caso esso ha un aspetto chiaro, mentre nel secondo caso è scuro ed infine la quarta area è localizzata su un terreno molto ruvido.[24] Gli spettri ottenuti sono tutti arrossati ed in particolare quello del terreno ruvido è il più rosso. Tra il primo ed il secondo set di immagini si osserva una diminuzione della pendenza spettrale, tranne che per il terreno ruvido. Questo andamento viene spiegato in termini dell'attività cometaria, che tra i due periodi presi in esame ha rimosso parte del materiale arrossato dalla superficie, esponendo gli strati sottostanti di materiale più fresco e dall'aspetto meno arrossato.[24] Nella regione Khonsu sono state osservate anche 4 macchie luminose contenenti ghiaccio d'acqua, con una pendenza spettrale dell' 11%/100nm, la cui estensione superficiale e durata temporale assumono valori differenti. La più grande osservata ha un'area di  $80m^2$  ed ha continuato ad essere visibile per un periodo di 5 mesi. Per spiegare una sopravvivenza così lunga al processo di sublimazione è necessario che le macchie vengano continuamente alimentate e ciò implica che il ghiaccio sia presente anche negli strati sottostanti, che vengono progressivamente esposti durante l'erosione. Le dimensioni delle macchie dipendono anche dalle condizioni di illuminazione, infatti esse si riducono quando sono esposte direttamente alla luce del Sole e tornano a crescere quando invece non sono illuminate.[24] [24]

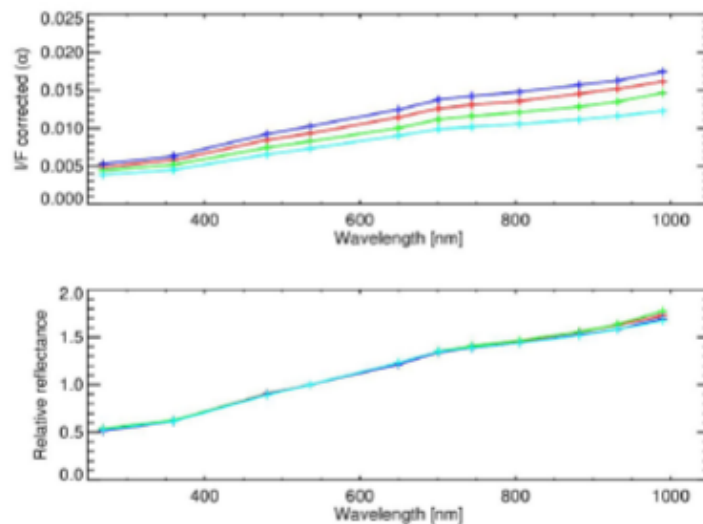


Figura 21: Riflettanza corretta per gli angoli di fase in funzione della lunghezza d'onda per le 4 aree di Khonsu (sopra) e Riflettanza relativa (sotto), ottenute dal primo set di dati.



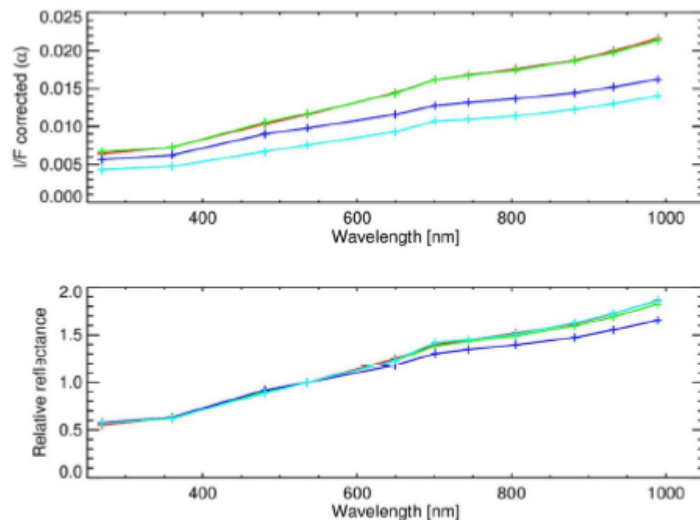


Figura 22: Riflettanza corretta per gli angoli di fase in funzione della lunghezza d'onda per le 4 aree di Khonsu (sopra) e Riflettanza relativa (sotto), ottenute dal secondo set di dati.

