

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
“FEDERICO II”

SCUOLA DI DOTTORATO IN INGEGNERIA INDUSTRIALE

Dottorato di ricerca in
INGEGNERIA AEROSPAZIALE, NAVALE E DELLA QUALITÀ

TESI DI DOTTORATO

**LA MISSIONE ROSETTA: ANALISI DEI DATI DI GIADA IN VOLO
DURANTE LA FASE DI CROCIERA**

TUTOR

Prof. Luigi Colangeli

COORDINATORE

Prof. Antonio Moccia

CANDIDATO

Alessandro Aronica

XXII ciclo

Anno Accademico 2008/2009

Sommario

Introduzione	3
1 La missione ESA-Rosetta: obiettivi scientifici e aspetti della missione	5
1.1 <i>LE COMETE E LA LORO ESPLORAZIONE</i>	5
1.2 <i>LE MISSIONI SPAZIALI PASSATE</i>	13
1.3 <i>LA SONDA ROSETTA DELL'ESA</i>	16
1.3.1 Gli obiettivi scientifici della missione ESA Rosetta.....	16
1.3.2 Il piano di volo: la fase di crociera e il rendez-vous con la cometa	18
1.3.3 La sonda Rosetta: il payload dell'Orbiter e del Lander	21
1.4 <i>IL TARGET PRINCIPALE DI ROSETTA: LA COMETA 67P/CHURYUMOV-GERASIMENKO</i>	26
2 Lo strumento GIADA e i suoi sottosistemi	28
2.1 <i>OBIETTIVI SCIENTIFICI</i>	28
2.1.1 Misura dei flussi di polvere "diretti" and "riflessi"	29
2.1.2 Distribuzione di velocità dei grani di polvere	29
2.1.3 Evoluzione della polvere nella chioma.....	29
2.1.4 Variazione dei flussi di polvere in funzione dell'evoluzione del nucleo	30
2.1.5 Determinazione del rapporto gas/polvere	30
2.1.6 Altri obiettivi	30
2.2 <i>LA STRUTTURA E IL PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO</i>	31
2.2.1 Il modulo GIADA-1	32
2.2.2 Il modulo GIADA-3	34
2.2.3 Il modulo GIADA-2	35
2.3 <i>PRESTAZIONI DI GIADA E CONFRONTO CON LE CARATTERISTICHE DEL TARGET 67P/C-G</i>	38
3 Le operazioni scientifiche di GIADA	39
3.1 <i>LA FASE DI CROCIERA DI ROSETTA E I TEST IN VOLO DI GIADA</i>	39
3.2 <i>PREPARAZIONE ALLE OPERAZIONI IN VOLO DI GIADA</i>	43
3.2.1 Interazioni con RSOC e RMOC.....	43
3.2.2 Richieste di osservazione durante i test in volo (OBR).....	47
3.2.3 Pianificazione delle operazioni in volo (OIOR, ITL)	50
3.2.4 Sequenze operative e procedure di controllo	53
3.2.5 Test di verifica on-ground per le nuove procedure (EQM).....	57
3.3 <i>RECUPERO DEI DATI DDS DA ESOC</i>	59
4 L'elaborazione e l'analisi dei dati.....	60
4.1 <i>IL SOFTWARE PER L'ELABORAZIONE E LA VISUALIZZAZIONE</i>	60
4.1.1 Vecchia e nuova architettura del software.....	60
4.2 <i>ANALISI DEI DATI</i>	62
4.2.1 Risultati dei test in volo durante i Payload Checkout.....	62
4.2.2 Analisi comparativa dei dati.....	73
4.2.3 Analisi dei dati di GIADA su un caso di notevole interesse	75
4.2.4 Il sorvolo dell'asteroide Steins	77
Conclusioni	82
Bibliografia	83
Ringraziamenti	89

Introduzione

Le comete si sono formate circa 4.6 miliardi di anni fa nella nuvola rotante di materiale che circondava il Sole. A causa della loro piccola massa (compresa tra 10^{14} e 10^{21} g) e della loro posizione concentrata per la maggior parte della loro esistenza ai margini del Sistema Solare (oltre Nettuno), esse riflettono le caratteristiche della nebulosa protosolare primordiale. Inoltre, grazie alle basse temperature (poche decine di gradi kelvin) presenti tipiche di tali regioni, il loro materiale risulta sicuramente il meno processato termicamente fra tutti gli oggetti del Sistema Solare. Il nucleo è strettamente legato ai costituenti della nebulosa, avendo preservato parte dei composti interstellari presenti al tempo del collasso gravitazionale; inoltre, le osservazioni mostrano che le comete hanno conservato una frazione consistente di materiale volatile. Lo studio dettagliato della struttura, della chimica e della dinamica evolutiva delle comete, dunque, può fornire importanti informazioni sull'origine del Sistema Solare, sulle nubi protostellari e sulla loro evoluzione. Inoltre, le comete possono aver fornito parte dell'acqua che costituisce gli oceani terrestri e possono aver rilasciato il materiale organico complesso che ha portato alle prime forme di vita sulla Terra. Lo studio delle comete diventa, dunque, cruciale per far luce anche sull'evoluzione del nostro pianeta e sulle origini della vita.

L'esplorazione spaziale delle comete ha avuto inizio l'11 settembre 1985 con il flyby della cometa 21P/Giacobini-Zinner compiuto dalla sonda americana ICE. Le successive missioni spaziali verso comete hanno permesso approcci più ravvicinati, fornendo quindi informazioni sempre più dettagliate sul nucleo e sul complesso ambiente di gas, plasma e polvere che circonda questi oggetti. Le misure effettuate hanno permesso di verificare e aggiornare i modelli teorici che descrivono le caratteristiche fisiche, chimiche ed evolutive delle comete. Tuttavia hanno posto numerosi nuovi interrogativi che si spera di poter chiarire a partire dai risultati delle nuove e più ambiziose missioni spaziali che NASA ed ESA hanno sviluppato durante questi ultimi anni. Tra queste è particolarmente rilevante la missione ESA "Rosetta" che, per la prima volta nella storia dell'esplorazione spaziale, compirà il *rendez-vous* di una cometa. Infatti, nel 2014 la sonda Rosetta entrerà in orbita intorno alla cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko seguendola per un anno e mezzo fino al raggiungimento del perielio ed avrà l'opportunità unica di studiare l'evoluzione della sua attività lungo la sua traiettoria verso il Sole. Inoltre la sonda rilascerà un modulo sul nucleo della cometa che ne analizzerà le caratteristiche fisico-chimiche.

Le misure delle proprietà dinamiche (flusso e distribuzione della massa e della velocità) delle particelle emesse dal nucleo verranno effettuate dallo strumento GIADA (*Grain Impact Analyzer and Dust Accumulator*). L'Osservatorio Astronomico di Capodimonte (OAC) e l'Università degli Studi di Napoli "Parthenope" sono responsabili dello studio, della progettazione e della realizzazione di tale dispositivo; in particolare, la *PIship* dello strumento è affidata al Prof. Luigi Colangeli.

Prima di raggiungere il suo *target*, la sonda Rosetta compie una lunga evoluzione nello spazio interplanetario, detta "fase di Crociera", che durerà 10 anni. Durante questa fase gli strumenti integrati a bordo si accendono periodicamente allo scopo di effettuare test di verifica del loro stato e di calibrazione in volo. L'attività svolta nell'ambito del progetto di ricerca è mirata proprio allo studio del comportamento dello strumento

GIADA in volo durante la fase di crociera di Rosetta e in varie condizioni operative. Gli obiettivi del lavoro di ricerca si sono concentrati su due aspetti cardine:

1. impostare l'insieme delle operazioni preliminari ai test in volo al fine di:
 - a. eseguire i test periodici durante i *Payload Checkout*;
 - b. eseguire test dedicati su GIADA;
 - c. verificare l'affidabilità dello strumento in condizioni di criticità;
 - d. mettere a punto delle strategie volte ad ottimizzare l'uso dello strumento e migliorarne le condizioni di sicurezza.
2. studiare il comportamento dello strumento mediante l'elaborazione e l'analisi critica dei dati relativi ai test periodici in volo, con particolare riferimento a:
 - a. dati di Housekeeping, utili a monitorare lo stato di "salute" dei sottosistemi di GIADA attraverso il controllo dei loro parametri ingegneristici (temperatura, potenza, consumo di corrente...);
 - b. dati di Calibrazione in volo, utili a monitorare il comportamento dei sottosistemi di GIADA;
 - c. dati Scientifici, utili a monitorare gli eventi di rumore e a rivelare eventuali eventi definibili come "reali".

L'insieme delle attività finalizzate agli scopi della ricerca è consistito nella impostazione, nello sviluppo e nella implementazione di una serie di operazioni propedeutiche ai test in volo. Tale lavoro ha riguardato in particolare la pianificazione e la preparazione delle operazioni di volo, la revisione delle sequenze operative e delle procedure di controllo, l'aggiornamento e la definizione di nuove procedure e il collaudo delle stesse mediante test su modello EQM (*Electrical Qualification Model*). Per quanto concerne l'attività di controllo e di studio del comportamento di GIADA essa si è concentrata sulla elaborazione e sull'analisi critica dei dati relativi ai test in volo, utilizzando un software dedicato. I risultati ottenuti hanno dimostrato che lo strumento ha un comportamento nominale ed è pronto per le fasi future della missione.

1 La missione ESA-Rosetta: obiettivi scientifici e aspetti della missione

1.1 LE COMETE E LA LORO ESPLORAZIONE

Le comete sono oggetti celesti estremamente affascinanti che, sin dai tempi più remoti, stimolarono la curiosità dell'uomo spingendolo all'osservazione. La spettacolarità e la loro apparizione spesso non prevedibile hanno contribuito a creare un alone di mistero e di superstizione intorno alle comete, per cui la loro comparsa è stata spesso associata al manifestarsi di eventi positivi o persino nefasti come guerre, carestie ed epidemie. Tali superstizioni perdurarono nel corso dei secoli, fin quando non si cominciò ad osservare ed a studiare le comete in modo rigorosamente scientifico utilizzando le leggi della meccanica celeste che consentirono di calcolarne i parametri orbitali e quindi, per molte di esse, predirne l'avvento.

Per lungo tempo si cercò di capire invano se le comete fossero fenomeni atmosferici od oggetti interplanetari. Gli astronomi si limitavano a registrare la loro apparizione ma i tentativi di spiegazione erano pure e semplici speculazioni. La svolta si ebbe nel XVI secolo quando l'astronomo danese Tycho Brahe dimostrò che le comete dovevano trovarsi al di là dell'orbita della Luna e quindi ben al di fuori dell'atmosfera terrestre. Durante il XVII secolo l'astronomo inglese Edmond Halley si avvale della teoria della gravitazione di Isaac Newton per calcolare l'orbita di alcune comete e scoprì che una di esse ritornava periodicamente vicino al Sole ogni 76 anni; la predizione di Halley fu confermata dopo la sua morte e la cometa periodica divenne famosa come la "Cometa di Halley". La seconda cometa riconosciuta come periodica fu la "Cometa di Encke" (1821), dal nome del suo scopritore, il matematico e fisico tedesco Johann Franz Encke, che ne calcolò l'orbita. La cometa di Encke ha il periodo più breve conosciuto (poco più di 3 anni) e di conseguenza è la cometa della quale si registrano più apparizioni (la prima apparizione registrata risale al 1786). Inoltre è anche la prima cometa per la quale si riscontrò che l'orbita era influenzata da forze non gravitazionali.

La vera natura delle comete rimase ignota per molti secoli. All'inizio del XIX secolo il matematico tedesco Friedrich Wilhelm Bessel elaborò una teoria secondo la quale la luminosità di una cometa scaturisse dall'evaporazione di un oggetto solido e le forze non gravitazionali agenti sulla cometa di Encke fossero il risultato della spinta causata dai jet di materia in evaporazione. Le sue idee furono dimenticate per più di 100 anni fino a quando l'astronomo americano Fred Lawrence Whipple, all'oscuro del lavoro di Bessel, nel 1950 propose una teoria simile secondo la quale il nucleo di una cometa è sostanzialmente una "palla di neve sporca" (Whipple, 1950). Tale modello fu largamente accettato e riproduceva il nucleo di una cometa come un agglomerato di materiale roccioso, di polveri e di ghiaccio. La presenza di ghiaccio nel nucleo delle comete suggeriva l'idea che esse si fossero formate in luoghi decisamente più freddi dell'interno del Sistema Solare. Nel 1950 l'astronomo olandese Jan Hendrik Oort, avvalendosi di risultati osservativi, predisse l'esistenza di una vasta nube di comete

che orbita in una regione che dista circa 50000 U.A.* dal Sole o circa a metà strada dalla stella più vicina (Oort, 1951). Tale regione è oggi conosciuta come *Nube di Oort*. L'anno successivo, l'astronomo americano Gerard Kuiper avanzò l'ipotesi che oggetti simili alle comete fossero rimasti confinati in regioni esterne a quelle dove risiedono i pianeti dopo che il processo di formazione del Sistema Solare era terminato. Egli suggerì che ci doveva essere una fascia di comete inattive oltre le orbite dei pianeti giganti tra 30 e 100 U.A. dal Sole. Tale fascia, oggi nota come *Kuiper Belt*, è la sorgente delle comete che orbitano intorno al Sole con un periodo orbitale relativamente breve (comete *a corto periodo*). Al contrario, le comete appartenenti alla Nube di Oort, sono definite comete *a lungo periodo*.

Quando hanno avuto origine queste due sorgenti di comete? Circa 4.55 miliardi di anni fa, nel braccio di Orione, una zona periferica della nostra galassia, una nube oscura di gas e di polveri interstellari cominciò a contrarsi sotto l'azione della propria gravità. Lo studio delle anomalie isotopiche riscontrate in alcuni meteoriti, insieme alle osservazioni delle caratteristiche di altre nebulose, ha messo in evidenza che il collasso della nube primordiale è stato preceduto di poco dall'esplosione di una supernova: l'onda d'urto proveniente da tale esplosione deve aver fornito alla nebulosa l'input iniziale di compressione, provocandone la contrazione. All'aumentare della densità e della velocità di rotazione la nube assunse la forma di un disco appiattito, al centro del quale si formò un corpo talmente caldo e massiccio da innescare al suo interno le reazioni termonucleari e da cui nacque il Sole; intorno ad esso il materiale residuo, non potendo cadere verso il centro a causa dell'elevata velocità di rotazione, cominciò ad aggregarsi in uno sciame di piccoli grani solidi che crescevano le loro dimensioni grazie alle reciproche attrazioni gravitazionali dando progressivamente origine ai pianeti. Le comete si sarebbero formate in seno alla nube rotante di materiale che circondava il proto-Sole e pertanto, grazie alla loro piccola massa compresa tra 10^{14} e 10^{21} g e alla loro posizione concentrata essenzialmente ai margini del Sistema Solare (oltre Nettuno), riflettono le caratteristiche della nebulosa protosolare primordiale. Infatti, a causa delle basse temperature presenti in tali regioni (poche decine di gradi Kelvin), il loro materiale risulta sicuramente il meno processato termicamente fra tutti gli oggetti del Sistema Solare. Il nucleo è quindi strettamente legato ai costituenti della nebulosa primordiale, avendo preservato parte dei composti interstellari presenti al tempo del collasso gravitazionale. In realtà, le nuove teorie sulla formazione ed evoluzione non escludono che le comete possano avere inglobato almeno una frazione di materia proveniente dalle zone interne del sistema proto-solare e, quindi, contengano una miscela di materia con record evolutivi differenti (Donn & Rahe, 1982). Le osservazioni mostrano che le comete hanno conservato una frazione consistente di materiale volatile; infatti, circa il 50% della massa delle comete è composto di acqua, mentre il carbonio è presente in percentuali comprese tra il 10% e il 20% della loro massa[†]. Lo studio dettagliato della struttura, della chimica e della dinamica evolutiva delle comete può fornire, pertanto, importanti informazioni sull'origine del Sistema Solare, sulle nubi protostellari e sulla loro evoluzione.

* U.A. = Unità Astronomica, unità di misura delle distanze corrispondente alla distanza media della Terra dal Sole pari a 149,6 milioni di km.

† L'ipotesi oggi più accreditata è che il nucleo sia formato per l'80% da ghiaccio d'acqua misto a polvere solida, a sua volta costituita essenzialmente da silicati e composti a base di carbonio. Il resto del materiale volatile è costituito da molecole come CO, CO₂, SO₂, NH₃, CH₄, HCN, CH₃OH, HCHO, H₂CS.

Inoltre le comete hanno ricoperto probabilmente un ruolo determinante anche nella formazione dei pianeti. Infatti alcune teorie delineano uno scenario in cui, nel violento periodo della formazione del disco protoplanetario, molte comete impattarono sui giovani pianeti. I crateri generati dagli impatti di comete ed asteroidi sono ancora evidenti sulla superficie di Luna, Mercurio e di molti satelliti dei pianeti (i bombardamenti sono terminati, almeno per la Luna, 3.9 miliardi di anni fa). Inoltre, è possibile che le comete abbiano fornito una nuova provvista di acqua agli oceani terrestri dopo la parziale vaporizzazione dovuta all'ultima fase del bombardamento più violento. Durante questa fase le comete possono aver rilasciato anche il materiale organico complesso contenuto in esse contribuendo, in modo decisivo, allo sviluppo delle prime forme di vita sulla Terra (Chyba & Sagan, 1997).

Grande parte delle conoscenze attuali sulle comete è basata sulle osservazioni *in situ* durante i *fly-by* da parte di missioni spaziali dedicate all'esplorazione di tali oggetti. Le osservazioni *in situ* del plasma e della superficie del nucleo hanno fornito informazioni più dettagliate sulla composizione e sui processi fisico-chimici all'interno della chioma, nonché sull'interazione di una cometa col suo plasma, informazioni altrimenti non ricavabili con le tecniche del telerilevamento (*remote-sensing*). Sinora sono state lanciate con successo ben dieci missioni spaziali verso sei differenti comete. Il flyby della cometa 21P/Giacobini-Zinner, effettuato nel 1985 dalla sonda International Cometary Explorer (ICE) della NASA, ha segnato l'inizio di una nuova era nello studio di questi oggetti, l'era delle osservazioni *in situ*. Tale missione era dedicata all'esplorazione della corona di idrogeno, del plasma e delle sue interazioni con il vento solare ad una distanza dal nucleo dell'ordine di 10^5 – 10^6 km. L'anno successivo (1986) fu segnato dal passaggio al perielio della cometa 1P/Halley. L'evento fu seguito da una flotta di ben sei sonde spaziali (*ICE* per gli USA, *GIOTTO* per l'ESA, *Vega 1 & 2* per l'URSS e *Sakigake & Suisei* per il Giappone) e monitorato da Terra in una imponente campagna internazionale di osservazioni: l'*International Halley Watch* (Edberg et al., 1988). Grazie alle sonde russe e alla sonda *GIOTTO* dell'ESA si ottennero le prime immagini ravvicinate di una cometa attiva. Inoltre tali missioni fornirono le prime misure *in situ* della composizione di gas e polveri e consentirono di osservare i jet di materiale in evaporazione. I risultati delle missioni spaziali verso la cometa 1P/Halley hanno enormemente arricchito le conoscenze scientifiche sulle comete e gettato le basi per nuovi programmi di ricerca verso le comete come i progetti innovativi *Stardust* della NASA e della missione *Rosetta* dell'ESA di cui si parlerà ampiamente nel prosieguo.

Grazie all'ingente mole di informazione fornite dalle sonde spaziali, oggi disponiamo di un quadro abbastanza dettagliato della struttura e della composizione delle comete, anche se molto altro ancora ci si aspetta dalle missioni future. I *nuclei* delle comete possono variare in dimensione dalle centinaia di metri fino alle decine di chilometri e, come già accennato, sono composti da roccia, polvere e ghiacci d'acqua più altre sostanze comunemente presenti sulla Terra allo stato gassoso, quali CO, CO₂, CH₄ ed NH₃. Le osservazioni rivelano che i nuclei hanno forme irregolari e superfici secche di polveri o rocce, suggerendo che i ghiacci siano nascosti sotto la crosta. Le comete sono composte inoltre da una varietà di composti organici: oltre ai gas già menzionati, sono presenti metanolo, acido cianidrico, formaldeide, etanolo ed etano ed anche, forse, molecole più complesse come lunghe catene di idrocarburi e amminoacidi. Paradossalmente i nuclei cometari sono tra gli oggetti conosciuti più scuri del Sistema

Solare a causa della presenza rilevante di carbonio e dei composti organici che dovrebbero abbondare in superficie: il riscaldamento solare fa sublimare ghiacci ed elementi volatili, lasciando solo molecole pesanti organiche che tendono ad essere molto scure. La sonda Giotto scoprì che il nucleo della Cometa di Halley ha un albedo* di circa il 4% della luce con cui viene illuminato (Hammel et al., 1986) mentre la sonda Deep Space 1 scoprì che la superficie della cometa Borrelly riflette una percentuale tra il 2,4% e il 3% della luce incidente.

Quando una cometa si avvicina al Sole, il nucleo si riscalda ed il ghiaccio sublima trascinando con sé particelle solide (di dimensioni variabili tra qualche μm e qualche cm). Si produce così una *chioma* diffusa di gas e polveri (Figura 1.1). Prima della formazione della chioma il nucleo può essere osservato dalla riflessione della luce solare anche se con difficoltà, date le dimensioni ridotte e la presenza di una crosta superficiale, che appare scura nel visibile. Quando si sviluppa la chioma, il gas comincia ad assorbire radiazione ultravioletta e diventa fluorescente. Generalmente la fluorescenza inizia a prevalere a circa 5 U.A. dal Sole.



