

Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Astronomia

TESI DI LAUREA

**RISULTATI PRINCIPALI DELLA MISSIONE
ROSETTA**

Relatore: Prof. MONICA LAZZARIN
Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Padova

Laureando: MARCO COLLARI, matricola 440519

ANNO ACCADEMICO 2016-2017

a Enzo...

Indice

Introduzione	1
1. Le missioni spaziali ai corpi minori e Rosetta	3
1.1. Storia delle missioni ai corpi minori.....	3
1.2. Rosetta	5
1.2.1. Cronistoria della missione Rosetta.....	6
1.2.2. La strumentazione di Rosetta.....	7
1.3. La cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko	9
1.4. Gli asteroidi Steins e Lutetia.....	13
2. I Principali risultati ottenuti	15
2.1. Giada.....	15
2.2. Virtis	16
2.3. Osiris.....	19
2.4. Rosina	22
2.5. Midas	25
2.6. Miro	26
2.7. Consert.....	28
2.8. Alice.....	29
2.9. Rpc	30
2.10. Cosima	32
3. Philae	37
3.1. Il primo lander	37
3.2. La strumentazione di bordo	40
3.3. I risultati principali	42
4. Conclusioni	47
4.1. Il 30 settembre 2016	47
4.2. Le missioni future	49
4.2.1. A.R.M.	49
4.2.2. A.I.M.	50
4.3. Conclusioni finali	51
Elenco figure	53
Riferimenti bibliografici	55



Fig.1 Orbiter Rosetta

INTRODUZIONE

Questo lavoro di tesi ha lo scopo di riassumere l'esperienza della missione Rosetta, sviluppata dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) in collaborazione con la NASA.

L'obiettivo di questa missione spaziale era di intraprendere un'inedita esplorazione cometaria: scortare una cometa da distanza ravvicinata, lungo la sua traiettoria orbitale, allo scopo di studiarne l'evoluzione al passaggio del perielio; inoltre era previsto l'atterraggio sulla superficie del nucleo della cometa per mezzo di un lander (Philae), in modo da eseguire analisi in situ.

Fissato il lancio per il 12 Gennaio 2003 con obiettivo la cometa 46P/Wirtanen, da raggiungere nel 2011, i ripetuti rinvii nel lancio del vettore Ariane 5 modificarono la data di lancio al 2 Marzo 2004: la scelta della cometa ricadde così nella 67P/Churyumov-Gerasimenko.

Nel lungo viaggio durato più di dodici anni, la sonda Rosetta (Fig.1) ha eseguito due voli ravvicinati ad altrettanti asteroidi della fascia principale di noto interesse per la comunità scientifica: Steins e Lutetia, prima di giungere alla sua destinazione finale, la cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, incontrata nell'agosto 2014 e scortata nel suo viaggio attorno al Sole per circa due anni, fino al Settembre 2016 quando la sonda fu fatta scendere sulla cometa.

CAPITOLO 1

LE MISSIONI SPAZIALI AI CORPI MINORI E ROSETTA

1.1 LA STORIA DELLE MISSIONI AI CORPI MINORI

Il nostro minuscolo angolo di universo, il sistema solare, è la casa di una stella, otto pianeti e dozzine di satelliti planetari. Contiene anche innumerevoli asteroidi e comete, resti di quel luogo cosmico dove si formarono e accrebbero i pianeti e le loro lune; da un punto di vista storico, le comete sono tra gli oggetti celesti che più hanno attratto l'interesse e la curiosità dell'uomo, anche solo per l'effetto spettacolare che la chioma, una diffusa nube di polvere e gas che circonda il nucleo solido, genera sulla volta celeste, seguita da una coda che si estende per milioni di km.

Dagli inizi degli anni '80 le missioni spaziali alle comete sono divenute di interesse internazionale, anche per l'atteso arrivo della cometa di Halley: più di 30 anni fa la missione Giotto (Fig.2) aprì la finestra dei misteri sulle comete, oggi con la missione Rosetta abbiamo risolto molte questioni, ma come era prevedibile sono sorti altri interrogativi per i quali si cerca ancora risposta. Riportiamo un breve riepilogo delle missioni pianificate ai corpi minori che hanno preceduto Rosetta:

ICE: lanciata il 12/08/1978 dalla NASA, fece il primo incontro di sempre con una cometa, avvicinando la Giacobini-Zinner nel Settembre 1985 da una distanza di circa 7860 km; l'anno seguente raggiunse la coda della cometa Halley, a circa 30 milioni di km dal suo nucleo.

VEGA1-2: lanciate a pochi giorni di distanza nel Dicembre 1984, queste due sonde russe scattarono alcune fotografie alla cometa di Halley: passarono a circa 8000 km di distanza dal nucleo.

SAKIGAKE-SUISEI: lanciate tra Gennaio e Agosto 1985, furono le prime sonde giapponesi ad inoltrarsi nello spazio profondo. Le sonde gemelle osservarono l'interazione del vento solare con la cometa di Halley, avvicinandosi a circa 150000 km dal nucleo.

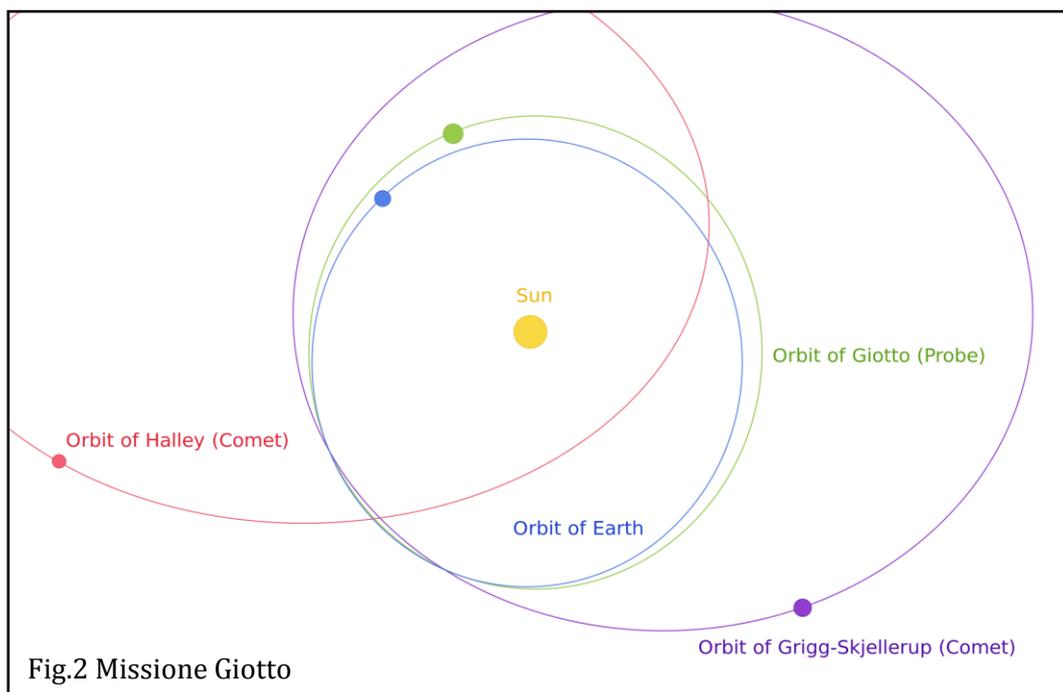
GIOTTO: prima missione europea nello spazio profondo, venne lanciata il 2 Luglio 1985 verso la cometa di Halley. Il suo volo ravvicinato fu il più vicino di sempre ad una cometa, inferiore ai 600 km, permettendo di riprendere immagini uniche, che evidenziarono regioni molto attive: fu la prima navetta a visitare due comete, quando il 12 Luglio 1992 passò a circa 200 km dalla cometa Grigg-Skjellerup.

DEEP SPACE 1: lanciata il 24/10/1998, venne battezzata come l'inizio del programma NASA del nuovo millennio. Con ben 12 nuove tecnologie da testare, nel Luglio del '99 arrivò a soli 26 km dall'asteroide Braille, stabilendone con ottima approssimazione le dimensioni.

STARDUST: lanciata il 07/02/1999, questa missione NASA viaggiò attraverso la nuvola di ghiaccio e polvere che circondava il nucleo della cometa WILD 2, passando a 240 km di distanza dal nucleo nel Gennaio 2004 dove raccolse particelle di polvere che riportò a Terra nel 2006.

CONTOUR: lanciata il 03/07/2002, questa sfortunata missione NASA incontrò diversi problemi; la perdita nel controllo della comunicazione nell'Agosto del 2002 ne dichiarò il fallimento.

DEEP IMPACT: lanciata il 12/01/2005 dalla NASA, questa missione aveva due obiettivi: eseguire un volo ravvicinato della cometa Tempel 1 per registrare dati ed immagini, inoltre, colpire con un proiettile la superficie del nucleo per consentire un'analisi elementale dello stesso e del sottosuolo.



Le principali finalità della comunità scientifica nelle missioni alle comete riguardano temi come la caratterizzazione del nucleo: la conoscenza della struttura interna e della superficie del nucleo; anche i processi di attività cometaria e di interazione tra nucleo e parte interna della chioma sono informazioni, che associate alla determinazione delle componenti chimiche presenti, possono aiutare a comprendere l'origine delle comete e quindi, l'evoluzione del Sistema Solare.

1.2 ROSETTA

Nel 1985 il Solar System Working Group di ESA, nell'ambito del programma HORIZON 2000, propose una missione con lo scopo di campionare il materiale proveniente da una cometa.

Le comete sono piccoli oggetti celesti costituiti da un nucleo composto di ghiaccio, polvere e parti rocciose: ad ogni avvicinamento al perielio mostrano una chioma e una coda ben visibili da Terra come risultato della luce riflessa da trilioni di particelle di polvere che si disperdono nello spazio.

Dopo aver considerato di inseguire il nucleo di una cometa per raccoglierne dei frammenti e riportarli a Terra, nel 1993 esigenze di bilancio portarono a riprogettare un nuovo concetto di missione su di una cometa: l'obiettivo era di affiancare e accompagnare il corpo allo scopo di raccogliere e analizzare il materiale incontaminato espulso, e far atterrare sulla superficie del nucleo un lander con esperimenti scientifici a bordo.

Durante questa odissea di 6.4 miliardi di km attraverso il Sistema Solare, Rosetta ha compiuto 5 rivoluzioni attorno al Sole aumentando la sua velocità con tre manovre assistite di effetto gravitazionale: due sulla Terra e una su Marte, per poi posizionarsi definitivamente su di un'orbita con destinazione la 67P/C-G.

Lo scopo di Rosetta era di affiancarsi all'andatura della cometa, a circa 55.000 km/h, e di viaggiare con lei ad una velocità relativa tra 1 e 2 m/s, come in una passeggiata.

Da Luglio 2014 la navigazione ottica ha permesso di determinare la distanza di separazione tra Rosetta e la cometa, con un'incertezza di 50 km; da una coppia di stazioni a Terra, ampiamente separate, sono state eseguite misure per determinare la posizione di Rosetta entro un intervallo di 20 km a più di 400 milioni di km di distanza.

Con le immagini a disposizione e riferendosi allo spostamento Doppler durante l'avvicinamento, il gruppo del volo dinamico ha sviluppato un modello sul potenziale gravitazionale, la forma e il moto rotazionale del corpo; nella fase di approccio, con Rosetta a circa 30 km dalla superficie, l'accensione dei razzi propulsori e la debole gravità della cometa hanno contribuito a portare la navetta in orbita attorno alla cometa.

Il 14/02/15 Rosetta si è spinta fino a circa 6 km di distanza dalla 67P/C-G, qui la fotocamera Osiris ha filmato l'ombra dell'orbiter al suo passaggio ravvicinato sopra la superficie: il più grande avvicinamento di sempre tra una cometa e un orbiter.

1.2.1 CRONISTORIA DELLA MISSIONE ROSETTA

Evento	Data
Lancio	2 Marzo 2004
Primo Volo Ravvicinato alla Terra	4 Marzo 2005
Volo Ravvicinato a Marte	25 Febbraio 2007
Secondo Volo Ravvicinato alla Terra	13 Novembre 2007
Volo Ravvicinato Asteroide Steins	5 Settembre 2008
Terzo Volo Ravvicinato alla Terra	13 Novembre 2009
Volo Ravvicinato Asteroide Lutetia	10 Luglio 2010
Inizio fase di ibernazione	8 Giugno 2011
Fine fase di ibernazione	20 Gennaio 2014
Inizio Manovre di Avvicinamento	7 Maggio 2014
Arrivo alla 67P/C-G	6 Agosto 2014
Inizio Mappatura Cometa	10 Settembre 2014
Atterraggio Lander Philae	12 Novembre 2014
Passaggio al Perielio	13 Agosto 2015
Termine della missione	30 Settembre 2016

Tabella 1 - Riepilogo eventi salienti della missione

1.2.2 LA STRUMENTAZIONE DI ROSETTA

Durante la prolungata spedizione interplanetaria, tutti i dati scientifici raccolti dalla strumentazione di bordo sono stati spediti a Terra tramite un collegamento radio: per lo scopo era stata costruita una nuova antenna parabolica per lo spazio profondo a Perth nell'Australia Occidentale. Con questo mezzo, l'energia del segnale radio veniva concentrata in un strettissimo fascio in grado di raggiungere distanze maggiori ai 1000 milioni di km (> 6 U.A.): i segnali sono stati ricevuti e trasmessi rispettivamente nelle bande radio S (2GHz) e X (8GHz).

In viaggio alla velocità della luce, il segnale impiegava 50 minuti per coprire la distanza tra la Terra e la navetta, quando questa si trovava alla massima distanza, mentre la velocità di raccolta dati era compresa tra i 10000 e i 22000 bit per secondo; per la rotazione della Terra non sempre è stato possibile comunicare con Rosetta in tempo reale, per di più ogniqualvolta la navetta si trovava a passare dietro al Sole le comunicazioni venivano forzatamente interrotte.

Rosetta è stata la prima missione spaziale di sempre a viaggiare al di là della fascia principale degli asteroidi dipendendo solamente da celle solari per la generazione di energia. I pannelli solari contenenti migliaia di celle di silicio non riflettenti, grazie ad un'estensione di 14 metri, riuscivano a generare fino a 8700 Watt di potenza nella parte interna del Sistema Solare, e a garantirne 400 nello spazio profondo, laddove il livello di luce è appena il 4% di ciò che giunge a Terra, e i classici generatori termici a radio isotopo non avrebbero potuto garantire l'apporto energetico sufficiente.

Durante il periodo di ibernazione, allo scopo di limitare i consumi di energia e combustibile, e perché no i costi di gestione, la navetta ruotava una volta al minuto in direzione del Sole, per ricevere la maggior quantità di energia incidente: per 31 mesi tutti i sistemi elettrici, ad eccezione del ricevitore radio, dei comandi decodificatori e dell'energia di supporto, erano spenti. Nel suo computer di bordo, Rosetta aveva il solo compito di amministrare i dati e controllare i propri parametri orbitali.

Il controllo della temperatura è stato il problema più grosso da affrontare per i progettisti. Vicino al Sole, il surriscaldamento veniva prevenuto da radiatori che dissipavano il calore in eccesso verso lo spazio, al contrario nella parte esterna del Sistema Solare, e nell'intera fase di ibernazione, il sistema e la strumentazione scientifica dovevano trattenere il calore per garantirne la sopravvivenza. Gli stessi radiatori, posizionati in posti strategici come nelle tubature o nei razzi, in concomitanza ad un isolamento della navetta con molti strati di materiale tecnico hanno, di fatto, risolto il problema.

La massa a pieno carico di Rosetta era circa 2900 kg, di cui 1670 kg di solo propellente: oltre ai 100 kg del lander Philae, il "carico" scientifico trasportato ammonta a 165 kg e consisteva in una serie di strumenti (Fig.3) dedicati alla ricerca e all'analisi del materiale cometario, nonché allo studio prolungato del nucleo in evoluzione.

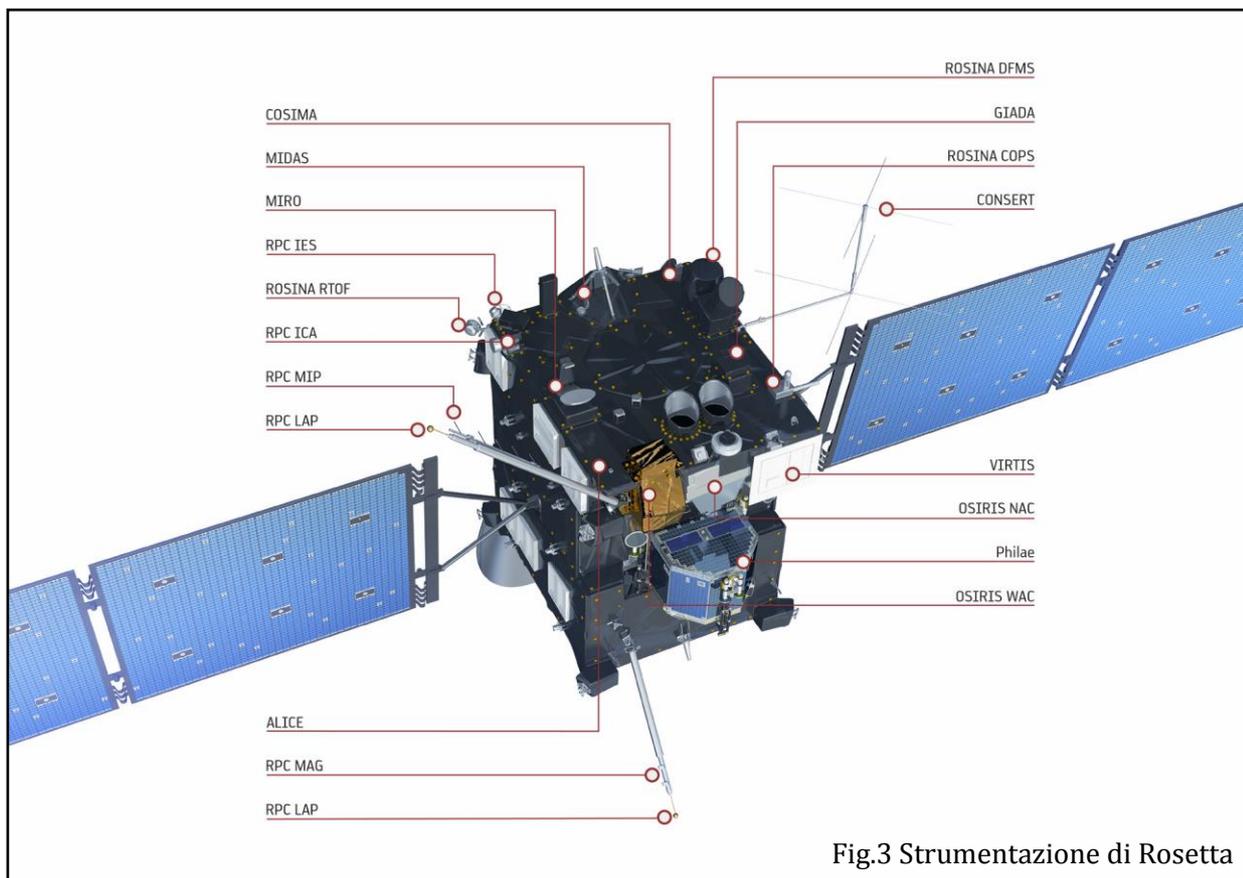


Fig.3 Strumentazione di Rosetta

Di seguito, sono elencati in ordine alfabetico gli esperimenti scientifici a bordo dell'orbiter Rosetta.

ALICE: spettrometro di immagini in ultravioletto, determina la composizione del nucleo e della chioma della cometa.

CONSERT: *Comet Nucleus Sounding* è un esperimento sul sondaggio del nucleo cometario attraverso emissione di onde radio. Lavora in collaborazione al lander Philae.

COSIMA: *COmetary Secondary Ion Mass Analyser*, studia i grani di polvere originatisi nella chioma.

GIADA: *Grain Impact Analiser and Dust Accumulator*, analizza i grani di polvere espulsi dal nucleo.

MIDAS: *Micro-imaging Analysis System* è un esperimento creato per ottenere un profilo 3D dei grani di polvere microscopici.

MIRO: *Microwave Instrument for the Rosetta Orbiter* è un sistema che utilizza le microonde per determinare la natura del nucleo, le emissioni di gas e lo sviluppo della chioma.

OSIRIS: *Rosetta's Optical, Spettroscopia and Infrared Remote Imaging System*, fotocamera per la raccolta di immagini composta di due camere a campo largo e stretto: WAC e NAC.

ROSINA: *Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis*, per determinare la composizione della chioma e analizzare i gas espulsi. E' composta da tre strumenti principali: DFMS, RTOF e COPS.

RPC: *Rosetta Plasma Consortium*, si tratta di una serie di sensori per lo studio del plasma cometario.

VIRTIS: *Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer*, spettrometro di immagini visibili, infrarosse e termiche: rileva la temperatura del nucleo e determina la composizione dei gas della chioma e del nucleo stesso.

PHILAE: Il lander progettato per la discesa sulla superficie della cometa, contiene dieci strumenti per eseguire esperimenti in situ.

1.3 LA COMETA 67P/CHURYUMOV-GERASIMENKO

Con decine di centinaia di comete che attraversano il nostro Sistema Solare, la potenziale candidata alla missione Rosetta avrebbe dovuto soddisfare alcuni particolari criteri: l'interesse principale della comunità scientifica era rivolto a quel tipo di comete già viste compiere più volte orbite intorno al Sole e, che avessero mostrato inequivocabili segni di attività. Per facilitare le operazioni di volo, come un'osservazione prolungata a distanza ravvicinata, ed un successivo atterraggio sulla superficie del nucleo, era necessario che la cometa viaggiasse vicino al piano dell'eclittica, per cui con una bassa inclinazione orbitale.

La migliore "sostituta" alla 46P/Wirtanen, era rappresentata dalla 67P/Churyumov-Gerasimenko, cometa della famiglia di Giove (Jupiter Comet Family), il cui periodo orbitale era inferiore ai 20 anni.

Le comete come la 67P/C-G vengono considerate originatesi nella fascia di Kuiper, il grande serbatoio di piccoli corpi ghiacciati situato al di là dell'orbita di Nettuno.

Per effetto di perturbazioni gravitazionali e/o collisioni, alcuni di questi corpi vengono spinti verso il Sole.

Quando queste comete attraversano l'orbita di Giove, il pianeta più massivo del Sistema Solare, interagiscono gravitazionalmente cambiando gradualmente traiettoria fino ad essere spinti a collidere con un pianeta o con il Sole stesso, o addirittura fino a essere espulsi dal Sistema Solare.

Dai nostri modelli sembra che la 67P/C-G rappresenti in pieno il processo di come gli incontri con Giove spingano una cometa nella parte interna del Sistema Solare. Le analisi delle evoluzioni dei parametri orbitali mostrano che la distanza dal perielio fino al 1840 fosse di circa 4.0 U.A., ad una tale distanza, il Sole non avrebbe potuto scaldare a sufficienza il corpo permettendogli di vaporizzare i ghiacci e rendere perciò la cometa dormiente visibile da Terra: probabilmente un incontro molto ravvicinato col pianeta gigante causò un cambio orbitale spostando il perielio a 3.0 U.A..

Nel corso di un secolo il perielio si è gradualmente abbassato fino a 2.77 U.A., ma solo nel 1959 nell'ultimo vero incontro ravvicinato con Giove, il perielio è stato abbassato sino a 1.29 U.A., spostandosi di poco sino ai giorni nostri a 1.24 U.A.. Ad oggi la posizione dell'afelio è di 5.68 U.A..