#### 4.9 Risultati sulla composizione chimica

Lo strumento OSIRIS ha rilevato tra luglio 2015 e gennaio 2016 alcuni granelli di polvere presenti nella chioma della cometa. Ciascuno di questi granelli è stato sottoposto ad un'analisi spettrofotometrica che ha permesso di ricavare lo spettro e indagare sulla composizione chimica. La pendenza spettrale media nell'intervallo tra  $480\text{nm}$  e  $649\text{nm}$  ha un valore di  $(12.9 \pm 0.2)\%/100\text{nm}$ , mentre nell'intervallo tra  $649\text{nm}$  e  $882\text{nm}$  assume il valore di  $(7.3 \pm 0.2)\%/100\text{nm}$ .<sup>[25]</sup> Si possono distinguere tre tipi differenti di granelli di polvere in base alla pendenza spettrale. Alla prima tipologia appartengono granelli che presentano uno spettro ripido, con una pendenza superiore al  $15\%/100\text{nm}$ . Questi granelli rappresentano il 13% del totale di quelli analizzati e sono associati alla presenza di composti organici. La seconda tipologia di granelli presenta invece uno spettro piatto, cioè con una pendenza spettrale inferiore al  $5\%/100\text{nm}$ . I granelli di questo tipo rappresentano il 10% del totale e sono associati alla presenza di ghiaccio d'acqua e materiale carbonaceo. La terza tipologia è caratterizzata da spettri di pendenza intermedia tra le prime due. Questi granelli rappresentano il 77% del totale e sono dovuti alla presenza di una miscela di silicati e composti organici. Comparando gli spettri dei granelli di polvere con quelli dei terreni del nucleo cometario, si è capito che i granelli con uno spettro ripido provengono dalle regioni con terreno liscio, mentre quelli con spettro piatto vengono prodotti dalle macchie luminose.<sup>[25]</sup> Lo strumento VIRTIS ha invece permesso di identificare in modo non ambiguo 5 differenti molecole nella chioma cometaria nel periodo del passaggio al perielio. Le molecole identificate sono  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $^{13}\text{CO}_2$ ,  $\text{OCS}$  e  $\text{CH}_4$ . Il rapporto tra i due isotopi di carbonio

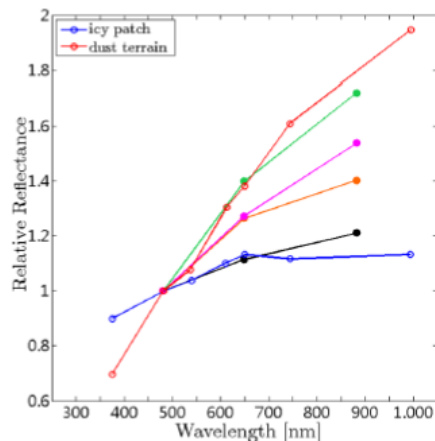


Figura 23: Spettri dei granelli di polvere confrontati con quelli dei terreni. In verde è rappresentata la prima tipologia, che ha un comportamento simile a quella dei terreni lisci, rappresentata in rosso. In nero è rappresentata la seconda tipologia, che si avvicina al comportamento delle macchie luminose rappresentate in blu. La terza tipologia è rappresentata dai due spettri intermedi rosa ed arancione, che cambiano a seconda delle percentuali di composti organici e silicati.

che meglio interpola le osservazioni prevede un valore di  $\text{CO}_2/^{13}\text{CO}_2$  pari a 89.[26] Nella prima settimana dopo il passaggio al perielio si osserva un aumento delle emissioni di  $\text{H}_2\text{O}$ . In contemporanea si verifica però anche un incremento delle abbondanze relative delle altre molecole rispetto all'acqua. Questo incremento è dovuto al fatto che, al momento del passaggio al perielio l'attività cometaria interessa l'emisfero sud, le cui regioni non sono ricoperte dalla polvere e danno quindi un'idea migliore del materiale cometario incontaminato.[26] Le abbondanze relative determinate dalle emissioni delle regioni dell'emisfero sud permettono quindi di ridurre le stime fatte sull'abbondanza d'acqua nel nucleo cometario a favore delle altre sostanze chimiche. In particolare per il diossido di carbonio si passa da un rapporto  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O} = 0.14$  ad un rapporto  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O} = 0.32$  e questo permette di fare una correzione alle stime di abbondanza di  $\text{CO}_2$  presente nel nucleo cometario.[26] La bassa albedo della cometa è dovuta invece alla presenza di composti carbonacei poliaromatici refrattari scuri mescolati con minerali opachi. L'analisi di alcuni granelli di polvere suggerisce che i minerali opachi contengano leghe di Fe-Ni e solfuri di FeS. La componente refrattaria scura consiste invece in un miscuglio complesso di specie chimiche semi-volatili che non sublimano a temperature inferiori ai 220K e sono responsabili di una ampia banda di assorbimento a  $3.2\mu\text{m}$ . Diverse molecole e specie ioniche possono essere responsabili dell'assorbimento osservato. Pertanto sono stati eseguiti degli esperimenti in laboratorio con composti che simulano i ghiacci interstellari ed alcuni dei residui fotolitici e termici