Figura 1.1 – La cometa Hale-Bopp che fu visibile in Italia nel 1997, anche ad occhio nudo. Nella foto si distinguono le due code della cometa: la coda di ioni, di colore blu, costituita da gas ionizzati, e la coda di polvere, di colore bianco violetto, che rilascia nello spazio ingenti quantità di polveri.

* *Albedo*: frazione di luce incidente che viene riflessa da una superficie.

Per effetto dell'assorbimento di radiazione ultravioletta, si innescano processi chimici che portano al rilascio di idrogeno che sfugge alla gravità della cometa e forma un *inviluppo di idrogeno*. Le particelle di polvere, espanse nella chioma, vengono accelerate dalla pressione di radiazione* solare nella direzione opposta a quella del Sole. Pertanto, la polvere tende a muoversi in orbite con semiassi maggiori che aumentano progressivamente. Ciò porta ad una diminuzione delle loro velocità kepleriane rispetto al nucleo ed alla conseguente formazione di una *coda di polvere* (*dust tail*) (Figura 1.1). Poiché l'efficacia della pressione di radiazione è funzione del rapporto superficie-massa dei singoli grani, tali particelle si dispongono nella coda secondo massa e dimensioni.

La *coda di ioni* (*ion tail*) (Figura 1.1) è formata da molecole ionizzate e radicali presenti nella chioma, che interagiscono con le particelle cariche del vento solare†. Gli ioni sono anche soggetti alla forza di Lorentz che risulta dal campo magnetico solare. Tale forza accelera gli ioni nella direzione opposta al Sole così rapidamente da produrre una coda quasi lineare. Tipicamente le code di plasma sono di colore bluastro a causa della presenza di ioni CO^+ (che emettono nel blu). Nella fotografia della cometa Hale-Bopp, mostrata in Figura 1.1, sono evidenti in maniera molto distinta le due code.

Prima della missione *GIOTTO* non si aveva alcuna conoscenza sulla struttura del nucleo cometario. Ciò era dovuto alla difficoltà di osservarlo da Terra a causa della presenza della chioma. Come già accennato, però, esistevano diversi modelli teorici che ne descrivevano la struttura (Boice & Huebner, 1999). La teoria più accreditata, formulata nel 1950 da Whipple, prevedeva per il nucleo cometario una struttura simile ad una "palla di neve sporca" (*dirty snowball*) (Figura 1.2 a).

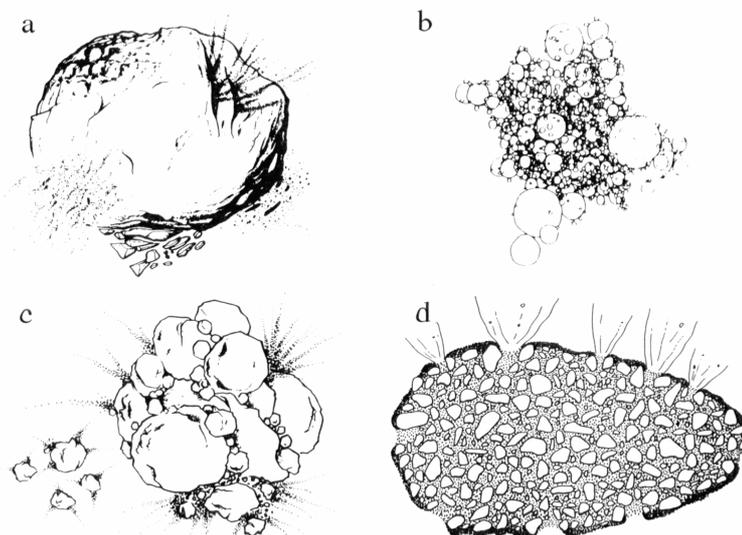


Figura 1.2 – Modelli di strutture di nuclei cometari (Donn, 1991): (a) modello dell'agglomerato ghiacciato (*dirty snowball*), (b) modello dell'aggregato *fluffy*, (c) la pila di detriti primordiali (*rubble pile*), (d) il modello del ghiaccio-colla (*icy-glue*). L'agglomerato *fluffy* e la *rubble pile* sono i modelli più rappresentativi della struttura nucleare osservata nelle varie missioni spaziali. Tutti i modelli, eccetto il modello (d), sono stati formulati prima dell'incontro di *GIOTTO* con la cometa 1P/Halley nel 1986.

* *Pressione di radiazione*: flusso della quantità di moto trasportata dai fotoni solari nell'unità di superficie e per unità di tempo.

† *Vento solare*: corrente di particelle cariche (elettroni, protoni ed altri ioni) emessa dal Sole.

Tale agglomerato di ghiaccio e polvere, misto ad ammoniaca, metano ed anidride carbonica, giunto in prossimità del Sole, avrebbe cominciato a surriscaldarsi con conseguente sublimazione del ghiaccio d'acqua. Il gas così prodotto sarebbe poi sfuggito alla debole attrazione gravitazionale del nucleo con velocità pari alla velocità dovuta all'agitazione termica, trascinando con sé grani silicatici e organici presenti nella miscela ghiacciata. Questa teoria fu convalidata dalle immagini della cometa 1P/Halley riportate dalla sonda Giotto (Figura 1.3). Il nucleo apparve come un corpo irregolare di dimensioni $(16 \times 8 \times 7) \text{ km}^3$. Si possono osservare regioni attive distribuite sulla parte illuminata dal Sole, mentre la parte buia si presenta inattiva.



Figura 1.3 – Immagine composta del nucleo della cometa 1P/Halley fotografata da GIOTTO il 14 Marzo 1986. Si possono osservare la forma irregolare e allungata del nucleo, le cui dimensioni sono $(16 \times 8 \times 7) \text{ km}^3$, e le regioni attive sulla sua superficie (Keller et al., 1986).

Un particolare, però, suscitò molta sorpresa: l'albedo della superficie era molto bassa. Ciò non è in accordo con l'idea di una struttura che sia essenzialmente un agglomerato di ghiaccio ma può, in parte, essere spiegata con la presenza dei grani di carbonio e materiale organico, che hanno un'albedo molto bassa. Inoltre, le misure di densità, stimata tra 0.1 e $0.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, lasciano pensare ad un nucleo molto poroso. Tali stime furono confermate anche dall'osservazione della cometa *Shoemaker-Levy 9*, che fu frammentata dalle forze di marea durante l'avvicinamento a Giove nel 1992 e distrutta nel successivo impatto sul pianeta (Weaver et al., 1995). Questo evento, insieme ad altre evidenze osservative, suggerì che la struttura del nucleo poteva essere costituita da agglomerati, debolmente legati, di tante *dirty snowballs*. Questa modifica della teoria di Whipple è nota come modello della pila di detriti primordiale (*primordial rubble pile*). Tale modello, che oggi gode del maggior credito, è in grado di spiegare non solo il comportamento della cometa *Shoemaker-Levy 9*, ma anche quello di tante comete che occasionalmente si disgregano spontaneamente. Esso spiega anche le

“eruzioni” cometarie (*outburst*), ossia getti improvvisi di gas e polvere che si osservano nelle comete, attribuiti al disgregamento di alcuni agglomerati del nucleo, con conseguente esposizione alla radiazione solare di nuove sostanze volatili ghiacciate.

Lo studio delle orbite cometarie suggerisce che la maggior parte delle comete risiede in due regioni ai bordi del Sistema Solare, dove la temperatura è talmente bassa da permettere la conservazione del ghiaccio presente nel nucleo:

- la *fascia di Kuiper* (Edgeworth, 1949), che giace appena oltre Nettuno, e si estende per oltre 100 U.A. a partire da una distanza dal Sole di 30 U.A. Dal 1992 in poi sono state scoperte dozzine di oggetti in questa regione, con dimensioni di varie centinaia di chilometri;
- la *nube di Oort* (Oort, 1951), che si estende oltre le 10000 U.A. dal Sole per altre 100000 U.A. Questa enorme regione sferica può contenere miliardi di oggetti cometari.

Occasionalmente le comete vengono espulse da tali regioni, in seguito a collisioni o all’attrazione gravitazionale di un pianeta gigante o di una stella. In queste occasioni possono essere spinte verso l’interno del Sistema Solare. Il loro percorso può essere alterato dall’attrazione gravitazionale del Sole o dei pianeti giganti, nel caso di passaggi ravvicinati. In tal caso le comete possono essere intrappolate nelle regioni interne del Sistema Solare o addirittura collidere con il Sole o con i pianeti. Nel primo caso possono inserirsi in orbite di periodo T . Se le orbite sono ellittiche e T è minore di 200 anni, si dice che le comete sono a *corto periodo*, altrimenti si dicono a *lungo periodo*. In quest’ultimo caso le orbite possono essere ellittiche, paraboliche o iperboliche, a seconda delle perturbazioni planetarie che hanno subito.

Negli ultimi due secoli sono state adottate diverse convenzioni tra loro differenti per la nomenclatura delle comete. Poco prima del XX secolo, ci si riferiva alla maggior parte delle comete con l’anno in cui erano apparse, a volte con aggettivi addizionali per le comete particolarmente brillanti (ad esempio, la “Grande Cometa del 1680”). Dopo che Edmund Halley ebbe dimostrato che le comete del 1531, 1607 e 1682 erano lo stesso oggetto celeste e ne predisse correttamente il ritorno nel 1759, quella cometa divenne nota come la Cometa di Halley. Similmente, la seconda e la terza cometa periodiche conosciute, la Cometa Encke e la Cometa Biela, furono nominate dal cognome degli astronomi che ne calcolarono l’orbita, piuttosto che da quello dei loro scopritori. Successivamente, le comete periodiche saranno nominate abitualmente dal nome degli scopritori. In particolare, divenne usanza comune nominare le comete dagli scopritori nei primi anni del XX secolo. Una cometa può essere nominata dal nome di non più di tre scopritori. In anni recenti, molte comete sono state scoperte da strumenti manovrati da un consistente numero di astronomi ed in questi casi le comete possono essere nominate dalla denominazione dello strumento. Per esempio, la Cometa IRAS-Araki-Alcock fu scoperta indipendentemente dal satellite IRAS e dagli astronomi amatoriali Genichi Araki e George Alcock. Successivamente è stata adottata una designazione sistematica delle comete per evitare confusione. Nel 1994 l’Unione Astronomica Internazionale ha adottato una nuova nomenclatura. Attualmente, al momento della loro scoperta le comete ricevono una sigla composta da “C/”, dall’anno della scoperta, da una lettera maiuscola dell’alfabeto e un numero; la lettera indica in

quale mese e parte del mese (prima o seconda metà) è stata scoperta, il numero indica l'ordine progressivo di annuncio della scoperta, durante ogni periodo di mezzo mese; a questa sigla segue il nome dello scopritore. Possono essere attribuiti fino a tre nomi o, se il caso, il nome del programma o del satellite che ha effettuato la scoperta. Nella nomenclatura astronomica per le comete, la lettera che precede l'anno indica la natura della cometa e può essere:

- P/ indica una cometa periodica (definita a tale scopo come avente un periodo orbitale inferiore ai 200 anni o di cui sono stati osservati almeno due passaggi al perielio);
- C/ indica una cometa non periodica (definita come ogni cometa che non è periodica in accordo alla definizione precedente);
- D/ indica una cometa disintegrata o "persa";
- X/ indica una cometa per cui non è stata calcolata un'orbita precisa (solitamente sono le comete storiche).
- A/ indica un oggetto identificato erroneamente come cometa ma che è in realtà un asteroide.

Quando viene osservato un secondo passaggio al perielio di una cometa identificata come periodica, ad essa viene assegnata una nuova denominazione composta da una P/, seguita da un numero progressivo dell'annuncio e dal nome degli scopritori secondo le regole precedentemente indicate. Così la Cometa di Halley, la prima cometa ad essere stata individuata come periodica, presenta anche la designazione 1P/1682 Q1. Una cometa non periodica come la Cometa Hale-Bopp ha ricevuto la denominazione C/1995 O1.

1.2 LE MISSIONI SPAZIALI PASSATE

Le comete sono state oggetto di studio di un gran numero di missioni spaziali delle quali non tutte, però, furono originariamente designate per questo scopo. In Tabella 1.1 sono elencate le missioni spaziali passate.

<i>Missione</i>	<i>Agenzia spaziale</i>	<i>Cometa</i>	<i>Data dell'incontro</i>	<i>Note</i>
ISEE-3/ICE	NASA	21P/Giacobini-Zinner	11/09/85	Fu rinominata International Cometary Explorer (ICE) e passò l'11/09/85 attraverso la coda di plasma della cometa Giacobini-Zinner
Sakigake Suisei	JAXA	1P/Halley	01/03/86 08/03/86	-
Vega 1 - Vega 2	URSS	1P/Halley	06/03/86	Durante il viaggio verso la cometa le due sonde passarono vicino a Venere e rilasciarono un lander e un pallone per investigarne la struttura atmosferica
Giotto	ESA	1P/Halley 26P/Grigg-Skjellerup	13/03/86	Usando un transito vicino alla Terra, la sua traiettoria fu modificata e il 10/07/92 passò a circa 200 km dal nucleo della cometa 26P/Grigg-Skjellerup
Hubble Space Telescope	NASA/ESA	Shoemaker-Levy 9	luglio 1994	Il telescopio spaziale Hubble riprese la caduta della cometa Shoemaker-Levy 9 su Giove
Ulysses	NASA/ESA	C/1996 B2 - Hyakutake	01/05/96	Progettata per lo studio del Sole e della eliosfera, attraversò fortuitamente la scia di ioni della cometa Hyakutake
Deep Space 1 (DS1)	NASA	19P/Borrelly	22/09/2001	Nel luglio 2009 ha sorvolato l'asteroide 9969 Braille
Deep Impact	NASA	9P/Tempel 1	04/07/05	Lander rilasciato sulla cometa
Comet Nucleus Tour (CONTOUR)	NASA	2P/Encke	-	-
Stardust	NASA	81P/Wild 2	15/01/06	Trovata la Glicina, amminoacido degli organismi viventi

Tabella 1.1 – Le missioni spaziali passate verso le comete.

La prima osservazione *in situ* di una cometa fu eseguita dalla sonda spaziale USA *ISEE-3* che nel 1985 effettuò un fly-by della cometa 21P/Giacobini-Zinner. Successivamente, il passaggio al perielio della cometa 1P/Halley nel 1986 fu seguito da ben sei sonde spaziali (compresa ISEE-3 che effettuò osservazioni a distanza). In seguito sono state progettate diverse altre missioni.

La sonda ISEE 3 (International Sun-Earth Explorer 3) (poi rinominata ICE ossia International Cometary Explorer) era parte di una missione con tre sonde (ISEE 1, 2 e 3) il cui scopo era di studiare il vento solare e le relazioni Terra-Sole ai bordi della magnetosfera terrestre. Il 5 giugno 1985 la sonda si trovò a 26550 km dal nucleo della

cometa 21P/Giacobini-Zinner e pertanto i suoi strumenti di rivelazione di particelle e di campo magnetico poterono misurare le caratteristiche della coda di plasma. L'11 settembre venne eseguita la prima misura in assoluto di una cometa *in situ*: per la prima volta vennero rilevati ioni. La sonda trovò una regione di interazione tra ioni cometari e vento solare e attraversò la coda di plasma della cometa. Furono identificati ioni d'acqua e di monossido di carbonio che confermavano la teoria della *dirty snowball*. La posizione di massimo avvicinamento alla cometa (7862 km) fu raggiunta l'11 settembre con una velocità di flyby di 20.7 km s^{-1} . La sonda non disponeva di alcuna protezione contro la polvere cometaria e si pensava potesse restarne danneggiata; invece rimase relativamente illesa e registrò un tasso di impatti di particelle minore di quello atteso: circa una al secondo (Gurnett et al., 1986). Nel 1986 ICE eseguì osservazioni a distanza della cometa 1P/Halley passando a 31 milioni di km da essa.

Il 1986 fu un anno fondamentale per l'esplorazione spaziale delle comete. Il passaggio della cometa 1P/Halley al perielio fu seguito, con *fly-by* più ravvicinati di quello effettuato da ICE, da altre cinque sonde: Vega 1 e 2, Giotto, Sakigake e Suisei.

Le due sonde Vega giunsero in vicinanza (8890 km la prima e 8030 km la seconda) della cometa nel marzo 1986 ed acquisirono immagini del nucleo. Le prime immagini mostrarono due aree chiare che vennero interpretate inizialmente come un nucleo doppio e furono poi spiegate da due eruzioni del nucleo. Le immagini mostrarono un nucleo scuro e lo spettrometro infrarosso misurò una temperatura di 300-400 K, molto più bassa di quanto ci si potesse aspettare. Tali misure furono spiegate con la presenza di uno strato sottile di materiale refrattario che copre il corpo ghiacciato. Lo spettrometro di massa rivelò, inoltre, materiale di composizione simile a quello delle meteoriti di tipo condrite carbonacea.

Anche le sonde giapponesi Sakigake e Suisei eseguirono misure di plasma. Sakigake (in giapponese "pioniere") mostrò che il vento solare era influenzato dalla presenza della cometa a 6.99 milioni di km di distanza, ma tale misura risultò in contrasto con quella ottenuta da Suisei a 420000 km. L'analizzatore di vento solare di Suisei (ossia "cometa" in giapponese) rilevò la presenza di ioni di acqua, monossido di carbonio e CO_2 (Mukai et al., 1986). Suisei riportò inoltre immagini UV della cometa.

La missione spaziale che fornì il maggior numero di informazioni sulla cometa 1P/Halley fu Giotto.

GIOTTO aveva ben 11 strumenti a bordo, tra cui una camera a più colori, uno spettrometro di massa, un rivelatore di impatti di particelle, strumenti per la misura delle caratteristiche del plasma, un analizzatore di particelle energetiche e un magnetometro. Era inoltre equipaggiato con uno schermo spesso che gli permetteva di "sopravvivere" al flusso di polvere durante l'incontro ravvicinato con la cometa. Il 13 Marzo 1986, GIOTTO giunse in prossimità della cometa 1P/Halley ad una velocità di 68 km s^{-1} . Durante l'attraversamento della chioma la camera inviò a Terra immagini del nucleo. Questo si presentava di forma irregolare e risultarono evidenti due getti di materia molto chiari. Il rivelatore di impatti di grani registrò meno eventi rispetto alle attese ma il tasso di impatti aumentò rapidamente quando la sonda si trovò apparentemente nel raggio di azione di uno dei due getti. 14 secondi prima di raggiungere la minima distanza dalla cometa, GIOTTO venne colpito da un grosso frammento solido che ne modificò l'orientamento rispetto alla Terra. Le comunicazioni

con la sonda vennero ripristinate dopo circa 30 minuti. La sonda avrebbe dovuto giungere a 500 km dalla cometa ma la distanza minima effettivamente misurata è stata di 596 km. L'approccio con la cometa 1P/Halley non fu indolore: parte degli strumenti rimasero seriamente danneggiati.

La composizione chimica dei gas varia con la distanza dal nucleo in una complessa catena di reazioni. Le "molecole genitrici" all'inizio di questa catena riflettono la composizione del nucleo. Come era atteso si riscontrò una dominanza dell'acqua (80%). Altre molecole sono CO (10%), CH₄ (7%), CO₂ (2.5%) e poi NH₃, HCN e vari idrocarburi: C₂H_n, C₃H_m. Furono trovati anche Fe e Na e alcuni modelli indicarono la presenza di S₂ e H₂S come ulteriori molecole genitrici. Il gas cometario viene ionizzato dalla radiazione ultravioletta, dagli elettroni e dallo scambio di carica con il plasma del vento solare. GIOTTO identificò molte specie ioniche, tra cui H₃O⁺ (dominante in prossimità del nucleo), H₂O⁺, OH⁺, C⁺, CH⁺, O⁺, Na⁺, C₂⁺, S⁺ e Fe⁺ (Korth et al., 1987). Nel periodo dell'incontro di GIOTTO, a circa 0.9 U.A. dal Sole, la cometa 1P/Halley emetteva circa 19.8 tonnellate di gas al secondo insieme ad una quantità simile di polveri; in totale c'era un'emissione di 33 tonnellate di materiale al secondo.

Il più grosso grano rivelato aveva una massa di 40 mg sebbene si sia stimato che la particella più massiva che colpì la sonda aveva una massa tra 0.1 e 1 grammo (McDonnell et al., 1986 e 1987). Le informazioni sul plasma fornite dallo spettrometro di massa indicarono che la superficie della cometa era coperta da uno strato di materiale organico.

La composizione chimica della polvere mostrò che, eccetto per l'azoto, tutti gli elementi leggeri sono presenti nella stessa abbondanza riscontrata nel Sole. Tali abbondanze deviano significativamente dai valori ottenuti per la Terra e le meteoriti. Ciò conferma l'ipotesi che la cometa 1P/Halley sia costituita dai materiali più primitivi conosciuti nel Sistema Solare. GIOTTO determinò la composizione chimica di diverse migliaia di grani osservando la presenza di due classi principali di particelle: quelle dominate dagli elementi leggeri (idrogeno, carbonio, azoto, ossigeno), ossia i cosiddetti "grani organici", e altre ricche negli elementi che formano i minerali ossia sodio, magnesio, silicio, calcio e ferro, i cosiddetti "grani minerali" (Kissel et al., 1986; Langevin et al., 1987).