La 67P/C-G venne osservata ben otto volte avvicinare il Sole dal 1969, anno del suo primo avvistamento in Kazakistan da parte degli astronomi di Kiev, Churyumov e Gerasimenko; nel Marzo 2003, il telescopio Hubble raccolse oltre 60 immagini della cometa evidenziandone un nucleo dalla forma ellissoidale.

All'arrivo di Rosetta nell'Agosto 2014, la sua complessa forma e la struttura a doppio lobo, hanno destato grande stupore e interesse nel mondo scientifico.

L'aspetto morfologico della 67P/C-G ci ha suggerito che a giocare il ruolo principale nella formazione della superficie della cometa siano state le attività esplosive per tempi brevi e, i processi di perdita per sublimazione per tempi di scala maggiori.

Con immagini acquisite ad orbite comprese tra i 20 e i 30 km di distanza dal centro della cometa e con risoluzioni spaziali di 0.17 m/px, è parso che i due lobi abbiano una porzione significativa ricoperta da un mantello di polvere che sembra essersi depositato recentemente e che mostra segni di spostamento per processi simili a quelli eolici.

Dopo sei mesi di osservazioni ravvicinate si è completata la mappatura dell'emisfero nord della cometa: per le considerevoli differenze morfologiche, sono state definite 19 regioni (saranno 19 nell'EMISFERO NORD + 7 nell'EMISFERO SUD, classificate dopo Maggio 2015) contrassegnate da nomi di divinità egizie (Fig.4), distinte nelle seguenti 5 categorie:

- regioni ricoperte di polvere
- regioni con buche, strutture circolari, e materiale "fragile"
- regioni con depressioni su larga scala
- regioni con terreni lisci
- regioni con superfici più esposte e consolidate da rocce

La complessa forma a doppio lobo della 67P/C-G gioca un ruolo chiave sull'eterogeneità della chioma, proprio per le differenti porzioni delle facce del nucleo rivolte al Sole durante un completo ciclo di rotazione, della durata di 12.4 ore terrestri. La composizione della chioma varia notevolmente col tempo, alquanto disomogenea rispetto alle attese, presumibilmente a causa delle improvvise esplosioni.

L'attività della cometa, come del resto per la maggior parte di questi oggetti noti alla comunità scientifica, non è parsa distribuita omogeneamente sulla superficie e, nonostante il piccolo massimo in corrispondenza del perielio, la 67P/C-G risulta poco brillante, con magnitudine visuale pari a 12.

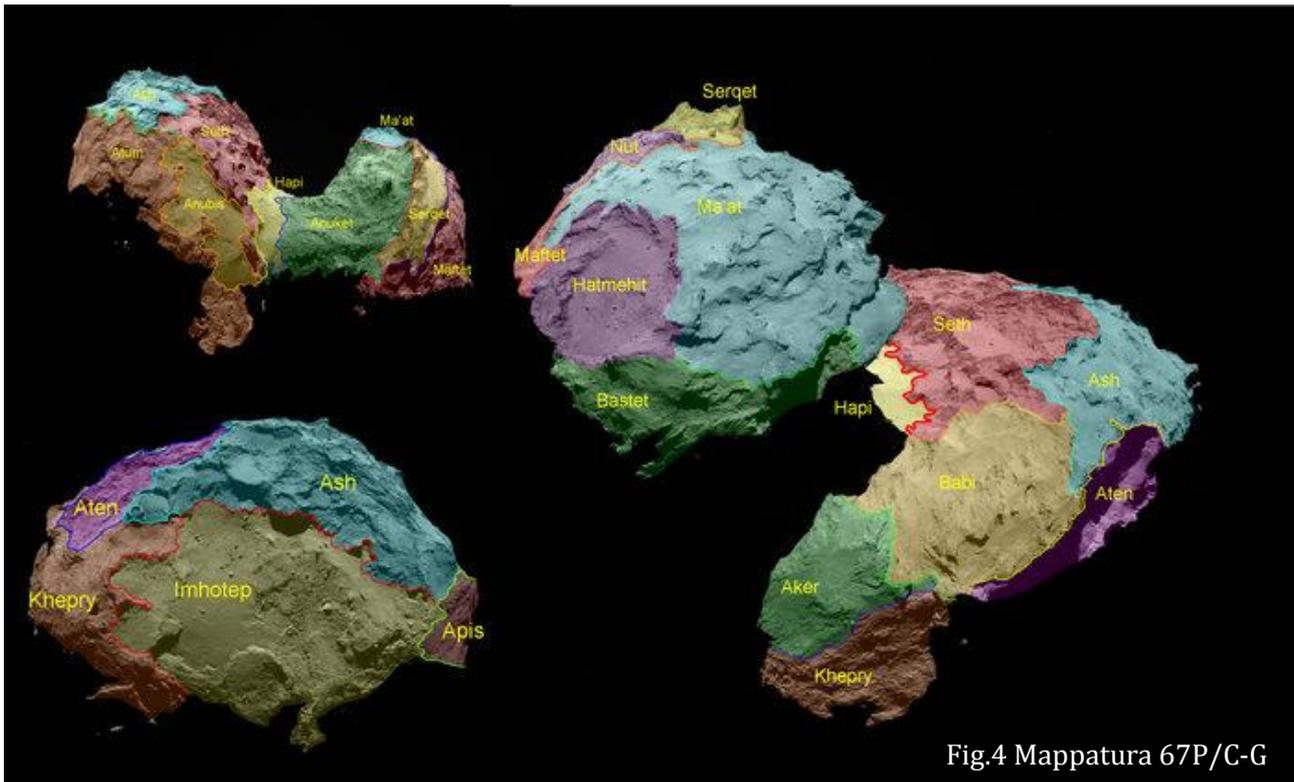


Fig.4 Mappatura 67P/C-G

Da Maggio 2015 l'emisfero sud della cometa ha cominciato ad essere esposto direttamente alla luce solare, permettendo una mappatura completa della superficie; le immagini raccolte da Osiris ad una distanza tra i 45 e i 125 km dal nucleo hanno una risoluzione spaziale tra 0.8 e 2.3 m/px ed in concomitanza all'uso di modelli digitali di terreni, si è potuto denominare altre 7 regioni, verosimilmente classificate secondo confini morfologici e/o topografici. Appare un'evidente dicotomia con la controparte a nord. Anzitutto l'assenza di terreni lisci su ampia scala, di mantelli di polvere e la presenza di grandi e ambigue depressioni suggeriscono che nonostante i due lobi presentino delle superficie eterogenee, manifestino differenti caratteristiche fisico-chimiche.

Le immagini della fotocamera Osiris mostrano delle depressioni circolari viste in superficie, è probabile che la loro morfologia sia collegata ad un effetto di sublimazione cumulativa, da quando la 67P/C-G è divenuta una JFC. Per confronto diretto, si sono prese le immagini raccolte della 81P/Wild2, della 9P/Tempell e della 103P/Hartley, comete della famiglia di Giove: l'ampiezza della distribuzione delle frequenze delle depressioni circolari mostra avere una legge con distribuzione a potenza simile a quella della 9P/Tempell e della 81P/Wild2. Si presume che possano essere generate dallo stesso processo, ma un calcolo sull'integrazione orbitale mostrerebbe che le storie erosive di queste due comete possano essere più corte di quelle della 67P/C-G. Non si esclude che tali depressioni siano databili prima della fase che le rese delle JFC, o addirittura prima della fase transnettuniana.

Dalle proprietà fotometriche e spettro-fotometriche della 67P/C-G abbiamo potuto ricavare una magnitudine assoluta di 15.74 ± 0.02 mag. Significativa la quasi totale assenza di bande di assorbimento se non quella centrata a 290 nm dovuta al ghiaccio di SO₂; l'albedo geometrico calcolato è risultato 6.5 ± 0.2 a 649 nm, con variazioni locali fino al 16% nella regione notoriamente più attiva di Hapi.

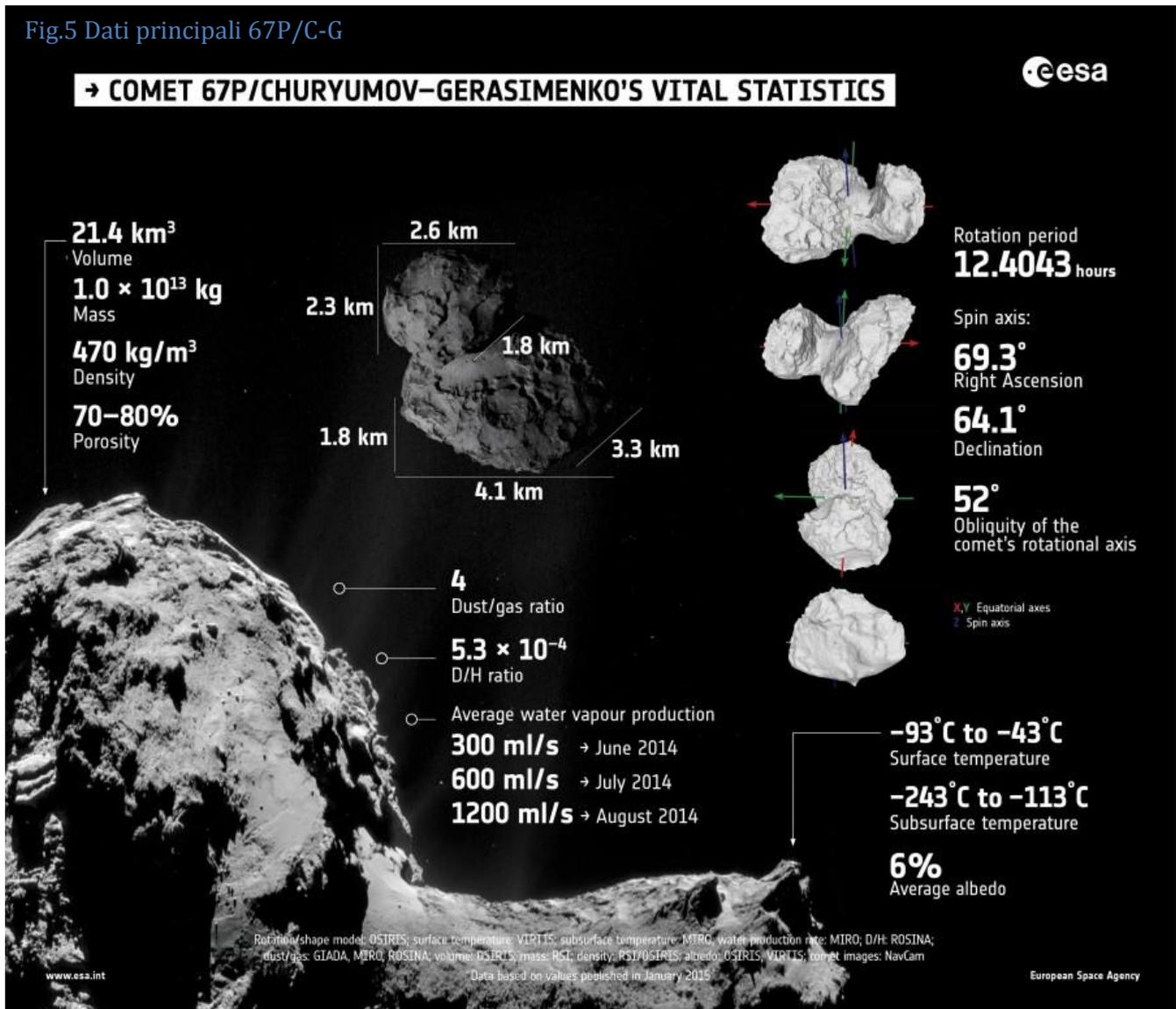
La fotocamera NAC di Osiris ha permesso di mappare la superficie del nucleo, acquisendo immagini con diversi filtri nell'intervallo di lunghezze d'onda del visibile, allo scopo di di-

stinguere gruppi omogenei e definire una composizione globale studiando il comportamento spettro-fotometrico del nucleo.

Si definiscono quattro gruppi omogenei simili: il primo corrisponde al comportamento medio spettro-fotometrico del nucleo, il secondo più rosso e il terzo più blu si trovano in regioni che erano già state trovate deviare dal terreno medio, invece il quarto gruppo mostra un aumento del flusso tra 700 e 750 nm e a 989 nm, forse dovuto alle emissioni di H_2O^+ e/o NH_2 , collegato all'attività della cometa piuttosto che alla composizione volumetrica.

Usando un modello di forma ad alta risoluzione abbiamo ottenuto un volume dell'emisfero nord di $9.35 \text{ km}^3 \pm 0.1 \text{ km}^3$. Considerando una distribuzione di massa omogenea, si estrapola un volume globale di $21.4 \text{ km}^3 \pm 12 \text{ km}^3$ una miglior stima di massa di $1.0 \times 10^{13} \text{ kg}$ con densità volumetrica di $535 \text{ kg/m}^3 \pm 35 \text{ kg/m}^3$, a dimostrare un'alta porosità: circa tra il 70 e l'80% (Fig.5).

Fig.5 Dati principali 67P/C-G



1.4 GLI ASTEROIDI STEINS E LUTETIA

Lungo la sua odissea, Rosetta ha eseguito due incursioni nella fascia asteroidale principale per eseguire osservazioni su due asteroidi: 2867 Steins e 21 Lutetia.

La maggior parte degli asteroidi popola la fascia principale tra Marte e Giove, anche se, se ne possono trovare vagare in altre zone del Sistema Solare, a volte in prossimità di pianeti: sono molto diversificati per forma, dimensione e composizione.

Ad oggi, conosciamo almeno 14 distinte classi di asteroidi, anche se la maggior parte appartiene ad una delle seguenti tre:

- Tipo C (Carbonacei): sono circa il 75% degli asteroidi noti, molto scuri e con albedo tra 0.03 e 0.09. Hanno una composizione impoverita di H e He ed altri volatili. Occupano la regione più esterna della fascia principale.
- Tipo S (Silicatici): rappresentano circa il 17% degli asteroidi, relativamente brillanti e un albedo compreso tra 0.1 e 0.22. La loro composizione è data da una miscela di ferro metallico e silicati di ferro e magnesio. Dominano la parte più interna della fascia principale.
- Tipo M (Metallici): includono quasi tutti gli asteroidi restanti noti, hanno un albedo tra 0.1 e 0.18. Composti di ferro e nichel puri, si trovano nella parte centrale della fascia principale.

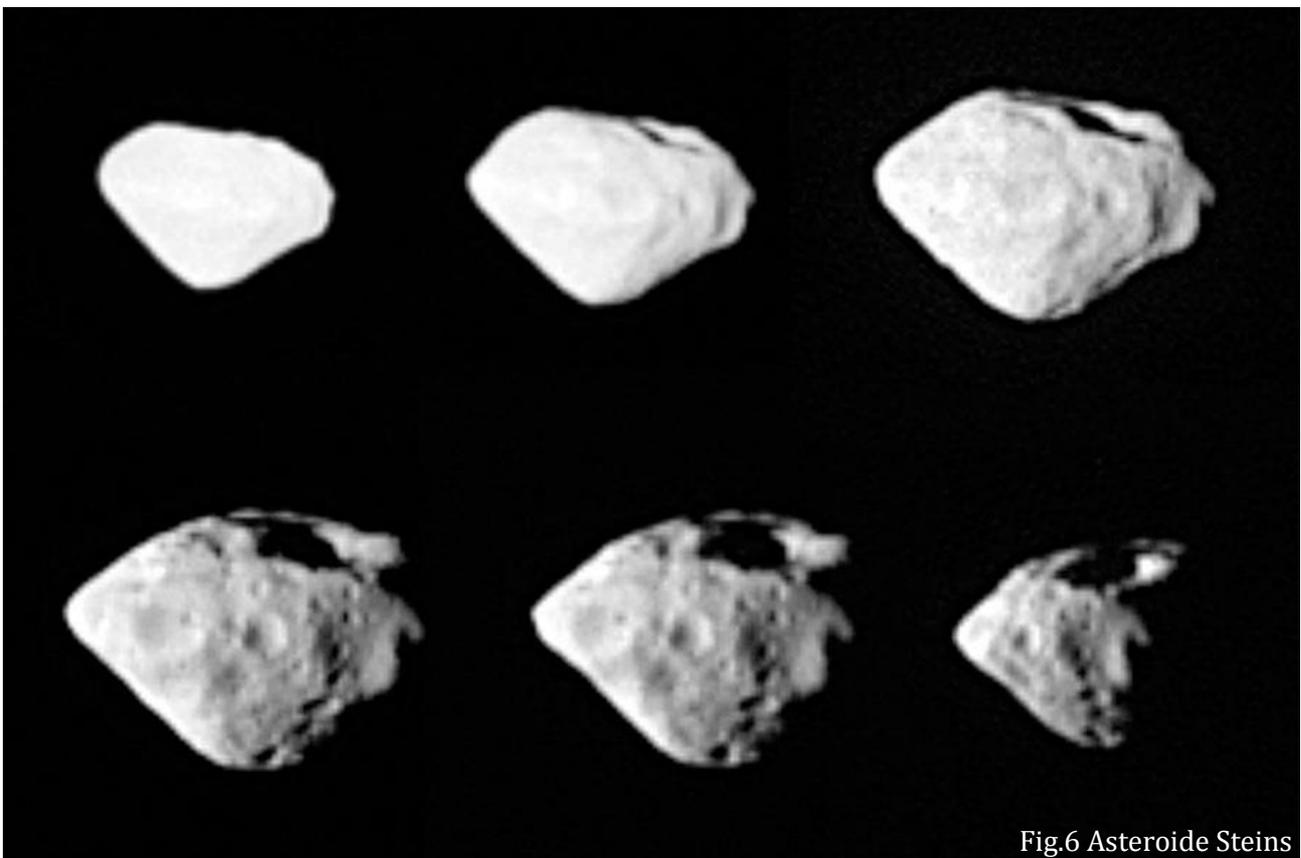


Fig.6 Asteroide Steins

Nel settembre 2008 la missione Rosetta è passata a 800 km di distanza dall'asteroide 2867 Steins (Fig.6), ad una velocità relativa di 8.6 km/sec: dato l'alto albedo e le caratteristiche dello spettro viene classificato asteroide di Tipo E, inoltre dalla dimensione di circa 4.6 km di diametro, si presume si tratti di un frammento di un'asteroide molto più grande.

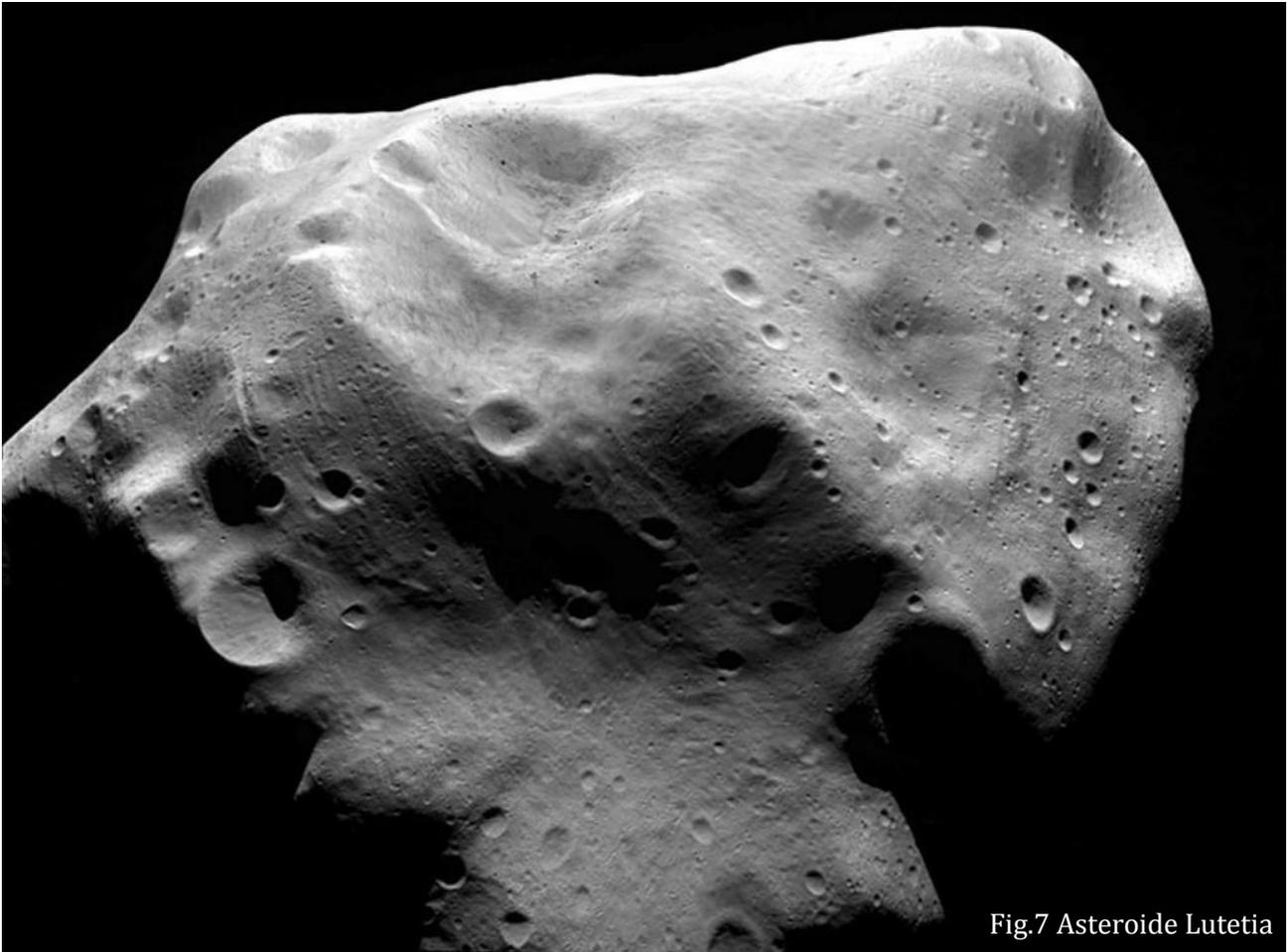


Fig.7 Asteroide Lutetia

Il volo ravvicinato a 21 Lutetia (Fig.7) è avvenuto nel Luglio 2010 ad una distanza di circa 3000 km; nel tempo erano già state fatte molte osservazioni su questo asteroide, la cui composizione e natura restano, ancora oggi, fonte di dibattito. Per molto tempo si è creduto che 21 Lutetia avesse una natura metallica visto il suo alto albedo IRAS: attraverso le osservazioni al TNG, i 13 spettri nel visibile raccolti a differenti fasi rotazionali hanno confermato i risultati precedentemente trovati, compresi i tratti spettrali tra 0.47 e 0.48 μm , se non per le differenti pendenze spettrali tra 0.60 e 0.75 μm , dovute a possibili differenze nella composizione chimico/mineralogico e così pure alla disomogeneità della struttura superficiale: nel complesso non si notano variazioni composizionali di rilievo. La vera natura di questo asteroide è tuttora fonte di dibattito.

CAPITOLO 2

I PRINCIPALI RISULTATI OTTENUTI

La missione Rosetta è stata il più grande insieme di esperimenti scientifici, dedicato allo studio dettagliato e integrato di una cometa, come mai tentato prima. Alcuni suoi strumenti hanno lavorato in combinazione al lander Philae (Consert, Rpc, etc.), certi invece hanno lavorato indipendentemente e/o in concomitanza ad altri per uno studio dedicato.

Nello specifico, ogni singolo esperimento scientifico contava su di un proprio gruppo di lavoro, che ha visto la collaborazione all'unisono per la realizzazione di questa grande impresa.

Evidenziamo nel dettaglio come ogni strumento abbia contribuito a nuove scoperte in fase esplorativa.

2.1 GIADA

Lo strumento Giada è un accumulatore di polvere cometaria il cui ruolo, condiviso con Cosima e Midas, è l'analisi dettagliata dei grani che compongono la chioma e la coda della 67P/C-G.