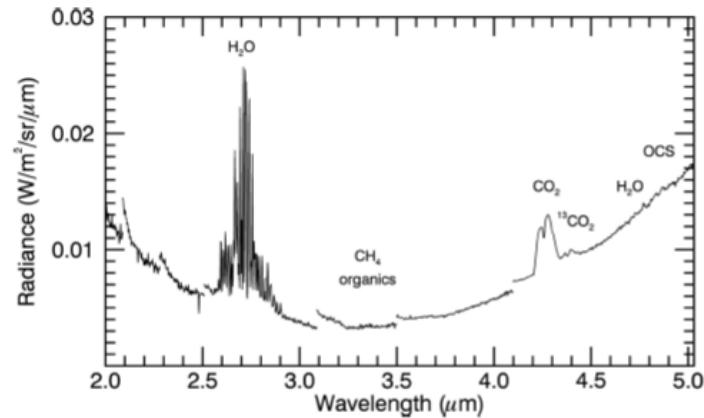


Figura 24: Grafico della radianza in funzione della lunghezza d'onda che mostra la banda di assorbimento a  $3.2\mu\text{m}$  ed i contributi dei composti chimici rilevati nella chioma cometaria.

prodotti sembrano interpolare bene quanto osservato.<sup>[27]</sup> Il contributo maggiore viene dato dal gruppo carbossilico COOH presente negli acidi carbossilici, dagli alifatici quali CH<sub>2</sub> e CH<sub>3</sub> e dagli aromatici CH. Anche gli alcoli possono contribuire se presenti in piccola quantità, mentre i silicati che contengano lo stesso gruppo OH degli alcoli non sembrano essere in accordo con quanto osservato, perché producono una banda di assorbimento a lunghezze d'onda minori. Per quanto riguarda i composti contenenti azoto, il gruppo imminico NH ed il gruppo amminico NH<sub>2</sub> sembrano dare un contributo poco importante, mentre il catione ammonio NH<sub>4</sub><sup>+</sup> presente in diversi sali di ammonio contribuisce maggiormente, in quanto produce una banda di assorbimento tra  $2.94\mu\text{m}$  e  $3.34\mu\text{m}$  con dei picchi a  $3.17\mu\text{m}$  e  $3.26\mu\text{m}$ .<sup>[27]</sup> Le osservazioni rivelano poi un contributo significativo da parte del ghiaccio d'acqua soprattutto in corrispondenza del collo cometario. Non si osservano invece bande di assorbimento centrate sui  $0.7\mu\text{m}$  associate alla presenza di silicati idrati e di fillosilicati e questo permette di dire che non c'è una connessione genetica tra le comete e le condriti.<sup>[27]</sup> Una recente pubblicazione ha rivelato degli importanti risultati ottenuti per quanto riguarda i sali di ammonio. Sono infatti stati condotti nuovi esperimenti in laboratorio simulando le condizioni cometarie, con temperature tra i 170K ed i 200K ed una pressione inferiore ai  $10^{-5}\text{mbar}$ , utilizzando un miscuglio di composti contenenti il gruppo carbossilico e lo ione ammonio in una matrice porosa di granelli minerali opachi. La simulazione ha rivelato che la banda di assorbimento a  $3.2\mu\text{m}$  è consistente con la presenza di sali d'ammonio come il formiato di ammonio, il solfato di ammonio ed il citrato di ammonio.<sup>[28]</sup> Si ritiene che questi sali possano essere stati sintetizzati sulla superficie della cometa attraverso reazioni acido-base dell'ammoniaca con le corrispondenti molecole acide nei ghiacci solidi. Questo tipo di reazioni possono avvenire anche nel mezzo interstellare, nel disco proto-planetario o durante la sublimazione del ghiaccio del