Dopo l'incontro con la cometa 1P/Halley, GIOTTO fu messo in ibernazione; fu riattivato una prima volta il 19 Febbraio 1990 per verificarne lo stato di salute. Tre strumenti erano completamente operativi, quattro parzialmente danneggiati ma utilizzabili mentre gli altri, camera inclusa, erano completamente fuori uso. GIOTTO fu riattivato una seconda volta nel 1992 per l'incontro con un'altra cometa: la 26P/Grigg-Skjellerup che fu avvicinata ad una velocità di 14 km s⁻¹ e ad una distanza di 200 km. Anche in questo secondo approccio vennero analizzate polveri, molecole e plasma. La 26P/Grigg-Skjellerup apparve più piccola e meno attiva rispetto alla cometa 1P/Halley. La scoperta più insolita furono le inusuali onde magnetiche vicino alla cometa. L'attività magnetica aumentava e diminuiva periodicamente ogni 70 secondi circa. Le onde erano generate da ioni pick-up, ossia particelle cariche generatesi dalla rottura dei legami chimici all'interno delle molecole d'acqua che circondavano la cometa, durante il movimento nel campo magnetico creato dal vento solare (Goldstein et al., 1994; Johnstone et al., 1993; McKenna-Lawlor et al., 1993; McDonnell et al., 1993; Patzold et al., 1993; Neubauer et al., 1993).

1.3 LA SONDA ROSETTA DELL'ESA

La Missione ROSETTA, definita Missione Planetaria *Cornerstone* nel programma scientifico a lungo termine dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), raggiungerà nel 2014 la cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, seguendola durante la fase di avvicinamento al perielio. La sonda Rosetta studierà le proprietà chimico-fisiche del nucleo della cometa, l'evoluzione della chioma durante l'avvicinamento della cometa al Sole e lo sviluppo delle regioni più attive della cometa e particolarmente sensibili all'azione del vento solare per più di un anno fino al perielio. In aggiunta alle misure effettuate dagli strumenti scientifici montati sull'*Orbiter*, il *Lander* PHILAE di Rosetta sarà rilasciato sulla superficie del nucleo. Durante il lungo cammino che conduce alla cometa 67P, Rosetta effettuerà il sorvolo (*fly-by*) dei due asteroidi 2867/Steins (già avvenuto il 5 settembre 2008) e 21/Lutetia per ottenerne delle immagini e studiarne le caratteristiche.

1.3.1 Gli obiettivi scientifici della missione ESA Rosetta

La missione internazionale Rosetta, approvata nel 1993 dal "Science Programme Committee" dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), fu definita missione planetaria *Cornerstone* nel programma a lungo termine Horizon 2000 dell'ESA (Bonnet, 1985).

La missione Rosetta è il prosieguo logico della prima missione di successo dell'ESA (GIOTTO) lanciata verso la cometa 1P/Halley (Reinhard, 1986). Il principale obiettivo scientifico della Missione Rosetta consiste nell'indagare le origini del Sistema Solare studiando le origini delle comete. La sonda Rosetta, in principio progettata come una missione *Sample Return* verso le comete (Comet Nucleus Sample Return mission – CNSR) (Huber & Schwehm, 1991), è composta da due macro-elementi: un *Orbiter* e un *Lander* di nome PHILAE. La missione Rosetta, che comprende ben 25 progetti scientifici, è il frutto della collaborazione tra ESA, NASA e varie Agenzie Spaziali dei paesi europei come l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI). La missione prende il nome dalla *Stele di Rosetta*, una lastra in granito scuro (identificato come basalto) conservata presso il British Museum a Londra. La Stele riporta un'iscrizione con tre differenti grafie: geroglifico, demotico e greco; poiché il greco era conosciuto, la stele offrì una chiave decisiva per interpretare e conoscere i geroglifici, il sistema di scrittura utilizzato dagli antichi Egizi. E così, come la Stele di Rosetta fu in grado di svelare i segreti di un'antica civiltà, gli strumenti scientifici a bordo della sonda spaziale Rosetta sono stati progettati per scoprire i misteri degli oggetti più antichi del Sistema Solare: le comete.

Lo studio delle comete è di fondamentale importanza nell'ambito delle scienze planetarie in quanto si pensa che esse contengano i materiali meno processati del Sistema Solare sin dalla loro condensazione nella nebulosa proto-solare. È molto probabile che in tali corpi siano inclusi persino grani di origine pre-solare. Pertanto le proprietà fisiche e chimiche delle comete possono fornire utili informazioni sulla loro genesi ed evoluzione e dunque sulla formazione del Sistema Solare. Prove dirette sul materiale cometario, in particolare sulla composizione chimica dei materiali volatili, sono tuttavia difficili da ottenere. Prima delle missioni spaziali verso le comete 21P/Giacobini-Zinner, 1P/Halley e 26P/Grigg-Skjellerup soltanto le osservazioni

spettroscopiche da Terra consentivano di avanzare ipotesi sulla composizione e sulle proprietà chimiche delle comete (Sezione 1.1).

Le misure *in situ* delle citate missioni cometarie e di quelle successive – ossia la missione Deep-Space 1 verso la cometa 19P/Borrelly (Boice et al., 2002), la missione Stardust verso la cometa 81P/Wild2 (Tsou et al., 2004; Rotundi & Rietmeijer, 2008) e la missione Deep Impact verso la cometa 9P/Tempel1 (Sunshine et al., 2006; Belton et al., 2006) – condussero ad una revisione radicale delle nostre conoscenze sulle comete (Sezione 1.2). In sintesi, tutti i risultati attuali indicano che i nuclei delle comete sono unici, hanno una propria storia e non sono del tutto primitivi. Molti processi fisico-chimici – come la sublimazione, le reazioni foto-chimiche e le interazioni delle comete con il vento solare e le radiazioni ad alta energia nello spazio – alterano il materiale presente all'origine nel nucleo. Le osservazioni da Terra e *in situ* durante i fly-by delle sonde non sono pertanto sufficienti a rappresentare l'attuale composizione molecolare dei nuclei a partire dai tempi della formazione, sebbene le informazioni oggi disponibili dimostrino già un moderato livello di evoluzione del materiale cometario.

Per ottenere informazioni sulla composizione del nucleo di una cometa e sui processi che lo hanno alterato, è necessario studiare *in situ* la sua superficie e l'ambiente circostante mediante misure analitiche altamente sensibili, includendo anche il plasma e i gas ionizzati della cometa di cui non è ancora del tutto nota l'evoluzione durante l'avvicinamento al perielio (Ip, 2004; Hansen et al., 2007). Gli obiettivi della missione Rosetta sono dunque i seguenti (Schwehm & Schulz, 1999):

- la caratterizzazione globale del nucleo;
- la determinazione delle sue proprietà dinamiche;
- lo studio della morfologia e della composizione della superficie;
- la determinazione della composizione chimica, mineralogica e isotopica dei materiali volatili e refrattari nel nucleo;
- la determinazione delle proprietà fisiche e delle relazioni che intercorrono tra materiali volatili e refrattari nel nucleo;
- lo studio dello sviluppo dell'attività cometaria e dei processi nello strato superficiale del nucleo e nella chioma interna, cioè l'interazione gas/polveri;
- lo studio dell'evoluzione delle regioni di interazione tra il vento solare e l'*outgassing* durante l'avvicinamento al perielio.

Per ottenere questi obiettivi Rosetta studierà in dettaglio le proprietà del nucleo, l'evoluzione fisico-chimica della chioma e il plasma della cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, dal principio delle sue attività a grande distanza dal Sole (circa 3 U.A.) fino a oltre il perielio (circa 1.2 U.A.). La Tabella 1.2 mostra le fasi salienti della missione Rosetta.

Rosetta combinerà due strategie per la caratterizzazione del nucleo della cometa. Da un lato, l'evoluzione dell'attività cometaria lungo l'orbita al decrescere della distanza eliocentrica sarà oggetto di studio da parte degli strumenti dell'*orbiter* misurando le proprietà fisiche e chimiche del nucleo e mediante l'analisi *in situ* del suo ambiente circostante. Dall'altro lato, il *lander* di Rosetta (PHILAE) potrà studiare direttamente la superficie del nucleo.

Fase della missione Rosetta	Data nominale
Launch	02/03/2004
First Earth Gravity Assist (ESB-1)	04/03/2005
Mars Gravity Assist (MSB)	25/02/2007
Second Earth Gravity Assist (ESB-1)	13/11/2007
2867 Steins Fly-by	05/09/2008
Third Earth Gravity Assist (ESB-3)	13/11/2009
21 Lutetia Fly-by	10/07/2010
Rendezvous Manœuvre 1	23/01/2011
Start of Hibernation	luglio 2011
Hibernation Wake up	gennaio 2014
Rendezvous Manœuvre 2	22/05/2014
Between 4.5 and 4.0 AU	
Start of Near-Nucleus	22/08/2014
Operations at 3.25 AU	
PHILAE delivery	10/11/2014
Start of Comet Escort	16/11/2014
Perihelion Passage	agosto 2015
End of Nominal Mission	31/12/2015

Tabella 1.2 – Le tappe del lungo viaggio di Rosetta (Cortesia ESA).

1.3.2 Il piano di volo: la fase di crociera e il rendez-vous con la cometa

Il *target* della sonda Rosetta era inizialmente la cometa 46P/Wirtanen. Un inconveniente avvenuto nel dicembre 2002 su un razzo Ariane costrinse l'ESA a posticipare la data del lancio, prevista per gennaio 2003, e a modificare la cometa "bersaglio" di Rosetta, attualmente indirizzata verso la cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. Rosetta fu infine messa in orbita il 2 marzo 2004 mediante il lanciatore Ariane-5 G+ dalla base *Guyana Space Center* sita a Kourou in Guyana francese. Durante un viaggio lungo 10 anni attraverso il Sistema Solare, Rosetta sta compiendo cinque rivoluzioni intorno al Sole, attraverserà la fascia degli asteroidi fin oltre 5 U.A. e nel 2014 raggiungerà la sua destinazione.

Per acquistare energia sufficiente a raggiungere l'orbita del suo *target*, lo *spacecraft* si è servito di ben quattro manovre di *gravity assist* (3 *Earth swing-by* e 1 *Mars swing-by*) (Figura 1.4). Il 5 settembre 2008, tra il secondo e il terzo *Earth swing-by*, la sonda Rosetta ha sorvolato con successo l'asteroide 2867 Steins alla distanza minima di 802 km e alla velocità relativa di 8.6 km s^{-1} . Dopo l'ultimo *gravity assist* (il terzo *Earth swing-by*) Rosetta entrerà di nuovo nella fascia principale degli asteroidi ed il 10 luglio 2010 effettuerà il *fly-by* dell'asteroide 21 Lutetia alla distanza minima di circa 3000 km e alla velocità relativa di 15 km s^{-1} . Lo *spacecraft* entrerà poi in fase di ibernazione nel luglio 2011. Infine, a gennaio 2014 Rosetta uscirà dalla fase di ibernazione e a maggio 2014 inizierà ad eseguire una serie di manovre di *rendezvous* che guideranno opportunamente la sonda verso il suo bersaglio.

La seconda manovra di *rendezvous*, che avverrà a circa 4.5 U.A. dal Sole, consentirà di diminuire progressivamente a circa 25 m s^{-1} la velocità relativa dello *spacecraft* rispetto a quella della cometa e, a partire dal 22 maggio 2014, comincerà la fase di avvicinamento alla cometa (*near comet drift phase*) che durerà finché la distanza da essa non sarà ridotta a 10000 km. Tale fase sarà attuata sulla base della determinazione dell'orbita a partire da specifiche osservazioni astrometriche da Terra, prima che la

cometa sia intercettata dalle camere a bordo della sonda. Il punto finale della *near comet drift phase*, detto “punto di acquisizione della cometa” (*Comet Acquisition Point, CAP*), sarà raggiunto ad una distanza inferiore a 4 U.A. dal Sole. Non appena i pannelli solari avranno fornito energia sufficiente a portare lo *spacecraft* in uno stato operativo ottimale, saranno acquisite le immagini della cometa con la camera di navigazione di bordo (NAVCAM). Le effemeridi della cometa saranno quindi aggiornate grazie alle osservazioni a bordo.

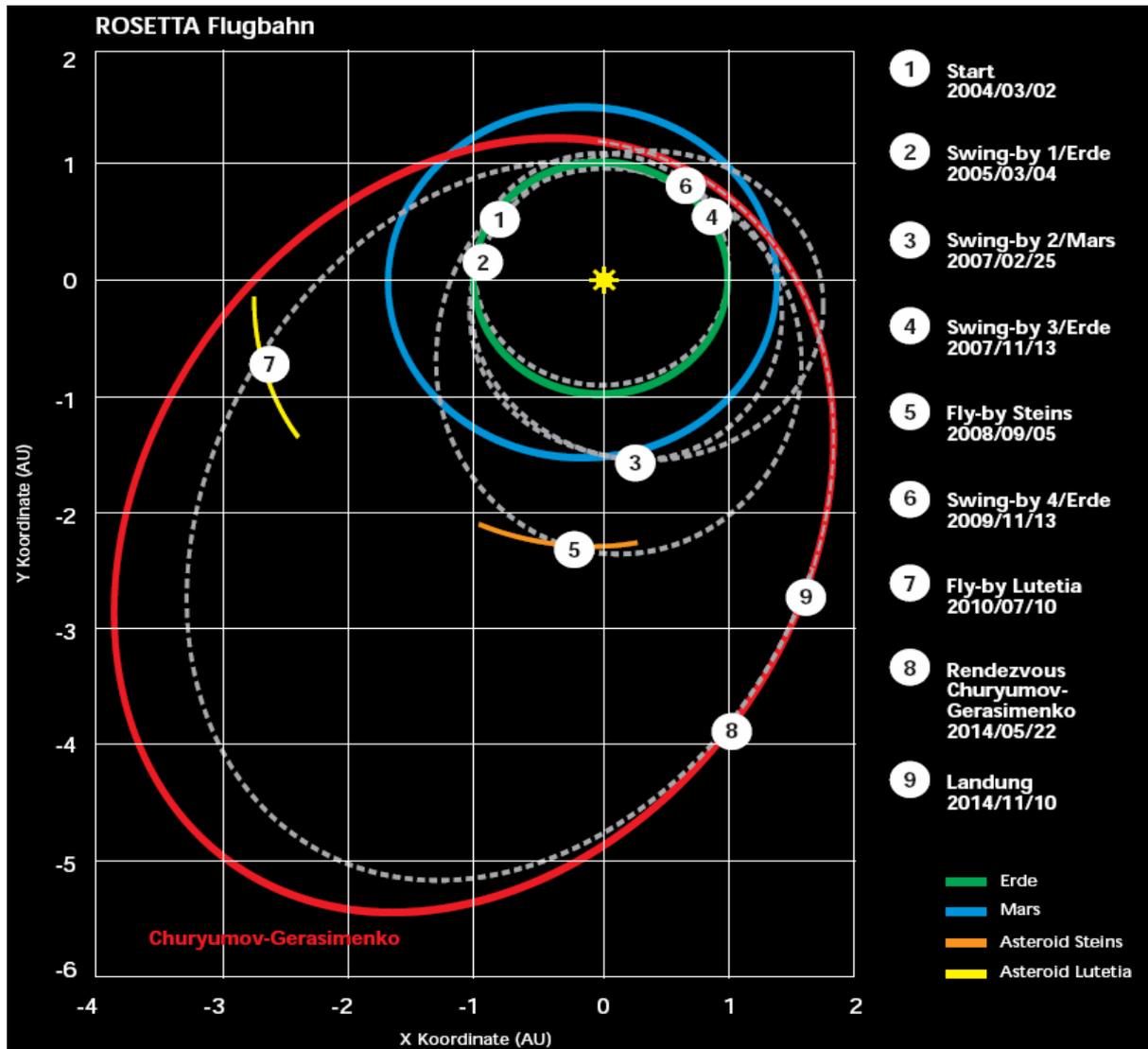


Figura 1.4 – La traiettoria della sonda Rosetta per raggiungere la cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko (Cortesia ESA).

Appena raggiunto il CAP, inizierà la fase di approccio alla cometa (*far approach trajectory phase*). Al termine di tale fase, che durerà circa 30 giorni, la velocità relativa tra Rosetta e la cometa sarà ridotta a 1.5 m s^{-1} , alla distanza di circa 300 raggi del nucleo cometario. A questo punto le misure al *landmark* e le misure radiometriche saranno impiegate per effettuare una determinazione accurata delle posizioni relative dello *spacecraft* e della cometa, delle rispettive velocità relative e della rotazione e della gravità del nucleo al fine di apportare piccole correzioni alle orbite per un approccio ottimale alla cometa. Tali informazioni saranno utili ad iniziare le

operazioni di inserimento della sonda nell'orbita della cometa e di *close approach*, alla distanza di circa 60 raggi della cometa e alla velocità relativa di pochi cm s^{-1} . Alla distanza di circa 25 raggi della cometa una manovra di "cattura" chiuderà l'orbita. Le orbite polari a $5 \div 25$ raggi del nucleo cometario saranno usate per ottenere una mappa del nucleo; tale fase, detta *global mapping phase*, inizierà il 22 agosto 2014. Dopo aver completato lo studio globale del nucleo saranno selezionate 5 aree ($500 \times 500 \text{ m}^2$) per osservazioni ravvicinate (*close observation phase*), ossia ad una distanza inferiore a 1 raggio del nucleo. Idealmente, durante questa fase, tutti gli strumenti a bordo dell'*orbiter* saranno operativi. A causa delle lunghe distanze geocentriche e del limitato flusso di dati (circa 14 kbit s^{-1}) nelle telecomunicazioni, sarà necessario effettuare una pre-elaborazione di dati a bordo e un loro immagazzinamento temporaneo nella memoria di massa (SSMM) dello *spacecraft*. Alla fine della *close observation phase* sarà selezionata l'area di sbarco per PHILAE sulla base dei dati raccolti. Il *lander* sarà rilasciato da un'orbita eccentrica (la minore altezza possibile al "pericentro", il punto dell'orbita più vicino al centro di forza) con un passaggio al pericentro vicino al sito di approdo desiderato. Un meccanismo di espulsione separerà il *lander* dallo *spacecraft* con una velocità relativa massima di circa 1 m s^{-1} . Il tempo e la direzione della separazione Rosetta-PHILAE saranno scelti in modo tale che il *lander* approdi con le minime velocità relative, orizzontali e verticali, rispetto alla superficie della cometa. Dopo il rilascio del *lander* il 10 novembre 2014 alla distanza di 3 U.A. dal Sole, lo *spacecraft* sarà immesso su un'orbita ottimizzata per ricevere i dati trasmessi dal *lander* e ritrasmetterli a Terra. Per adattarsi alle sequenze operative del *payload* il *lander* potrà essere comandato direttamente dall'*orbiter*.

Le attività iniziali di PHILAE dureranno 5 giorni ma non si escludono tempi operativi più lunghi. Dopodiché l'*orbiter* trascorrerà almeno 200 giorni in orbita, in stretta vicinanza al nucleo, fino al passaggio al perielio della cometa, raccogliendo dati dal *lander* ad intervalli regolari, almeno finché esso rimarrà operativo. L'obiettivo di questa fase (*escort phase*) consiste nel monitorare il nucleo e le sue regioni attive, i getti di gas e di polveri e di analizzare gas, polveri e plasma della chioma interna dall'inizio all'apice della sua attività. Le geometrie orbitali dipenderanno dai fattori di sicurezza e dagli scopi scientifici, tenendo conto che il servizio di trasmissione delle telecomunicazioni deve essere mantenuto per l'intero periodo di attività del *lander*. La progettazione della missione dipenderà dal risultato delle operazioni precedenti e, in particolare, dall'intensità dell'attività cometaria. Il monitoraggio esteso di regioni differenti in prossimità del nucleo potrebbe essere realizzato da successivi *fly-by* a bassa velocità (qualche m s^{-1}) con orbite pressoché iperboliche.

Va osservato che le orbite di Rosetta saranno sensibilmente perturbate da alcuni fattori come la gravità del Sole, la spinta dei gas e delle polveri emessi dalla cometa; in sostanza tali orbite sono alquanto diverse da quelle relative alle sonde spaziali che orbitano intorno ai pianeti. Per mantenere lo *spacecraft* sulla traiettoria richiesta occorreranno operazioni specifiche e molto accurate.

Rosetta rimarrà in orbita intorno alla cometa dopo il passaggio al perielio che avverrà in agosto 2015, fino al termine nominale della missione prevista per il 31 dicembre 2015. Non si escludono ulteriori operazioni come l'escursione della coda in vicinanza della cometa, qualora ce ne fosse la possibilità e lo *spacecraft* fosse ancora in condizioni di operare.

1.3.3 La sonda Rosetta: il payload dell'Orbiter e del Lander

Il progetto di Rosetta è basato su un'armatura centrale di forma approssimativamente cubica ($2.8 \times 2.1 \times 2.0 \text{ m}^3$) con una piattaforma principale di alluminio a nido d'ape (*honeycomb*) (Figura 1.5). La massa totale è di 2900 kg, inclusi i 100 kg del *Lander* PHILAE e i 165 kg del *payload* scientifico dell'*Orbiter*. Due pannelli solari, ciascuno di 32 m^2 , si estendono sui lati opposti del cuboide dispiegandosi fino a 32 m. Lo *spacecraft* è composto da due moduli primari: il *Payload Support Module*, che sostiene la strumentazione scientifica e due bracci estensibili (*boom deployment mechanisms*) alla sommità dell'armatura, e il *Bus Support Module*, che sostiene i sottosistemi del satellite nella parte più bassa. Un'antenna parabolica sterzante ad alto guadagno avente il diametro di 2.2 m è montata su un lato mentre il *Lander* PHILAE è montato dalla parte opposta.