La peculiarità di Giada è consistente con la presenza di un sensore da impatto in grado di misurare il numero, la massa, il momento e la distribuzione delle velocità dei grani di polvere raccolti: tale sensore si è dimostrato fondamentale per l'analisi del cammino dei grani fuoriusciti e l'identificazione della regione della cometa dalla quale questi erano espulsi. La possibilità di prevedere la velocità di deposito della polvere ha permesso al gruppo del volo dinamico, tramite le indicazioni fornite da Giada, di eseguire tutte quelle manovre correttive atte a salvaguardare l'integrità dell'orbiter e della strumentazione in toto, per l'intera durata della missione.

In fase di approccio, con bassa velocità relativa tra orbiter e cometa, il 1 Agosto 2014 si è avuta la rilevazione del primo grano di polvere impattato sul sensore proveniente dalla cometa: in quel momento Rosetta si trovava a 814 Km dal nucleo della 67P/C-G ed a più di 3 U.A. di distanza dal Sole.

Dopo l'arrivo a destinazione, sono stati sufficienti alcuni giorni per poter fare un'importante distinzione tra due differenti popolazioni di grani di polvere: una prima popolazione riguardante grani di polvere intrappolati, che orbitano attorno al nucleo, ed una seconda consistente coi grani che venivano espulsi.

Basandosi sull'intervallo di luminosità, si è dedotto che i grani intrappolati hanno dimensioni che variano tra i 4 cm e i 2 metri, mentre per i grani espulsi, immortalati dalle immagini di Osiris, le dimensioni risultano inferiori ad 1.7 cm. Poiché la densità spaziale dei grani intrappolati è risultata almeno 100 volte inferiore a quella dei grani espulsi, si ritiene che questi siano stati rilasciati durante la precedente escursione della cometa attorno al Sole, ed in

seguito trattenuti in sospensione quando l'attività di espulsione del gas ha cominciato a diminuire non sottoponendoli più a perturbazioni durante il compimento dell'orbita.

Lo studio effettuato da Agosto 2014 a Gennaio 2015, che ha campionato oltre mille particelle di polvere impattanti, ha permesso al gruppo di separare le particelle in due famiglie distinte: la prima di particelle compatte con una dimensione compresa tra 0.03 e 1 mm, e una seconda famiglia di particelle aggregate, più voluminose, con dimensioni comprese tra 0.2 e 2.5 mm.

In fase di raccolta, le particelle compatte impattavano ad una velocità media di circa 3 m/s, invece gli aggregati non raggiungevano il m/s.

RPC-LAP ci ha mostrato che Rosetta ha un potenziale elettrostatico negativo, tra - 5 e - 10 Volt, per gli effetti associabili all'ambiente di plasma attorno alla cometa e agli stessi raggi UV che colpiscono la navetta: il potenziale negativo decelera le particelle che approssimano il sensore poiché anch'esse sono caricate negativamente, in maniera proporzionale alla loro carica, massa e geometria.

Si ritiene che un aggregato poroso, a parità di raggio equivalente, sia circa 20 volte più carico di una particella compatta.

Le particelle compatte hanno una densità volumetrica tra 800 e 3000 kg/m³ paragonabile ad una miscela di minerali, al contrario, le particelle aggregate sono composte da grani con dimensione inferiore al micron e spaziate tra loro, in una struttura di tipo porosa, per lo più vuota: queste vengono associate agli aggregati porosi visti da Cosima, e per i quali è stata riscontrata una densità volumetrica inferiore a quella dell'aria (1Kg/m³ sul livello del mare). Il parametro critico che distingue le due famiglie di grani, e ci porta a pensare che possano avere due differenti storie è la loro densità: presumibilmente i grani compatti rappresentano quel materiale che ha subito processi significativi venutisi a creare attorno alla nostra stella appena formata, prima di aggregarsi per costituire la 67P/C-G, nelle parti più esterne del Sistema Solare; le particelle aggregate porose sembrano mostrare tutte le caratteristiche del materiale primordiale collegato alla polvere interstellare, che presumibilmente ha preceduto la formazione del Sole, ed è sfuggito prima di essere accresciuto con la cometa nella fase della sua costituzione.

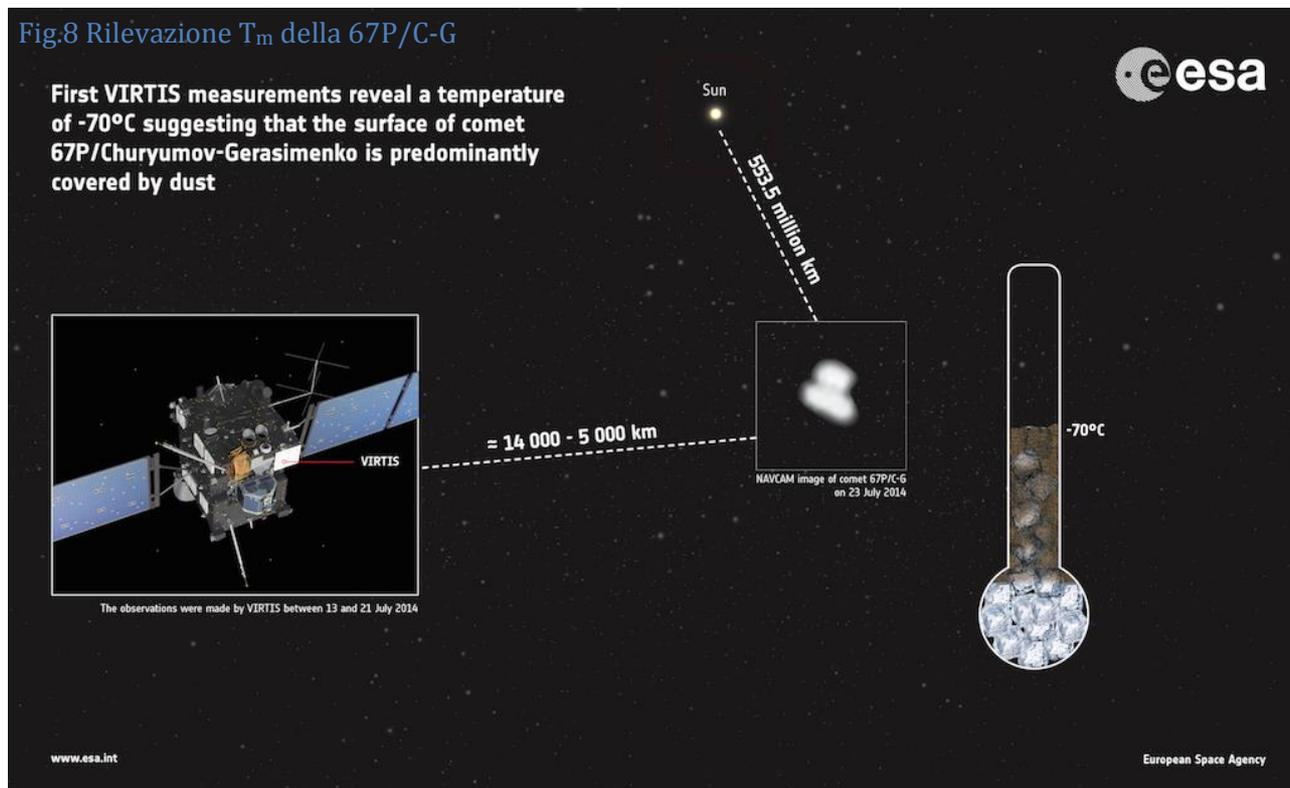
Con la collaborazione dei gruppi di Rosina, Miro e Osiris, si è fatta luce su di un altro aspetto interessante che riguarda il valore del rapporto polvere/gas nella chioma: questo tipo di informazione fornisce utili suggerimenti sul luogo di formazione e sullo stato evolutivo della cometa.

L'incrocio dei dati mostra una situazione molto diversa rispetto alla visione classica più recente, verosimilmente da misurazioni in situ si ottiene un valore di 4 ± 2 , in netto contrasto con l'intervallo atteso $0.1 \div 1$, che nella visione più classica portava a ritenere le comete come delle "palle di neve sporca": sembra più probabile che ci si trovi di fronte ad una "palla di polvere innevata".

2.2 VIRTIS

Lo spettrometro Virtis è stato sviluppato dalla collaborazione di Italia, Francia e Germania, sotto la responsabilità dell'Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziale di Roma, che ne ha guidato le operazioni scientifiche. Come noto, in uno spettro la forma delle bande molecolari dipende dalla temperatura, mentre l'intensità è funzione del numero di molecole lungo la

linea di vista dello spettrometro: nel Luglio 2014 le prime misure della radiazione emessa negli spettri raccolti da Virtis, per la chioma della 67P/C-G, hanno fornito una stima iniziale sulla temperatura media della cometa, risultata essere circa -70°C (Fig.8). Sin da subito si sono scartati alcuni modelli di superficie cometari, favorendo altri che prevedevano una crosta polverosa esautorata di ghiacci ed un nucleo ad alta porosità, di fatto, le osservazioni da Terra della cometa di Rosetta avevano già escluso fosse ricoperta da ghiaccio d'acqua, per così dire "incontaminato".

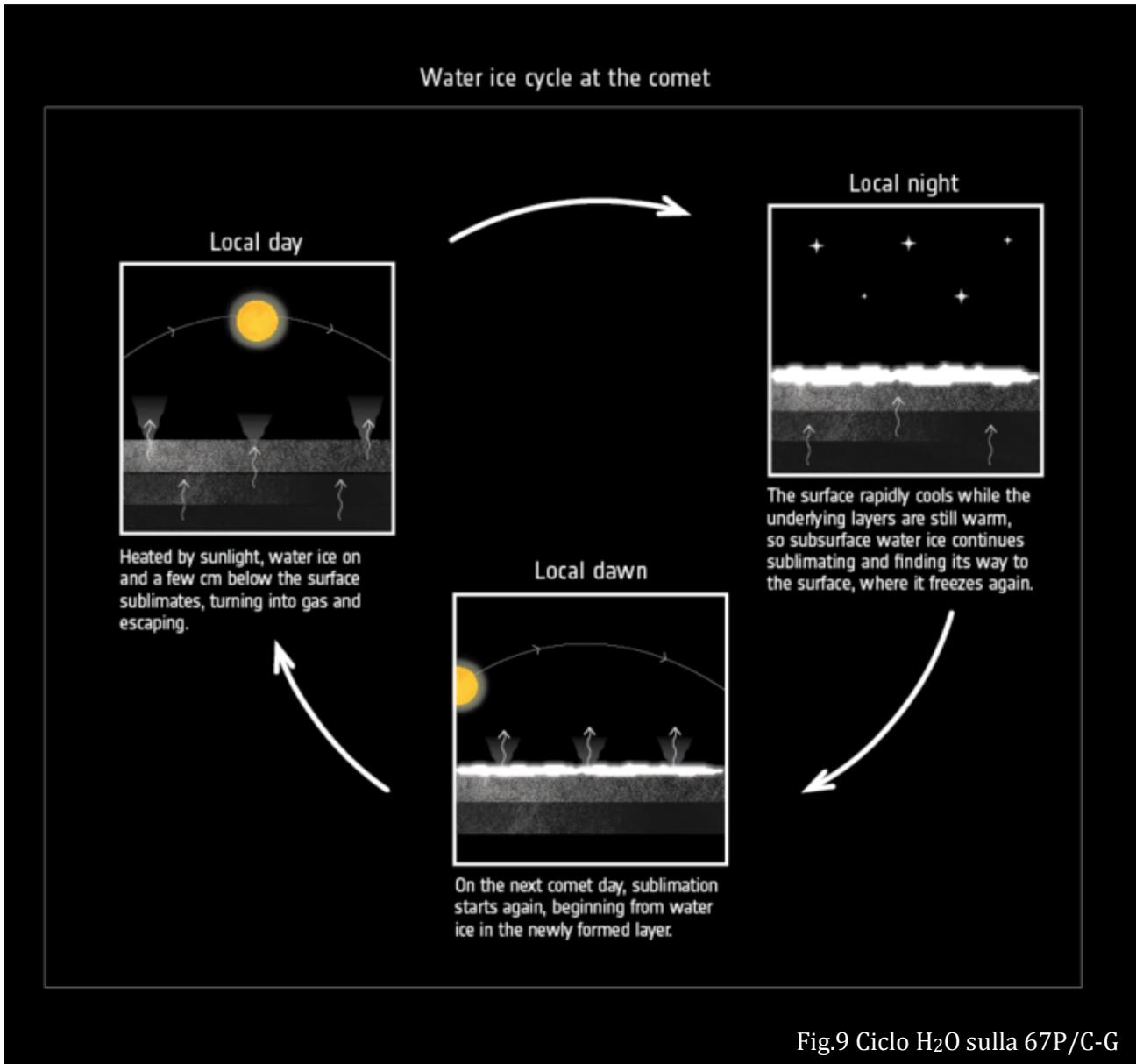


Uno degli obiettivi di Virtis era la mappatura delle emissioni dei differenti gas nella chioma, e lo studio del loro cambiamento con l'attività della cometa: nei primi giorni di ottobre 2014 sono state determinate le abbondanze relative del CO_2 rispetto all' H_2O , ed il dato sorprendente del 4% non sembrava coerente col valore del 20% riscontrato per la 103P/Hartley con la missione del 04/11/2010, e che fungeva da modello per le comete JFC.

Dopo circa 5 mesi in compagnia della cometa, agli "occhi" di Virtis, la 67P/C-G è risultata tra gli oggetti più scuri del Sistema Solare con un albedo del 6% che indicava la presenza sulla superficie del nucleo di solfiti di ferro e composti di carbonio. Le osservazioni in IR hanno permesso di scoprire componenti organiche macromolecolari, simili ad acidi carbosilici o polimeri presenti negli amminoacidi.

Alcuni giorni dopo il 13 agosto 2015, giorno del passaggio al perielio, con più di un anno di studio ravvicinato, Rosetta ha identificato regioni sul nucleo della cometa dove i ghiacci d'acqua appaiono e scompaiono in sincronia al periodo di rotazione: si è compreso il meccanismo che rifornisce la superficie di ghiaccio fresco e, in un certo qual modo, mantiene in vita la cometa. Per effetto della rotazione, tutte le regioni subiscono variazioni di illuminazione: i dati mostrano che il ghiaccio d'acqua sulla superficie e fino a pochi centimetri al di sotto della crosta superficiale sublima per effetto di luce solare incidente, trasformandosi in

gas che fuoriesce dalla cometa. Con la rotazione la stessa regione precipita nell'oscurità tornando rapidamente a ghiacciarsi, ma gli strati sottostanti rimasti scaldati aiutano il ghiaccio sottostante a sublimare coadiuvati dalla porosità interna del nucleo.



L'inseguimento della cometa nel suo intercedere orbitale, ha dato la possibilità di monitorare il comportamento di molte regioni del nucleo, e mettere in evidenza l'esistenza di un ciclo dell'acqua sulla 67P/C-G (Fig.9): un fenomeno che trasporta l'acqua dal sottosuolo alla superficie in maniera continuativa, funzione delle condizioni di illuminazione.

La scoperta di due distinte popolazioni di grani di ghiaccio sulla superficie della cometa pone interessanti quesiti: la zona del collo del nucleo, nella regione di Hapi, è ricoperta da uno strato di grani ghiacciati molto piccoli, con diametro dell'ordine della decina di micrometri, che condensano velocemente in concomitanza al ciclo giornaliero; sul lobo maggiore, nella regione Imhotep, si trovano grani molto maggiori, dell'ordine del millimetro, occasionalmente esposti dall'erosione.

La netta distinzione tra i due tipi di grani, conduce a due diversi meccanismi di formazione e, in tempi di scala nettamente differenti. Assunto che i grani più piccoli seguano il ciclo

dell'acqua, come del resto anche nelle altre comete, i grani con dimensione superiore al millimetro possono essere spiegati come risultato di una crescita di cristalli secondari. Un modo perché ciò avvenga è la sintetizzazione: un compattamento dei più piccoli grani di ghiaccio oppure, siamo di fronte ad un processo di sublimazione nel quale i test di laboratorio mostrano che più dell'80% del vapore si ricondensa negli strati sotto la superficie, intrappolato dalla polvere. In questo processo di trasformazione del ghiaccio amorfo in ghiaccio cristallizzato, alle basse temperature, viene liberata energia.

Un aumento dei grani di ghiaccio può portare all'ispessimento degli strati sotto superficiali ricchi di metri di ghiaccio e questo, su grande scala, influenzerebbe la struttura, la porosità e le proprietà termiche del nucleo.

Se ne deduce che la stratificazione globale non è forse univocamente definita dalla storia della formazione della cometa, altresì potrebbe essere collegata all'attività e all'evoluzione: si cerca di comprendere quali siano i processi più importanti nei vari stadi di vita della cometa.

2.3 OSIRIS

La fotocamera Osiris è stata per tutta la missione il vero occhio di Rosetta. Questo sistema per la raccolta di immagini nell'ottico, infrarosso e spettroscopico è formato dalla combinazione di due fotocamere ad ampio (WAC) e stretto (NAC) campo [la WAC è stata costruita interamente dall'università di Padova dalla collaborazione di vari dipartimenti]; in più di due anni e mezzo di lavoro la mole e la qualità delle immagini che ci ha inviato sono senza precedenti, a partire dalle prime foto degli asteroidi Steins e Lutetia.

Per l'intera durata della missione, Osiris è stata monitorata attraverso una serie di calibrazioni cominciate a Terra prima del lancio, e poi proseguita sino al termine del suo esercizio. Nel luglio 2014 durante la fase di approccio alla cometa, Osiris ha eseguito una campagna dedicata alla ricerca di oggetti nelle vicinanze del nucleo della cometa: da una distanza compresa tra i 5800 e i 5400 km dal nucleo, la ricerca di eventuali satelliti era finalizzata alla sicurezza della navetta e alla determinazione dei loro limiti orbitali per fissarne i vincoli sugli spostamenti all'interno della sfera di Hill.

Usando immagini con diversi tempi di esposizione, non sono stati rilevati oggetti maggiori di 6 metri entro i 20 km di distanza e non più larghi di un metro entro un intervallo compreso tra i 20 e i 110 km; dalle nostre scoperte si sottolinea che è altamente improbabile che grossi oggetti "sopravvivano" a lungo attorno ai nuclei cometari.

Dalle prime immagini di Osiris sul nucleo della 67P/C-G sono parse evidenti differenze morfologiche in tutta la superficie; sono stati compiuti svariati studi sulle proprietà meccaniche del materiale cometario (duttilità, taglio, compressione) per lo più in regioni caratterizzate da pendii dove la gravità sembrava apparire dominante. Se ne deriva che il rapporto tra forza e gravità nella 67P/C-G è simile a quello delle rocce deboli sulla Terra: come risultato di una bassa forza di compressione, l'interno del nucleo deve essere stato sufficientemente compresso per iniziare il processo di diagenesi che può aver contribuito alla formazione degli strati. La resistenza a forza di trazione è confrontabile con quella degli aggregati di polvere formati per instabilità gravitazionale e tende a favorire una formazione di comete per accrescimento di massi più piccoli a basse velocità relative.

Le immagini a distanza ravvicinata raccolte da Osiris hanno consentito di mettere in discussione le origini e l'evoluzione della 67P/C-G: si sostiene che i due lobi del nucleo possano derivare da due oggetti distinti e, la cometa si sia formata per effetto di un processo di fusione binario avvenuto in maniera lenta, a giudicare dalla bassa densità dell'aggregato e dall'abbondanza delle specie volatili; i lobi sono corpi separati, ma comunque simili da poterne indicare lo stesso luogo di formazione.

Coi dati provenienti dal sistema di immagini Osiris, si stabilisce la plausibilità del trasporto di polvere da una parte all'altra del nucleo: questo meccanismo influenza significativamente le proprietà termiche della superficie e l'aspetto della 67P/C-G. Si ritiene che il trasporto di materiale sia conseguenza delle più grandi particelle emesse e non sfuggite dalla regione del collo del nucleo, che si spiegano nel deposito liscio e fino dell'emisfero nord della cometa; valutazione degli effetti eolici o eventi simili, portano a considerare il meccanismo più efficace nello strisciamento, anche se non è da escludere un certo tipo di "salto" sotto la densità di gas rarefatto vista sulla superficie del nucleo, pur presentando le forze coesive interparticellari maggiori difficoltà per questa soluzione.

Con il risveglio dall'ibernazione del Marzo 2014, le osservazioni di approccio dell'esperimento Osiris erano volte anche a determinare il periodo di rotazione e l'orientazione degli assi di rotazione della 67P/C-G: presumibilmente dovuta alla torsione indotta dalla sublimazione, la velocità di rotazione è cambiata significativamente dai tempi del precedente passaggio al perielio, nel 2009. Non si notano segni di periodicità multipla nelle curve di luce ad indicare che la rotazione avviene attorno all'asse del massimo momento d'inerzia.

Dai dati ottenuti dalla ricostruzione della forma, combinate alle immagini di Osiris, vi sono chiare evidenze della complessa rotazione della 67P/C-G. Anzitutto, l'orientazione dell'asse di rotazione non è fissato su di un sistema di riferimento inerziale, che suggerisce un moto di precessione attorno al vettore momento angolare, con un periodo approssimato di 257 ± 12 h: nelle assunzioni che il corpo ruoti in condizione di libera torsione, l'interpretazione più probabile è che la 67P/C-G sia in rotazione attorno all'asse del momento principale di inerzia con un periodo di circa 13 h, ma un tale moto richiede un maggior rapporto tra i momenti d'inerzia, rispetto ad un qualsiasi corpo omogeneo. Infine, considerazioni teoriche hanno mostrato che la variazione nella velocità di rotazione può spiegarsi nella perdita di circa un metro di materiale della cometa ad ogni orbita intorno al Sole.

Attraverso il monitoraggio dell'attività del nucleo della cometa, a partire da Marzo 2014, sono stati osservati eventi esplosivi consistenti in getti di polvere, ripresi da più serie di immagini da WAC di Osiris dalla fine di Aprile ed incrementati poi tra Luglio e Agosto 2014: il rintracciamento geometrico delle sorgenti dei getti conferma che le regioni attive del nucleo devono trovarsi ad almeno 60° gradi di latitudine nord, come si era già intuito dalle osservazioni da Terra nei precedenti passaggi. Non si esclude che i getti su larga scala siano composti, sul loro punto di origine della superficie da numerosi getti più piccoli.

L'osservazione ad alta risoluzione, continuata per mesi, dei getti di polvere serve a comprendere i processi fisici che ne guidano la formazione: con l'uso di molte immagini si è cercato di ricostruire i getti collimati in 3D per collegarli alle sorgenti sul nucleo. E' stato proposto un modello nel quale le sorgenti principali si trovino in corrispondenza di dirupi attivi, ovvero zone della cometa che si erodono più velocemente: un tale meccanismo è probabilmente comune in tutte le comete.

Nel tardo Aprile 2015, ad una distanza eliocentrica di 1.8 U.A., sono stati osservati getti di polvere originatisi nella regione Ma'at, sul piccolo lobo della cometa, e proseguiti per oltre un'ora dopo la fase del tramonto. Tali getti sono espulsi da regioni del nucleo in ombra e

sono resi visibili dall'illuminazione solare a decine di metri al di sopra delle loro sorgenti apparenti: condizioni specifiche di osservazioni dei getti al tramonto pongono le sorgenti entro terreni polverosi e poco scoscesi, anche se una disparità nella distribuzione degli stessi è plausibilmente collegata alla disomogeneità sotto superficiale dell'area polverosa.

Il 12 Marzo 2015, per la prima volta si è osservata direttamente la fase iniziale di un evento esplosivo nella regione di Imhotep: attraverso l'analisi delle immagini di WAC di Osiris, e la combinazione di modelli di forma della cometa e di modelli di dinamica del gas per getti di polvere transitori si è rilevato che la regione sorgente non era illuminata fino a 1.5 ore prima del vero evento di attività osservato.