nucleo cometario. La profondità della banda di assorbimento suggerisce che la superficie cometaria possa contenere una percentuale massima del 40% di sali di ammonio, anche se non si conosce con esattezza questa abbondanza. Tuttavia, se il peso percentuale è superiore al 5%, allora i sali di ammonio rappresentano la riserva principale di azoto nella cometa, con percentuali maggiori di quelle presenti nei composti organici refrattari e nelle specie volatili  $\text{NH}_3$  ed  $\text{N}_2$ . Si trova quindi che l'abbondanza di azoto della cometa è molto più simile a quella del Sole di quanto precedentemente ipotizzato. Inoltre, la presenza dei sali di ammonio spiegherebbe bene anche l'aumento di emissioni di  $\text{NH}_3$  ed  $\text{HCN}$  che si verifica durante il passaggio al perielio, che sarebbe quindi dovuto alla dissociazione termica degli stessi. Si può dunque affermare che esiste un legame tra la composizione chimica delle comete, degli asteroidi e della nebulosa proto-solare. [28]

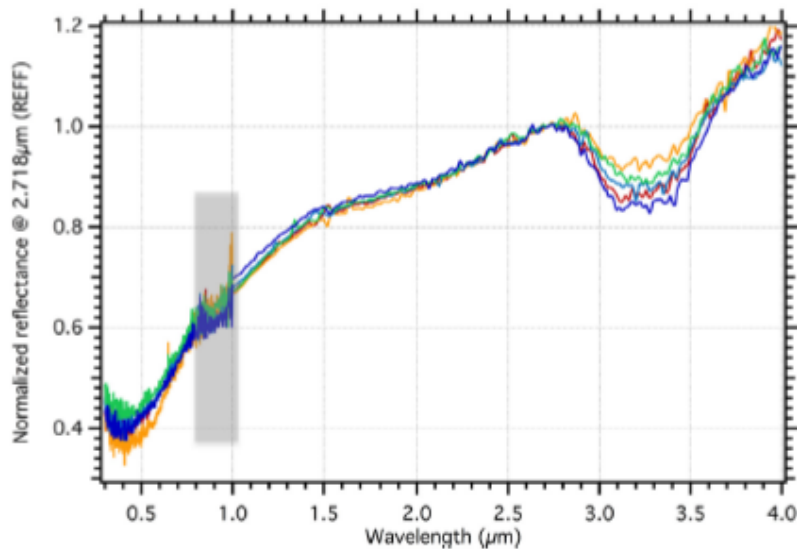


Figura 25: Spettro ottenuto da VIRTIS in 4 zone del nucleo cometario. Quello rosso corrisponde alla testa, quello blu al collo, quello giallo al corpo e quello verde alla base del corpo. E' possibile vedere la banda di assorbimento centrata a  $3.2\mu\text{m}$ . Il rettangolo grigio racchiude un'artefatto strumentale dovuto alla congiunzione tra gli spettri ottenuti col canale del visibile e col canale dell'infrarosso.