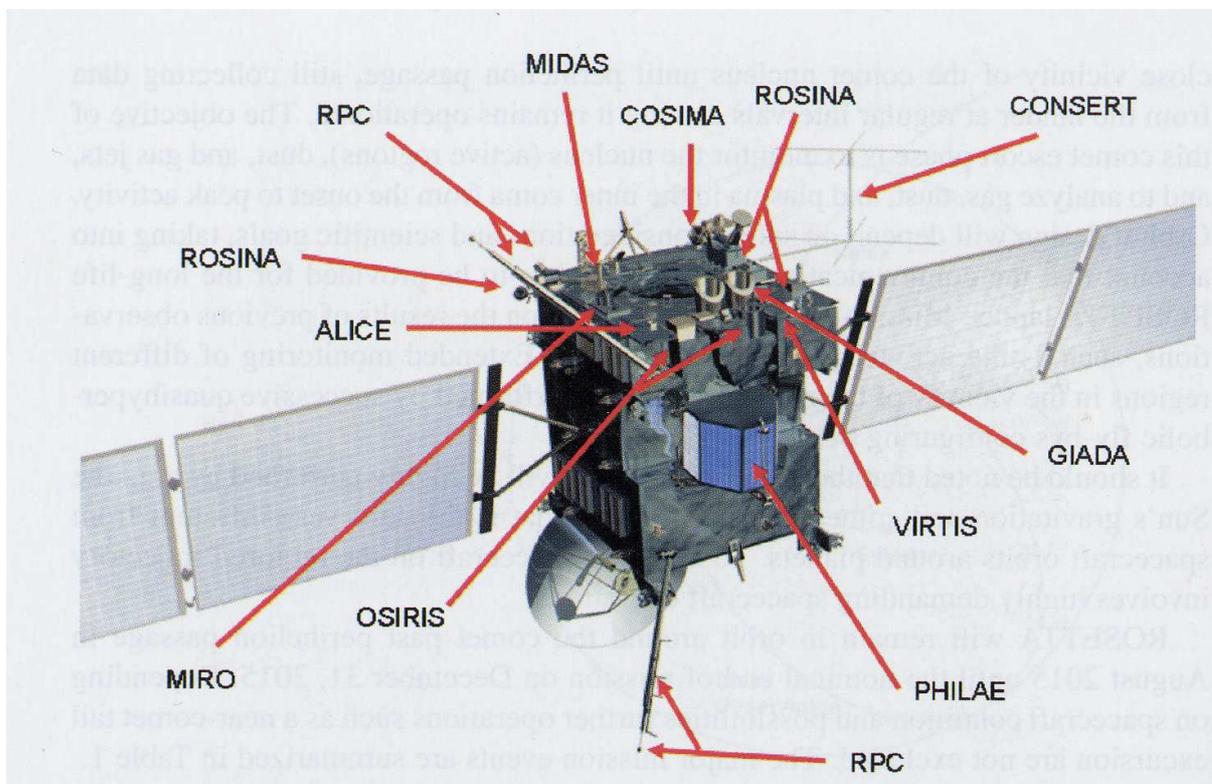


Figura 1.5 – La sonda Rosetta e il suo *payload* scientifico. Sono mostrati tutti gli strumenti dell'*Orbiter*, compreso il *Lander* PHILAE (Cortesia ESA).

Il pannello degli strumenti scientifici è montato alla sommità ed è progettato per essere puntato continuamente verso la cometa mentre la sonda è in orbita; invece l'antenna e i pannelli solari sono rispettivamente rivolti verso la Terra e il Sole. I radiatori sono montati sul retro e dal lato dei pannelli che sono rivolti lontano dal Sole e dalla cometa. Al centro dello *spacecraft*, sporgente dal retro, c'è un meccanismo di propulsione (*vertical thrust*) che fornisce la spinta necessaria alle manovre principali e comprende due serbatoi aventi la capacità di 1106 litri contenenti propellente (il più alto) e ossidante (il più basso). Per fornire un ΔV di 2200 m s^{-1} lungo il tragitto dell'intera missione è necessario un ammontare di 660 kg di propellente (bipropellente

a monometilidrazina ($(\text{CH}_3)_2\text{NH}_2/\text{N}_2\text{O}_2$) e 1060 kg di ossidante (tetrossido di azoto N_2O_4). Inoltre sono presenti anche dei serbatoi a pressione aventi la capacità di 35 litri. Lo *spacecraft* è stabilizzato in assetto sui 3 assi (*three-axis stabilized*), ossia il suo assetto (*attitude*) è costantemente regolato facendo ruotare il satellite soltanto intorno ai tre assi principali di inerzia in modo da evitare effetti di nutazione. L'orientamento è controllato da 24 propulsori (*thrusters*) che esercitano una spinta di 10 N ciascuno. L'assetto è mantenuto tramite 4 *reaction wheel*, in aggiunta a 2 *star tracker*, sensori solari, camere di navigazione e 3 giroscopi laser. L'energia è fornita dai pannelli solari. Le celle solari impiegate sono celle al silicio di 200 μm a bassa intensità e temperatura e misurano 61.95 x 37.75 mm^2 . Uno strato protettivo di vetro trattato con il cerio (Ce) e avente lo spessore di 100 μm ricopre completamente ogni cella solare. I pannelli solari forniranno una potenza di 395 W a 5.25 U.A. e 850 W a 3.4 U.A. quando inizieranno le operazioni alla cometa. L'energia è immagazzinata in 4 batterie NiCd di 10 Ah che assicurano una tensione di 28 V. Le comunicazioni sono mantenute mediante un'antenna ad alto guadagno, un'antenna fissa di 0.8 m a medio guadagno e 2 antenne omnidirezionali a basso guadagno. Rosetta utilizza un sistema di telecomandi in banda-S per le comunicazioni verso il satellite (*uplink*) e un sistema di telemetria e di dati scientifici in banda-S e in banda-X per le comunicazioni verso la Terra (*downlink*), con un flusso di trasmissione di dati da 5 a 20 kbit s^{-1} . I riscaldatori (*heaters*) a bordo impediscono che gli strumenti raggiungano temperature troppo basse durante il viaggio quando la sonda è molto distante dal Sole.

Il *payload* dell'**Orbiter** di Rosetta comprende 12 strumenti scientifici (Figura 1.5) più il *Lander*. I consorzi scientifici che fanno capo alle agenzie spaziali di vari stati europei insieme agli Stati Uniti hanno prodotto “lo stato dell'arte” di tali strumenti di cui segue una breve descrizione (Figura 1.6):

ALICE – È uno spettrometro ad immagini nell'ultravioletto che analizzerà i gas nella chioma e nella coda e misurerà il tasso di produzione di H_2O , CO e CO_2 della cometa. Inoltre fornirà informazioni sulla composizione della superficie del nucleo.

CONSERT – È una “sonda” che effettuerà misure di *sounding* studiando gli effetti delle radioonde che penetrano all'interno del nucleo.

COSIMA – È uno spettrometro di massa a ioni secondari che analizzerà le caratteristiche dei grani di polvere emessi dalla cometa, come la loro composizione e la loro natura (organica o inorganica).

GIADA – È lo strumento cui è dedicata la presente tesi, atto a misurare velocità, massa e quantità di moto dei grani di polvere provenienti dal nucleo e i flussi di polveri emessi dalla cometa e provenienti da direzioni diverse in funzione della distanza eliocentrica (dettagli nel Capitolo 2).

MIDAS – È un sistema a microimmagini per l'analisi di grani catturati nell'ambiente di polveri circostante la cometa e fornirà informazioni su forma, dimensione, volume e popolazione delle particelle.

MIRO – È uno strumento a microonde progettato per determinare le abbondanze dei principali gas emessi, la velocità di espulsione dei gas dalla superficie e la temperatura al di sotto della superficie del nucleo.

OSIRIS – È uno strumento per il telerilevamento di immagini ottiche, spettroscopiche e infrarosse. È composto da una camera grandangolare e una camera a campo corto per ottenere immagini ad alta risoluzione del nucleo della cometa.

ROSINA – È uno spettrometro di massa per l'analisi di ioni e di specie neutre progettato per lo studio della composizione dell'atmosfera e della ionosfera della cometa, della velocità delle particelle di gas ionizzati e delle reazioni cui partecipano.

RPC – È uno strumento composto da 5 sensori progettato per studiare la struttura e le dinamiche relative all'interazione cometa-vento solare durante l'avvicinamento della cometa al Sole. Inoltre RPC misurerà le proprietà fisiche del nucleo e, durante la fase di crociera, sarà utile a fornire informazioni scientifiche relative ad eventuali incontri con code di ioni e scie di polveri cometarie.

RSI – È uno strumento per l'analisi dei segnali radio dello *spacecraft* utilizzato per misurare la massa, la densità e la gravità del nucleo.

VIRTIS – È uno spettrometro ad immagini nel visibile e nell'infrarosso che studierà la natura dei solidi e la temperatura sulla superficie del nucleo. Inoltre identificherà i gas della cometa e caratterizzerà la chioma.

In aggiunta ai progetti scientifici appena descritti, l'*orbiter* è dotato di un radiometro (SREM) progettato per monitorare l'ambiente di particelle ionizzate e altamente energetiche in prossimità dello *spacecraft*. L'obiettivo di SREM è quello di fornire una misura continuativa delle particelle altamente energetiche che Rosetta incontra lungo il suo cammino e sfruttare queste informazioni anche per scopi di analisi della missione.

Instrument name	Scientific objectives	Principal investigator
ALICE	UV-spectroscopy (70 nm–205 nm)	Alan Stern, SRI, Boulder, USA
CONSERT	Radio sounding and nucleus tomography	Wlodek Kofman, LPG, CNRS/UJF, Grenoble, France
COSIMA	Dust mass spectrometer (SIMS, $m/\mu\text{m} \approx 2,000$)	Martin Hilchenbach (formerly Jochen Kissel), MPS, Lindau, Germany
GIADA	Dust velocity and impact momentum Measurement, Contamination monitor	Luigi Colangelo INAF, Naples, Italy
MIDAS	Grain morphology with an atomic force microscope at nm resolution	Willi Riedler IWF, Graz, Austria
MIRO	Microwave spectroscopy (1.3 nm and 0.5 nm)	Sam Gulkis, JPL, Pasadena, USA
OSIRIS	Multi-colour imaging with a narrow and a wide angle camera	Horst-Uwe Keller MPS, Lindau, Germany
ROSINA	Neutral Gas and ion mass spectroscopy DFMS: 12–200 AMU, $M/\Delta M \approx 3,000$ RTOF: 12–350 AMU, $M/\Delta M > 1,000$ incl. Gas Pressure Sensor	Hans Balsiger Universität Bern Switzerland
RPC	Ion composition analyser (ICA)	Rickard Lundin, IRF, Kiruna, Sweden
	Ion and electron sensor (IES)	Jim Burch, SRI, San Antonio, USA
	Langmuir probe (LAP)	Anders Eriksson, (formerly Rolf Boström), IRF Uppsala, Sweden
	Fluxgate magnetometer (MAG)	Karl-Heinz Glassmeier, IGEP, TU Braunschweig, Germany
	Mutual impedance probe (MIP)	Jean-Gabriel Trotignon, LPCE/CNRS, Orleans, France
	Plasma interface unit (PIU)	Chris Carr, Imperial College, London, England
RSI	Radio science experiment	Martin Pätzold, Universität Köln, Germany
SREM	Standard radiation environment monitor	
VIRTIS	VIS and IR mapping spectroscopy (0.25–5 μm)	Angioletta Coradini, IAS-CNR, Rome, Italy

Figura 1.6 – Il *payload* scientifico dell'*Orbiter* di Rosetta (Cortesia ESA).

Il **Lander** PHILAE di Rosetta si può considerare di per sé uno *spacecraft* scientifico che è trasportato e rilasciato sulla cometa dall'*Orbiter*. I 10 strumenti scientifici e i vari sottosistemi montati a bordo del *Lander* (Figura 1.7) sono forniti da un consorzio di agenzie spaziali e di istituti di ricerca che fanno capo a 6 stati europei e all'ESA. Una descrizione più dettagliata del *Lander* PHILAE si può trovare in Bibring et al. (2007).

Instrument name	Scientific objectives	Principal investigator
APXS	α -p-X-Ray spectrometer	Göstar Klingelhöfer, (formerly Rudi Rieder), Universität Mainz Germany
CIVA	Panoramic camera and IR microscope	Jean-Pierre Bibring, IAS, Orsay, France
CONSERT	Comet nucleus sounding	Wlodek Kofman, LPG, CNRS/UJF, Grenoble France
COSAC	Evolved gas analyser: elemental and molecular composition	Fred Goesmann, (formerly Helmut Rosenbauer), MPS, Lindau, Germany
MUPUS	Multi purpose sensor for surface and sub-surface science	Tilman Spohn, DLR Berlin, Germany
PTOLEMY	Evolved gas analyser: isotopic composition	Ian P. Wright, Open University, Milton Keynes, UK
ROLIS	Descent camera	Stefano Mottola, DLR Berlin, Germany
ROMAP	RoLand magnetometer (ROMAG) Plasma monitor (SPM)	Hans-Ulrich Auster IGEP, TU Braunschweig, Germany Istvan Apathy, KFKI, Budapest, Hungary
SESAME	Comet acoustic surface Sounding experiment (CASSE) Dust impact monitor (DIM) Permittivity probe (PP)	Klaus J. Seidensticker, (formerly Dirk Möhlmann), DLR Cologne, Germany Istvan Apathy, KFKI, Budapest, Hungary Walter Schmidt, (formerly Harri Laakso) FMI, Helsinki, Finland
SD-2	Drill, sample, and distribution system	Amalia Ercoli-Finzi, Politecnico di Milano Milano, Italy

Figura 1.7 – Il *payload* scientifico del *Lander* PHILAE di Rosetta (Cortesia ESA)

La *mapping phase* del nucleo e l'indagine ravvicinata di poche sue regioni considerate scientificamente molto interessanti e sufficientemente sicure per lo sbarco, permetteranno di tracciare lo scenario per il rilascio di PHILAE dall'*orbiter*. Il sito finale di approdo sarà selezionato per fare atterrare il modulo nel novembre 2014, quando la cometa si troverà a circa 3 U.A. dal Sole. Il *lander* sarà letteralmente lasciato cadere sulla superficie della cometa da una distanza di circa 1-2 raggi del nucleo. Sofisticati meccanismi di atterraggio e di ancoraggio (un arpione) assicureranno uno sbarco sicuro, anche in condizioni estreme come inclinazioni della superficie molto elevate o molto lievi.

Durante la discesa sul nucleo le immagini della superficie saranno riprese dalle camere CIVA e ROLIS. Subito dopo lo sbarco partirà il programma di analisi scientifiche da parte degli strumenti a bordo del *lander*. Le analisi coinvolgeranno tutti gli esperimenti del *lander* che saranno alimentati dalle batterie di bordo per circa 5 giorni; CIVA e ROLIS continueranno a fornire immagini della superficie e dell'ambiente circostante il sito di sbarco (panorami, attività, visioni dettagliate delle strutture di superficie). SESAME eseguirà misure di *sounding* acustico ed elettrico della superficie e effettuerà il monitoraggio degli impatti di polvere dovuti all'attività cometaria. CONSERT riceverà e trasmetterà i segnali radio al suo partner gemello montato sull'*orbiter* in modo da esplorare l'interno e la struttura globale del nucleo. Il campo magnetico e il plasma circostanti al sito di sbarco e le loro interazioni con il vento solare saranno oggetto di studio da parte di ROMAP. Lo spettrometro APXS e lo strumento MUPUS saranno spiegati sulla superficie per misurare rispettivamente la composizione chimica dei materiali superficiali e le proprietà fisiche degli strati al di sotto della superficie. Le attività combinate della trivella e del raccogliitore di campioni SD-2, dello spettrometro di massa PTOLEMY e del cromatografo a gas COSAC consentiranno di raccogliere ed analizzare campioni della superficie e della zona sottostante del nucleo ed ottenere informazioni sulla loro composizione isotopica e molecolare. Una camera ed uno spettrometro infrarosso dell'esperimento CIVA forniranno immagini e misure dei campioni raccolti da SD-2 dopo che essi saranno stati vaporizzati nelle fornaci di PTOLEMY e COSAC.

Le misure iniziali saranno eseguite mediante una sequenza prestabilita di comandi memorizzati nel computer di bordo del *lander*. Le informazioni relative a tali misure saranno ritrasmesse a Terra mediante l'*orbiter* e, dopo un'analisi di primo livello, schemi di misure raffinate e modificate saranno inviati al *lander*, ancora tramite l'*orbiter*, per essere eseguiti. Dopo l'intensa attività di misure dei primi 5 giorni, il *lander* sarà predisposto per il programma di esplorazione della cometa a lungo termine, misurando l'evoluzione nel tempo (diurna, lungo un'orbita, ...) dell'attività del nucleo e dei fenomeni ambientali, raccogliendo ulteriori campioni del nucleo in zone differenti intorno al sito di sbarco e continuando ad esplorare l'interno della cometa (mediante le misure di CONSERT). Il programma a lungo termine sarà alimentato da batterie supplementari che si possono ricaricare mediante i generatori solari a bordo di PHILAE. Ci si aspetta che il *lander* sopravvivrà all'ambiente ostile sulla superficie della cometa per pochi mesi e almeno fino alla distanza di 2 U.A. dal Sole.

1.4 IL TARGET PRINCIPALE DI ROSETTA: LA COMETA 67P/CHURYUMOV-GERASIMENKO

La cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko è una cometa di corto periodo appartenente alla famiglia cometaria di Giove (*Jupiter Family Comets*, JFC) (Lamy et al., 2007). Fu scoperta per caso il 9 settembre 1969 da Klim Ivanovic Churyumov e Svetlana Ivanovna Gerasimenko sulle lastre fotografiche del telescopio Maksutov di 50 cm dell'Osservatorio di Alma Ata, Kazakistan, utilizzate per osservare la cometa 35P/Comas-Sola.

Si pensa che le comete appartenenti alla famiglia cometaria di Giove si siano formate nella Fascia di Kuiper. Poiché la distribuzione dimensionale nella *Kuiper Belt* per gli oggetti aventi dimensioni inferiori ai 50 km è governata dalle collisioni, le comete JFC potrebbero rappresentare in realtà dei frammenti generati da collisioni all'interno di tale fascia. Esse furono espulse dalla *Kuiper Belt* grazie all'azione di Nettuno. Ripetute perturbazioni gravitazionali da parte dei pianeti giganti più esterni, sospinsero le comete verso l'interno del Sistema Solare dove infine furono catturate da Giove su orbite quasi ellittiche di corto periodo intorno al Sole (Morbidelli e Brown, 2004; Duncan et al., 2004). Pertanto esse si formarono in regioni ai confini del sistema planetario e, a causa delle basse temperature, conservarono al loro interno i materiali più antichi dalla formazione del Sistema Solare.

L'evoluzione dell'orbita della 67P/Churyumov-Gerasimenko è attualmente controllata da Giove. Calcoli basati su modelli evolutivi hanno rivelato che negli ultimi 200 anni la cometa ha avuto molti incontri con il pianeta gigante; l'ultimo è avvenuto il 4 febbraio 1959 (10 anni prima della scoperta della cometa) ed è stato il più vicino al pianeta, ad una distanza di appena 0.052 U.A. (circa 109 raggi gioviani) (Belyaev et al., 1986). L'incontro ravvicinato ha modificato significativamente l'orbita della cometa; ad esempio, la distanza al perielio è passata da 2.744 U.A. a 1.280 U.A., rendendo la cometa a portata della missione Rosetta. I suoi parametri orbitali attuali sono mostrati nella Figura 1.8 e resteranno sostanzialmente invariati ben oltre la durata della missione Rosetta.

67P / Churyumov-Gerasimenko	
Perihelion distance (AU)	1.28931109
Eccentricity	0.631935597
Ascending node (deg)	50.923016
Perihelion argument (deg)	11.367883
Inclination (deg)	7.1272258
Perihelion date	2002-Aug-18. 23754

Figura 1.8 – Parametri orbitali della cometa bersaglio di Rosetta (Cortesia ESA)

L'intensa caratterizzazione fisica della cometa tramite osservazioni da Terra è iniziata solo nel 2004 in concomitanza con il lancio di Rosetta. 67P/Churyumov-Gerasimenko è un oggetto dalle piccole dimensioni avente un raggio di circa 2 km, forse con un albedo basso e una forma asimmetrica (Lamy et al., 2007). Si tratta, dunque, della cometa più piccola che sia mai stata esplorata da un veicolo spaziale. Il tasso di produzione d'acqua al perielio è di circa 10^{28} molecole s^{-1} e la chimica del gas della

chioma sembra essere dominata dal carbonio impoverito (A'Hearn et al., 1995; Schulz et al., 2004). La struttura della chioma suggeriscono l'esistenza di 2-3 regioni attive sul nucleo, almeno per quanto concerne la sua apparizione nel 2003-2004 (Figura 1.9). Durante l'ultimo passaggio al perielio la cometa presentò un'interessante *neck-line* dovuta all'attività delle polveri del nucleo (Fulle et al., 2004). E' anche noto che la cometa produce una scia di polveri di grani "grossi" lungo la sua orbita (Sykes e Walker, 1992). Se comparata al suo *target* iniziale (la cometa 46P/Wirtanen), la 67P/Churyumov-Gerasimenko è molto più rappresentativa in quanto ha le caratteristiche di un oggetto evoluto, permette le esplorazioni *in situ* dell'intera struttura del nucleo, è caratterizzata da un cospicuo numero di rari fenomeni cometari e consente di avere una visione globale delle comete. Gli articoli di Agarwal et al. (2007), Hansen et al. (2007) e Lamy et al. (2007) riassumono le attuali conoscenze del *target* principale della missione Rosetta.