L'esplosione è durata meno di un'ora e per i primi 4 minuti la velocità media di produzione della polvere è stato pressoché costante su livelli di 1 kg/sec. Con la riflettanza dei grani di polvere si è determinata per la popolazione di grani compresa tra 0.01 mm e 1 mm, ed una distribuzione di dimensione che segue una legge a potenza con indice 2.6, mentre per il getto nello specifico si è stabilito un rapporto polvere/gas tra 0.6 e 1.8.

Con l'elevata risoluzione della NAC di Osiris è stato possibile analizzare dettagliatamente la geomorfologia della regione di Imhotep ai piedi del grande lobo della cometa, nelle vicinanze dell'equatore: questa peculiare regione ha mostrato una serie di varietà consistenti in terreni lisci e rocciosi, aree luminose, tratti lineari, tratti circolari e massi.

Si ritiene che i processi cometari come la perdita di massa e i collassi gravitazionali giochino il ruolo principale nell'evoluzione della regione di Imhotep: presumibilmente l'erosione inicializza le condizioni per la fuoriuscita di gas; sempre in questa regione della cometa, nel periodo tra Maggio e Luglio 2015, si è osservato il più grande cambiamento morfologico sull'intera superficie della 67P/C-G, nella forma di linee tondeggianti che incrementavano da una data località ed in una direzione preferenziale. La località dalla quale sono partiti i cambiamenti e i contorni dei tratti espansi sono più brillanti rispetto alle aree circostanti, a suggerire la presenza di ghiacci di H₂O e di CO₂ in superficie: si ritiene che il solo processo di sublimazione non sia sufficiente a spiegare l'espansione dei tratti osservati, poiché nessuna variazione di attività della polvere era stata osservata in concomitanza.

Con le osservazioni ad alta risoluzione della superficie del nucleo, è stato identificato almeno un centinaio di punti brillanti di dimensione dell'ordine del metro: la localizzazione è avvenuta tendenzialmente in aree a bassa insolazione, ma anche in regioni con evidenti differenze morfologiche. I punti brillanti, di norma, sono raggruppati in prossimità di terreni franati vicino a dirupi alti almeno una decina di metri, oppure totalmente isolati, senza una relazione strutturale col terreno circostante. Nel visibile le macchie sono fino a dieci volte più luminose della superficie media della cometa, mostrando uno spettro nettamente più blu: per periodi osservativi di alcune settimane non si sono evidenziati cambiamenti significativi, consistenti con un'esposizione di ghiaccio d'acqua sulla superficie.

L'analisi dei dati multispettrali generati da Nac di Osiris, tramite osservazioni ottenute con tecniche spettrali, rapporti di riflettanza e curve spettrali hanno consentito lo studio delle regioni più attive della cometa. Rispetto all'intera superficie, la regione attiva di Hapi, i punti attivi Ma'at e Seth, e insieme i tratti brillanti isolati o raggruppati della regione di Imhotep, hanno uno spettro nettamente più blu; gli spettri generati dalle osservazioni sono dominate da emissioni cometarie dai 700 ai 750 nm come risultato della chioma che insiste tra la superficie e la fotocamera. In corrispondenza di alcuni punti brillanti si notano le bande di assorbimento a circa 700 nm, probabilmente indicanti la presenza di silicati idrati, ed un'altra centrata tra 800 e 900 nm che riteniamo dovuta al campo di assorbimento cristallino dell'Fe²⁺.

Le immagini scattate dalla fotocamera Osiris e le osservazioni fatte da Terra col VLT hanno contribuito all'analisi delle proprietà dei grani di polvere, per cui era già previsto uno studio dedicato da parte di Cosima, Midas e Giada: lo scopo è stato quello di monitorare la dipendenza dal tempo del tasso di produzione della polvere e la funzione di distribuzione della dimensione dei grani in un intervallo di distanze compreso tra le 4.5 U.A. e 2.9 U.A..

Considerando che l'inizio dell'attività cometaria avviene approssimativamente a 4.3 U.A., il tasso di produzione passa da 0.5 kg/sec fino ad arrivare a 15 kg/sec ad una distanza di 2.9 U.A. dal Sole: combinato al dato sulla velocità di produzione dell'acqua dell'esperimento Miro, il miglior modello di adattamento indica un rapporto di massa polvere/gas che varia tra 3.8 e 6.5. Anche la funzione di distribuzione della dimensione dei grani sembra consistente con il modello, eccetto che per i grani più piccoli del mm, per i quali l'indice di potenza nella funzione risulta $\alpha = -3$, anziché $\alpha = -2$, presumibilmente perché collegata alla presenza di aggregati più porosi nella chioma.

2.4 ROSINA

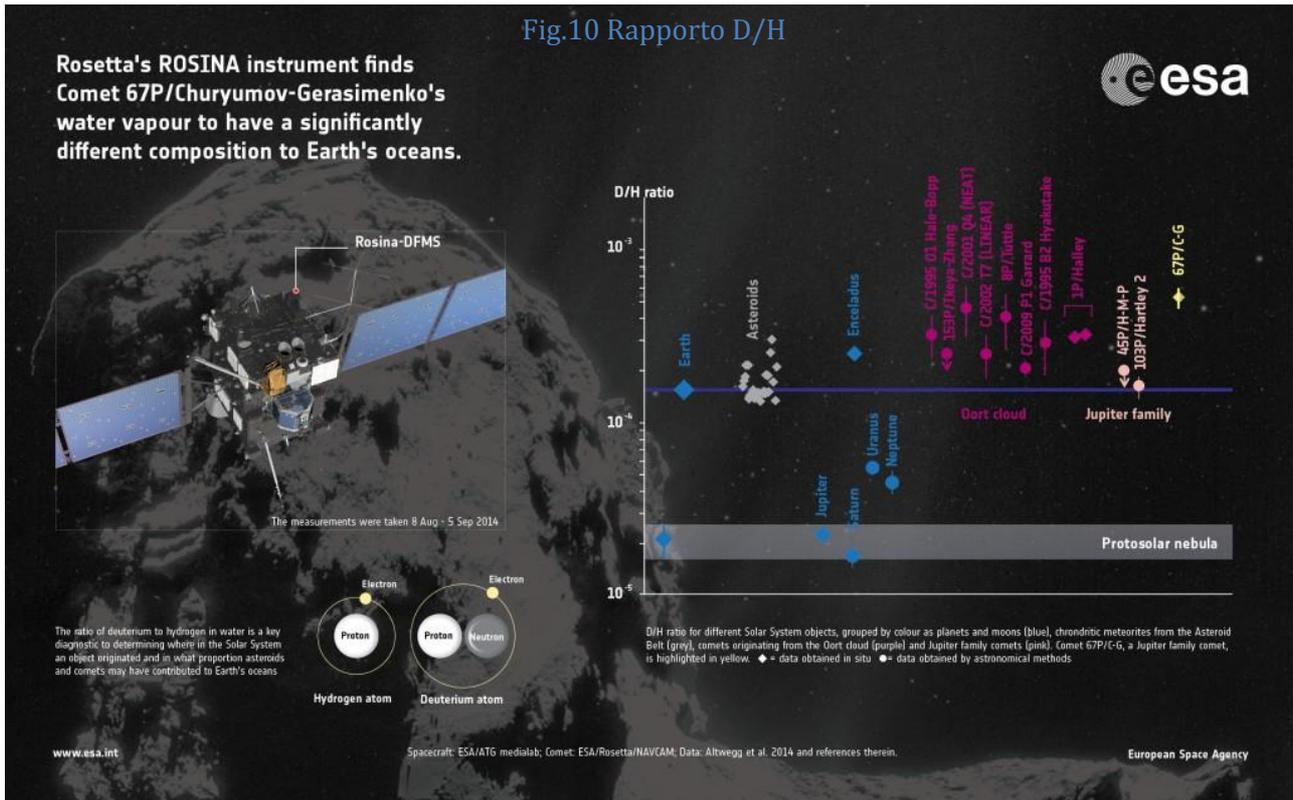
Questo esperimento a bordo di Rosetta, costituito da due spettrometri di massa (DFMS, RTOF) ed un sensore (COPS), ha permesso di analizzare la composizione elementare della chioma della 67P/C-G.

Rosina ha eseguito più di 40000 spettri ad alta e bassa risoluzione e, oltre alle principali specie molecolari rilevate, come H₂O, CO, CO₂, NH₃, CH₄, CH₃OH (metanolo), ha riscontrato tracce di CH₂O (formaldeide), H₂S, HCN, SO₂ e CS₂.

La composizione dell'acqua sulla 67P/C-G è significativamente diversa da quella degli oceani sulla Terra, la cui origine è ancora fonte di dibattito.

La chiave, per determinare come e dove si possa essere formata l'acqua, è data dal rapporto tra gli isotopi dell'idrogeno (D/H): il valore trovato nella cometa di Rosetta è circa tre volte maggiore a quello dell'acqua sul nostro pianeta (Fig.10). Precedenti indagini su altre 11 comete hanno dato ampi intervalli di rapporti, ma solo la 103P/Hartley ha dato valori simili a quelli del nostro pianeta, tra tutte le comete della famiglia di Giove (JFC)

Fig.10 Rapporto D/H



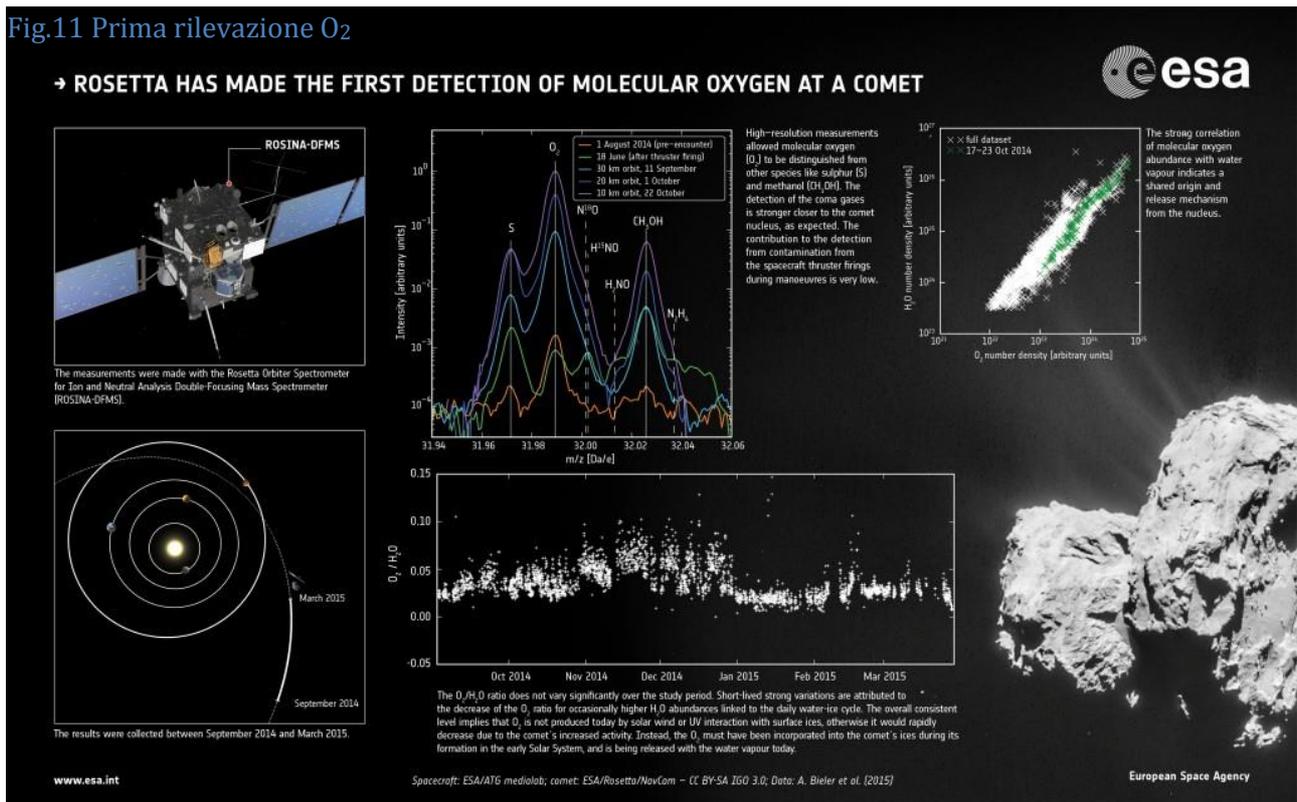
Ad opera di Rosina anche la prima rilevazione di azoto molecolare (N₂) su di una cometa, fondamentale allo sviluppo della vita, questa molecola ha bisogno di temperature estremamente basse per essere intrappolata; il rapporto tra N₂/CO suggerisce un valore non troppo diverso da quello della nebula protosolare ed un'origine nella fascia di Kuiper, anche se altri scenari non possono essere tuttavia esclusi. Per concretizzare il possibile contributo delle comete, come la 67P/C-G, all'azoto presente nell'atmosfera terrestre (78%), gli scienziati assumono che il rapporto isotopico ¹⁴N/¹⁵N nella cometa di Rosetta sia lo stesso di quello misurato su Giove e nel vento solare, che riflette appunto quello della nebula protosolare. Tale rapporto va valutato, comunque, con la concentrazione di azoto nelle altre specie comuni, come HCN (acido cianidrico) e NH₃ (ammoniaca): sono infatti queste le principali differenze di un fattore superiore a 15, a non rendere plausibile un veicolamento di azoto sulla Terra da parte delle JFC, come la 67P/C-G.

Rosina ha scoperto concentrazioni di elementi ritrovati nelle meteoriti condriti carbonacee: le evidenze maggiori sono nel picco del numero di massa [A] pari a 23 e identificativo del sodio refrattario (Na), oltre alle abbondanze di potassio (K), e a tracce di calcio (Ca) e silicio (Si).

A ridosso del perielio, Rosetta ha assistito ad un'esplosione avvenuta nella regione di Anuket, sul collo della cometa, con fuoriuscita di materiale che viaggiava a velocità superiori ai 10 m/s: nei giorni precedenti lo scoppio si sono viste raddoppiare le concentrazioni di CO₂, quadruplicare quelle di CH₄ e addirittura aumentare di un fattore 7 quelle dell'H₂S.

Inoltre, la scoperta della presenza di un gas nobile estremamente volatile come l'argon (Ar), nella chioma della 67P/C-G, sottolinea l'impressionante sensibilità di Rosina. Negli spettri sono stati identificati due isotopi stabili, ³⁶Ar e ³⁸Ar, il cui rapporto è confrontabile con quello del Sistema Solare. Nel volo ravvicinato del Maggio 2016, con l'orbiter ad una distanza compresa tra i 5 e i 10 km dal nucleo, abbiamo aggiunto all'inventario dei gas nobili altre due specie: 5 isotopi di kripton (Kr) e ben 7 di xenon (Xe). I gas nobili reagiscono ra-

Fig.11 Prima rilevazione O₂



ramente con altri elementi presenti per formare molecole, solitamente restano nel loro stato stabile: i segni isotopici di questi, e di altri gas, aiutano a comprendere le proprietà chimico-fisiche dell'ambiente nel quale si sono formate le comete.

Il DFMS di Rosina ha fatto la prima rilevazione di sempre, su di una cometa, di ossigeno molecolare (O₂): misurazioni ad alta risoluzione hanno permesso di distinguere questa molecola dallo zolfo (S) e dal metanolo (CH₃OH). Questa scoperta, così come altre, è stata in realtà fatta da Rosina, ma annunciata dal gruppo di lavoro di Alice, a testimoniare che ogni singolo risultato è il frutto della collaborazione tra i gruppi coinvolti (Fig.11).

La rilevazione di O₂, così come le previsioni sulle sue abbondanze, da sempre sono un interesse per gli astronomi. Con Rosetta è stata scoperta un'inattesa abbondanza di O₂ nella chioma della 67P/C-G: si osserva una forte correlazione tra l'O₂ e le produzioni di H₂O, mentre non si osserva nessuna relazione tra l'O₂ e il CO o l'N₂.

Dopo serie di esperimenti di laboratorio, finalizzati a ricreare nella miglior maniera possibile le condizioni sulla superficie del nucleo, si deduce che l'O₂ viene rilasciato, in concomitanza all'evaporazione del ghiaccio d'acqua, per dismutazione (particolare reazione di ossidazione, nella quale un'unica sostanza in parte si ossida e in parte si riduce) della molecola di H₂O₂.

Tale molecola viene prodotta ciclicamente durante la crescita del mantello di ghiaccio d'acqua sui grani di polvere per sintetizzazione o dopo una lunga processazione: questa desorbe all'ultimo livello di sublimazione e subisce la reazione di dismutazione.

Si attende un rilascio di O₂ in fase gassosa, alla fine dell'evaporazione dei mantelli di ghiaccio; sembra plausibile che il valore medio nel rapporto tra O₂/H₂O in forma gassosa sia di pochi percentuali.

Per oltre un anno, Rosina ha studiato l'eterogeneità della chioma fornendo una descrizione dettagliata delle dinamiche dei principali volatili (H₂O, CO₂, CO, O₂), e i loro rapporti di abbondanza.

Dai modelli sullo studio della chioma, risulta confermata l'assunzione che le condizioni di illuminazione del nucleo sono un'importante guida per le attività del gas, le regioni attive evolvono in base alla stagione; questo è il caso tranne che per una dicotomia che suggerisce la presenza di uno strato di polvere, contenete acqua depositata nell'emisfero nord durante i precedenti perielii, che nasconde ghiacci di CO₂.

Lo studio dei dati raccolti da DFMS di Rosina, viene applicato al modello in grado di riprodurre l'evoluzione delle densità osservate, compresi i cambiamenti avvenuti all'equinozio. Mentre l'O₂ rimane correlato all'H₂O prima e dopo l'equinozio, il CO₂ e il CO che prima dell'equinozio non erano correlati, dopo mostrano una relazione. Le velocità di produzione derivate dal modello di chioma mostrano un cambiamento nelle curve dopo l'equinozio: il confronto tra modello e dati suggerisce che gli effetti stagionali nell'emisfero nord sono processati con una struttura stratificata, mentre nell'emisfero sud si ha esposizione costante di nuovo materiale.

2.5 MIDAS

Questo nuovo strumento equipaggiato su Rosetta, è parte della terna (con Cosima e Giada) degli strumenti dedicati allo studio della polvere cometaria.

Tale dispositivo comprende una sorta di imbuto posto in direzione della cometa per raccogliere i micro-frammenti di polvere espulsi, inviandoli su di un disco che, ruotando, li posiziona di fronte ad un microscopio: queste osservazioni da distanza ravvicinata aiutano a comprendere la connessione tra le scale più piccole e quelle maggiori di polvere che osserviamo.

Il sistema di micro-immagini Midas analizza i grani più piccoli di polvere, tipicamente dell'ordine del micron (μm) mostrandoli in 3D: in sostanza svolge lo stesso lavoro di Cosima, ma su scala inferiore. Midas ha rilevato due distinte categorie di popolazioni: piccoli grani compatti e più grandi aggregati di grani dall'aspetto poroso, per così dire "soffici".

Osservando le particelle di polvere alla lunghezza d'onda polarizzata che viene riflessa dai grani, si riscontrano caratteristiche molto simili alla polvere interstellare: la forma oblunga ricorda appunto quella delle conditi porose che compongono l'IDP (Interstellar Dust Grain), abbondante nel mezzo interstellare.

Le particelle risultano essere degli aggregati di grani più piccoli e allungati con strutture di dimensioni distinte, che porta a pensare ad una aggregazione di tipo gerarchico. Questa distinta varietà morfologica mostra come i grandi aggregati di particelle porose sono simili per elongazione alle conditi porose delle particelle di polvere interplanetaria: probabilmente, tali grani rappresentano una frazione di quel materiale che ha formato i blocchi di comete.

2.6 MIRO

Lo scopo dell'esperimento Miro è di studiare come cambiano le proprietà del nucleo in base alla profondità nella parte superiore della crosta, fino a qualche decina di centimetri al di sotto della superficie.

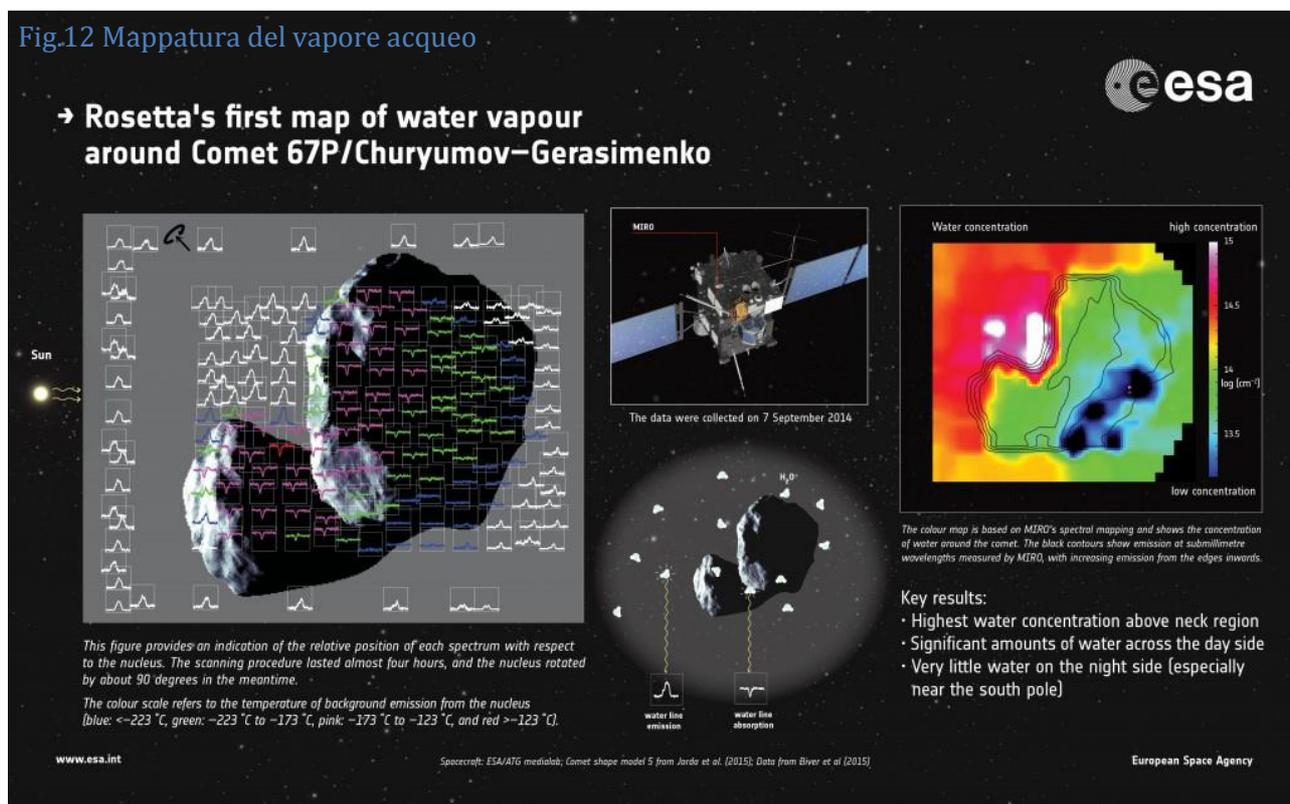
Lo strumento ha prodotto più di 1.5 milioni di spettri di gas cometari della chioma, ed è il primo strumento a microonde che lavora nell'intervallo dal millimetro al sub-millimetro, nello spazio profondo. Questo piccolo e leggero spettrometro può mappare le abbondanze, la temperatura e la velocità di rilascio del vapore d'acqua e di altre molecole, non di meno, determina la temperatura al di sotto della crosta superficiale.