## CONCLUSIONI

---

### 5 CONCLUSIONI

Lo scopo di questo lavoro era quello di effettuare una review dei risultati ottenuti dalla missione spaziale Rosetta nell'ambito della spettrofotometria e della composizione superficiale del nucleo della cometa Churyumov-Gerasimenko. Durante i due anni in cui la sonda ha accompagnato la cometa lungo la sua orbita attorno al Sole, OSIRIS e VIRTIS hanno raccolto una quantità notevole di dati. La superficie del nucleo è stata suddivisa in 26 regioni morfologiche, caratterizzate da differenti tipologie di terreno, con particolari strutture, lineamenti ed unità geologiche. In generale si osserva una dicotomia tra i due emisferi cometari, in quanto l'emisfero nord presenta numerose regioni ricoperte da uno strato più o meno spesso di materiale sottile, mentre nell'emisfero sud la polvere è quasi del tutto assente. Si è capito che questa dicotomia è legata agli effetti stagionali indotti dai parametri di inclinazione orbitale e assiale della cometa. Infatti, quando la cometa si avvicina al perielio l'attività cometaria è più intensa, ma in questo periodo risulta illuminato soltanto l'emisfero sud e ciò implica un tasso di erosione 4 volte maggiore rispetto all'altro emisfero, con la conseguente rimozione degli strati di polvere e la sublimazione delle sostanze volatili presenti nel terreno. Inoltre si verifica un trasferimento della massa da sud a nord per mezzo del trasporto delle polveri, un fenomeno che causa una redistribuzione delle particelle sottili prodotte dall'attività cometaria nell'emisfero sud, sulla superficie dell'altro emisfero. Proprio grazie all'assenza di terreni ricoperti di polvere, le regioni dell'emisfero sud danno un'idea migliore della composizione primordiale del nucleo. Infatti, le emissioni prodotte da questo emisfero aumentano le abbondanze relative delle sostanze chimiche osservate nella chioma cometaria durante il periodo di massima attività. Sulla superficie della cometa sono stati osservati numerosi fenomeni legati alla sublimazione delle sostanze volatili, come jets ed esplosioni, i più importanti dei quali si sono verificati nei mesi di massimo avvicinamento al perielio. L'attività cometaria ha influenzato anche lo spettro della cometa, la cui pendenza è progressivamente diminuita durante i mesi di avvicinamento al perielio ed ha poi ripreso a crescere in fase di allontanamento dal Sole, ad una distanza eliocentrica superiore alle 2 UA, fino a quando lo spettro ha assunto il valore di arrossamento inizialmente osservato a grandi distanze eliocentriche. Queste variazioni periodiche sono dovute alla rimozione delle polveri dalla superficie, caratterizzate da uno spettro più rosso a causa dei composti organici in esse presenti e dal conseguente affioramento del materiale fresco sottostante, che contiene ghiaccio ed ha uno spettro meno arrossato. Oltre alle

variazioni di pendenza spettrale periodiche, l'attività cometaria induce variazioni superficiali dello spettro, che appare più blu in corrispondenza del collo cometario, in cui si registra una maggiore attività e più rosso sulle superfici esterne dei due lobi, che sono meno attive. All'interno delle varie regioni si osserva una eterogeneità in termini di colore, dovuta sia alla tessitura del terreno sia alla sua composizione. Le superfici su cui si trovano depositi di particelle sottili hanno un aspetto più blu rispetto alle aree interessate dai ruvidi terreni consolidati ed in genere si ha una diminuzione della pendenza spettrale tra diamitcon, depositi dovuti all'accumulo gravitazionale e ghiaioni. Alcuni dei massi osservati sono molto scuri, mentre altri appaiono più luminosi e chiari. Ciò è dovuto alla differente composizione chimica, con una maggiore presenza di composti organici e minerali opachi nel primo caso e la presenza di ghiaccio d'acqua nel secondo caso. Allo stesso modo si spiegano le eterogeneità osservate nei terreni, in cui è possibile distinguere aree più scure ed aree più chiare. In particolare, sulla superficie della cometa sono state individuate 56 macchie luminose dovute alla presenza di ghiaccio d'acqua ed 1 macchia luminosa dovuta alla presenza di ghiaccio di CO<sub>2</sub>, osservata nella regione Anhur prima del passaggio al perielio, nella stessa area successivamente occupata da una macchia di ghiaccio d'acqua. Il lavoro di revisione ha permesso di capire per quali regioni è stata eseguita un'analisi spettrofotometrica. Infatti, finora sono state analizzate solo alcune delle 26 regioni totali del nucleo cometario. In particolare, le regioni di cui siano disponibili risultati per questo tipo di analisi sono Hapi, Seth, Ma'at, Hatmehit, Ash, Imhotep, Khepry, Anhur, Bes e Khonsu. Anhur e Bes sono state analizzate assieme, mentre Ash e Khepry sono state analizzate entrambe localmente, nella zona di transizione con Imhotep. La regione Hatmehit è stata studiata durante l'analisi di un'area estesa attorno al sito Agilka, durante la quale sono state coinvolte parzialmente anche alcune aree appartenenti a Maftet, Nut e Bastet. Le regioni Hapi, Seth e Khonsu sono state analizzate singolarmente, ed anche per Ma'at ed Imhotep sono state condotte analisi specifiche. Di seguito è riportata una tabella che visualizza quanto appena detto.