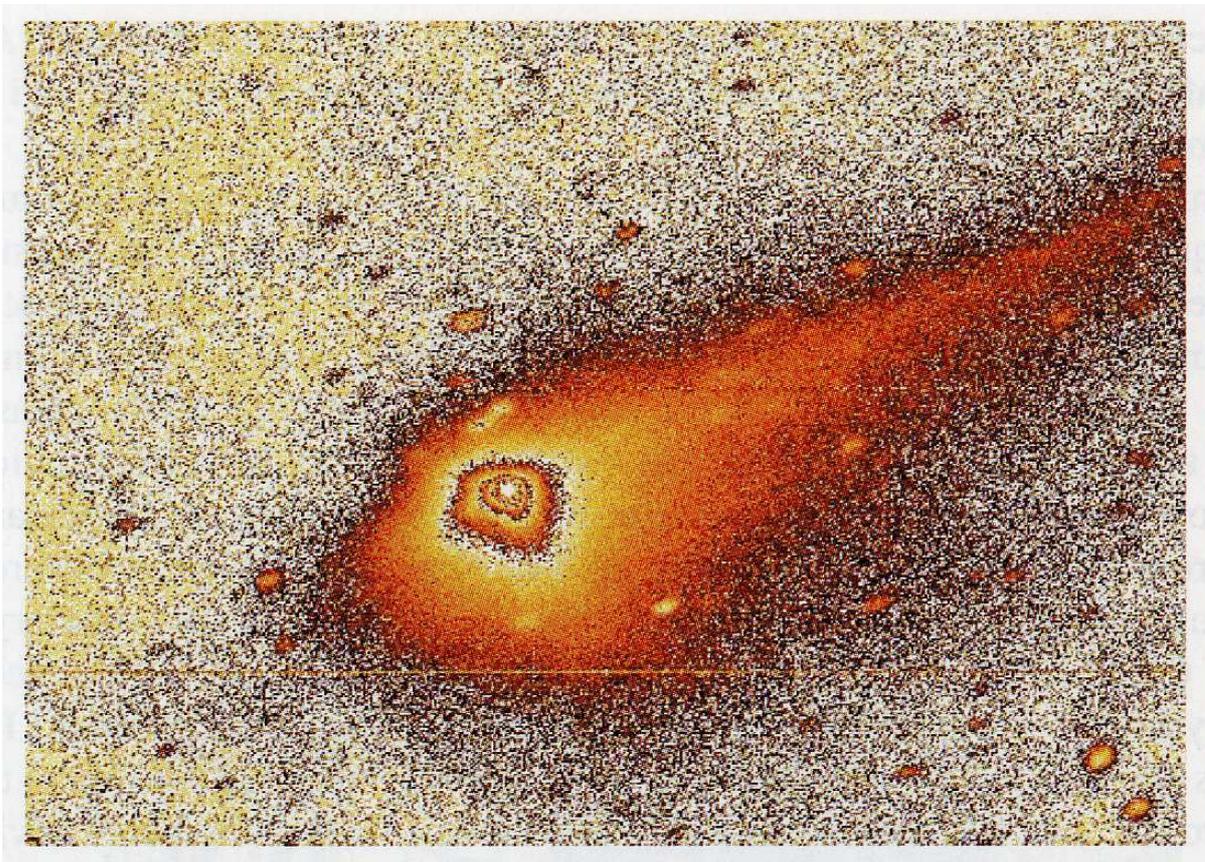


Figura 1.9 – La cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko a 2.49 U. A. dal Sole, ripresa il 9 marzo 2004 con lo strumento EFOOSC2 del telescopio di 3.6 m dell'European Southern Observatory (ESO) in Cile (Cortesia di Hermann Boehnhardt ed ESO)

2 Lo strumento GIADA e i suoi sottosistemi

2.1 OBIETTIVI SCIENTIFICI

GIADA (Grain Impact Analyser and Dust Accumulator) è lo strumento italiano integrato a bordo della sonda Rosetta dedicato allo studio dei flussi di polveri emesse dal nucleo della cometa 67P/Churyumov–Gerasimenko in funzione della distanza eliocentrica ed alla misura delle caratteristiche fisiche e morfologiche dei singoli grani di polvere (quantità di moto, velocità, massa e dimensioni). La strategia della missione Rosetta prevede che la sonda segua la cometa per molti mesi a distanza ravvicinata, in modo che gli strumenti scientifici siano costantemente immersi nelle scie di polvere e gas circostante il nucleo. Ciò offre a GIADA la straordinaria opportunità di poter studiare *in situ*, per la prima volta, le caratteristiche chimico-fisiche e l'evoluzione dinamica della polvere cometaria che le osservazioni da Terra e i fly-by delle precedenti missioni spaziali non sono state in grado di ottenere e che i modelli della coda e della chioma, a lungo elaborati, non sono riusciti a rappresentare in modo appropriato.

Lo studio della polvere è uno degli obiettivi principali della missione Rosetta, sia da un punto di vista scientifico sia da un punto di vista operativo. La caratterizzazione della abbondanza e della dinamica della polvere è necessaria per:

- 1) studiare i processi di emissione dal nucleo;
- 2) conoscere l'evoluzione della chioma;
- 3) comprendere le relazioni tra gas e polvere.

Inoltre le informazioni sulla dinamica e sui flussi di polvere sono fondamentali per analizzare quantitativamente i dati forniti da altri strumenti scientifici (ad esempio: spettrometri e camere). Infine, conoscere la dinamica della polvere è essenziale per prevedere il degrado delle prestazioni di molte strutture dello *spacecraft* (ad esempio: elementi ottici, radiatori, pannelli solari) e per prendere le opportune precauzioni in caso di pericolo.

GIADA misurerà la massa di singoli grani di polvere più grandi di 15 μm unitamente alla loro quantità di moto nell'intervallo $6.5 \cdot 10^{-10} \div 4.0 \cdot 10^{-4} \text{ kg m s}^{-1}$, per velocità fino a circa 300 m s^{-1} . Invece, per particelle microniche e sub-microniche potrà essere rivelata la massa cumulativa con una sensibilità di 10^{-10} g .

Pertanto, le prestazioni di GIADA consentiranno di ottenere un insieme di dati statisticamente significativi riguardo le proprietà fisiche e dinamiche delle polveri emesse dalla cometa 67P/Churyumov–Gerasimenko. In tal modo si potranno definire dettagliatamente le proprietà del nucleo e della chioma con il conseguente affinamento dei modelli che descrivono l'evoluzione dell'interno e dell'esterno della chioma e l'emissione di gas e polvere dal nucleo durante le differenti fasi evolutive della cometa.

Le misure effettuate prima del volo e durante i test eseguiti periodicamente in volo (*Payload Checkout*) durante la fase di crociera (*cruise phase*) dimostrano che lo strumento si comporta secondo le specifiche del progetto ed è pronto per le fasi

scientifiche della missione: le misure *in situ* durante il *rendezvous* alla cometa che sono descritte nelle seguenti sotto-sezioni.

2.1.1 Misura dei flussi di polvere “diretti” and “riflessi”

I grani di polvere “diretti” (*direct grains*) provengono dalla direzione del nucleo mentre le particelle “riflesse” (*reflected grains*) subiscono l’azione della pressione di radiazione solare e dunque provengono dalla direzione del Sole. Le due popolazioni di polveri sono caratterizzate da evoluzioni dinamiche nella chioma e da tempi di espulsione dal nucleo molto dissimili tra loro (Fulle et al., 1997; 1999). A seconda della posizione e dell’orientamento dello *spacecraft*, GIADA misurerà i flussi di polveri provenienti da direzioni diverse e permetterà pertanto di distinguere il contributo che le due popolazioni di grani forniscono alla chioma. Questo aspetto è fondamentale per determinare la distribuzione dimensionale della polvere in situ e di scoprire la distribuzione dimensionale originale dei grani sul nucleo. D’altro canto, questa informazione è indispensabile per derivare un parametro chiave delle comete: la velocità di perdita di massa dal nucleo.

2.1.2 Distribuzione di velocità dei grani di polvere

La velocità di espulsione della polvere dal nucleo dipende dalla dimensione dei grani secondo varie leggi di distribuzione. GIADA determinerà la velocità scalare e la quantità di moto di ogni particella rivelata dai sensori. Le misure effettuate puntando verso la direzione del nucleo forniranno informazioni sui “grani diretti”, dalle quali sarà possibile derivare la dipendenza della velocità di espulsione dalla massa dei grani sul nucleo. In definitiva sarà possibile ottenere sperimentalmente quantità che sinora nessun modello della coda e della chioma è stato in grado di rappresentare in modo attendibile (Fulle et al., 1997; 1999) e cioè:

- a) la dipendenza della velocità di espulsione della polvere dalla dimensione e dalla massa;
- b) la relazione tra velocità più probabile e massa dei grani;
- c) la distribuzione delle velocità in funzione della massa dei grani;
- d) la dispersione della velocità in funzione della massa dei grani.

2.1.3 Evoluzione della polvere nella chioma

Molti processi, come la frammentazione dei grani, possono modificare le proprietà fisiche delle particelle non appena esse sono state emesse dal nucleo (Crifo, 1995). La distribuzione dimensionale dei grani può, poi, evolvere nello spazio e nel tempo. Le osservazioni di GIADA sulle variazioni della distribuzione di polvere in diverse zone della chioma possono offrire una evidenza diretta di come l’efficienza dei meccanismi attivi nella chioma possono modificare le proprietà della polvere. Ad esempio, si possono distinguere gli effetti dovuti alla frammentazione dei grani e/o all’emissione di aree attive sul nucleo. Le osservazioni di GIADA sui cambiamenti della distribuzione di dimensione in diverse posizioni nella chioma può offrire nuove evidenze dirette per definire l’efficienza di meccanismi potenzialmente attivi nella

chioma e capaci di modificare le proprietà della polvere. Questo è appunto il caso della frammentazione e/o dell'emissione privilegiata da aree attive del nucleo.

2.1.4 Variazione dei flussi di polvere in funzione dell'evoluzione del nucleo

L'ambiente di polvere è in continua evoluzione mano a mano che la cometa si avvicina al perielio e che il nucleo si modifica di conseguenza. Le misure delle proprietà dinamiche e dei flussi di polvere eseguite da GIADA forniranno la migliore opportunità di caratterizzare l'evoluzione della polvere nel tempo in funzione della distanza eliocentrica. Le immagini del nucleo consentiranno, inoltre, di collegare i cambiamenti osservati con le proprietà e la dinamica del nucleo.

2.1.5 Determinazione del rapporto gas/polvere

Il rapporto gas/polvere è un parametro fondamentale per caratterizzare il nucleo di una cometa. Lo studio della polvere da parte di GIADA è essenziale per stimare tale quantità che sarà possibile ottenere in combinazione con i risultati di altri esperimenti (ad esempio: ROSINA, lo spettrometro di massa dei gas).

2.1.6 Altri obiettivi

Una corretta interpretazione delle immagini della chioma e del nucleo si deve basare anche su una conoscenza quantitativa dell'ambiente di polvere (es.: profondità ottica) entro il quale si sono effettuate le osservazioni visuali.

Inoltre sarà instaurata una sinergia tra tutti gli esperimenti dedicati allo studio della polvere come il microscopio a forza atomica (MIDAS), lo spettrometro di massa della polvere "a tempo di volo" (COSIMA) ed altri esperimenti di analisi in situ (ad esempio: ROSINA, lo spettrometro di massa dei gas).

Infine, il sensore di polvere DIM, una parte dell'esperimento SESAME a bordo del lander PHILAE, offrirà l'opportunità di ottenere risultati scientifici complementari a quelli di GIADA.

I dati forniti da GIADA sui flussi di polvere e utilizzati per determinare l'emissione non omogenea di polvere dalla superficie, possibilmente associata ad aree attive, torneranno anche utili a selezionare il sito di sbarco per il lander (PHILAE).

Infine, GIADA sarà utilizzato per garantire le condizioni di sicurezza degli altri strumenti e dello *spacecraft* stesso. A tale scopo, i dati di GIADA sulla popolazione e sul flusso delle polveri saranno usati per prendere opportune decisioni riguardo le operazioni scientifiche ed il prosieguo della missione, nel caso Rosetta si trovi in presenza di aree vaste o localizzate molto abbondanti di polvere.

2.2 LA STRUTTURA E IL PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

GIADA è basato su tre tipi diversi di sensori. Il *Grain Detection System* (GDS) è in grado di rivelare otticamente il transito di ogni particella che entra in GIADA senza modificarne in alcun modo le proprietà dinamiche. L'*Impact Sensor* (IS) è progettato per misurare, mediante 5 sensori piezoelettrici (PZTs), la quantità di moto rilasciata dall'impatto con una piastra di alluminio delle particelle già rivelate dal GDS. Il *Micro Balance System* (MBSs) è costituito da 5 microbilance indipendenti che puntano verso direzioni differenti dello spazio ed è in grado di misurare la deposizione cumulativa di polvere nel tempo.

GIADA è uno strumento costituito da una singola scatola (Figura 2.1) che, dal punto di vista funzionale, può essere divisa in tre moduli. Il modulo GIADA-1 è montato nella parte alta dello strumento ed include il GDS e l'IS; sotto tale struttura si trova il modulo GIADA-2, che ospita l'elettronica principale (*Main Electronics*). Il modulo GIADA-3 è posizionato sulla piastra cima superiore dello strumento ed ospita le 5 MBSs. L'entrata del modulo GIADA-1 e le 5 microbilance sono protette da un coperchio che funge anche da protezione termica e che deve essere aperto durante le misure.

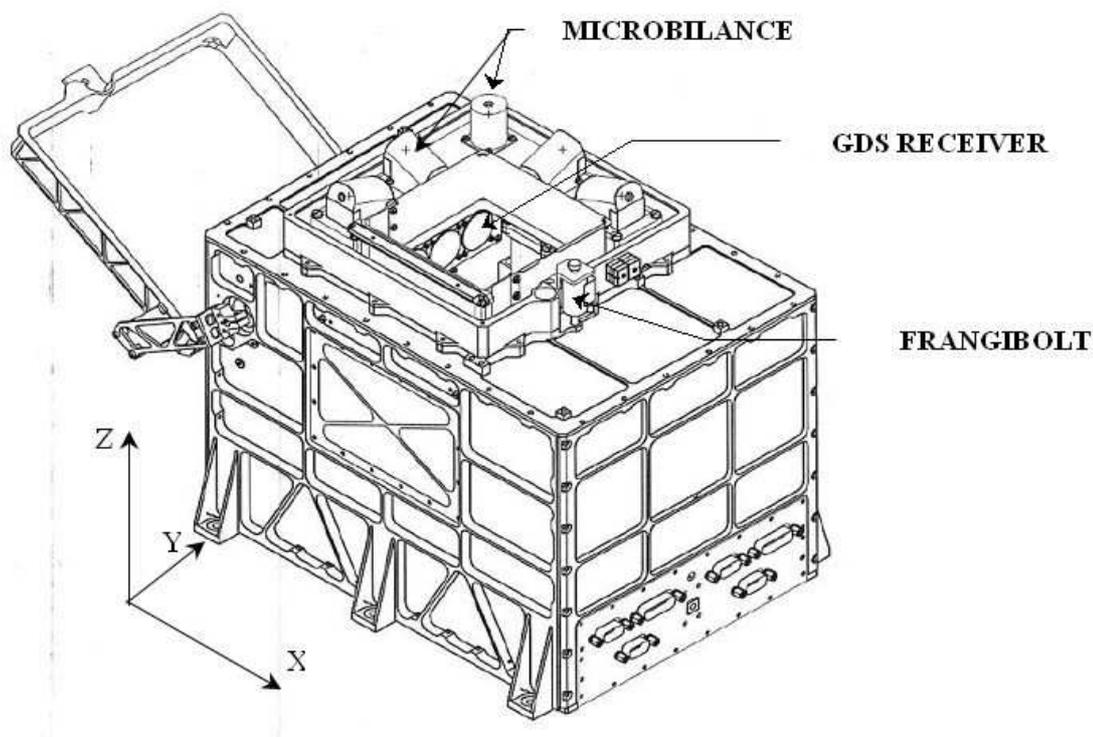


Figura 2.1 – Schema dell'esperimento GIADA (230 mm x 270 mm x 250 mm, quando il coperchio è chiuso, e 230 mm x 322 mm x 250 mm, in condizioni operative col coperchio aperto). I sensori sono disposti alla sommità (le 5 microbilance) e all'interno della scatola, mentre la *Main Electronics* è collocata nella sua parte inferiore. Il *Frangibolt* è un dispositivo di blocco che è stato liberato alla prima accensione dopo il lancio. In basso a sinistra si nota anche il sistema di riferimento di GIADA che corrisponde esattamente a quello della sonda Rosetta.

2.2.1 Il modulo GIADA-1

Il modulo GIADA-1 è progettato per misurare la quantità di moto, la velocità scalare e la massa dei singoli grani che entrano in esso e che attraversano il GDS e l'IS. Questi due sensori sono montati "in cascata": il GDS sopra e l'IS sotto (Figura 2.2).

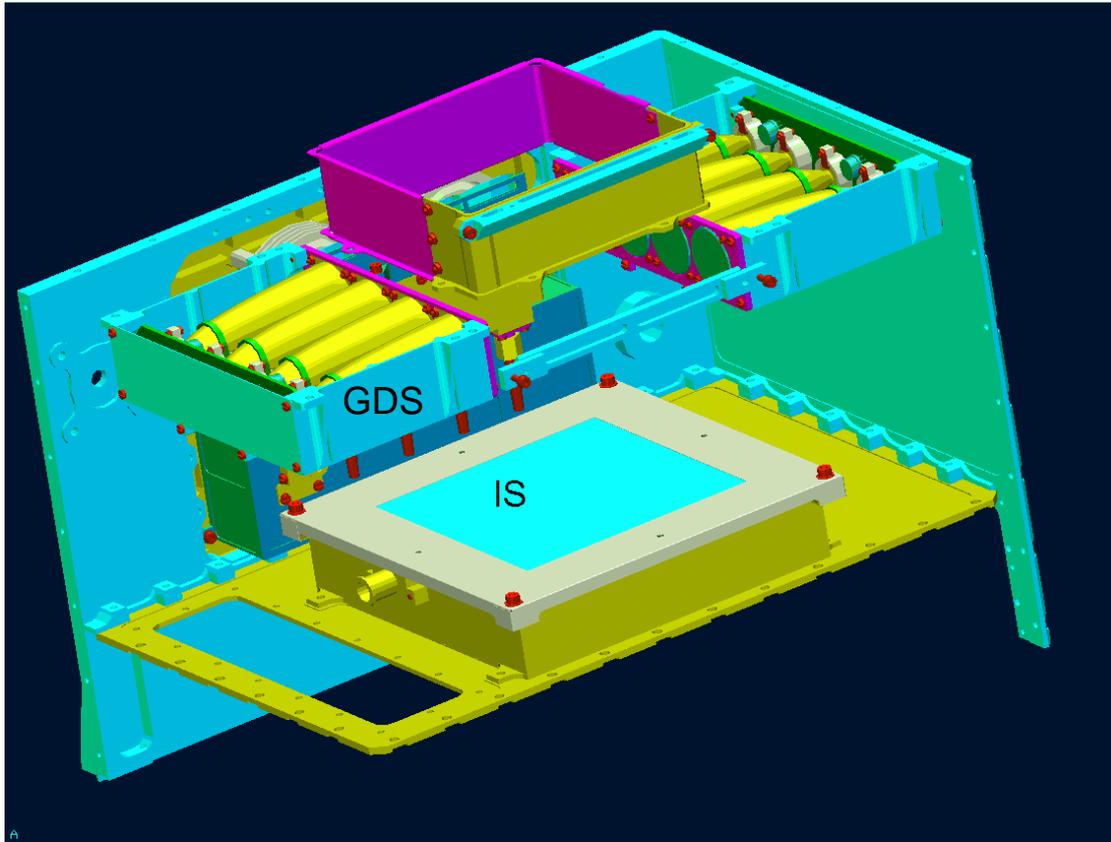


Figura 2.2 – Sezione laterale di GIADA che mostra i sensori GDS e IS montati "in cascata".

Quando un grano entra nell'apertura di GIADA, viene intercettato dal GDS. In tale sotto-sistema, 4 diodi laser (che emettono a 915 nm) con le loro ottiche di collimazione formano una sottile cortina di luce spessa 3 mm e avente un'area sensibile pari a 100 cm^2 . I laser, numerati in sequenza da #1 a #4, pulsano in coppia ad una frequenza di 100 kHz: quando i laser #1 e #3 sono attivi, i laser #2 e #4 sono spenti, e viceversa. Questo meccanismo permette di minimizzare il rumore elettromagnetico dovuto alla sequenza ON/OFF dei laser. Ogni volta che una particella attraversa la cortina laser, la luce diffusa e riflessa è intercettata da due serie di rivelatori, ciascuno costituito da 4 fotodiodi, montati a 90° rispetto ai diodi-sorgente su lati opposti (serie "left" e "right"). Un cono di Winston è montato davanti a ciascun fotodiodo (Figura 2.3). Le caratteristiche di tale elemento ottico garantiscono una sensibilità uniforme nell'area di intercettazione degli eventi. Importa, pertanto, l'intensità del segnale misurato risulta indipendente dal punto di attraversamento della cortina laser da parte della particella ed è collegata soltanto alle proprietà fisiche (essenzialmente la forma e le dimensioni) e chimiche (mediante le costanti ottiche) del grano intercettato. Inoltre i sensori ottici assicurano che la dinamica delle particelle non sia alterata dal GDS (maggiori dettagli sul GDS si possono trovare in Mazzotta Epifani et al., 2002).