A causa della combinazione della forma a doppio lobo e del suo asse di rotazione, la 67P/C-G ha un modello stagionale estremamente peculiare: le stagioni sono distribuite in modo totalmente irregolare tra i due emisferi, ognuno dei quali comprende parti di entrambi i lobi e del collo.

Per la maggior parte del periodo orbitale della cometa, l'emisfero nord vive una lunghissima estate persistente per circa 5.5 anni terrestri, al contrario, l'emisfero sud cade in lungo freddo e scuro inverno. All'arrivo di Rosetta, nell'Agosto 2014, l'emisfero sud non poteva essere fotografato dalla camera scientifica OSIRIS: l'assenza di illuminazione diretta e le temperature, tra i 20 e i 50 gradi al sopra dello zero assoluto, non permettevano osservazioni nemmeno con VIRTIS; l'unico strumento in grado di osservare e rappresentare il polo sud è stato Miro.

Miro rilevava emissioni di molecole di acqua misurando l'emissione diretta di vapore d'acqua nella chioma ed osservando l'assorbimento della radiazione, da parte del nucleo, alle frequenze specifiche dell'acqua laddove la radiazione attraversava la chioma (Fig.12). Dalle osservazioni è risultato evidente che la distribuzione di acqua nella chioma è altamente disomogenea: appena al di sopra della regione del collo, la densità di colonna d'acqua è risultata di due ordini di grandezza superiore rispetto a qualsiasi altro punto della chioma: negli ultimi tre mesi la quantità d'acqua "versata" nello spazio, sotto forma di vapore, è incrementata fino a 10 volte.

Fig.12 Mappatura del vapore acqueo



Contrariamente alle attese, siamo rimasti sorpresi dalla difficoltà che ha avuto lo strumento a rilevare gas di CO a causa della sua forte interazione con le onde radio: dopo un anno di osservazioni, in prossimità del perielio e con il contributo di Rosina, il gas di CO si è visto abbondare particolarmente nell'emisfero sud.

La misura dell'emissione polarizzata dalla superficie è uno degli studi più complessi eseguiti sulla cometa, di fatto, la maggior parte delle onde radio emesse risulta essere non polarizzata e l'orientazione dei campi elettromagnetici casuale. Le onde radio emesse dal nucleo subiscono un cambiamento quando colpiscono la zona di confine tra lo spazio profondo e l'atmosfera (chioma), permettendo di ricavare entrambe le polarizzazioni e analizzare le proprietà del nucleo.

In termini di proprietà termiche, il nucleo della 67P/C-G mostra una relativa uniformità su tutta la superficie e fino a pochi centimetri al di sotto di essa: altri aspetti del nucleo, come la composizione, sembrano variare da regione a regione.

I calcoli sul modello termico delle temperature del nucleo vicino alla superficie, suggeriscono che le regioni dell'emisfero sud hanno un'inerzia termica entro un intervallo tra $10 \div 60 \text{ J m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-0.5}$: piccoli valori, consistenti con una superficie porosa simile alla regolite, e che non si discostano significativamente dalle altre regioni del nucleo. La grande differenza sta nelle temperature di luminosità con il lato illuminato, attribuite alle proprietà dielettriche, entro alcune decine di centimetri di profondità. Appare quindi che, il materiale superficiale o quello a qualche decina di centimetri al di sotto della superficie contiene grandi quantità di ghiaccio. In generale, questa condizione deve essere originata dal peculiare ciclo stagionale: il vapore d'acqua e gli altri gas (prevalentemente CO e CO₂) che al perielio precedente sono sublimati senza disperdersi nello spazio, per effetto del nuovo e lungo inverno, riconsolidano e precipitano sulla superficie.

2.7 CONSERT

L'esperimento radar Consert è uno strumento innovativo per le missioni spaziali ai corpi minori, costruito appositamente per la missione Rosetta, è composto da due unità separate equipaggiate sia sull'orbiter che sul lander Philae: certamente la sua tecnologia sarà utilizzata anche per le future missioni.

Consert lavora trasmettendo un segnale radio dall'orbiter al lander e, con la corretta geometria, attraversa il nucleo della cometa dando la possibilità di analizzarne l'interno: le variazioni sul tempo di propagazione e sull'ampiezza dell'onda radio forniscono dati sulle proprietà dei materiali costituenti e la possibilità di stabilire la forma tomografica del nucleo cometario.

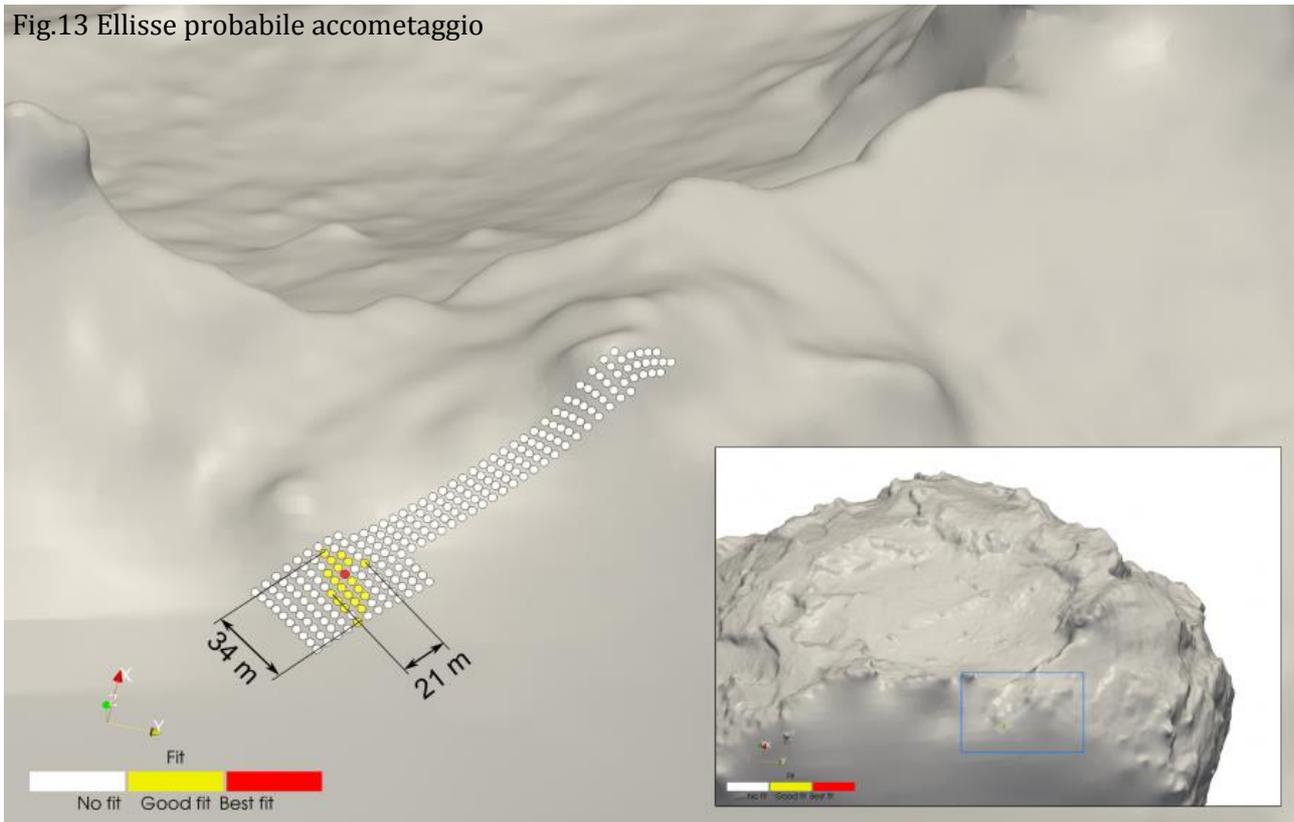
Il tempo di viaggio del segnale dipende da un parametro noto come permittività, correlata alla porosità, alla composizione, alla temperatura e alla struttura propria del nucleo. Il valore approssimato di permittività che riscontriamo per la 67P/C-G è di 1.27.

I risultati rivelano che il lobo più piccolo della cometa è consistente con una miscela di ghiaccio e polvere poco compattate ed ha una porosità tra il 75 e l'85%; in cima ad entrambi i lobi, la cometa è completamente omogenea su scale di decine di metri, mostrando un rapporto polvere/ghiaccio per unità di volume compreso tra 0.4 e 2.6.

Le comete sono note per essere una miscela di polvere e ghiaccio, e se molto compatte dovrebbero essere più pesanti dell'acqua: tuttavia, le precedenti misure hanno mostrato che alcune comete hanno densità estremamente basse, inferiori al ghiaccio d'acqua (0.917 g/cm^3). La bassa densità implica che sono molto porose, e la spiegazione più ragionevole è che la porosità della 67P/C-G sia una proprietà intrinseca delle particelle di polvere mescolate con il ghiaccio che compone il suo interno: sin dalle prime misure di Cosima e Giada, si è dimostrato che la polvere non appare essere un solido compatto, ma piuttosto un aggregato soffice, con particelle ad alta porosità e bassa densità.

L'insieme degli esperimenti hanno confermato l'assenza di cavità all'interno del nucleo della 67P/C-G. Come noto, Rosetta è trascinata dalla gravità della cometa: l'effetto della gravità sui movimenti dell'orbiter è misurata da cambi nella frequenza dei segnali di Rosetta quando questi sono spediti a Terra, evidente manifestazione dell'effetto Doppler ogni qual volta c'è uno spostamento tra sorgente e osservatore. Le variazioni nel segnale che abbiamo ricevuto dall'antenna di 35 metri, a New Norcia in Australia, sono state analizzate per dare un'immagine del campo gravitazionale intorno alla cometa: per grosse cavità interne dovrebbero esserci evidenti variazioni nell'accelerazione dell'orbiter. In termini pratici, rimosse l'influenza del Sole, dei pianeti, dei grandi asteroidi che occupano la fascia principale, la pressione della radiazione solare e la coda di gas che sfugge dalla cometa, tutti fortunatamente noti e facilmente calcolabili con procedure standard, hanno portato ad affermare che la 67P/C-G trascina Rosetta da ogni suo punto, e ad escludere quindi l'esistenza di cavità al suo interno.

Fig.13 Ellisse probabile accometaggio



Infine, Consert ha giocato un ruolo principale nel ritrovamento di Philae, dopo l'accometaggio non completamente riuscito del 12 Novembre 2014: la combinazione di dati, come il tempo di viaggio del segnale tra le due navette, la traiettoria di Rosetta e il miglior modello di forma della cometa, hanno dato al gruppo di lavoro la possibilità di stabilire che il lander avesse terminato il “volo fuori programma” all'interno dell'area di un ellisse di 21×34 metri (Fig.13). Il 9 Luglio 2015 il gruppo di lavoro di Consert ha reso possibile il più lungo contatto mai avvenuto tra Rosetta e Philae, con un collegamento durato 22 minuti ed uno scambio di 246 pacchetti di dati.

2.8 ALICE

Lo strumento Alice è uno dei tre esperimenti NASA a bordo della navetta dell'ESA: si tratta di uno spettrografo per la raccolta di immagini nel lontano ultravioletto.

La storia di Alice ci racconta che questo strumento è già stato equipaggiato a bordo del ricognitore lunare LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) per mappare la riga Lyman Alpha nel nostro satellite, così pure nelle missioni spaziali Juno, verso Giove, e New Horizons verso Plutone, raggiungendo verosimilmente ogni angolo del nostro Sistema Solare.

Lo scopo principale di questo strumento è quello di contribuire alle indagini sulla composizione elementare del nucleo e, attraverso lo studio delle collisioni degli elettroni con le molecole nella chioma, aiutare a comprendere l'attività della polvere e delle particelle attorno alla cometa.

Alice fissa degli standard elevati per la sua categoria e fornisce il primo spettro nel lontano UV della superficie della 67P/C-G: molto scuro, il corpo appare riflettere una piccolissima percentuale di luce ultravioletta incidente, anche se in maniera piuttosto uniforme; poco dopo l'arrivo di Rosetta a destinazione, Alice ha contribuito alla rilevazione di idrogeno e ossigeno molecolare nella chioma.

2.9 RPC

L'esperimento RPC comprende una serie di 5 sensori destinati allo studio di vari fenomeni, tra i quali l'interazione della cometa con il vento solare, le variazioni di attività del nucleo, ed un'ampia serie di informazioni complementari sull'ambiente di plasma che circonda la 67P/C-G.

Le precedenti missioni spaziali dedicate allo studio delle comete si erano sempre mantenute a grandi distanze, sfrecciando a velocità di decine di km/sec: le missioni ICE e Sakigake, già equipaggiate con alcuni sensori RPC, rilevarono attività di onde acustiche a bassissima frequenza note come "onde classiche di tipo cometario", sia per la cometa di Halley che per la Giacobini-Zinner, considerate sino a quel momento come prodotte dall'attività della cometa.

Rosetta, unica nel suo genere, è stata posta in orbita attorno alla cometa a poche decine di km, e con una bassissima velocità relativa ha consentito di raggiungere la 67P/C-G ancora quando si trovava in uno stato per così dire "dormiente". Dal momento dell'arrivo, e per un periodo di circa quattro mesi, il magnetometro RPC-MAG ha "ascoltato" un particolare suono emesso tra i 40 ÷ 50 mHz in migliaia di occasioni: di certo un evento senza precedenti che ha colto di sorpresa l'intera comunità scientifica.

Lo spazio interplanetario è pervaso da un flusso di particelle elettricamente cariche che trasporta campi magnetici dal Sole lungo tutto il Sistema Solare: questo gas conduttivo è ostruito nel suo cammino dal rilascio di gas e polveri nello spazio da parte della cometa che, avvicinando il Sole, sublima le specie volatili.

L'interazione del plasma con la chioma ionizza la parte esterna dell'atmosfera, e gli ioni colpiti dai campi elettrici e magnetici vengono accelerati ad alte velocità perpendicolarmente al campo magnetico, in direzione dei campi elettrici, generando un campo elettrico incrociato. La densa atmosfera della cometa, ionizzata ed elettricamente conduttiva, comincia ad opporre resistenza al vento solare inducendo la formazione di una magnetosfera, una regione circoscritta che deflette il vento solare e funge da schermo alla cometa (Fig.14): questo ha aiutato a comprendere come il vento solare interagì con i pianeti durante la fase iniziale della loro formazione.

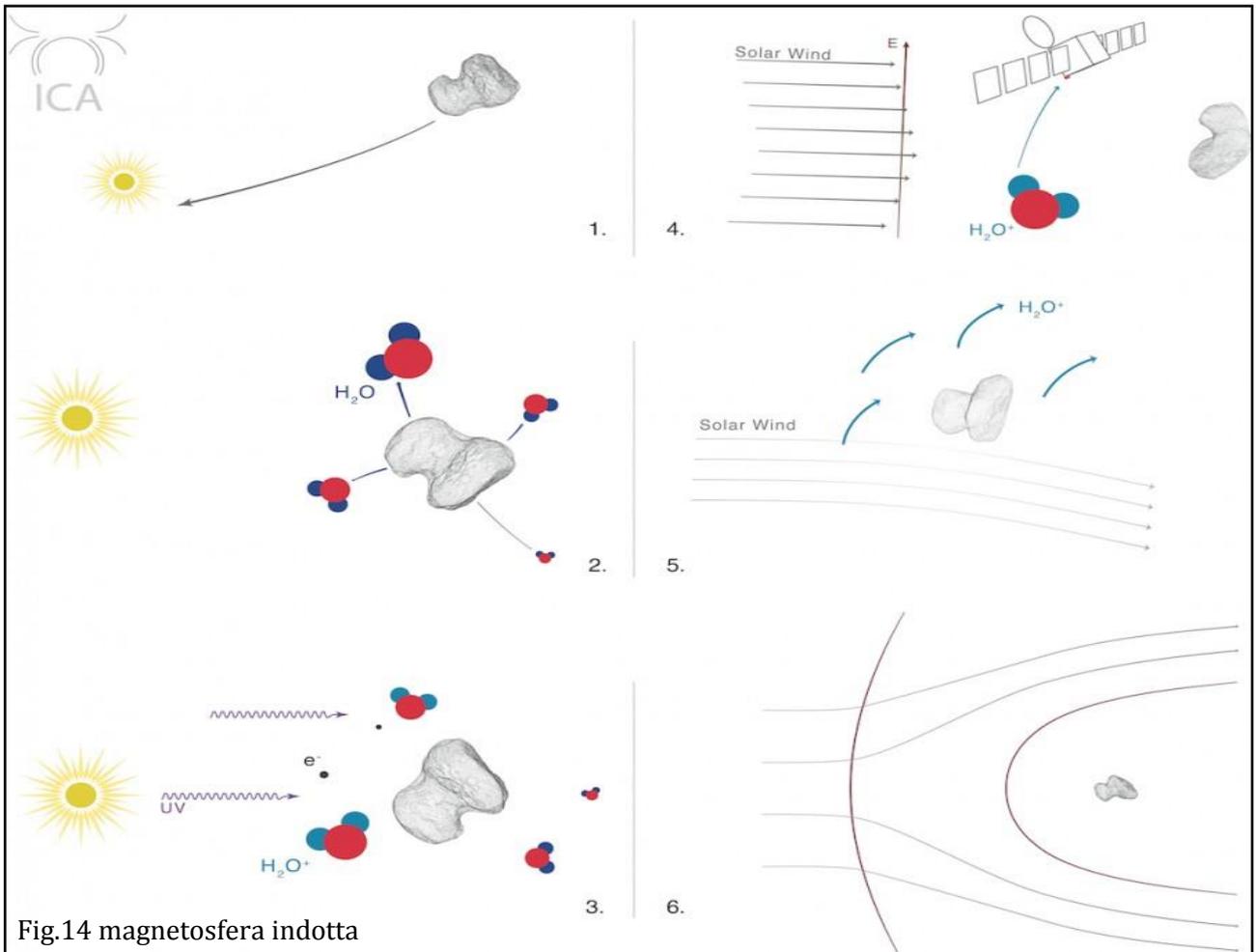


Fig.14 magnetosfera indotta

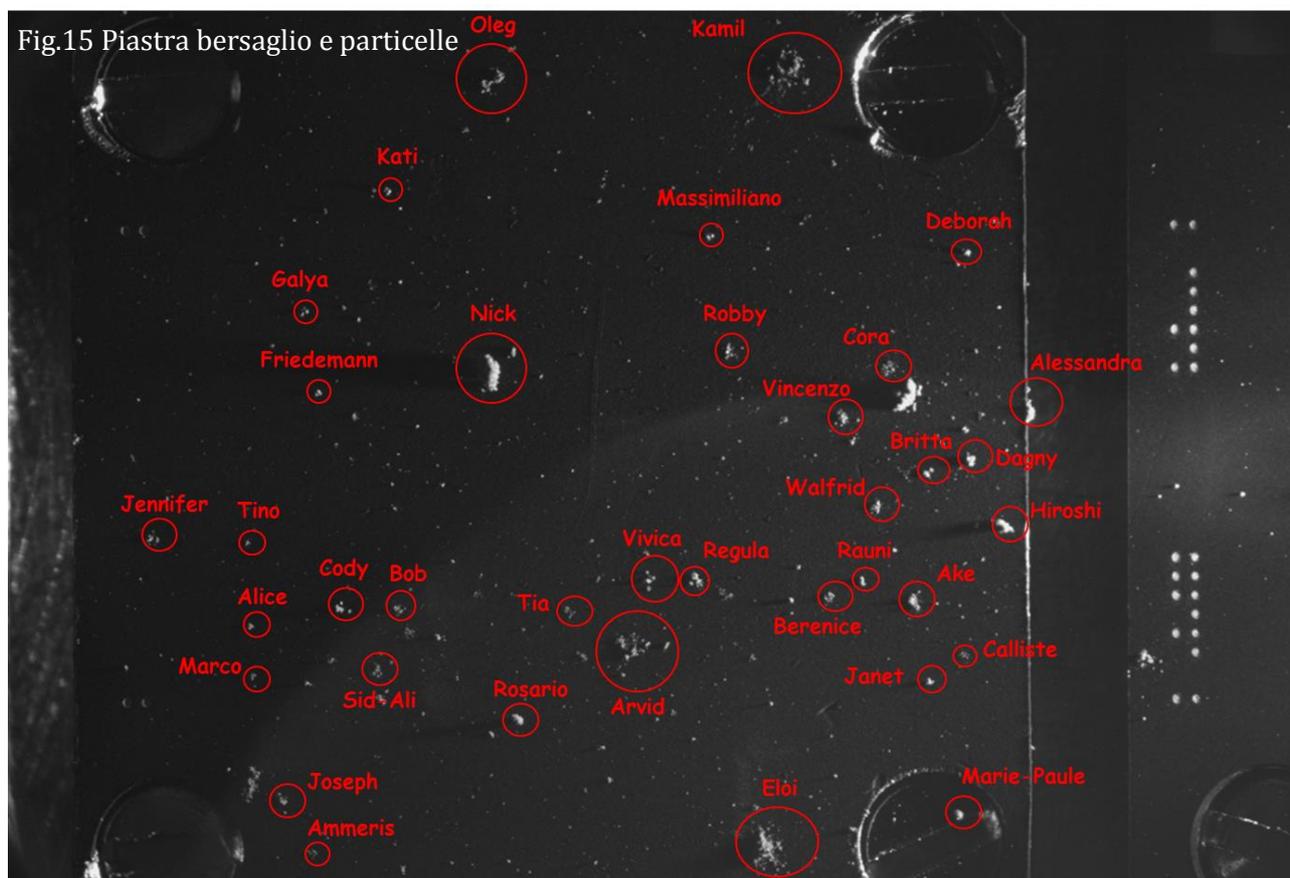
Quando tre decenni fa la sonda Giotto sorvolò la cometa di Halley, rilevò una vasta regione senza attività magnetica (cavità diamagnetica) estesa oltre i 4000 km dal nucleo; la sorpresa è che Rosetta ha rilevato una tale depressione molto più vicino al nucleo.

Come già noto dalle precedenti missioni alle comete, il nucleo della 67P/C-G non ha mostrato un campo magnetico proprio: dunque, sono le fluttuazioni del campo magnetico indotto, nell'interfaccia tra lo spazio profondo e la chioma, a generare l'emissione delle onde acustiche che abbiamo ascoltato e che modificano continuamente forma e dimensione della magnetosfera.

Infine, il sistema RPC, ha permesso di scambiare informazioni tra orbiter e lander attraverso lo strumento ROMAP, montato su quest'ultimo, durante la fase di atterraggio: l'uso dei dati combinati ha permesso di interpretare le dinamiche di Philae, e confermare definitivamente l'assenza di campi magnetici prodotti dal nucleo della 67P/C-G.

2.10 COSIMA

L'esperimento Cosima di Rosetta è dedicato alla raccolta e all'analisi composizionale (così come Giada e Midas) delle particelle di polvere nella chioma della 67P/C-G, allo scopo di



studiarne le proprietà fisiche, a partire da una distanza eliocentrica di circa 3.5 U.A..

In oltre due anni di lavoro, le 24 piastre bersaglio da 1cm² di Cosima hanno raccolto più di 30000 particelle di polvere, di cui almeno 2000 singolarmente nominate (Fig.15) e catalogate; rispetto alle precedenti missioni di volo ravvicinato su delle comete, come Giotto o Stardust, dove i grani raccolti impattavano i bersagli a velocità comprese tra i 5 e i 70 km/sec, qui i grani raccolti giungevano con una velocità relativa molto più bassa, appena 100 m/sec: anche se non è ancora chiaro in che maniera l'energia dell'impatto, trasformata in calore (temperatura massima stimata circa 5°C) possa alterare i grani. Per la prima volta si studiano dei grani di polvere provenienti dal di là della cosiddetta "linea del ghiaccio del Sistema Solare", distanza dal Sole alla quale si possono formare grani ghiacciati.