Regione	Analisi	S[%/100nm]	$\alpha$ [°]	Tipologia
Aten	no			
Aker	no			
Khepry	locale	$21.6 \pm 2.9$	62	Rossa
Babi	no			
Apis	no			
Seth	sì	$16.6 \pm 1.4$	90	mod. rossa
	sì	$16.8 \pm 2.6$	89	mod. rossa
	locale	$8 < S < 19$	34.84	mista
	Aswan	$15 \pm 1$	70	mod. rossa
Atum	no			

Ash Anubis	locale no	$19 < S < 22.5$	1	Rossa
Imhotep	sì locale	$17.7 \pm 1$ $8 < S < 21.7$	1 57.76	mod. rossa mista
Anhur e Bes	sì sì	$14.9 < S < 16.4$ $15.9 < S < 17.5$	62 87	mod. rosse mod. rosse
Geb	no			
Khonsu	sì sì	15.5 16.5	60.48 65.2	mod. rossa mod. rossa
Hapi	sì locale	$11 < S < 14$ $8 < S < 11$	50 34.84	Blu Blu
Sobek	no			
Hatmehit	sì Abydos	$14.5 < S < 18$ 13.5	64 90	mod. rossa Blu
Nut	parziale			
Maftet	parziale			
Bastet	parziale			
Hathor	no			
Anuket	no			
Ma'at	sì locale	$15.2 \pm 2$ $8 < S < 19$	64 70.45	mod. rossa mista
Serqet	no			
Neith	no			
Wosret	no			

Tabella 1: In questa tabella sono riportate tutte le regioni del nucleo cometario. Le regioni in cui è stata condotta un'analisi sono accompagnate dalla dicitura "sì", quelle che non sono state analizzate sono invece accompagnate dalla dicitura "no". Con la dicitura " locale " si intende l'analisi condotta su aree ristrette della superficie della regione, mentre con la dicitura "parziale" si intende che la regione è stata coinvolta in parte durante l'analisi del sito Agilka. Per le regioni di cui siano disponibili dei risultati sono indicati i valori di pendenza spettrale trovati, gli angoli di fase a cui si riferiscono e la tipologia di regione spettrale di appartenenza, Rossa, moderatamente rossa, Blu o mista.

La tabella permette di avere un'idea delle regioni che finora sono state analizzate e di quelle su cui non è stata ancora condotta alcuna analisi spettrofotometrica. Le regioni inesplorate da questo punto di vista sono ancora numerose, perciò sarebbe davvero interessante studiare anche quelle che mancano per completare il lavoro fino a qui svolto.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] H. Rickman et al. *Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko: Constraints on its origin from OSIRIS observations* In: *Astronomy and Astrophysics* 583,(Nov.2015), A44, 8 pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201526093
- [2] L. Giacomini et al. *Geologic mapping of the Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko's Northern hemisphere* In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 462,(Nov.2016), S352–S367. DOI: 10.1093/mnras/stw2848
- [3] M. Pätzold et al. *The Nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko - Part I: The global view - nucleus mass, mass-loss, porosity, and implications* In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 483, (Feb. 2019), Is.2, p.2337-234. DOI: 10.1093/mnras/sty3171
- [4] L. Jorda et al. *The global shape, density and rotation of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from preperihelion Rosetta/OSIRIS observations* In: *Icarus* 277, (Oct.2016), p. 257-278. DOI: 10.1016/j.icarus.2016.05.002
- [5] H. U. Keller et al. *Insolation, erosion, and morphology of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko* In: *Astronomy and Astrophysics* 583, (Nov.2015), A34, 16 pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201525964
- [6] M. R. El-Maarry et al. *Regional surface morphology of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from Rosetta/OSIRIS images: The southern hemisphere* In: *Astronomy and Astrophysics* 593, A110 (Sep. 2016), 20 pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201628634
- [7] 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), 28 pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201525723.
- [8] C. Tubiana et al. *Scientific assessment of the quality of OSIRIS images* In: *Astronomy and Astrophysics* 583, A46 (Nov. 2015), 9 pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201525985
- [9] S. Fornasier et al. *Spectrophotometric properties of the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from the OSIRIS instrument onboard the ROSETTA spacecraft* In: *Astronomy and Astrophysics* 583, A36 (Nov. 2015), 18 pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201525901
- [10] 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), 18.pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201525983