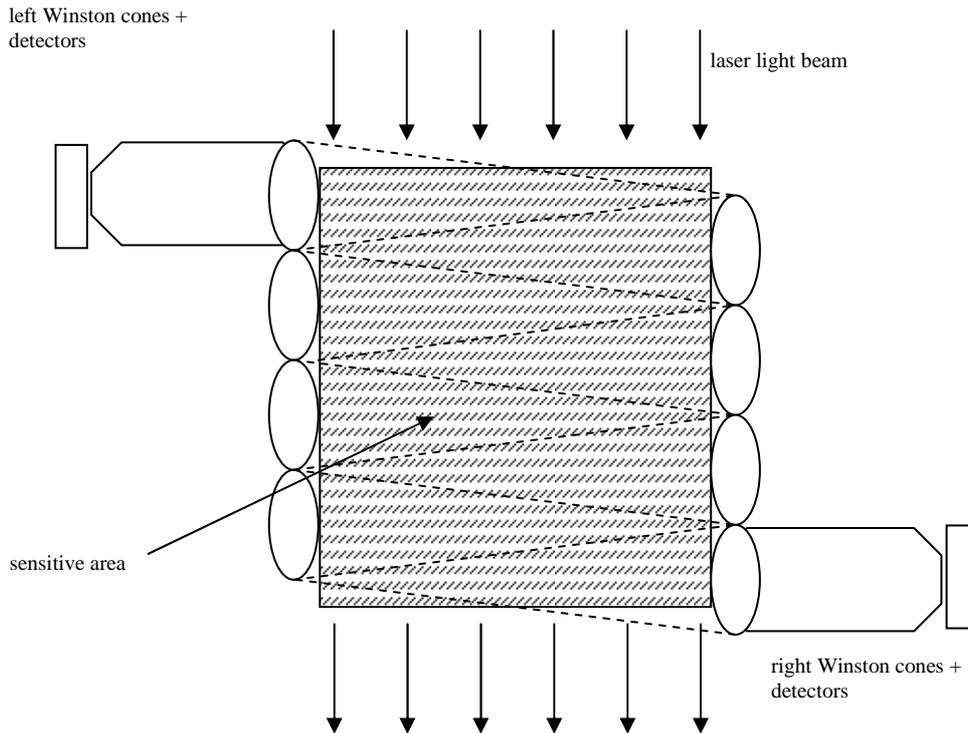


Figura 2.3 – Sezione vista dall'alto del sensore GDS. L'area è larga $10 \times 10 \text{ cm}^2$ mentre la cortina laser è spessa 3 mm. I fotodiodi sono montati a 90° rispetto ai fasci di luce. Ciascun lato della serie di rivelatori è formato da 4 fotodiodi con un cono di Winston montato davanti (per semplicità, nella figura è mostrato solo un cono per lato). La sensibilità del sensore è uniforme in ciascuno dei triangoli posti di fronte ad ogni cono.

L'IS è disposto al di sotto del GDS (Figura 2.2). Questo sottosistema è costituito da un diaframma quadrato di alluminio avente lo spessore di 0.5 mm ed un'area sensibile di 100 cm^2 . Esso è dotato di 5 sensori piezoelettrici (PZT) localizzati ai quattro angoli ed al centro del diaframma. Quando un grano urta sulla piastra sensibile si generano delle onde flessurali che sono rivelate dai cristalli piezoelettrici. Lo spostamento massimo dei cristalli cresce con l'aumentare dell'impulso registrato e produce un potenziale proporzionale a tale spostamento. Utilizzando la calibrazione, un impulso noto può essere associato ad un segnale in volt prodotto sugli elettrodi dei cristalli piezoelettrici. In tal modo il segnale rivelato risulta proporzionale alla quantità di moto del grano incidente tramite il fattore $(1+e)$, con e = coefficiente di restituzione (maggiori dettagli sull'IS si possono trovare in Esposito et al., 2002).

Il GDS fornisce una prima stima della velocità di un grano che lo attraversa (mediante il tempo di residenza nella cortina di luce); la rivelazione di un transito di grano avvia un cronometro che si arresta quando l'IS registra l'impatto del grano, di modo che si possano misurare il "tempo di volo"* e, nota la distanza GDS-IS, la velocità del grano. In definitiva, mediante il sistema combinato GDS+IS, per ciascun grano rivelato si possono misurare il **tempo di volo**, la **velocità**, la **quantità di moto** e, di conseguenza, la **massa**. La doppia misura della velocità (ottenuta dal tempo di passaggio nel GDS e dal tempo di volo nel GDS-IS) consente di avere un doppio controllo che l'evento registrato dai due sottosistemi sia generato dallo stesso grano di polvere. Tale controllo

* Il *time-of-flight* (TOF) è il tempo necessario ad una particella per attraversare la distanza GDS-IS.

è importante durante le fasi della missione in cui la densità della polvere sarà elevata in quanto grani con velocità diverse potrebbero attivare GDS e IS in modo indipendente. È importante anche notare che, nominalmente, gli “eventi GDS+IS” sono registrati quando i due sottosistemi rivelano in sequenza un evento entro una finestra temporale predefinita. Tuttavia potrebbe accadere che siano registrati eventi solo dal GDS o solo dal IS quando soltanto uno dei due sensori riconosce una particella. Questi casi potrebbero essere ancora considerati scientificamente validi, ma un’analisi specifica dei dati sarà necessaria per capire perché solo uno dei due sottosistemi si è attivato al passaggio dei grani.

Il campo di vista (*field of view* = FOV) del sistema GDS+IS è di circa 37° per osservare principalmente le particelle che provengono dalla direzione verticale, la quale coinciderà con la direzione del nucleo (*nadir pointing*) nella maggior parte delle fasi della missione.

2.2.2 Il modulo GIADA-3

Il modulo GIADA-3 è composto da una rete di 5 microbilance (MBS). Ogni microbilancia è dotata di un sensore a cristallo di quarzo che è esposto alla deposizione di polvere. La frequenza di risonanza dell’oscillatore al quarzo cambia in funzione della variazione di massa, in conseguenza dell’accrescimento del materiale accumulato. Utilizzando speciali cristalli opportunamente tagliati, per i quali la frequenza ha una scarsissima dipendenza dalla temperatura, si può ottenere un’elevata sensibilità dei sensori. Un miglioramento del sistema di sensori si ottiene mescolando il segnale proveniente dal cristallo sensibile con quello di un secondo cristallo di quarzo, usato come riferimento, che non è esposto alla deposizione di massa. In questo modo la microbilancia è composta da una coppia di cristalli di quarzo “accoppiati” tra loro che “risuonano” alle frequenze di circa 15 MHz. Il cristallo sensore ha una frequenza di oscillazione di circa 1 KHz al di sotto di quella del cristallo di riferimento. In tal modo si può misurare la frequenza di “battimento” dei segnali miscelati, per i quali è ridotta al minimo la dipendenza dalla temperatura. L’uscita di tale circuito mixer fornisce un segnale che è linearmente dipendente dalla deposizione di massa in un intervallo di frequenze al massimo pari a circa l’1% della frequenza di risonanza. In tal caso, il segnale di uscita risulta proporzionale alla massa deposta sul sensore e si può misurare il **flusso** della polvere (maggiori dettagli sui sensori MBS si possono trovare in Palomba et al., 2002). Le 5 microbilance hanno un FOV di 40° ciascuna e puntano nella direzione +Z e nelle quattro direzioni prossime a +X, -X, +Y e -Y (Figura 2.1). In realtà queste ultime 4 MBSs sono inclinate sul piano XY di 20° in alto rispetto alle direzioni degli assi +X, -X, +Y e -Y per ridurre al minimo l’ostruzione del FOV da parte della piastra superiore di GIADA e di altre strutture dello *spacecraft*. Va osservato che la superficie sensibile esposta di ogni microbilancia misura circa 10^{-5} m² e che le particelle più grandi di 5 µm non sono rilevate dai sensori. Quest’ultimo effetto è generato dallo scarso accoppiamento meccanico delle particelle più grandi con la superficie dei cristalli di quarzo, sicché esse non stimolano variazioni di frequenza rivelabili dalle microbilance.

I moduli GIADA-1 e GIADA-3 sono protetti da un coperchio (*cover*) azionato mediante un motore. In condizioni nominali il coperchio è chiuso quando GIADA è

spento e si apre poco prima che lo strumento entri in operazione; ciò garantisce pulizia e protezione termica nelle fasi in cui GIADA non è in funzione.

2.2.3 Il modulo GIADA-2

Il modulo GIADA-2 è collocato al di sotto di GIADA-1 e contiene l'elettronica principale (*Main Electronics*, ME) dello strumento. Lo scopo principale di GIADA-2 è quello di controllare l'intero strumento, di interagire con i sottosistemi di GIADA e con lo *spacecraft*, di acquisire ed operare un primo processamento dei dati, di fornire energia a tutto il sistema. Il diagramma "a blocchi" ad alto livello di GIADA-2 è mostrato in Figura 2.4. GIADA-2 include due schede ridondanti che sono il generatore di potenza (*Power Supply Unit* = PSU) e l'unità di elaborazione centrale (*Central Processing Unit* = CPU). Esse si interfacciano con lo *spacecraft* e con la scheda analogica; quest'ultima si interfaccia a sua volta con l'elettronica di prossimità (*Proximity Electronics* = PE) dei sottosistemi di GIADA. La PSU converte i 28V della tensione primaria fornita dallo *spacecraft* nelle tensioni necessarie per i vari sottosistemi ($\pm 15V$ e $5V$), avendo cura di limitare i picchi di corrente che si generano all'accensione. Essa consente anche di accendere e spegnere i sottosistemi limitando i sovraccarichi di potenza. La CPU è basata su un microprocessore 80C86 che lavora alla frequenza di 4 MHz. Il suo *core* è costituito dalla CPU_FPGA, implementata in un RH1280 FPGA dalla Actel Corp. L'obiettivo principale di questo dispositivo consiste nel controllo delle funzioni periferiche collegate alla CPU.

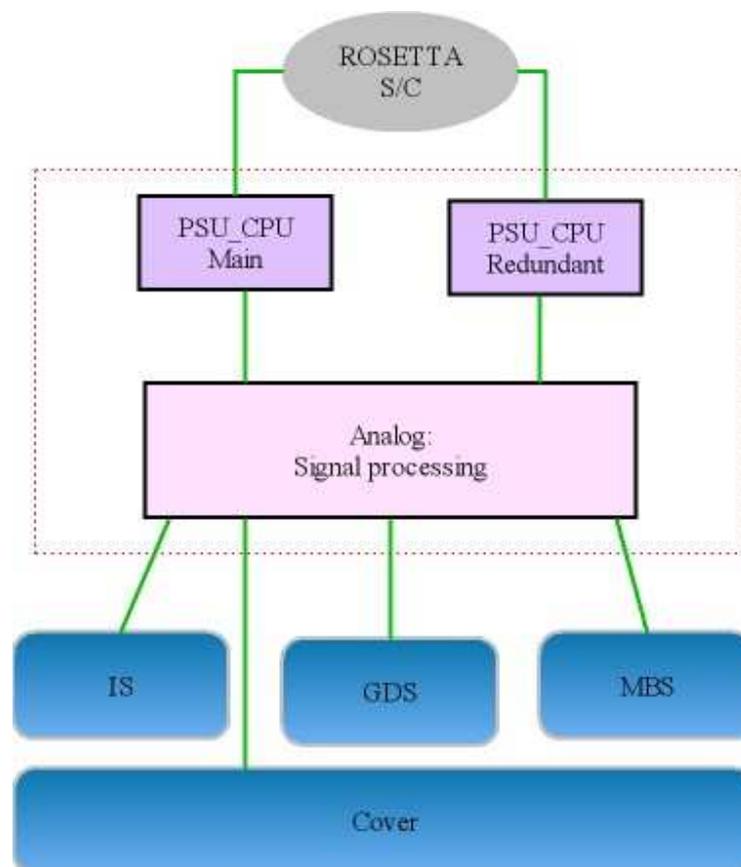


Figura 2.4 – Diagramma "a blocchi" della *Main Electronics* di GIADA connessa con l'IS (*Impact Sensor*), il GDS (*Grain Detection System*) e le 5 MBS (*Micro Balance Systems*).

Il blocco di elaborazione dei segnali analogici (*Analog Signal Processing = ASP*) mostrato in Figura 2.5 controlla e gestisce le funzionalità di GIADA. Quando un evento è rivelato dal GDS, l'ASP acquisisce l'ampiezza di picco del segnale, misura il tempo di permanenza della particella dentro la cortina laser (fornendo una prima stima della sua velocità) ed avvia un cronometro per misurare il tempo di volo tra GDS e IS. Quando uno dei PZT dell'IS registra un evento l'ASP arresta il cronometro per misurare il tempo di volo tra GDS e IS (dal quale si ottiene una misura molto più accurata della velocità della particella). Inoltre, all'impatto della particella sull'IS, l'ASP avvia altri cronometri per calcolare il tempo di propagazione dell'onda generata sulla piastra sensibile dell'IS a causa dell'impatto. I cronometri si fermano quando l'evento è registrato dagli altri canali PZT, in modo che il calcolo del tempo di propagazione per ciascun canale è completato. Per tutti i canali l'ASP acquisisce l'ampiezza di picco relativa al segnale dei sensori piezoelettrici. Se non c'è rivelazione di segnale l'ASP provoca un *reset* periodico dei sensori. Inoltre l'ASP genera anche il segnale che attiva lo stimolo per la calibrazione dei PZT. Ancora, l'ASP misura la frequenza di ogni microbilancia con un'accuratezza migliore di 10 ppm e regola la potenza dei sensori. Qualora richiesto tramite telecomando, l'ASP attiva un dispositivo riscaldatore per il ciclo termico delle MBSs, una alla volta. In aggiunta l'ASP controlla le operazioni dei laser del GDS e del coperchio. Infine l'ASP gestisce la calibrazione interna della ME, controlla la corrente sulle diverse linee di potenza e raccoglie una serie di letture di *housekeeping* dai sensori, come ad esempio i sensori termici disposti sopra o in prossimità dei vari sottosistemi.

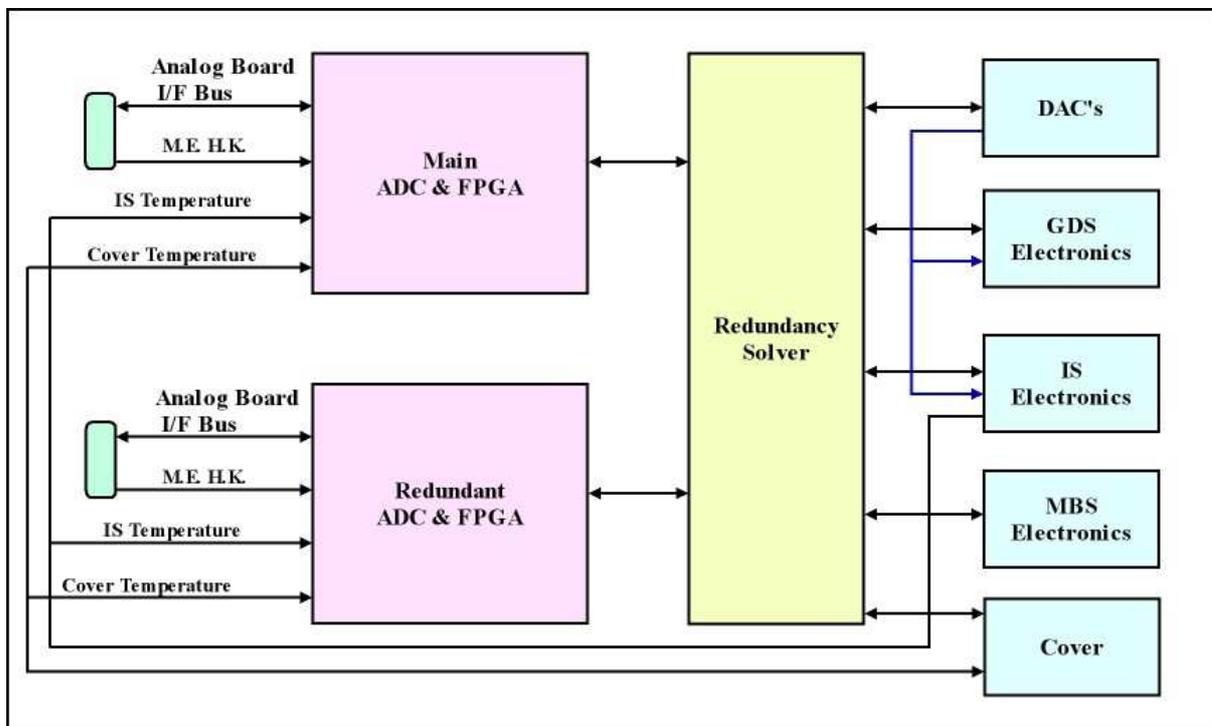


Figura 2.5 – Diagramma “a blocchi” relativo all’elaborazione dei segnali analogici (*Analog Signal Processing = ASP*) della *Main Electronics* di GIADA.

Il *software* integrato in GIADA è progettato seguendo l'usuale struttura a blocchi; ossia esiste un nucleo centrale costituito da *routine* di basso livello che elaborano il blocco esterno che consiste in sequenze di controllo dell'esperimento. Il *software* è scritto in linguaggio C, con alcune parti in codice *assembler* (proprio del linguaggio macchina) per ottimizzare il tempo. Il *software* è strutturato in piccoli moduli situati nelle memorie ROM e RAM (ciascuna memoria ha la dimensione di 64 Kword). I moduli ROM (utilizzati per la modalità *Safe* di GIADA) non possono essere modificati. I moduli RAM possono essere aggiornati (*patched*) ad eccezione di alcuni moduli più critici. Le *patch* di memoria sono caricate o da Terra, mediante l'uso di telecomandi, o dalla memoria dello *spacecraft* e sono salvate sul disco virtuale (*Virtual Disk*) di GIADA localizzato nella memoria NVRAM.

Il *software* prevede 4 modi operativi per GIADA (Figura 2.6):

1. *Safe*: in questa modalità è avviata le ME mentre tutti i sottosistemi sono spenti;
2. *Cover*: in questa modalità la ME è attiva e si eseguono le operazioni sul coperchio (apertura, chiusura, riscaldamento) mentre tutti i sottosistemi sono spenti;
3. *Flux*: in questa modalità sono attive solo la ME e le MBSs;
4. *Normal*: in questa modalità tutti i sensori (GDS, IS, MBSs) sono nominalmente in funzione ma possono essere accesi o spenti in funzione delle necessità operative.

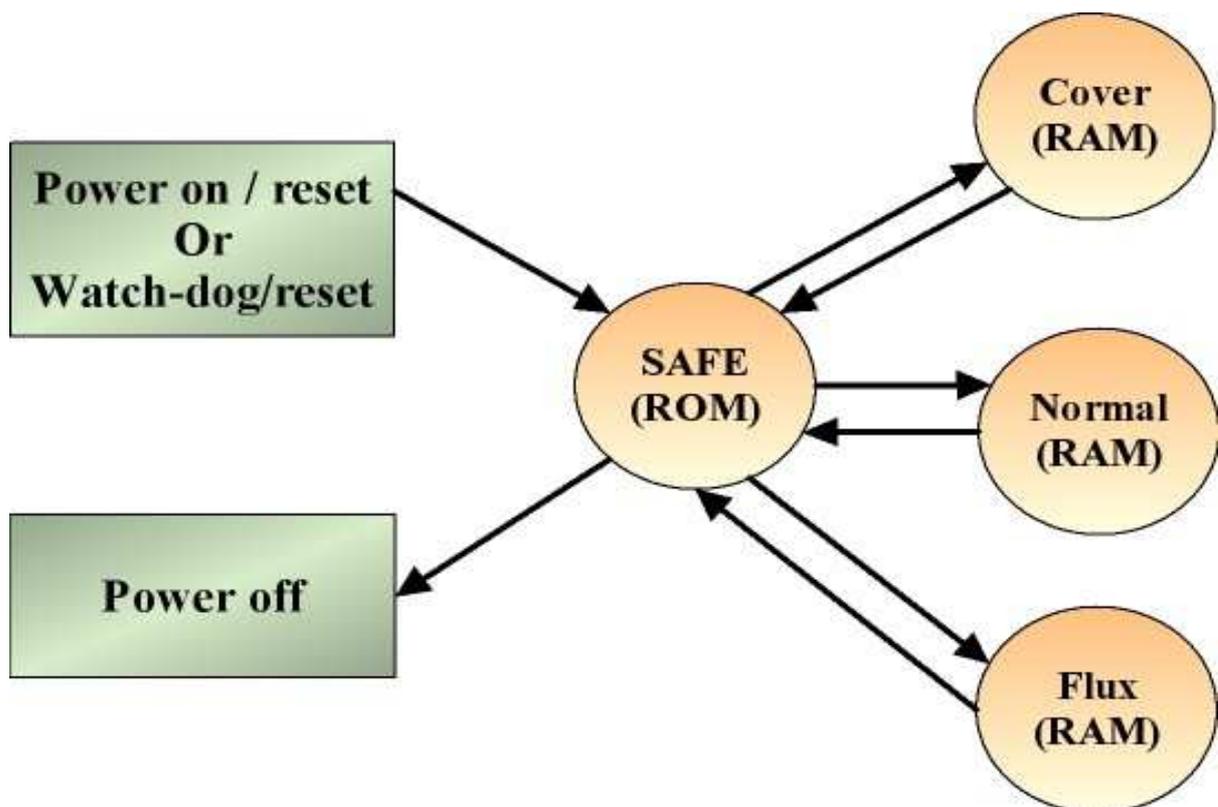


Figura 2.6 – Struttura e principio di funzionamento dei 4 modi operativi di GIADA .

2.3 PRESTAZIONI DI GIADA E CONFRONTO CON LE CARATTERISTICHE DEL TARGET 67P/C-G

In Tabella 2.1 sono riportate le prestazioni dei sensori di GIADA in termini di sensibilità e livello di saturazione. Tali informazioni sono il risultato di ripetute ed accurate operazioni di calibrazione effettuate in laboratorio prima del lancio dello strumento ed in considerazione delle caratteristiche fisiche attese per il *target* di Rosetta, la cometa 67P/C-G. Per ulteriori approfondimenti sulle prestazioni e le calibrazioni dei sottosistemi di GIADA si leggano gli articoli seguenti: Mazzotta Epifani et al., 2002; Esposito et al., 2002; Palomba et al., 2002; Colangeli et al., 2004.