Cosiscope, microscopio di Cosima, risolve grani di polvere della dimensione di almeno 10 µm ma, tra le caratteristiche principali di questo strumento, c'è la peculiarità di scindere i grani nei loro costituenti fondamentali per mezzo di un cannone che li colpisce con un fascio di atomi di indio 115.

La rilevazione di magnesio, presente nelle olivine e nei pirosseni di cui tutte le comete sono costituite, non ha sorpreso gli scienziati così come la presenza del sodio refrattario: le particelle rilasciate contengono una minima quantità di sodio simile alla polvere interplanetaria, che tipicamente si trova nelle meteore di origine cometaria, come le annuali Perseidi (109P/S-T) e/o Leonidi (55P/T).

La chioma e la coda delle altre comete avevano già mostrato sodio, come la Hale-Bopp nell'Aprile '97 nel suo passaggio ravvicinato al Sole, ma la 67P/C-G non ne aveva dato segno sino al campionamento della polvere: stiamo cercando di comprenderne la sorgente.

Il gruppo di Cosima ha valutato ogni possibile correlazione tra i dati e la durata dell'esposizione dei bersagli per ogni tipo di grano di polvere: il flusso, la distribuzione di dimensione e la morfologia delle componenti sono state monitorate con risoluzione temporale giornaliera e settimanale; le velocità di raccolta sono molto variabili, e non per forza dovute all'attività della cometa, anche se è confermata la grande raccolta con la navetta più vicina al nucleo. La raccolta non avviene mai in modo continuato, piuttosto a raffica, anche se non sappiamo se questo sia imputabile alla distanza della navetta, ai tempi di risoluzione limitati o anche alla possibile frammentazione all'interno dell'imbuto di raccolta.

Le famiglie dei grani di polvere sono distintamente due: particelle compatte e aggregati porosi (Fig.16), con quest'ultimi a loro volta suddivisi in aggregati frantumati, aggregati appiccicati e cumuli.

Le particelle compatte hanno dimensioni comprese tra le decine e le centinaia di μm , invece gli aggregati raggiungono anche dimensioni del mm: la classificazione si basa su fattori come la complessità all'apparenza, l'altezza sul bersaglio e la forza di coesione, in realtà tutte proprietà connesse tra loro.

Le particelle compatte, solitamente isolate, sono caratterizzate da bordi definiti ed una piccola area di contatto nel bersaglio, in generale si può affermare che mostrino una buona forza di coesione.

Gli aggregati mostrano avere sotto componenti ben definite e la loro suddivisione viene fatta sulla base di dimensione, altezza e morfologia nella distribuzione: molto probabilmente gli aggregati frantumati sono una via di mezzo tra gli altri due e rappresentano un arrangiamento dopo l'impatto col bersaglio.

La sostanziale differenza tra gli aggregati appiccicati e i cumuli sta nella matrice di connessione dei loro costituenti: negli aggregati appiccicati le sotto componenti appaiono collegate insieme da una matrice di consistenza irregolare, ma poiché le loro superfici di contatto non sono confrontabili alle altezze, la matrice di connessione non è idonea a mantenerne la forma; nei cumuli le sotto componenti devono essere molto più piccole e la loro forma tipicamente conica mostra apparenti linee di frattura che indicano una scarsa connessione alla matrice da parte dei costituenti.

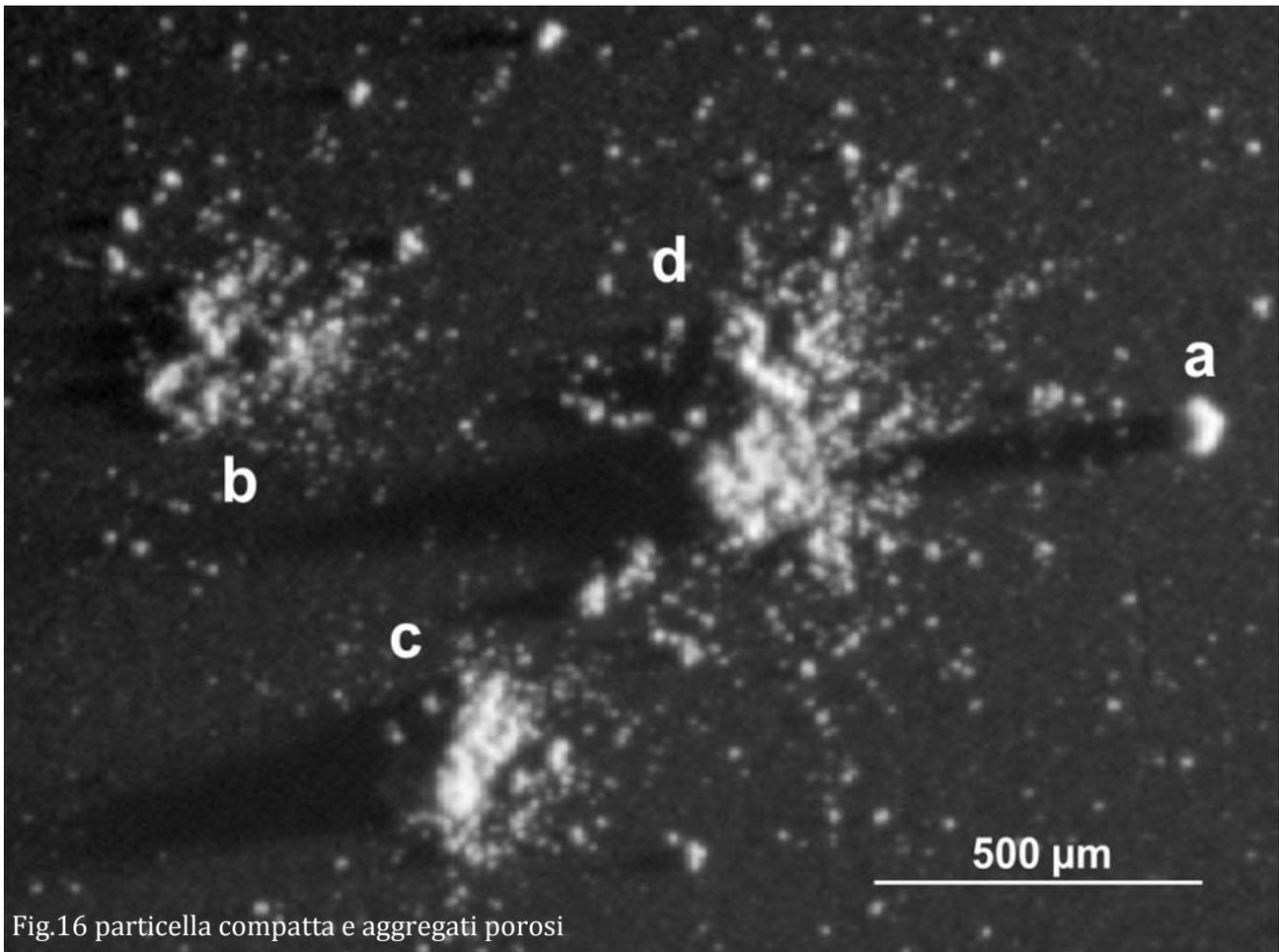


Fig.16 particella compatta e aggregati porosi

Considerando che gli eventi di maggior raccolta includono tutte le specie di grani, e assumendo che entrambe le famiglie condividano un percorso simile dalla cometa sino all'orbita, si ritiene che le particelle compatte si originino direttamente dalle zone attive, come già confermato dai dati di Giada. Per distanze inferiori a 2.5 U.A. dal Sole, le particelle compatte rappresentano circa il 30% dei frammenti raccolti, mentre il materiale poroso rappresenta il 75% del volume, e circa il 50% in numero di particelle raccolte: a bassa risoluzione il materiale poroso è simile per consistenza alle particelle di polvere interstellare di condrite porosa raccolte nella stratosfera della Terra.

In termini di raccolta possiamo esprimere che per alti angoli di fase il flusso di polvere segue una legge che va con $1/d^2$ potendo escludere frammentazioni durante il percorso cometa-orbita, invece a bassi angoli di fase la legge è molto più dispersiva rispetto alla precedente, ma la semplice frammentazione non può spiegare il risultato.

Per la distribuzione, si segnala che le particelle superiori ai 150 μm seguono una legge del tipo $r^{-0.8 \pm 0.1}$, (dati in accordo all'esperimento Giada); per le particelle comprese tra i 30 e i 150 μm , nella medesima legge si ha un'indice di potenza di -1.9 ± 0.3 . Infine per particelle inferiori ai 30 μm la distribuzione è piatta, ad indicare che sono ancora le forze di van der Waals a fornire il legame più forte tra i sotto costituenti.

L'eccesso di polvere compresa tra i 10 e i 100 μm , rispetto a quella tra i 100 μm e 1 mm, evidenzia che le prime possono essere frammentate appena dopo essere state rilasciate come particelle più grandi, visto che non ci sono evidenze significative di frammentazioni interne alla chioma.

Si ritiene che i grani rilevati siano quelli rimasti bloccati sulla superficie dopo il precedente passaggio al perielio, quando i flussi di gas espulsi si sono calmati e non sono più stati in grado di sollevare polvere dalla superficie, ricominciando non appena l'attività della cometa riprende, in concomitanza al suo approssimarsi al Sole.

CAPITOLO 3

PHILAE

Con le precedenti otto missioni alle comete, la comunità scientifica si è costruita una figura sulle proprietà di queste capsule temporali cosmiche, ma la possibilità di eseguire misure scientifiche direttamente sulla superficie di una cometa è un evento senza precedenti e rappresenta una delle chiavi dell'intera missione Rosetta: Philae è il primo manufatto umano ad eseguire un atterraggio controllato sul nucleo di una cometa.

Lo scopo iniziale della missione prevedeva una settimana di attività di Philae sulla superficie della cometa anche se, nella migliore delle ipotesi, il lander avrebbe potuto operare per alcuni mesi; la generazione della potenza a bordo era affidata a due differenti sistemi, una batteria primaria che immagazzinava 1 kWh di energia per le prime ore di esercizio, ed una batteria secondaria alimentata da pannelli fotovoltaici che avrebbe fornito l'energia necessaria al lander per il resto della missione, ricaricandosi ogni giorno nelle fasi di insolazione.

Philae è stato trasportato sul lato della sonda madre Rosetta per milioni di chilometri attraverso il Sistema Solare, in un viaggio durato oltre dieci anni, sino all'incontro con la 67P/C-G, il 6 Agosto 2014; con le osservazioni condotte nelle prime settimane sulla superficie della cometa si cercò di individuare un sito adatto all'accometaggio del lander: un luogo che potesse soddisfare per requisiti tecnici di sicurezza la traiettoria di discesa e la durata giornaliera di illuminazione solare, ma che fosse anche scientificamente idoneo per gli esperimenti da eseguire in situ.

Prima che l'attività della cometa potesse diventare così intensa da poter disturbare la fase di discesa, il gruppo del volo dinamico ha proceduto allo sgancio di Philae, seguendo la caduta libera verso il nucleo della cometa, durato circa sette ore.

Le comunicazioni non sono mai avvenute direttamente con la Terra, ma utilizzando Rosetta come elemento di collegamento, soprattutto per ridurre il quantitativo di energia richiesta al lander.

3.1 IL PRIMO LANDER

Il 12 Novembre 2014 alle 16:03 GMT/17:03 CET, mentre Rosetta orbitava a 17 km di distanza dal nucleo cometario, il centro operazioni spaziali coordinatore, ha dato conferma dell'avvenuto accometaggio di Philae sul sito di Agilkia.

Durante la discesa, lo strumento Consert ha operato per circa 6 ore, fino a 50 minuti prima dell'atterraggio: le distanze misurate tra Rosetta e il lander corrispondevano alla pianificazione iniziale.

Come da programma, le tre gambe si sarebbero dovute dispiegare alla fine della discesa balistica, smorzando la maggior parte dell'energia cinetica e riducendo al minimo le possibilità di un errato posizionamento.

Purtroppo, il primo segnale di ritorno dati ha rivelato il mancato fissaggio al suolo. E' parso evidente sin da subito che Philae non si sia correttamente allineato, probabilmente per l'insufficienza di ghiaccio superficiale che non ha permesso all'arpione di penetrare in sicurezza o, forse, l'arpione non è stato nemmeno sparato: di fatto, il lander ha cominciato a rimbalzare senza controllo per circa due ore sulla superficie.

Sostenuto dalla debole gravità della cometa, Philae ha compiuto quattro tocchi sul suolo balzando tre volte e, dopo aver percorso più di 1 km, ha fatto perdere le proprie tracce, finendo per terminare l'inaspettata carambola completamente fuori obiettivo.

I dati preliminari di Consert hanno suggerito che Philae possa aver viaggiato vicino ad una grande depressione, chiamata Hatmehit sul lobo più piccolo della cometa, e malgrado l'antenna si sia trovata in una configurazione sfavorevole, si è comunque operato con successo la prima sequenza scientifica sulla cometa: la cruciale incertezza stava nella durata della batteria primaria, che si sarebbe potuta spegnere prima della fine di questa sequenza iniziale. La batteria secondaria si sarebbe caricata coi pannelli solari di Philae, quindi vista l'orientazione sfavorevole del lander, questo avrebbe rappresentato un forte impatto sul bilancio energetico per permettere di condurre esperimenti in tempi più lunghi.

Nei giorni e nelle settimane seguenti, il gruppo di lavoro di Osiris ha continuato la ricerca di Philae con una dettagliata riesamina delle nuove immagini che arrivavano, ma data l'irregolarità del terreno, le minute dimensioni del lander e la distanza di Rosetta dalla cometa, si è rivelato un lavoro estenuante.

Un tale imprevisto ha sconvolto parzialmente il programma della missione: i piani di Rosetta erano stati precedentemente pianificati, quindi non era previsto "cercare" Philae, ma se le traiettorie dell'orbiter non erano modificabili, lo erano i puntamenti per poter raccogliere immagini sulle zone interessate.

Le immagini con risoluzione più alta prese sulla regione di interesse, dopo l'atterraggio del lander, hanno fatto parte di una ricerca minuziosa esclusivamente finalizzata al ritrovamento di Philae, a partire dalla metà di Dicembre.

Con Rosetta a 18 km di distanza, NAC di Osiris ha una risoluzione di 34 cm per pixel. La dimensione di Philae è di circa un metro e, con le sue gambe che si estendono fino a 1.4 metri dal centro della struttura si è preso in considerazione dimensione, riflessività e orientazione del lander oltre alla risoluzione intrinseca delle ottiche della fotocamera: il gruppo di lavoro Osiris si aspettava che Philae non occupasse più di qualche pixel nelle immagini raccolte. Per fortuna, attraverso i segnali radio spediti tra orbiter e lander, come previsto nell'esperimento Consert, si è potuto restringere il campo di ricerca all'interno di un'ellisse di 16×160 metri. Pur essendo questa la miglior stima in termini di probabilità statistica, che si basa su una serie di simulazioni e sul modello attuale assunto della forma della cometa, è stato possibile eliminare un enorme quantità di candidati, ma la ricerca non ha dato nell'immediato i risultati sperati.

Alle 20:18:11 UTC del 13 Giugno 2015, Philae e Rosetta sono riusciti a stabilire il loro primo contatto a doppia via dal Novembre 2014: in 78 secondi, il lander ha passato 343 pacchetti di dati telemetrici, per un totale di 100 Kbyte di informazioni. Dopo aver seguito gli sviluppi di Philae da Rosetta, siamo certi che il lander abbia lavorato per circa due giorni prima di cadere in ibernazione: la questione fondamentale era l'insufficienza di luce solare per caricare la batteria secondaria. Dato il grande numero di incognite sul sito finale di approdo, è stato difficile poter dire quando Philae si sia "svegliato" mentre la cometa appiccava al Sole e l'intensità della luce solare incrementava. La questione più importante era rappresentata dall'abilità dell'hardware di sopravvivere a temperature estremamente basse, ben al di sotto dei -55°C per cui era stato progettato: ciò di cui eravamo a conoscenza era

che le condizioni minime per un risveglio prevedevano almeno una temperatura di -45°C e una potenza di 5.5 Watt.

Dopo il primo contatto è stato chiaro che l'orologio del lander non fosse più sincronizzato con Rosetta; al risveglio di Philae, si è presa la decisione di ottimizzare le traiettorie dell'orbiter per migliorare i contatti, dando priorità a questa attività: si è definito che l'intervallo di latitudine della cometa dove si trovasse il lander fosse compresa tra 0° e 55° Nord.

Con le analisi iniziali, e nonostante gli imprevisti della discesa, gli scienziati hanno creduto che Philae non avesse subito danni alla strumentazione di bordo. Le successive indagini hanno invece evidenziato dei problemi di malfunzionamento ad una delle due unità di trasmissione, per di più confermando che anche una delle due unità riceventi era stata irrimediabilmente danneggiata, forse proprio durante la serie dei balzi.

Dal 14 al 24 Giugno 2015 ci sono stati altri cinque contatti, ma lo scambio di informazioni non è mai stato stabile, inoltre non si ha mai avuto la certezza di poter ricevere un buon segnale.

Nelle successive due settimane i continui tentativi di contattare Philae hanno dato esito negativo, facendo pensare che l'unica trasmittente ancora funzionante fosse fuori uso: il gruppo di lavoro pensò di utilizzare l'esperimento Consert. Nel secondo tentativo del 9 luglio, venne ripristinato un breve ma efficace contatto durato circa 22 minuti, con un'interruzione di 12, ma nel quale vennero raccolti ben 246 pacchetti di dati, si può parlare del più lungo contatto tra Rosetta e Philae.

Poiché la sicurezza della navetta ha da sempre rappresentato la priorità della missione, dopo mesi di estenuante ricerca del lander nel fine settimana del 10/11 luglio 2015, Rosetta è stata spostata a circa 180 km di distanza dal nucleo della 67P/C-G: la confusione creata dalla polvere di particelle sollevata in maniera considerevole per l'approssimarsi al Sole, ha reso l'ambiente particolarmente pericoloso per la navetta, inoltre nessuno aveva previsto che Philae potesse lavorare anche dopo il passaggio al perielio.

Come pianificato, dopo il 25 luglio 2015 la traiettoria di Rosetta è stata spostata verso l'emisfero sud, e nelle due settimane successive non è stato più possibile comunicare con il lander.

Meno di un mese prima della fine della missione, la fotocamera ad alta risoluzione di Rosetta ha rintracciato il lander Philae incastrato in una scura depressione sul sito di Abydos, nel piccolo lobo della 67P/C-G (Fig.17).

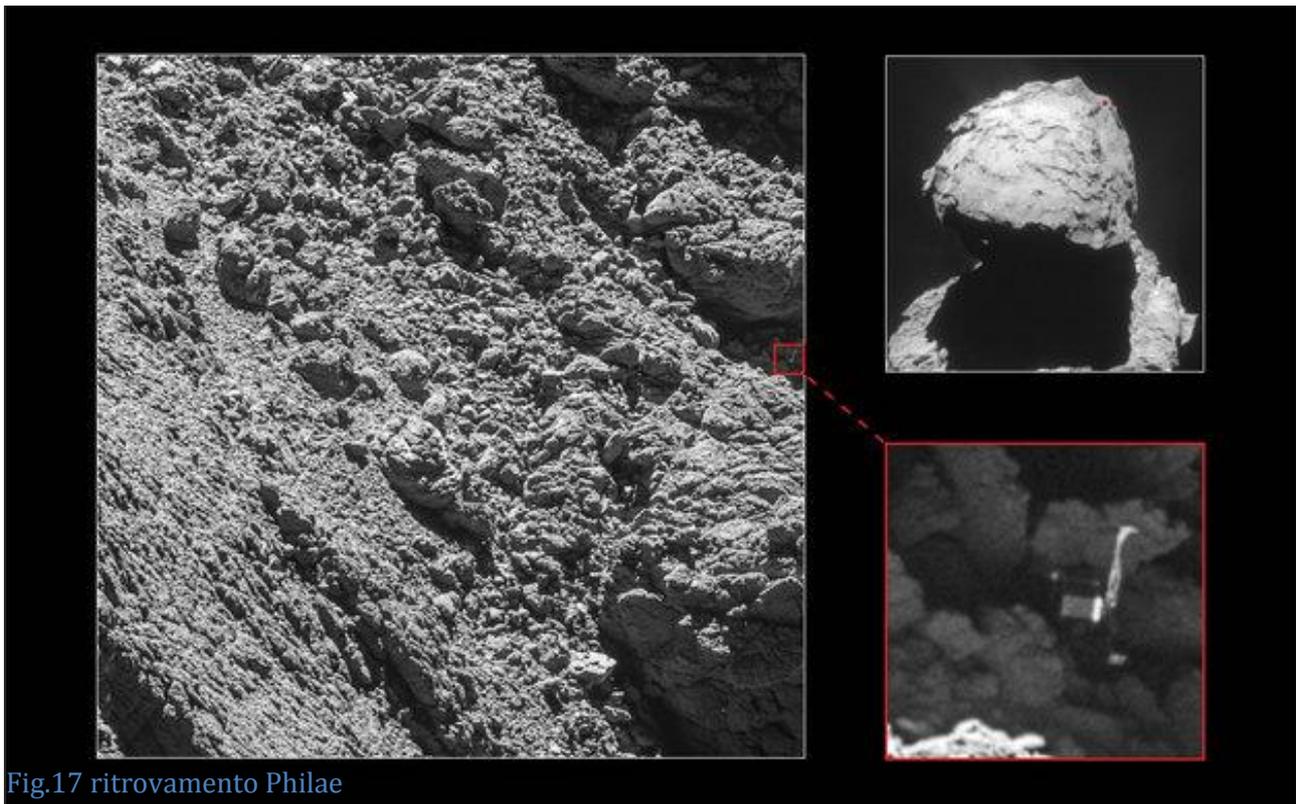


Fig.17 ritrovamento Philae

Le immagini raccolte il 2 settembre 2016 da Osiris, con l'orbiter entro i 2.7 km di distanza dalla superficie e risoluzione di 5 cm/px, hanno chiarito che il ripristino delle comunicazioni si era complicato proprio per la posizione che Philae aveva assunto: nelle immagini risultava chiaramente ribaltato e con due dei tre arpioni non fissati al suolo.

Questo ritrovamento ha messo fine ad una ricerca minuziosa proprio nelle ore finali di una missione durata oltre un decennio, quando ormai si erano perse per sempre le speranze di comprendere dove il lander si fosse fermato.