- [11] D. Perna et al. *Multivariate statistical analysis of OSIRIS/Rosetta spectrophotometric data of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko* In: *Astronomy and Astrophysics* 600, A115 (Apr. 2017), 9pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201630015
- [12] S. Ferrari et al. *The big lobe of 67P/Churyumov-Gerasimenko comet: morphological and spectrophotometric evidences of layering as from OSIRIS data* In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 479, Is.2, (Sep. 2018), p.1555-1568. DOI: 10.1093/mnras/sty1656
- [13] G. Tognon et al. *Spectrophotometric variegation of the layering in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko as seen by OSIRIS* In: *Astronomy and Astrophysics* 630, A16 (Oct. 2019), 12pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201834884
- [14] A. Lucchetti et al. *Geomorphological and spectrophotometric analysis of Seth's circular niches on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko using OSIRIS images* In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 469, Is.2, (June 2017), S238-S251. DOI: 10.1093/mnras/stx1590
- [15] N. Oklay et al. *Variegation of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko in regions showing activity* In: *Astronomy and Astrophysics* 586, A80, (Feb. 2016), 18pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201527369
- [16] S. Fornasier et al. *Linking surface morphology, composition, and activity on the nucleus of 67P/Churyumov-Gerasimenko* In: *Astronomy and Astrophysics* 630, A7, (Oct. 2019), 26pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201833803
- [17] J. D. P. Deshapriya et al. *Exposed bright features on the comet 67P/Churyumov-Gerasimenko: distribution and evolution* In: *Astronomy and Astrophysics* 613, A36, (May 2018), 14pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201732112
- [18] S. Fornasier et al. *Surface evolution of the Anhur region on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from high-resolution OSIRIS images* In: *Astronomy and Astrophysics* 630, A13, (Oct. 2019), 18pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201834824
- [19] A. Lucchetti et al. *Characterization of the Abydos region through OSIRIS high-resolution images in support of CIVA measurements* In: *Astronomy and Astrophysics* 585, L1, (Jan. 2016), 5pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201527330
- [20] M. Pajola et al. *Aswan site on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko: Morphology, boulder evolution, and spectrophotometry* In: *Astronomy and Astrophysics* 592, A69, (Jun. 2016), 17pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201527865

- [21] C. Feller et al. *Decimetre-scaled spectrophotometric properties of the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from OSIRIS observations* In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 462, Is.1, (Nov.2016), 19pp. DOI: 10.1093/mnras/stw2511
- [22] C. Feller et al. *Rosetta/OSIRIS observations of 67P's nucleus during the April 2016 flyby: high-resolution spectrophotometry* In: *Astronomy and Astrophysics* 630, A9, (Oct. 2019), 20pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201833807
- [23] S. Fornasier et al. *The highly active Anhur-Bes regions in the 67P/Churyumov-Gerasimenko comet: results from OSIRIS/ROSETTA observations* In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 469, Is. 2, (July 2017), S93-S107. DOI: 10.1093/mnras/stx1275
- [24] J. D. P. Deshapriya et al. *Spectrophotometry of the Khonsu region on the comet 67P/Churyumov-Gerasimenko using OSIRIS instrument images* In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 462, Is. 1, (Nov. 2016), S274-S286. DOI: 10.1093/mnras/stw2530
- [25] E. Frattin et al. *Post-perihelion photometry of dust grains in the coma of 67P Churyumov-Gerasimenko* In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 469, Is. 2, (July 2017), S195-S203. DOI: 10.1093/mnras/stx1395
- [26] D. Bockelee-Morvan et al. *Evolution of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and OCS abundances relative to H<sub>2</sub>O in the coma of comet 67P around perihelion from Rosetta/VIRTIS-H observations* In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 462, Is. 1, (Nov. 2016), S170-S183. DOI: 10.1093/mnras/stw2428
- [27] 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: *Icarus* 272, (July 2016), p. 32-47. DOI: 10.1016/j.icarus.2016.02.028
- [28] O. Poch et al. *Ammonium salts are a reservoir of nitrogen on a cometary nucleus and possibly on some asteroids* In: *Science* 367, Is. 6483, (March 2020), p.eaaw7462. DOI: 10.1126/science.aaw7462