Sottosistema	Quantità fisica	Sensibilità	Livello di saturazione
GDS	Raggio (μm)	15	140
GDS	Velocità scalare (m s^{-1})	1	300
IS	Quantità di moto ($\text{kg} \cdot \text{m s}^{-1}$)	$6.5 \cdot 10^{-10}$	$4.0 \cdot 10^{-4}$
GDS + IS	Velocità scalare (m s^{-1})	1	300
MBS	Massa cumulativa (g)	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-4}$

Tabella 2.1 – Sommario delle sensibilità e dei limiti di saturazione dei sottosistemi di GIADA.

Per poter valutare le capacità di GIADA rispetto all'ambiente di polvere atteso alla cometa bisogna tener conto che il sottosistema GDS+IS è *event driven*, ossia GDS e IS intercettano nell'ambiente esplorato singoli grani a campione così come essi entrano nell'apertura dello strumento. Al contrario, le MBS sono sensori "cumulativi", cioè misurano l'accumulo di grani (principalmente quelli sub-micrometrici). In entrambi i casi, una statistica significativa ed una indagine efficace rispetto alla posizione nella chioma ed al tempo richiedono un'operazione continua ed a lungo termine. Assumendo che ciò sia garantito durante le diverse fasi di missione alla cometa, bisogna confrontare l'efficienza dei sensori di GIADA (funzione delle superfici di raccolta esposte e delle prestazioni dei sensori) con l'abbondanza di polvere attesa e le caratteristiche fisiche e dinamiche nella chioma della cometa 67P/C-G. Naturalmente ci si aspetta che le condizioni varino fortemente mano a mano che la cometa si avvicina al Sole e con la distanza dal nucleo. Inoltre è possibile che si riscontreranno differenze locali nelle proprietà della polvere se l'attività della superficie e la dinamica del nucleo dovessero generare una complessa distribuzione di polvere nella chioma. Tuttavia va ricordato che le predizioni dei modelli attuali si riferiscono alla chioma esterna, mentre le proprietà fisiche e dinamiche della polvere nella chioma interna sono difficili da predire.

A partire dai dati riportati da Fulle et al. (2004) per la cometa 67P/C-G, è possibile stimare che il numero di eventi per i grani con raggio maggiore di $15 \mu\text{m}$ (cioè rivelabili da GDS+IS) è verosimilmente compreso tra $4.3 \cdot 10^5$ e $5.9 \cdot 10^6$, da circa 4.0 U.A. prima del perielio a 2.0 U.A. dopo il perielio. Analogamente la massa integrata per le particelle con raggio inferiore a $2 \mu\text{m}$ (ossia rivelabili in modo cumulativo dalle MBSs) attesa per la cometa 67P/C-G durante lo stesso periodo orbitale è compresa tra $1.1 \cdot 10^{-4}$ g e $1.6 \cdot 10^{-5}$ g. Tali valutazioni sono basate sull'assunzione (semplificata) che la distanza della sonda Rosetta dalla cometa durante l'intera missione sia costante (50 km). Gli eventi totali e la massa cumulativa per la 67P/C-G sono pienamente compatibili con la sensibilità e i limiti di saturazione dei sensori di GIADA.

3 Le operazioni scientifiche di GIADA

3.1 LA FASE DI CROCIERA DI ROSETTA E I TEST IN VOLO DI GIADA

Nel Capitolo 1 (sez. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) si è descritto in dettaglio il viaggio che permetterà alla sonda Rosetta di raggiungere nel 2014 il suo target, la cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. Dopo il lancio, avvenuto nel 2 marzo 2004, lo *spacecraft* entrò immediatamente nella fase di verifica in volo (*Commissioning*), terminata il 16 ottobre 2004, e poi nella fase di crociera (*Cruise phase*), che durerà fino alle prime manovre di *rendezvous* a maggio 2014.

La fase di *Commissioning* rappresentò la prima opportunità per i vari *team* di Rosetta di effettuare le operazioni in volo dei loro strumenti e per il centro di controllo dell'ESA di verificare lo stato generale dello *spacecraft*.

La fase di *Cruise* contiene un congruo numero di scenari programmati in modo da offrire a tutti i *team* la possibilità di effettuare sugli strumenti molteplici test e varie operazioni scientifiche, finché la sonda non raggiungere la cometa. Tali opportunità sono però limitate da una serie di vincoli dovuti al cambiamento delle condizioni ambientali durante la fase di crociera, vincoli che possono diventare sempre più rigorosi mano a mano che prosegue la missione. In tal modo i limiti e i vincoli a lungo termine hanno impatto sulle strategie di missione già pianificate.

La maggior parte delle attività di Rosetta sono state programmate durante i *Payload Checkout* che rappresentano la maggioranza dei test da effettuare su Rosetta durante la *Cruise phase*. La Tabella 1.2 mostra tutti gli scenari relativi alla fase di crociera che comprendono i *Payload Checkout*, le 4 manovre di *gravity assist* (3 *Earth swing-by* e 1 *Mars swing-by*) e i *fly-by* dei due asteroidi, Steins e Lutetia, citati nella sez. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

Scenari previsti durante la <i>Cruise phase</i>	Data di inizio	Data di fine
LAUNCH AND EARLY ORBIT PHASE (LEOP)	02/03/2004	04/03/2004
COMMISSIONING	05/03/2004	06/06/2004
CRUISE 1	07/06/2004	05/09/2004
COMMISSIONING	06/09/2004	16/10/2004
EARTH SWING-BY 1 (ESB-1)	17/10/2004	04/04/2005
CRUISE 2	05/04/2005	28/07/2006
MARS SWING-BY 1 (MSB)	29/07/2006	28/05/2007
CRUISE 3	29/05/2007	12/09/2007
EARTH SWING-BY 2 (ESB-2)	13/09/2007	27/01/2008
CRUISE 4-1	28/01/2008	03/08/2008
STEINS FLY-BY	04/08/2008	05/10/2008
CRUISE 4-2	06/10/2008	13/09/2009
EARTH SWING-BY 3 (ESB-3)	14/09/2009	13/12/2009
CRUISE 5	14/12/2009	06/06/2010
LUTETIA FLY-BY	7/06/2010	10/09/2010
RENDEZVOUS MANŒUVRE 1	11/09/2010	13/07/2011
CRUISE 6 (HIBERNATION PHASE)	14/07/2011	22/01/2014

Tabella 3.1 – Gli scenari che scandiscono le tappe della *Rosetta Cruise phase*. Alcuni scenari possono includere più di un test; ad esempio, la fase “CRUISE 2” comprende i *Payload Checkout* 1 e 2. Le manovre di assistenza

gravitazionale sono indicate in rosso, i fly-by degli asteroidi sono indicati in blu, la fase di ibernazione (seguito alla fase di crociera) e indicata in viola (Cortesia ESA).

I *Payload Checkout* sono test che consentono ai team degli esperimenti a bordo di Rosetta di mettere in esercizio e verificare regolarmente lo “stato di salute” dei payload durante i primi 10 anni della missione. Essi si suddividono in *Payload Checkout* “passivi” e “attivi” (Figura 3.1).

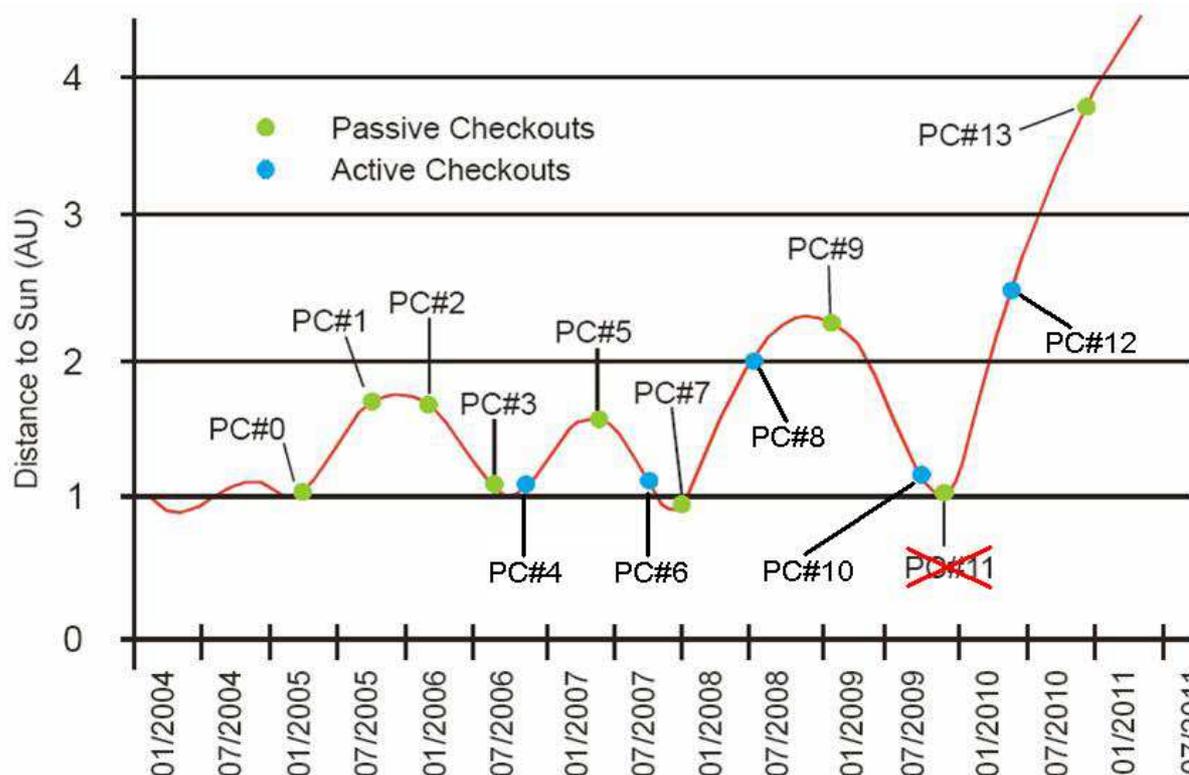


Figura 3.1 – I *Payload Checkout* (PC) previsti durante la fase di crociera di Rosetta. Con i colori si distinguono i “passivi” dagli “attivi”. Il *Passive Payload Checkout* n.11 è stato cancellato perché era troppo a ridosso del PC#10 e ciò rendeva difficile la pianificazione e la preparazione delle operazioni da parte di ESA e dei team (Cortesia ESA).

I *Passive Payload Checkout* di Rosetta sono previsti ogni 6 mesi durante tutta la fase di crociera. Tali test sono finalizzati ad eseguire due tipi di operazioni fondamentali:

- mettere periodicamente in esercizio la meccanica di ogni strumento;
- verificare con regolarità lo “stato di salute” funzionale ed operativo dei payload.

L’insieme delle attività svolte nei *Passive Payload Checkout* serve a tenere sotto controllo il comportamento degli strumenti nel corso del lungo viaggio della sonda. Durante i test “passivi” sono generalmente escluse le seguenti attività:

- controllo da Terra in tempo reale delle operazioni in volo;
- interruzione del flusso programmato di operazioni (*timeline*);
- richieste specifiche di puntamento dello *spacecraft* da parte dei team.

Inoltre si impone ai team di rispettare i vincoli già definiti, evitando richieste specifiche che esulano dal quadro delle attività previste, e di ridurre al minimo la produzione di dati scientifici. È evidente che le operazioni relative ai *Passive Checkout* sono

piuttosto rigide anche se alcuni cambiamenti sono certamente possibili in caso di emergenza.

Gli *Active Payload Checkout* sono sempre eseguiti prima di ogni attività importante della missione Rosetta come i *swing-by* della Terra e di Marte ed i *fly-by* degli asteroidi. Ad esempio, l'*Active PC10* (durato 12 giorni, dal 21 settembre al 2 ottobre 2009) si è svolto circa 7 settimane prima dell'*Earth swing-by 3* di Rosetta (13 novembre 2009). Inoltre il PC10 è stato utilizzato come test di preparazione alle operazioni scientifiche da eseguire durante il *fly-by* di Lutetia (10 luglio 2010) e durante la *comet phase*.

Le attività relative agli *Active Checkout* includono tutte le operazioni già descritte per i *Passive Checkout* (che continuano ad essere eseguiti regolarmente circa ogni 6 mesi) ed in aggiunta possono soddisfare specifiche richieste di puntamento dello *spacecraft* e un limitato numero di operazioni interattive da Terra. Ai *team* è richiesto ancora una volta di minimizzare il flusso dei dati scientifici prodotti ma con una maggiore libertà e flessibilità rispetto ai *Passive Checkout*; i dati scientifici ottenuti dai test attivi sono utilizzati per importanti scopi di indagine.

Più in generale gli *Active Payload Checkout* si prefiggono i seguenti obiettivi:

- mettere periodicamente in esercizio la meccanica di ogni strumento;
- verificare con regolarità lo “stato di salute” funzionale ed operativo dei *payload* anche in condizioni non di *routine*;
- effettuare test di calibrazione in volo.

In aggiunta i *team* possono richiedere test specifici atti a migliorare l'efficienza e la sicurezza dei *payload*, ad esempio aggiornamenti del software a bordo, modifiche dei parametri relativi alla gestione della memoria, test di interferenza con altri strumenti, simulazioni di scenari futuri come i *fly-by*, ecc. In tal modo, oltre a tenere costantemente sotto controllo il comportamento degli strumenti, è possibile verificarne il funzionamento in condizioni operative più critiche e/o non ancora esplorate.

ESA raccomanda i *team* di formulare le richieste delle operazioni nel modo più generale possibile, in maniera tale che possano essere riadattate ed utilizzate anche per i successivi *Active Checkout*. La maggioranza delle operazioni relative alla *Cruise phase* si svolgono a distanze dal Sole maggiori di 1 U.A.; ciò ha impatto sulle condizioni termiche ambientali e sul tempo necessario per le telecomunicazioni, elementi di cui bisogna tenere conto in fase di progettazione delle strategie operative. Ad ogni modo, si tendono ad escludere operazioni parallele tra gli strumenti allo scopo di mantenere condizioni termiche stabili e di evitare interferenze.

Durante la *Rosetta Cruise phase* GIADA ha partecipato continuamente ed attivamente alle operazioni previste dai *Payload Checkout*. Di solito lo strumento è acceso per circa 24 ore allo scopo di effettuare dei test di controllo, verifica e calibrazione del sistema. Ma non sono mancate richieste specifiche da parte del *team* di GIADA in vista di “campagne” dedicate all'interferenza e al puntamento (dove è prevista una modifica dell'assetto dello *spacecraft* in funzione delle operazioni richieste dai *team*). Infine GIADA ha partecipato alle operazioni relative al *fly-by* dell'asteroide Steins. Dal lancio di Rosetta ad oggi GIADA ha effettuato in sintesi i seguenti test in volo:

- First Commissioning
- Pointing (1, 2)

- Interference (1, 2, 3)
- Passive Payload Checkout (PC0, PC1, PC2, PC5, PC7, PC9)
- Active Payload Checkout (PC4, PC6, PC8, PC10)
- Steins fly-by – 05/09/2008

Come già ricordato, di recente ha avuto luogo l'*Active Payload Checkout* n. 10 (PC10) in cui le operazioni di GIADA hanno avuto pieno successo. Prima che inizi la fase di ibernazione di Rosetta, i test previsti ancora per GIADA sono:

- Active Payload Checkout n. 12 (PC12) – aprile ÷ maggio 2010
- Passive Payload Checkout n. 13 (PC13) – dicembre 2010

3.2 PREPARAZIONE ALLE OPERAZIONI IN VOLO DI GIADA

Le operazioni scientifiche e/o di controllo dei *payload* di Rosetta richiedono una serie di attività preliminari volte alla pianificazione delle strategie di osservazione, alla revisione di procedure di controllo e sequenze operative e alla stesura delle *timeline* che ciascuno strumento deve eseguire durante i test in volo. Nei paragrafi seguenti sono discusse in dettaglio le operazioni preliminari che riguardano GIADA.

3.2.1 Interazioni con RSOC e RMOC

Durante la fase preparatoria alle operazioni da effettuare in volo sui vari esperimenti si richiedono continue interazioni con l’Agenzia Spaziale Europea (ESA) ed in particolare con i centri operativi e di controllo RSOC e RMOC. Di seguito è descritta la struttura ESA che si occupa della gestione dell’intera missione Rosetta e dei compiti affidati a ciascun organismo componente.

Il **Ground Segment** costituisce l’insieme di sistemi e di apparati predisposti sulla Terra per gestire e controllare una missione spaziale, per ricevere e processare il flusso di dati provenienti dagli strumenti a bordo dello *spacecraft* e, se necessario, per rilasciare ed archiviare tutto il materiale generato. Il *Ground Segment* di Rosetta è stato progettato per soddisfare tutte le esigenze scientifiche, oltre che per affrontare le notevoli difficoltà insite in una missione nello spazio profondo, come i lunghi tempi di attesa per la trasmissione-ricezione dei segnali (fino a 100 minuti), le basse velocità di trasferimento dei dati (8 bps), le disponibilità minime di energia (tenendo conto anche dei due anni e mezzo di ibernazione), e l’utilizzo dell’assistenza gravitazionale per ben quattro volte. La Tabella 3.2 riporta l’elenco dei centri operativi e di controllo relativi al *Ground Segment* di Rosetta.

Nome della struttura	Luogo in cui è situata
ESA Deep Space Ground Station	New Norcia, nei pressi di Perth (Australia occidentale)
Rosetta Mission Operations Centre (RMOC)	European Space Operations Centre (ESOC), Darmstadt, Germania
Rosetta Science Operations Centre (RSOC)	European Space Astronomy Centre (ESAC), Villanueva de la Cañada, vicino Madrid (Spagna)
Rosetta Lander Control Centre (LCC)	Presso l’istituto di ricerca aerospaziale DLR, Colonia (Germania)
Rosetta Lander Science Centre	Presso le strutture del CNES Tolosa (Francia)

Tabella 3.2 – L’insieme delle strutture del *Ground Segment* dedicato alla gestione e al controllo della missione Rosetta (Cortesia ESA).

Dopo il lancio di Rosetta, il controllo della missione è stato affidato completamente ad un singolo centro operativo, il **Rosetta Mission Operations Centre (RMOC)**, situato presso l'European Space Operations Centre (ESOC) in Germania, con l'assistenza della Deep Space Ground Station dell'ESA, presso New Norcia in Australia. La funzione principale di RMOC è quella di acquisire dati scientifici durante il sorvolo dei pianeti e degli asteroidi, l'avvicinamento e l'inseguimento della cometa, la *near comet phase*, la *comet orbit phase* e infine durante il rilascio del *Lander* e l'interscambio dei dati con l'*Orbiter*. RMOC ha, inoltre, i seguenti compiti:

- il monitoraggio ed il controllo dello *spacecraft* e del suo *payload* durante le fasi più critiche della missione (lancio, sorvolo dei pianeti, ecc.);
- la determinazione ed il controllo della traiettoria della sonda;
- la pianificazione e la predisposizione delle operazioni di missione di concerto con i vari *team*;
- la creazione e la distribuzione dei dati scientifici ricevuti dalla sonda (dati in formato DDS) alla comunità scientifica di Rosetta, ai *Principal Investigator (PI)* e al Rosetta Lander Ground Segment.

Durante tutte le fasi della missione, RMOC è l'interfaccia principale con la sonda mediante anche le altre *ground station*. Infatti RMOC viene supportato per il *tracking*, la telemetria ed i telecomandi dalla *ground station* di ESA situata a Kourou e dalle stazioni del Deep Space Network (DSN) della NASA, di Madrid in Spagna e di Goldstone negli USA.



Figura 3.2 – La sala di controllo di ESOC a Darmstadt (Germania). Il personale di RSOC è al lavoro durante le operazioni relative al *fly-by* dell'asteroide Steins il 5 settembre 2008 (Cortesia ESA).

Il **Rosetta Science Operations Centre (RSOC)** è il centro operativo che ha sede presso l'European Space Astronomy Centre (ESAC) in Spagna. Esso gioca un ruolo essenziale nell'assicurare il successo delle operazioni scientifiche della missione e nel supportare la comunità scientifica di Rosetta. Il ruolo primario del *team* di RSOC durante la *Rosetta Cruise phase* è quello di interfacciarsi con i *team* dei *payload* e il *team* di RMOC e di coordinare le richieste per le operazioni scientifiche ricevute dai *team* responsabili sia degli strumenti dell'*Orbiter* sia di quelli del *Lander*. Il *team* di RSOC esamina le richieste di osservazione (ad esempio, dettagli di puntamento dello *spacecraft* e flusso delle operazioni) per ogni *payload*, supporta la pianificazione e la preparazione delle operazioni (*timeline*) da sottoporre ad RMOC, risolve potenziali conflitti tra le operazioni degli strumenti, fornisce le richieste di osservazione elaborate e definitive ad RMOC. Inoltre RSOC controlla che i vincoli sulle operazioni scientifiche non siano violati (ad esempio, assicurando che gli strumenti non puntino direttamente verso il Sole). Infine RSOC effettua un primo processamento dei dati scientifici e li archivia, mettendoli a disposizione della comunità scientifica.



Figura 3.3 – L'European Space Astronomy Centre (ESAC) a Villanueva de la Cañada, Madrid (Spagna) dove è situato il centro operativo di RSOC (Cortesia ESA).

Il **Rosetta Lander Ground Segment (RLGS)** supporterà le operazioni del *Lander*, in particolare prima e dopo il completamento della sua fase di atterraggio e durante lo scambio di dati con l'*Orbiter*. Il RLGS lavorerà in coordinazione con il German Aerospace Research Centre (DLR) situato a Colonia (Germania) e il Scientific Control Centre dell'Agenzia Spaziale Francese (CNES) di Tolosa (Francia).