3.2 LA STRUMENTAZIONE DI BORDO

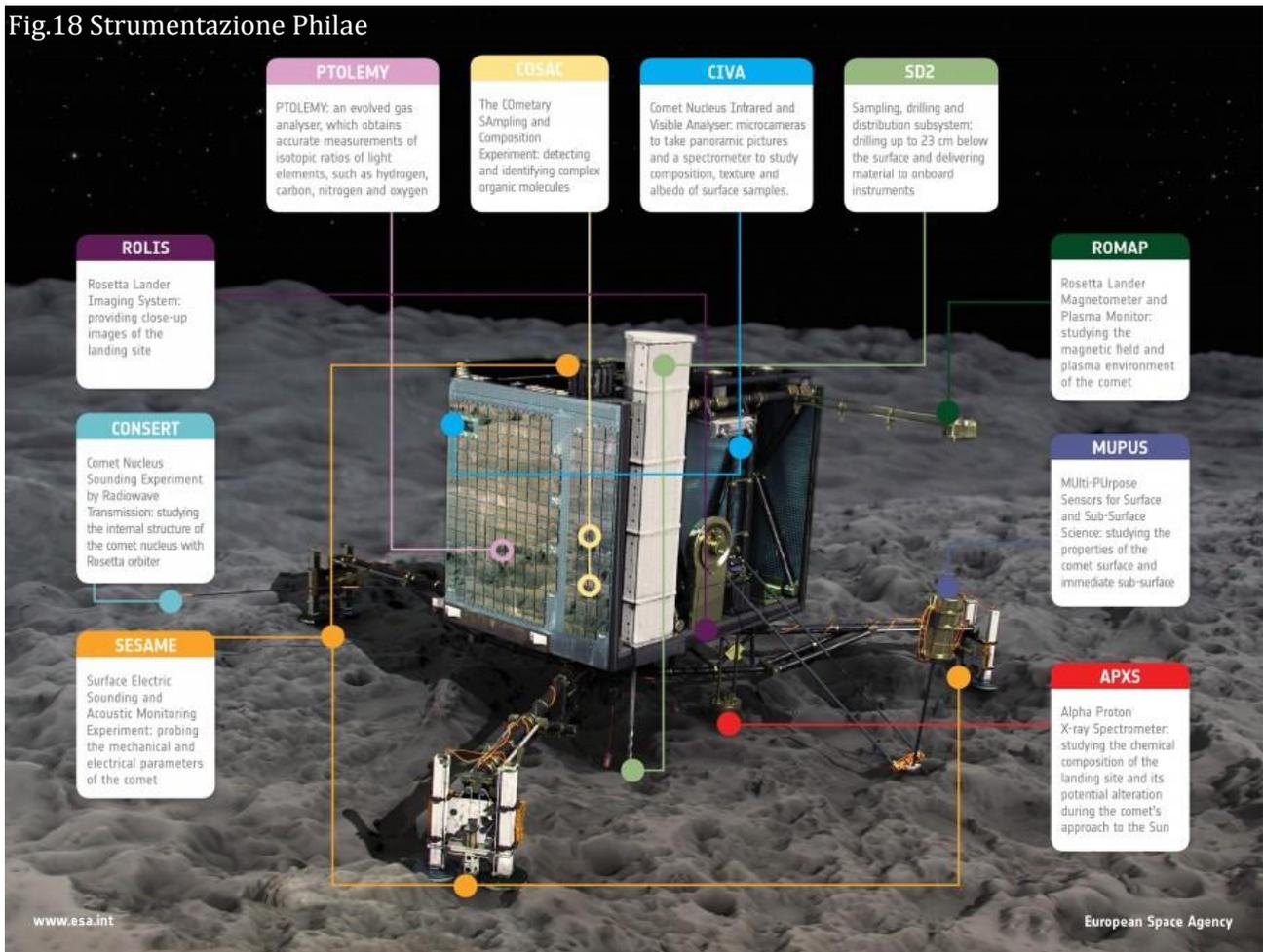
I 100 kg del lander di Rosetta sono stati forniti da un consorzio europeo guidato dall'Istituto di Ricerca Aerospaziale tedesco (DLR): gli altri membri del consorzio ESA sono gli Istituti di Austria, Finlandia, Francia, Ungheria, Irlanda, Italia e Regno Unito. Questo concentrato di tecnologia dalla forma di scatola è completamente costituito da fibra di carbonio: la sua costruzione poligonale, interamente ricoperta da celle solari, nasconde un cofano al di sotto del quale si trovano una decina di strumenti, oltre ad una serie di sofisticati sottosistemi.

La dotazione del piccolo robot è idonea ad eseguire esperimenti ed analisi sulla superficie della cometa, e a svelare dettagli sulla 67P/C-G, difficili da rivelare per l'orbiter.

Nelle brevi finestre di collegamento, alcuni di questi strumenti hanno rilevato dati determinanti, confermando i primi risultati di Rosetta, e risolvendo anche questioni in dubbio da tempo nella comunità scientifica.

Di seguito, l'elenco dei dieci strumenti a bordo del lander, il cui peso complessivo ammonta a circa 21 kg (Fig.18):

Fig.18 Strumentazione Philae



CONSERT: l'esperimento radar accoppiato all'orbiter Rosetta, dedicato allo studio della struttura interna della cometa attraverso la trasmissione di onde radio

ROLIS: la piccola fotocamera che fornisce le immagini del luogo di accometaggio.

PTOLEMY: l'analizzatore di gas cometari che determina i rapporti isotopici degli elementi più leggeri come idrogeno, carbonio, azoto ed ossigeno.

COSAC: il campionatore cometario che rileva ed identifica le molecole organiche più complesse.

CIVA: l'analizzatore di immagini del nucleo cometario nel visibile e nell'infrarosso, dotato di 7 microcamere. Esegue foto panoramiche, e con lo spettrometro studia composizione, struttura e albedo dei campioni superficiali.

SD2: lo strumento dedicato alla perforazione del sottosuolo, fino a 23 cm di profondità.

ROMAP: il dispositivo accoppiato a RPG-MAG sull'orbiter Rosetta, per il controllo dell'ambiente di plasma, è dotato di un magnetometro per lo studio dei campi magnetici.

MUPUS: il martello penetrante con sensori multifunzione che studia suolo e sottosuolo della cometa.

SESAME: lo strumento per il controllo acustico ed il sondaggio elettrico della superficie: valuta i parametri meccanici ed elettrici della 67P/C-G.

APXS: lo spettrometro a raggi X che studia la composizione del sito di atterraggio e le sue potenziali alterazioni con l'approcciarsi della cometa al perielio.

3.3 I RISULTATI PRINCIPALI

Dopo la conferma dell'avvenuto accometaggio, gli scienziati erano curiosi di analizzare questo nuovo mondo e comprendere la natura dell'atterraggio stesso.

Il primo tocco sul suolo della 67P/C-G, così come confermato dalla fotocamera con visore posteriore Rolis, è avvenuto all'interno dell'ellisse prestabilito.

E' stato allora che il lander si è inspiegabilmente sollevato dalla superficie per 1h 50', viaggiando per circa un chilometro ad una velocità di 38 m/sec, per compiere poi un ulteriore balzo durato alcuni minuti a circa 3 m/sec e rimbalzare nuovamente per terminare, definitivamente, in un luogo imprecisato con un'errata orientazione e senza ancorarsi al suolo, a più di un chilometro dal sito prestabilito di Agilkia. Il segnale di atterraggio, inviato al primo tocco, ha indotto la strumentazione di bordo a innescare la sequenza di esperimenti prefissati. Grazie alle immagini ad alta risoluzione raccolte da Rolis, a 9 metri di altezza durante la discesa su Agilkia, e da Civa sul sito di Abydos, è stato possibile confrontare la topografia di questi due siti. Le immagini di Rolis, prese poco prima dell'atterraggio, rivelano una superficie con blocchi di dimensione del metro di differenti forme, ruvidi e grezzi regoliti di dimensione tra i 10 e i 50 cm e grani con dimensioni inferiori ai 10 cm: si pensa che la regolite su Agilkia si estenda fino ai 2 metri di profondità, ma dalla risoluzione sembra non contenere grani fini di polvere depositata.

Il masso più grande nel campo di vista di Rolis misura 5 metri ed ha una struttura irregolare con linee di frattura che lo attraversano, queste suggeriscono la presenza di forze di erosione che stanno lavorando per frammentare i massi cometari in pezzi più piccoli; posteriormente il masso ha una coda rastremata di detriti, simili a quelli già visti in altre immagini raccolte da Rosetta che producono indizi di come le particelle siano sollevate da una parte della cometa erosa per poi depositarsi altrove. Ad oltre un chilometro di distanza, sul sito di approdo Abydos, le immagini raccolte da Civa aiutano a decifrare l'orientazione di Philae e rivelano dettagli sul terreno circostante, fino a scale del millimetro.

Le immagini mostrano fratture nei pendii a strapiombo della cometa, onnipresenti a tutte le scale; il materiale circoscritto è dominato da agglomerati scuri, forse contenenti grani ricchi di materiale organico.

Presumibilmente, le macchie più brillanti rappresentano differenze nella composizione minerale e potrebbero contenere materiali con abbondanze di ghiaccio. Di supporto a Civa, le immagini rilasciate da NAC di Osiris del 06/12/14 sulla morfologia di Abydos sono consistenti con un terreno primordiale con affioramenti stratificati e fratturati: la presenza di depositi di massi ai piedi di una scarpata sono, forse, segno di eventi gravitazionali innescati da sublimazioni, oppure fratture termiche dovute ad un'erosione regressa. Il valore medio dell'albedo su Abydos risulta di 5.8% a $\lambda_1 = 480.7$ nm e 7.4% a $\lambda_2 = 649.2$ nm, simili agli albedi globali ottenuti da Osiris. La strumentazione Mupus ha fornito idee sulle proprietà fisiche di Abydos: il martello penetrante ha mostrato che i campioni di materiale superficiale

e sotto superficiale sono più duri di quelli del sito di Agilkia. I risultati su Abydos puntano ad uno strato molto fino di polvere di circa 3 cm, che ricopre uno strato molto più duro compattato, presumibilmente una miscela di polvere e ghiaccio; al contrario su Agilkia, questo strato sembra esistere a profondità maggiori. Dalle immagini di Osiris sul sito di Agilkia, si ritiene che la differenza sulla composizione sia dovuta agli effetti di trasporto di materiale: le regioni attive devono essere le sorgenti originali di questo materiale liscio a grana fine che ha ricoperto il sito come conseguenza di deposito di materiale residuo.

Il sensore termico di Mupus ha rivelato una variazione di temperatura locale tra i -180°C e i -145°C in sincronia con un giorno cometario di 12.4 ore: l'inerzia termica mostrata dalle rapide salite e discese della temperatura rilevata concorda con un sottile strato di polvere in cima ad una crosta compattata di ghiaccio e polvere.

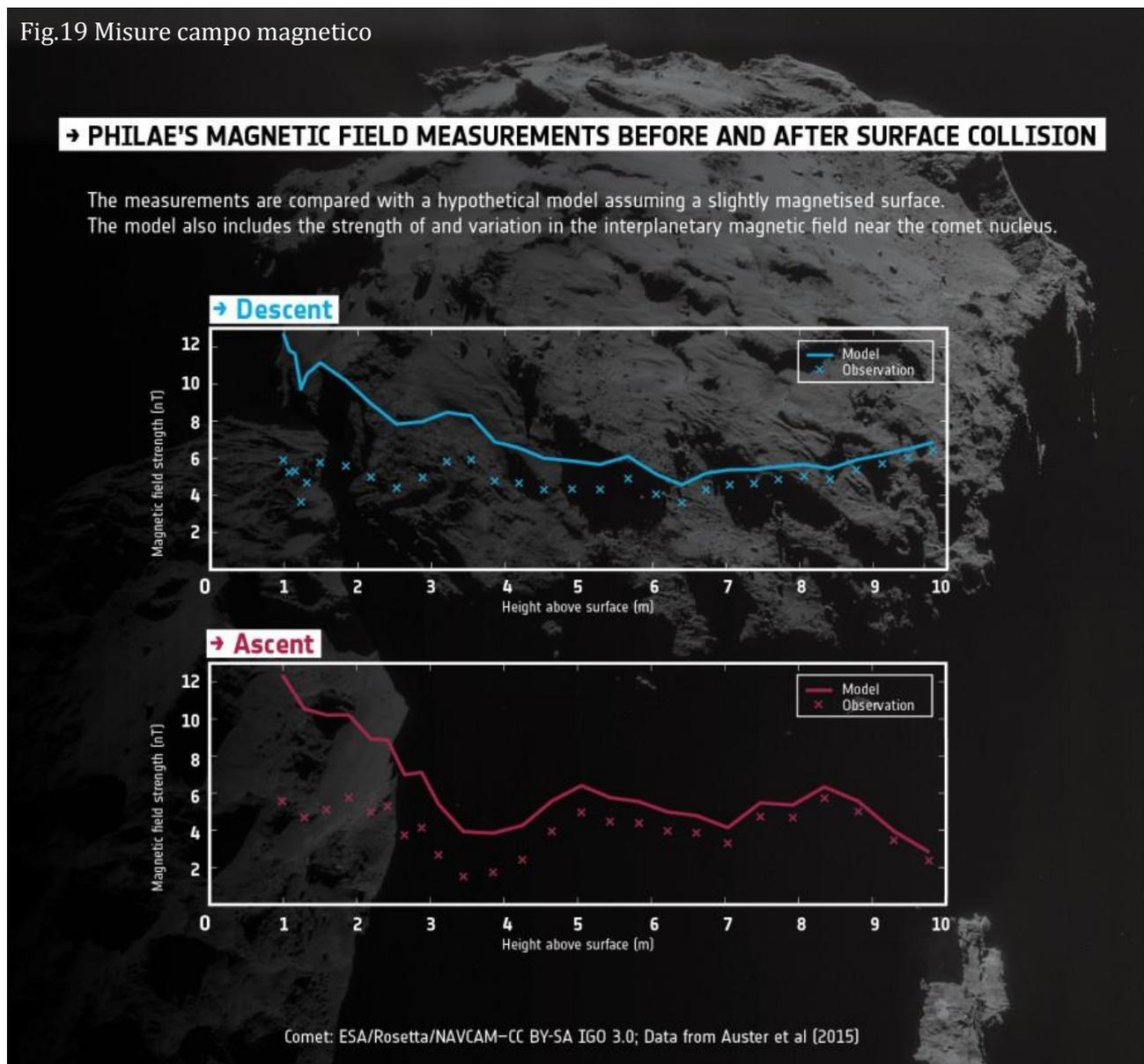
La sequenza di rimbalzi "non pianificata" ha consentito a Romap di fare misurazioni sul campo magnetico in più punti della superficie. L'intensità non è funzione dell'altezza o del luogo nel quale si è venuto a trovare il lander, inconsistente quindi con un campo magnetico di cui il nucleo stesso possa essere responsabile (Fig.19).

Se la cometa fosse magnetizzata, ci si dovrebbe aspettare un aumento nel campo magnetico rilevato, così come ci si avvicina sempre di più alla superficie.

In tutti i luoghi sorvolati dal lander durante i suoi balzi ciò non avviene: di fatto, è il vento solare interplanetario a produrre il campo magnetico che misuriamo. Definitivamente, la conferma che la cometa non è magnetizzata si ha dalle misure di Romap su Philae in accordo a quelle di RPC-MAG su Rosetta, eseguite contemporaneamente.

In fase di atterraggio, le letture di campo magnetico complementari escludono ogni anomalia magnetica locale sui materiali superficiali della cometa: se qualche materiale è magnetizzato deve esserlo per scale al di sotto del metro, inferiore per cui alla risoluzione spaziale dei nostri strumenti. I dati mostrano un campo magnetico inferiore a 2 nT, sia in superficie, che nelle varie località, con un momento magnetico specifico di $3.1 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$, minore dei valori conosciuti per i materiali lunari e le meteoriti misurate sulla Terra.

Fig.19 Misure campo magnetico



Dopo il primo atterraggio sul sito di Agilkia, l'analizzatore di gas Ptolemy e il campionatore Cosac hanno avviato gli esperimenti per la rilevazione della composizione chimica del gas e della polvere della cometa.

Cosac ha riscontrato, nei campioni penetrati dai tubi nel centro del lander, la presenza di ben 16 componenti organiche tra cui: composti del carbonio e dell'azoto di noto interesse, come l'isocianato metile (CH_3NCO), l'acetone ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$), la propionaldeide e l'acetamina, si tratta di molecole mai rilevate prima d'ora su di una cometa.

In contemporanea, Ptolemy ha analizzato l'ambiente gassoso, dai tubi posti al di sopra del lander, rilevando le principali componenti del gas della chioma: vapore d'acqua, biossido di carbonio e, una serie di composti organici contenenti carbonio in piccole quantità, come la formaldeide.

Come è noto, questi composti giocano un ruolo chiave nella sintesi prebiotica degli amminoacidi, degli zuccheri e dei nuclei basici: gli ingredienti della vita.

La formaldeide è implicata nella formazione del ribosio, i cui tratti sono nelle molecole di DNA. L'esistenza di molecole così complesse in una cometa, considerata una "reliquia" degli inizi del Sistema Solare, comporta che i processi chimici che hanno avuto luogo in quella

fase, possano aver giocato un ruolo principale nella inizializzazione della formazione di materiale prebiotico.

Il lander Philae ha inoltre eseguito misure sul rapporto CO/CO₂, determinando un valore pari a 0.07 ± 0.04 , inferiore a quello della chioma, ad indicare una significativa eterogeneità del nucleo cometario; l'analisi della polvere in superficie, suggerisce che questo materiale sia compatibile con particelle porose di bassa densità volumetrica (0.25 g/cm^3).

Prese tutte insieme, queste misure "pionieristiche" sulla superficie di una cometa stanno profondamente cambiando la nostra visione di questi mondi, e continuano a rimodellare le vecchie teorie sulla nascita del Sistema Solare.

Studiare le proprietà di una cometa, ad esempio, può fornire alcuni indizi sul ruolo che i campi magnetici hanno giocato ai tempi della formazione, circa 4.6 miliardi di anni fa: se la 67P/C-G fosse rappresentativa di tutti i nuclei cometari, allora si suggerisce che le forze magnetiche non possono aver giocato un ruolo nell'accumulo di quei blocchi che poi hanno contribuito a formare i pianeti.

CAPITOLO 4

CONCLUSIONI

4.1 Il 30 SETTEMBRE 2016

Nel 2014, dopo un consulto tra tutti i gruppi scientifici coinvolti, venne presa la decisione di terminare la missione con l'atterraggio controllato della navetta sulla superficie della cometa, seguendo il destino del lander Philae.

Di fatto, se l'orbiter avesse continuato a scortare la 67P/C-G verso Giove, la significativa riduzione di potenza solare dovuta ad una diminuzione di calore irraggiato, non avrebbe permesso di operare in sicurezza; contrariamente al 2011, quando la navetta venne messa in ibernazione per 31 mesi, questa volta si sarebbe dovuti giungere sino a 850 milioni di km di distanza dal Sole, per scortare la cometa in luoghi dove sarebbe stato impossibile riscaldare l'orbiter a sufficienza, in maniera da garantire l'operatività e l'integrità del carico.

Il restringimento dell'ampiezza di banda disponibile, non sarebbe stata inoltre favorevole alla trasmissione di ulteriori dati scientifici.

Il 30 Settembre 2016 alle 11:19:37 UTC è giunto il segnale finale da Rosetta che ha confermato il completamento della sua incredibile missione: circa 40 minuti prima, a 720 milioni di km dalla Terra, la navetta era discesa verso la regione ricca di depressioni di Ma'at, sulla "testa della cometa", raccogliendo le ultime preziose e irripetibili informazioni.

Le immagini ravvicinate di WAC di Osiris, a circa 20 metri dalla superficie, erano focalizzate sulla buca denominata Deir el-Medina, ampia più di 130 metri: le dettagliate immagini sequenziali della parte interna della depressione e dei suoi strapiombi ci saranno utili per analizzare il substrato superficiale della cometa e per comprendere la geologia di questo luogo inesplorato.

Le informazioni sulla composizione e sulla densità del gas attorno al nucleo sono state monitorate da DMFS e da COPS di Rosina: la registrazione dei dati sino al suolo ha certificato un incremento della pressione del gas circostante, maggiore di un fattore 100 rispetto ai primi istanti di avvicinamento. La velocità e la pressione del gas cadono a zero prima di toccare il suolo, suggerendo un'interessante accelerazione del gas allontanandosi leggermente dal nucleo: gli atomi e le molecole che compongono tale gas sono attualmente in fase di studio.

Durante l'intera fase di discesa, Miro ha continuato a monitorare i valori della temperatura del nucleo: i dati hanno indicato che entro i primi 5 cm di sotto strato superficiale vi sono variazioni di temperatura tra gli 80°K e i 160°K, presumibilmente dovute alle condizioni topografiche e di ombreggiatura della cometa. L'ultima misura spettroscopica di Miro sulla chioma, del 27 Settembre 2016, rappresenta una stima grossolana del tasso globale di produzione medio dell'acqua della 67P/C-G: il dato di 10^{24} molecole per secondo, equivalente a 2 cucchiaini da zucchero, sembra insignificante rispetto alla quantità paragonata alle due vasche da bagno per secondo disperse nello spazio nel periodo di maggiore attività, riferite cioè al periodo del passaggio al perielio nell'Agosto dell'anno precedente.

Lo spettro finale, trasmesso da Alice, è il risultato dell'esposizione sulla cometa dalle 10:20:16 alle 10:30:21 UTC, quando l'orbiter si trovava tra 1000 e 500 metri al di sopra del-

la superficie: l'ultima comunicazione di Alice è avvenuta alle 10:39:00 UTC, circa mezzo minuto prima dell'impatto dell'orbiter al suolo. La velocità di conteggio del flusso ultravioletto totale sulla banda passante, riportata ogni 30 secondi, mostra un persistente aumento del flusso UV durante la discesa. I dati forniti nell'ultima ora mostrano l'andamento delle pendenze dello spettro globale mediato e una mancanza di ampi tratti di assorbimento, simile ai dati raccolti in precedenza. Nonostante le maggiori risoluzioni spaziali, Alice non ha rilevato sostanziali differenze nella composizione superficiale, neppure se confrontate con le aree più vaste: l'assenza di chiazze di ghiaccio non sorprende, vista la velocità con la quale si sono viste cambiare le condizioni della superficie sulla 67P/C-G.

Sia nella fase di approccio alla cometa che al termine della missione, durante la discesa dell'orbiter, la fuoriuscita del gas di CO₂ è risultata considerevole.

I sensori LAP e MIP di RPC hanno riportato una densità del plasma molto bassa nella fase di discesa, ma uniformemente in crescita. Il plasma raggiunge un picco crescente di densità tra 100 e 150 cm⁻³ a circa 2 km dalla superficie, per poi affievolirsi. Il plasma originato da gas neutri ha mostrato una densità superficiale relativamente bassa, presumibilmente perché le molecole che hanno appena lasciato il nucleo non hanno ancora avuto il tempo di ionizzarsi. Il sensore MAG di RPC ha eseguito misure fino a 11 metri di quota, senza rilevare variazioni nell'intensità di campo magnetico a conferma, semmai ce ne fosse ancora bisogno, che la cometa non è magnetizzata.

Con la poca energia a disposizione durante la fase di discesa controllata, i gruppi di lavoro hanno deciso di mantenere in funzione solo alcuni strumenti: per Midas, Cosima e Virtis si è deciso in via precauzionale di procedere allo spegnimento.

Degli strumenti dedicati allo studio della polvere, l'unico a restare in funzione durante la fase di discesa controllata è stato Giada, il quale non ha rilevato alcun tipo di polvere, come se l'atterraggio fosse avvenuto in un ambiente completamente sterilizzato; Rosina, Miro e Alice hanno confermato il dato, per certi versi alquanto sorprendente: si ritiene che gli eventuali grani di polvere presenti avessero dimensioni inferiori ai 50 µm di diametro, limite di rilevazione di Giada.

La raccolta dati è continuata fino a pochi istanti prima dell'accometaggio dell'orbiter sulla 67P/C-G, con quest'ultima manovra si è chiusa definitivamente l'operatività di Rosetta.

Il 30 settembre 2016 ha segnato il termine della missione: di certo, l'inizio per tutti i gruppi di lavoro della fase di analisi dell'immensa mole di dati raccolti, compresi gli ultimi inviati proprio nella fase di discesa.

L'invecchiamento della navetta e del suo carico che hanno resistito nel duro ambiente spaziale per oltre dodici anni, di cui almeno due trascorsi tra la polvere cometaria, hanno messo a dura prova la strumentazione in toto, portando alla conclusione naturale questa magnifica missione (Fig.20).

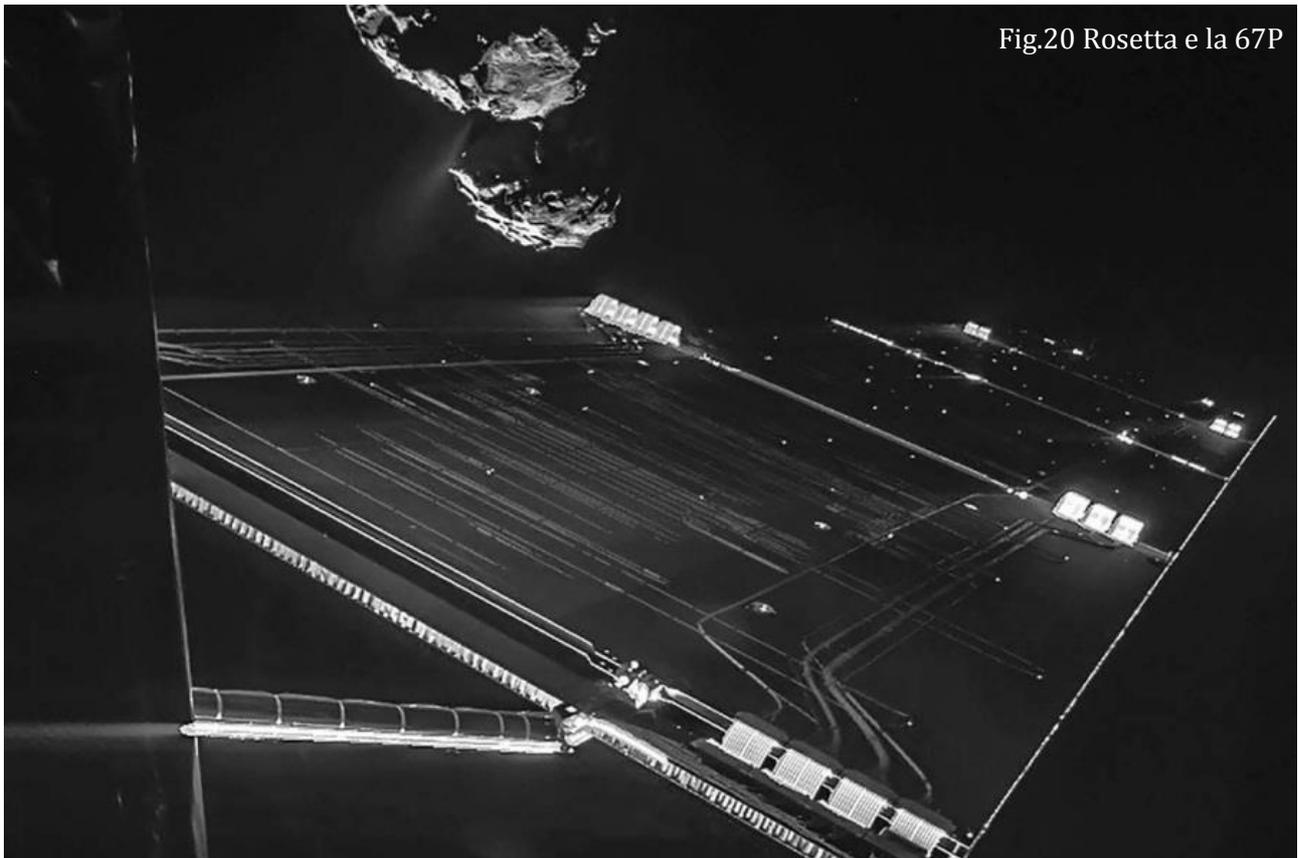


Fig.20 Rosetta e la 67P

4.2 LE MISSIONI FUTURE

4.2.1 A.R.M.

La NASA sta progettando la missione A.R.M. (Asteroid Redirect Mission), prima missione robotica di sempre a visitare un grande asteroide vicino alla Terra. Lo scopo è di raccogliere un masso di svariate tonnellate dalla sua superficie e deviarlo all'interno di un'orbita stabile attorno alla Luna: inoltre, l'equipaggio esplorerà l'ambiente raccogliendo molti più campioni di quelli che gli scienziati abbiano mai potuto studiare finora.

La missione robotica ci mostrerà quali sono le possibili tecniche di difesa planetaria, allo scopo di deflettere asteroidi che potenzialmente potrebbero entrare in rotta di collisione con il nostro pianeta pericolosi e proteggere il nostro pianeta in futuro, nel caso ce ne fosse bisogno.

La NASA sceglierà, per catturarlo, un masso la cui dimensione non possa danneggiare la Terra, poiché si disintegrerebbe in atmosfera: per assicurargli un'orbita stabile verrà deviato in un'orbita a distanza retrograda attorno alla Luna, questo garantirà l'impossibilità di colpirci.

Questo progetto, attuabile negli anni '20, contribuirà a fornirci l'avanzamento tecnologico ed un'esperienza nel volo spaziale, necessari per una missione umana sul sistema marziano prevista negli anni '30.

4.2.2 A.I.M.

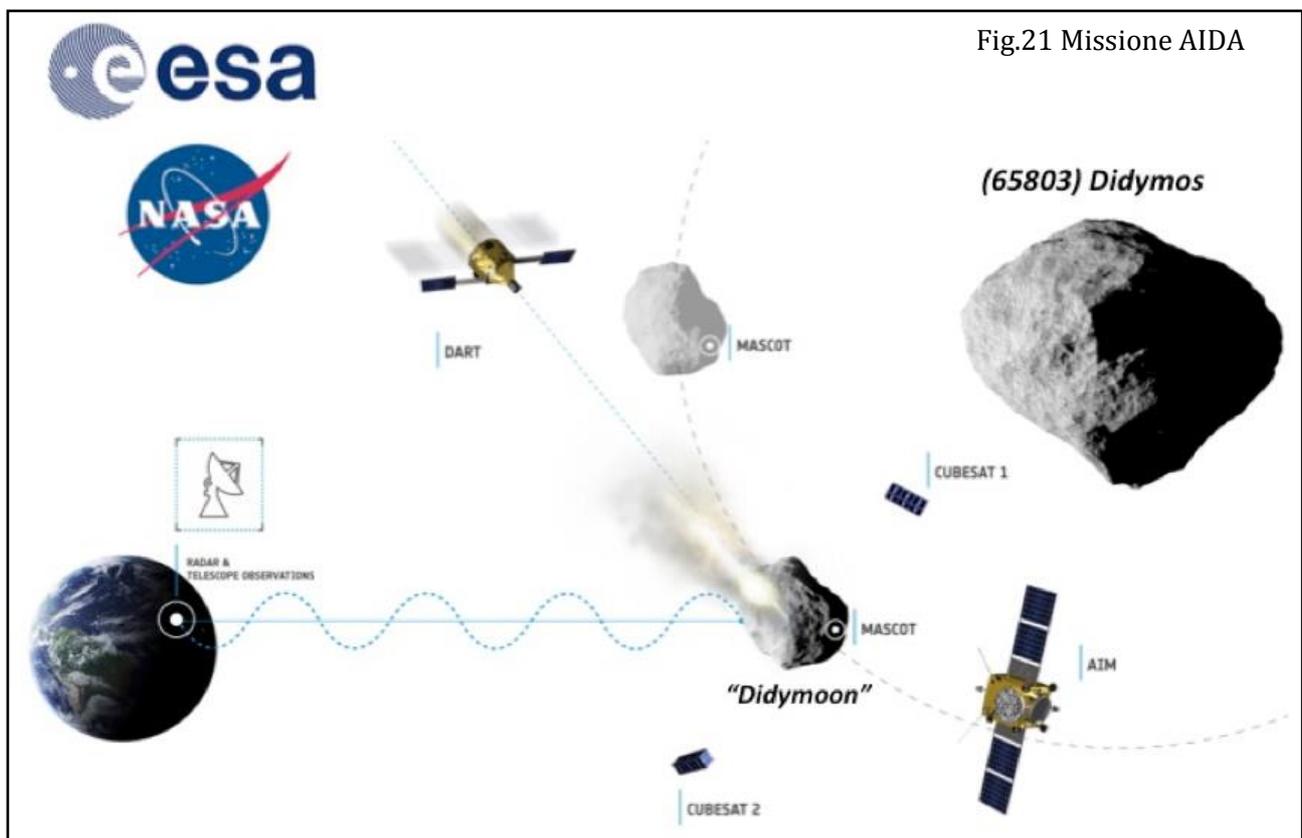
Con il lancio del vettore Ariane 6.2 dalla Guyana Francese è in programma per l'ottobre 2020 la missione A.I.M. (Asteroid Impact Mission) di ESA.

L'ente spaziale europeo vuole cogliere l'opportunità di testare nuove tecnologie nel campo delle telecomunicazioni: il progetto è di operare attraverso due vie di comunicazione ottiche.

AIM viaggerà per 18 mesi verso il sistema binario di asteroidi Didymos, che nel 2022 si troverà a circa 16 milioni di km dalla Terra: questo sistema è composto di un corpo primario della dimensione di 800 metri di diametro attorno al quale ne orbita uno inferiore di circa 170 metri, Lunadidy.

Il satellite Lunadidy sarà l'elemento di interesse della missione. Per creare una rete di comunicazione nello spazio profondo, la navetta principale AIM farà atterrare un lander sulla superficie, e rilascerà in orbita attorno allo stesso almeno due satelliti. Attraverso un collegamento laser con la stazione a Terra posta a Tenerife, otterremo immagini termiche infrarosse per studiare la geofisica superficiale e le proprietà termiche di Lunadidy. Il carico scientifico di AIM comprenderà due radar, rispettivamente ad alta frequenza per sondare la superficie e lo strato sotto superficiale, e a bassa frequenza per mappare in profondità la struttura interna del nucleo.

A quattro mesi dall'arrivo di AIM sul sistema binario, giungerà anche parte della nuova missione NASA denominata AIDA (Asteroid Impact & Deflected Assessment), che con il programma DART (Double Asteroid Redirection Test) scaglierà un "colpo" all'asteroide satellite, per capire che tipi di conseguenze possa generare (Fig.21).



4.3 CONCLUSIONI FINALI

Le comete sono presumibilmente tra gli oggetti più primitivi del Sistema Solare: nella comunità scientifica sono in molti a ritenere che queste mantengano un resoconto dei processi fisico-chimici avvenuti durante le prime fasi dell'evoluzione della nostra stella, circa 4.5 miliardi di anni fa.

La nostra conoscenza delle comete si è notevolmente ampliata, di fatto nell'ultimo ventennio si sono moltiplicate le osservazioni con telescopi a Terra e in orbita; ad oggi possiamo confrontare dati di una estesa varietà di oggetti, e da questo bacino di informazioni sembra non esserci una linea netta di separazione tra comete e asteroidi. Gli asteroidi più lontani mostrano similitudini con i nuclei cometari osservati lontano dal Sole: ad esempio, l'asteroide Chiron la cui orbita si trova al di là di Saturno, viene considerato come un gigante nucleo cometario. Non possiamo perciò escludere che le comete a corto periodo evolvano effettivamente in asteroidi dopo la completa deplezione delle componenti volatili.

Confrontando i dati provenienti dalla missione NASA Stardust sulla cometa 81P/Wild2, abbiamo cercato di verificare se i nuclei delle comete si possano ritenere cumuli di materiale primordiale formati nella Nebula solare, anziché cumuli di macerie formatesi dopo, in conseguenza a distruzioni catastrofiche di corpi simili ma molto più grandi. Con le osservazioni da Terra, gli elaborati di termofisica, idrostatica, evoluzione orbitale e collisioni fisiche, si deduce che con la trasformazione termica dei radionuclidi combinata alla trasformazione collisionale durante l'accrescimento del disco primordiale, si viene a creare una popolazione di corpi di media dimensione, effettivamente confrontabile per densità, compattezza e durezza, anche se fortemente esauriti di supervolatili come il CO o la CO₂.

I nuclei cometari considerati si presentano con bassa densità, alta porosità, ricchezza di supervolatili e una notevole quantità di acqua, per cui si schematizza uno scenario di formazione cometaria che comincia nella Nebula solare e che termina nel disco primordiale, perché riproduce le proprietà osservate e spiega inoltre la presenza di estese stratificazioni viste sulla 67P/C-G ed anche sulla 9P/Tempel1 nella missione Deep Impact.

La peculiare forma della 67P/C-G è ancora argomento di ricerca attiva, nel contesto dell'acceso dibattito se le proprietà delle comete come le osserviamo oggi sono primordiali, o il risultato di un'evoluzione collisionale, o di altri processi ancora. Dai nostri studi rileviamo che la struttura a doppio lobo della 67P/C-G potrebbe essere dovuta ad un evento piuttosto recente, avvenuto circa un miliardo di anni fa. I tipi di impatto devono essere stati poco catastrofici, ma hanno avuto il potenziale di alterare la forma di piccoli corpi in maniera significativa senza apportarne maggiori riscaldamenti o compattamenti. Negli impatti il riscaldamento è stato molto localizzato ed i corpi protagonisti di tali processi possono aver mantenuto un'alta porosità.

Le comete portano con sé molti segreti, ed il loro avvincente studio si può considerare ancora nelle fasi iniziali: questi corpi potrebbero rappresentare una potenziale risorsa mineraria per l'intera comunità, ma anche quei luoghi dove si nascondono le risposte alle questioni ancora in dibattito sulla formazione del Sistema Solare. La possibilità di rivisitare in futuro questi nuovi mondi aumenterà anche la conoscenza sulle capacità di controllare gli spostamenti di tali oggetti potenzialmente pericolosi per la vita, così come la conosciamo, sulla Terra.

ELENCO FIGURE

- Figura 1 Rappresentazione dell'orbiter Rosetta
- Figura 2 Traiettorie missione Giotto rispetto alla cometa Halley e Grigg-Skjellerup
- Figura 3 Rappresentazione degli strumenti posizionati sull'orbiter Rosetta
- Figura 4 Nomenclatura completa delle regioni mappate sulla cometa 67P
- Figura 5 Rappresentazione della 67P e dei suoi parametri principali
- Figura 6 Immagine dell'asteroide 2867 Steins (OSIRIS)
- Figura 7 Immagine dell'asteroide 21 Lutetia (OSIRIS)
- Figura 8 Rappresentazione schematica della prima rilevazione di temperatura per la 67P
- Figura 9 Rappresentazione del ciclo dell'acqua sulla 67P
- Figura 10 Diagramma dei valori del rapporto D/H per i corpi del S.S.
- Figura 11 Diagrammi che evidenziano la scoperta di ossigeno molecolare nella 67P
- Figura 12 Rappresentazione delle emissioni di vapore acqueo dalla Chioma della 67P
- Figura 13 Rappresentazione in 3D del più probabile luogo di accometaggio di Philae
- Figura 14 Rappresentazione schematica della formazione della magnetosfera
- Figura 15 Immagine della piastra bersaglio colpita dai grani di polvere
- Figura 16 Immagine particolareggiata dei quattro tipi di particelle classificati
- Figura 17 Immagini del luogo finale di accometaggio di Philae (OSIRIS)
- Figura 18 Rappresentazione degli strumenti posizionati sul lander Philae
- Figura 19 Diagrammi dei valori misurati di campo magnetico
- Figura 20 Immagine ravvicinata della 67P (OSIRIS)
- Figura 21 Rappresentazione schematica della missione futura AIDA

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

M. R. El-Maarry, N. Thomas, L. Giacomini, M. Massironi, M. Pajola, R. Marschall, A. Gracia-Bernà, H. Sierks, C. Barbieri, P. L. Lamy *et al.* (44 more). *A&A* 583, A26 (2015)
[en] **Regional surface morphology of comet 67P/C-G from Rosetta/Osiris images**

M. R. El-Maarry, N. Thomas, A. Gracia-Bernà, M. Pajola, J.-C. Lee, M. Massironi, B. Davidsson, S. Marchi, H. U. Keller, S. F. Hviid *et al.* (42more). *A&A* 593, A110 (2016)
[en] **Regional surface morphology of comet 67P/C-G from Rosetta/Osiris images: The southern hemisphere**

W.-H. Ip, I.-L. Lai, J.-C. Lee, Y.-C. Cheng, Y. Li, Z.-Y. Lin, J.-B. Vincent, S. Besse, H. Sierks, C. Barbieri *et al.* (45 more). *A&A* 591, A132 (2016)
[en] **Physical properties and dynamical relation of the circular depressions on comet 67P/C-G**

S.Fornasier, P. H. Hasselmann, M. A. Barucci, C. Feller, S. Besse, C. Leyrat, L. Lara, P. J. Gutiérrez, N. Oklay, C. Tubiana *et al.* (44more). *A&A* 583, A30 (2015)
[en] **Spectrophotometric properties of the nucleus of comet 67P/C-G from the OSIRIS instrument onboard the ROSETTA spacecraft**

D. Perna, M. Fulchignoni, M. A. Barucci, S. Fornasier, C. Feller, J. D. P. Deshapriya, P. H. Hasselmann, H. Sierks, C. Barbieri, P. L. Lamy *et al.* (35 more). *A&A* 600, A115 (2017)
[en] **Multivariate statistical analysis of OSIRIS/Rosetta spectrophotometric data of comet 67P/C-G**

F. Preusker, F. Scholten, K. -D. Matz, T. Roatsch, K. Willner, S. F. Hviid, J. Knollenberg, L. Jorda, P. J. Gutiérrez, E. Kuhrt *et al.* (35 more). *A&A* 583, A33 (2015)
[en] **Shape model, reference system definition, and cartographic mapping standards for comet 67P/C-G - Stereo-photogrammetric analysis of Rosetta/OSIRIS image data**

D. Perna, E. Dotto, M. Lazzarin, S. Magrin, M. Fulchignoni, M. A. Barucci, S. Fornasier, S. Marchi and C. Barbieri. *A&A* 513, L4 (2010)
[en] **Inhomogeneities on the surface of 21 Lutetia, the asteroid target of the Rosetta mission - Ground-based results before the Rosetta fly-by**

I.Bertini, P. J. Gutiérrez, L. M. Lara, F. Marzari, F. Moreno, M. Pajola, F. La Forgia, H. Sierks, C. Barbieri, P. Lamy *et al.* (37 more). *A&A* 583, A19 (2015)
[en] **Search for satellites near comet 67P/C-G using Rosetta/OSIRIS images**

J. Alves, C. Bertout, T. Forveille, T. Guillot and S. Shore. A&A 583, E1 (2015)
[en] **Rosetta mission results pre-perihelion**

L. M. Lara, S. Lowry, J.-B. Vincent, P. J. Gutiérrez, A. Rozek, F. La Forgia, N. Oklay, H. Sierks, C. Barbieri, P. L. Lamy *et al.* (47 more). A&A 583, A9 (2015)
[en] **Large-scale dust jets in the coma of comet 67P/C-G as seen by the OSIRIS instrument onboard Rosetta**

J.-B. Vincent, N. Oklay, M. Pajola, S. Hofner, H. Sierks, X. Hu, C. Barbieri, P. L. Lamy, R. Rodrigo, D. Koschny *et al.* (45 more). A&A 587, A14 (2016)
[en] **Are fractured cliffs the source of cometary dust jets? Insights from OSIRIS/Rosetta at 67P/C-G**

X. Shi, X. Hu, H. Sierks, C. Guttler, M. A'Hearn, J. Blum, M. R. El-Maarry, E. Kuhrt, S. Mottola, M. Pajola *et al.* (39 more). A&A 586, A7 (2016)
[en] **Sunsets Jets observed on comet 67P/C-G sustained by subsurface thermal lag**

A.-T. Auger, O. Groussin, L. Jorda, S. Bouley, R. Gaskell, P. L. Lamy, C. Capanna, N. Thomas, A. Pommerol, H. Sierks *et al.* (41 more). A&A 583, A35 (2015)
[en] **Geomorphology of the Imhotep region on comet 67P/C-G from OSIRIS observations**

O. Groussin, H. Sierks, C. Barbieri, P. Lamy, R. Rodrigo, D. Koschny, H. Rickman, H. U. Keller, M. F. A'Hearn, A.-T. Auger *et al.* (38 more). A&A 583, A36 (2015)
[en] **Temporal morphological changes in the Imhotep region of comet 67P/C-G**

A. Pommerol, N. Thomas, M. R. El-Maarry, M. Pajola, O. Groussin, A.-T. Auger, N. Oklay, S. Fornasier, C. Feller, B. Davidsson *et al.* (45 more). A&A 583, A25 (2015)
[en] **OSIRIS observations of meter-sized exposures of H₂O ice at the surface of 67P/C-G and interpretation using laboratory experiments**

N. Okay, J.-B. Vincent, S. Fornasier, M. Pajola, S. Besse, B. J. R. Davidsson, L. M. Lara, S. Mottola, G. Naletto, H. Sierks *et al.* (42 more). A&A 586, A80 (2016)
[en] **Variation of comet 67P/C-G in regions showing activity**

F. Moreno, C. Snodgrass, O. Hainaut, C. Tubiana, H. Sierks, C. Barbieri, P. L. Lamy, R. Rodrigo, D. Koschny, H. Rickman *et al.* (44 more). A&A 587, A155 (2016)
The dust environment of comet 67P/C-G from Rosetta OSIRIS and VLT observations in the 4.5 to 2.9 AU heliocentric distance range inbound

N. Thomas, B. Davidsson, M. R. El-Maarry, S. Fornasier, L. Giacomini, A. G. Gracia-Bernà, S. F. Hviid, W.-H. Ip, L. Jorda, H.U. Keller *et al.* (45 more). A&A 583, A17 (2015)
[en] **Redistribution of particles across the nucleus of comet 67P/C-G**

P. J. Gutiérrez, L. Jorda, R. W. Gaskell, B. J. R. Davidsson, C. Capanna, S. F. Hviid, H. U. Keller, L. Maquet, S. Mottola, F. Preusker *et al.* (45 more). A&A 590, A46 (2016)
[en] **Possible interpretation of the precession of comet 67P/C-G**

M. Choukroun, S. Keihm, F. P. Schloerb, S. Gulkis, E. Lellouch, C. Leyrat, P. Von Allmen, N. Biver, D. Bockelée-Morvan, J. Crovisier *et al.* (13 more). A&A 583, A28 (2015)
[en] **Dark side of comet 67P/C-G in Aug. - Oct. 2014 - MIRO/Rosetta continuum observations of polar night in the southern regions**

A. Lucchetti, G. Cremonese, L. Jorda, F. Poulet, J.-P. Bibring, M. Pajola, F. La Forgia, M. Massironi, M. R. El-Maarry, N. Oklay *et al.* (38 more). A&A 585, L1 (2016)
[en] **Characterization of the Abydos region through OSIRIS high-resolution images in support of CIVA measurements**

F. La Forgia, L. Giacomini, M. Lazzarin, M. Massironi, N. Oklay, F. Scholten, M. Pajola, I. Bertini, G. Cremonese, C. Barbieri *et al.* (45 more). A&A 583, A41 (2015)
[en] **Geomorphology and spectrophotometry of Philae's landing site on comet 67P/C-G**

M. Jutzi, W. Benz, A. Toliou, A. Morbidelli and R. Brasser.
A&A 597, A61 (2017)
[en] **How primordial is the structure of comet 67P? - Combined collisional and dynamical models suggest a late formation**

M. Luzzi and W. Benz.
A&A 597, A62 (2017)
[en] **Formation of bi-lobed shapes by sub-catastrophic collisions - A late origin of comet 67P's structure**

European Space Agency. (17 Gennaio 2014). “**Rosetta Blog**”. Living with a comet. Estratto il 14 giugno 2016, da www.blogesa.int

National Aeronautics and Space Administration. (31 Luglio 2015). “ **What is NASA's Asteroid Redirect Mission?**”. Asteroid Redirect Mission. Estratto il 13 settembre 2016, da www.nasa.gov

Royal Astronomical Society. (20 settembre 2016). “**Direct Simulation Monte Carlo modelling of the major species in the coma of comet 67P/C-G**”. Monthly Notices of Royal Astronomical Society. Estratto il 10 Gennaio 2017, da www.academic.oup.com