Durante la prolungata spedizione interplanetaria di Rosetta, la sicurezza nelle comunicazioni fra la sonda e le stazioni di Terra è un punto essenziale per la buona riuscita dell'impresa. Tutti i dati scientifici raccolti dagli strumenti di bordo sono di volta in volta inviati a Terra tramite un collegamento radio. Le comunicazioni radio fra Rosetta e i centri di controllo sono possibili grazie alla **Deep Space Antenna** dell'ESA situata a New Norcia nei pressi di Perth, Australia occidentale. Questa antenna parabolica da 35 metri di diametro concentra l'energia dei segnali radio in un fascio ristretto ed è usata per mantenere le comunicazioni con la sonda fino a 900 milioni di Km di distanza dalla Terra. I segnali vengono trasmessi e ricevuti su due bande a diverse frequenze radio: la banda S (2 GHz) e la banda X 8 (GHz). I segnali radio, viaggiando alla velocità della luce, impiegano fino a 50 minuti per coprire la distanza fra la sonda e la Terra.

In caso emergenza la seconda *Deep Space Antenna* dell'ESA può fornire un'ulteriore copertura alla sonda Rosetta. Si tratta di una nuova antenna parabolica da 35 metri situata presso Cerebros, vicino Avila (Spagna), e divenuta operativa nel 2005.

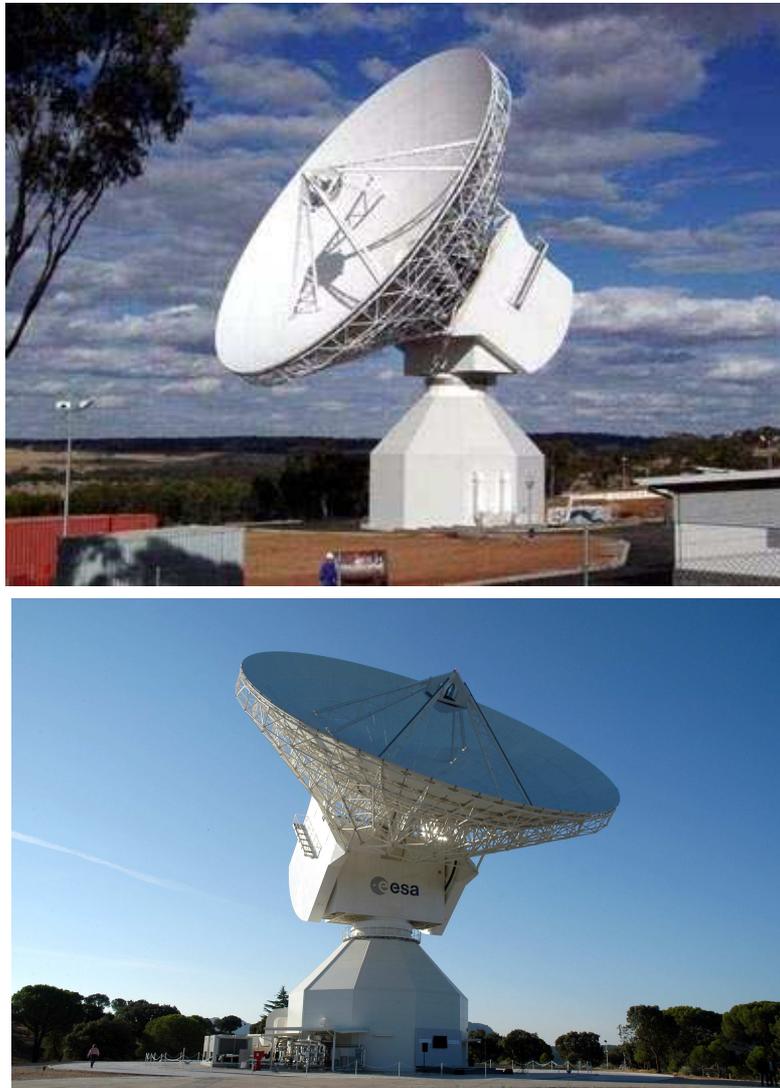


Figura 3.4 – La *Deep Space Antenna* dell'ESA situata a New Norcia, nei pressi di Perth in Australia occidentale (foto in alto) e la *Deep Space Antenna* di Cerebros, vicino Avila in Spagna (foto in basso) (Cortesia ESA).

3.2.2 Richieste di osservazione durante i test in volo (OBR)

Durante la fase di crociera, ogni *team* di Rosetta ha il compito di definire le strategie osservative e l'insieme delle operazioni scientifiche che ha intenzione di eseguire sul proprio strumento in occasione dei *Payload Checkout* e degli altri test in volo. Un'*Observation Request* (OBR) è il primo input che RSOC riceve dai *team* di ciascun *payload*. Esso è generalmente in uso durante la programmazione della *Cruise phase* e consiste in un modello Word che ogni *team* deve opportunamente riempire secondo criteri e linguaggi codificati. I temi proposti nel modello di OBR sui quali si chiede di fornire indicazioni sono i seguenti:

- descrizione dell'osservazione;
- obiettivi scientifici, calibrazioni e verifica dello strumento;
- durata dell'osservazione;
- requisiti di monitoraggio nel caso in cui l'osservazione prevede operazioni interattive da Terra;
- richieste di puntamento, assetto dello *spacecraft* e tipo di *target*;
- stima del flusso di dati prodotti e della potenza assorbita dallo strumento;
- speciali operazioni scientifiche.

La definizione del nome da assegnare ad un'OBR segue le seguenti convenzioni:

“OBR__PInRSO_D_SCEN_iinn_<SHORT_NAME>_Vnnnn”,

dove:

- “OBR” identifica il tipo di file
- “PIn” rappresenta l'acronimo di *Principle Investigator* accompagnato dalla sigla “n” che identifica il nome dell'esperimento (per GIADA, n = H → PIH)
- “RSO” identifica il destinatario che è sempre RSOC
- “D” indica che il file contiene dati
- “SCEN” è un codice di quattro lettere che identifica lo scenario della missione. (Alcuni esempi: ESB2 = *Earth Swing-by 2*, ESB3 = *Earth Swing-by 3*, PCnn = *Payload Checkout* numero nn, STEI = *Steins fly-by*)
- “ii” è un codice di due lettere che indica la forma contratta del nome dell'esperimento (per GIADA, ii = GD)
- “nn” indica il numero sequenziale dell'OBR
- <SHORT_NAME> è un campo libero che può essere utilizzato per assegnare un breve nome all'osservazione
- “Vnnnn” identifica la versione dell'OBR

Ad esempio, durante l'*Active Payload Checkout* n. 10 (PC10), il *team* di GIADA ha formulato tre richieste di osservazione (OBR) compilate in modo conforme alle convenzioni citate:

1. OBR__PIHRSO_D_PC10_GD01_PASSIVE_CHECKOUT_V0003
2. OBR__PIHRSO_D_PC10_GD02_INTERFERENCE_TEST_V0003
3. OBR__PIHRSO_D_PC10_GD03_NEW_CF_SETTINGS_V0003

La prima OBR specifica le operazioni ordinarie che GIADA esegue ogni 6 mesi durante i *Payload Checkout*, la seconda OBR fa riferimento ad uno specifico test di

interferenza con lo spettrometro VIRTIS e la terza OBR descrive una serie di operazioni mirate all'aggiornamento del *Context file* nella memoria dello strumento. In prima istanza, RSOC richiede ai *team* di compilare una versione “preliminare” delle OBR dove sono richiesti soltanto alcuni campi contrassegnati da un asterisco (*); in tal caso si parla di richiesta di operazioni *top-level*. Successivamente sono possibili alcune iterazioni tra RSOC e i *team* per raffinare e/o aggiornare i temi contenuti nelle OBR preliminari. Infine si perviene ad una versione definitiva (*final OBR*) dove tutti i campi devono essere riempiti.

A titolo esemplificativo sono di seguito riportate le richieste di operazioni *top-level* relativamente al test “passivo” di GIADA durante il PC10.

La Tabella 3.3 mostra le indicazioni relative alla sezione “Overview” dell'OBR. Il campo *Description of Observation* specifica che GIADA eseguirà una procedura standard di circa 24 ore volta alla verifica e al controllo del suo stato, come descritto nei campi *Objectives* e *Duration*. Il campo *Interactivity/Monitoring* specifica che il test non sarà “interattivo” (ossia le operazioni non saranno seguite da Terra in tempo reale) e sarà indipendente dai risultati di altri test previsti per GIADA durante il PC10. Il campo *Pointing Overview* fornisce indicazioni sul puntamento che dovrebbe avere lo *spacecraft* durante il test; in particolare si richiede che l'angolo tra la direzione del Sole e l'asse Z di GIADA (*boresight*) sia sempre maggiore di 90°, onde evitare la saturazione del *Grain Detection System* (GDS).

OBR Filename: OBR_PiInRSO_D_SCEN_iimn_<SHORT_NAME>_Vnnnn.doc	OBR_PiInRSO_D_PC10_GD01_PASSIVE_CHECKOUT_V0003
* Observation Mnemonic	[GD01]
* Instrument/Sensor	[GIADA]
* Description of Observation	[GIADA standard procedures and full functional verification]
* Objectives	[Verifying that all mechanisms, subsystems and electronics work as expected]
* CPPCR [RD02] Reference	[R_GD003]
* Duration (excluding set-up and run-down)	[About 24 hours]
* Interactivity/Monitoring (include duration)	[Entirely Non-interactive and independent from results of other OPs. Memory dump required]
* Pointing Overview	[Solar Aspect Angle wrt +Z > 90 degree required]
Boresight Name	[None] As specified in Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..
* Target Type	[N/A]
* Max Power Estimate (W)	[20.7]
Data Volume Estimate (MiB) by Type:	
*Cat. 4 Housekeeping (3,25)	[0.8]
Cat. 7 Progress and Event Reports (5,1) & (5,2)	[0.002]
Cat. 7 Memory Check Reports (6,10)	[N/A]
Cat. 9 Memory Dump Reports (6,6)	[0.003]
*Cat. 12 Science (20,3) & (20,13)	[0.11]
Other Data Types (e.g. Philae ESS events)	[N/A]

Tabella 3.3 – Sezione “Overview” dell'OBR relativa al test “passivo” di GIADA durante il PC10.

In Tabella 3.4 sono mostrate le informazioni riguardanti la sezione “Special Operational Constraints” dell'OBR in esame. Il campo *Order/Timing* indica che il test ha la priorità rispetto agli altri e non è di tipo “interattivo”. Il campo *Conflicts* specifica che bisognerebbe evitare l'accensione dei *thrusters* quando GIADA ha il coperchio

aperto e le microbilance sono in funzione poiché è possibile una loro contaminazione. Il campo *Wheel Off-Loading* specifica che bisogna evitare di eseguire tale operazione sullo *spacecraft* quando GIADA è in funzione in quanto potrebbe disturbare le delicate manovre di apertura e chiusura del coperchio.

Constraint	Requirement	Comments
* Order/Timing	[GD01 shall be executed before other sequences. Non-interactive and independent]	[GD01 is the nominal passive checkout procedure, so it shall be executed before any other procedure for reference]
* GO/NOGO Decision	[N/A]	[None]
* Conflicts	[Thrusters use to be avoided]	[Contamination of MBS from thrusters when GIADA is open could be possible; this is not a hard limit. Even if some interferences were probably detected with other payloads or S/C subsystems, no clear identification was made]
* Special Environment or Spacecraft Constraints if Different from Standard UM	[None]	[None]
Initial Configuration	[Instrument closed and off]	[None]
* Set-Up Duration	[40 min.]	[Nominal switch-on procedure]
* Run-Down Duration	[30 min.]	[Nominal switch-off procedure]
Final Configuration	[Instrument closed and off]	[None]
Temperature (K) if Different from Database Limits	[None]	[None]
Wheel Off-Loading	[WOL to be avoided during OPs]	[None]

Tabella 3.4 – Sezione “Special Operational Constraints” dell’OBR relativa al test “passivo” di GIADA durante il PC10.

La Tabella 3.5 mette in evidenza le specifiche relative alla sezione “Operations Overview” dell’OBR in esame. Il campo *Description of Operations* descrive la sequenza cronologica delle operazioni da eseguire durante il test, cui corrispondono le procedure elencate nel campo *FOP Reference*. Il campo *Pointing & Geometric Events* richiama i requisiti di puntamento già specificati nella sezione “Overview”.

* Description of Operations	[GIADA is switched on, Configuration Table is updated and on-board SW is updated to v.2.3; cover is opened and IS and GDS are set to specific values, on the base of results from previous tests (e.g., noise level); a series of calibrations of the three types of sensor are executed; self-interference test is executed; MBS heating calibration is executed; GIADA is switched off]
* FOP Reference	[AGDS001A, AGDS002A, AGDS003A, AGDS035A, AGDF090A, AGDS065A, AGDS110A, AGDS038A, AGDS037A, AGDS036A, AGDS120A, AGDF100A, AGDF055A, AGDF060A]
Pointing & Geometric Events	[Only pointing constraint relates to Sun position wrt. Z-axis; the whole sequence shall be executed with the stated constraint in the Sun position]

Tabella 3.5 – Sezione “Operations Overview” dell’OBR relativa al test “passivo” di GIADA durante il PC10.

Infine è utile commentare anche la sezione “Overview” dell’OBR numero 3, ancora con riferimento al test “passivo” di GIADA durante il PC10. In tal caso si tratta di un test specifico che si propone due obiettivi: 1) aggiornare alcuni parametri nella memoria non volatile dello strumento (NVRAM) in modo da rendere permanenti i cambiamenti e mantenere GIADA in maggiori condizioni di sicurezza; 2) studiare il comportamento di GIADA in configurazione *Flux Mode* finora non ancora

sperimentata. Come si può notare dal raffronto con la Tabella 3.3, questo test ha una durata di gran lunga inferiore (circa 2 ore) rispetto alla durata del test “passivo”, così come sono inferiori il flusso di dati prodotti e la potenza assorbita (Tabella 3.6).

OBR Filename: OBR_PInRSO_D_SCEN_iinn_<SHORT_NAME>_Vnnnn.doc	<i>Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.</i>
*Observation Mnemonic	[GD03]
*Instrument/Sensor	[GIADA]
*Description of Observation	[Upload on-board of new Context File settings. GIADA test in Flux Mode]
*Objectives	[Patching CF in NVRAM in order to upload on-board new GIADA parameters setting and avoid that an emergency procedure is triggered if unnecessary in future GIADA activities. Testing a series of operations with GIADA switched on Flux Mode]
*CPPCR [RD02] Reference	[N/A]
*Duration (excluding set-up and run-down)	[< 2 hour]
*Interactivity/Monitoring (include duration)	[Entirely Non-interactive and independent from results of other OPs. Memory dump required]
*Pointing Overview	[None]
Boresight Name	[None] As specified in Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..
*Target Type	[N/A]
*Max Power Estimate (W)	[10.7]
Data Volume Estimate (MiB) by Type:	
*Cat. 4 Housekeeping (3,25)	[0.05]
Cat. 7 Progress and Event Reports (5,1) & (5,2)	[0.002]
Cat. 7 Memory Check Reports (6,10)	[Negligible]
Cat. 9 Memory Dump Reports (6,6)	[0.003]
*Cat. 12 Science (20,3) & (20,13)	[N/A]
Other Data Types (e.g. Philae ESS events)	[N/A]

Tabella 3.6 – Sezione “Overview” dell’OBR n. 3 relativa al test “passivo” di GIADA durante il PC10.

3.2.3 Pianificazione delle operazioni in volo (OIOR, ITL)

Come già accennato nel paragrafo 3.2.1, uno dei compiti di RSOC è quello di esaminare le richieste di osservazione da parte dei PI *team* e di supportare la preparazione delle operazioni scientifiche da eseguire durante i test in volo già programmati per la fase di crociera. I *team* di Rosetta inviano a RSOC le loro richieste di operazioni mediante file in formato elettronico denominati *Orbiter Instrument Operational Request* (OIOR) e *Lander Operational Request* (LOR). L’insieme dei file OIOR e LOR sono chiamati *Operational Request Files* (ORF). Dopo aver rimosso eventuali conflitti tra le operazioni dei *payload*, che potrebbero richiedere iterazioni tra RMOC e i *team*, RSOC provvede a generare la versione consolidata e definitiva dei file sotto forma di *Payload Operational Request* (POR); infine RSOC invia i POR anche a RMOC e allo stesso tempo li rende disponibili ai *team* attraverso il server DDS situato ad ESOC.

I *Payload Operational Request* non sono altro che file di tipo ASCII. Il tipo di *format* supportato può essere di due tipi:

- a) un *format* che contiene la sintassi dei file POR;

b) un *format* chiamato ITL (Input Timeline) che è una versione più leggibile della sintassi dei POR strutturata a colonne. Per gli OIOR si preferisce usare il *format* ITL. Per quanto concerne i *payload* dell'*Orbiter*, la definizione del nome da assegnare ad un OIOR segue le seguenti convenzioni:

“OIOR_PInRSO_D_pppp_ii_XXXXX_vvvvv”,

dove:

- “OIOR” identifica il tipo di file
- “PIn” rappresenta l’acronimo di *Principle Investigator* accompagnato dalla sigla “n” che identifica il nome dell’esperimento (per GIADA, n = H → PIH)
- “RSO” identifica il destinatario che è sempre RSOC
- “D” indica che il file contiene dati
- “pppp” è un codice di quattro lettere che identifica il ciclo della pianificazione. La definizione esatta del numero che rappresenta tale ciclo è sotto la responsabilità di RSOC
- “ii” è un codice di due lettere che indica la forma contratta del nome dell’esperimento (per GIADA, ii = GD)
- “XXXXX” è un campo libero che può essere utilizzato per descrivere il nome del file. Esso deve essere lungo al massimo 5 caratteri tutti maiuscoli e, in caso di dubbi, può essere riempito con i caratteri *underscore*
- “vvvvv” rappresenta il numero sequenziale di sottomissione del file

Come esempio, durante l’*Active Payload Checkout* n. 10 (PC10), il *team* di GIADA ha formulato varie richieste di operazioni (OIOR) compilate in modo conforme alle convenzioni citate:

1. OIOR_PInRSO_D_0014_GD_01M__00045
2. OIOR_PInRSO_D_0014_GD_01R__00046
3. OIOR_PInRSO_D_0014_GD_02__00047
4. OIOR_PInRSO_D_0014_GD_03__00048
5. OIOR_PInRSO_D_0014_GD_INT__00049

I primi due OIOR si riferiscono alle operazioni ordinarie che GIADA esegue ogni 6 mesi durante i *Payload Checkout*, con lo strumento regolato rispettivamente sulle interfacce elettriche *Main* e *Redundant*. Il terzo OIOR fa riferimento ad uno specifico test di interferenza con lo spettrometro VIRTIS mentre il quarto è costituito da una serie di operazioni mirate all’aggiornamento del *Context file* nella memoria dello strumento. Infine il quinto OIOR è una sequenza operativa preparata “ad hoc” su richiesta del *team* di ROSINA per un test di interferenza con GIADA.

In generale un OIOR è un file di tipo ASCII costituito da un *header*, dove sono presenti diverse righe di commento, e da una sequenza di procedure operative (*timeline*) opportunamente temporizzate. L’*header*, mostrato nella parte alta della Figura 3.5, contiene informazioni sulla cronologia delle revisioni, sul nome e sul tipo di file, sugli autori, sulla data di produzione del file, sulla data di esecuzione e sui tempi di inizio e di fine della *timeline*. Questi ultimi sono tempi relativi, cioè si fissa lo zero all’istante di partenza della prima sequenza di telecomandi, in modo che le sequenze successive si avviano dopo intervalli temporali via via crescenti che hanno tutti origine al tempo della prima sequenza (parte bassa della Figura 3.5). La Figura si

riferisce al file OIOR per la simulazione delle operazioni del *fly-by* di Steins eseguita durante l'*Active Payload Checkout* n. 8 (PC8).

```

OIOR_PIHRSO_D_0011_GD_02_00034.TMP - Blocco note
File Modifica Formato Visualizza ?
# $Log: OIOR_PIHRSO_D_0011_GD_02_00034.TMP,v $
#
# Version 1.0 2008/04/09 GIADA test during PC8 in Steins Fly-by configuration
#
# Version 1.1 2008/05/15 GIADA test during PC8 in Steins Fly-by configuration
# RELATIVE TIMING APPLIED
#
# Version 1.2 2008/05/26 GIADA test during PC8 in Steins Fly-by configuration
# Timing conflict with the sequence AGDS311A fixed.
#
#-----#
# Filename: OIOR_PIHRSO_D_0011_GD_02_00034.ROS
# Type: Input Timeline file
#
# Description: GIADA test during PC8 in Steins Fly-by configuration
#
#
# Author: PP, AA
#
# GIADA
#
# Date: 26 May 2008
#
#
# Proposed by GIADA team
#
# (c) ESA/Estec
#
#-----#
# EPS required, but RSOC will use CVS version
Version: 00001
#
ref_date: 06-Jul-2008
Start_time: 000_00:00:00
End_time: 000_01:45:00
#
#-----#
Linea 59, colonna 48

```

```

OIOR_PIHRSO_D_0011_GD_02_00034.TMP - Blocco note
File Modifica Formato Visualizza ?
#-----#
# Description: "1. | Switch on and test - main I/E"
#-----#
+000_00:00:00 GIADA OFF AGDS001A ( \
VGDS0001B = "nom. branch" [ENG] \ # GIADA on Main IF
VGDS0001A = "YES" [ENG] \ # Context exists
+000_00:03:00 GIADA SAFE AGDS002A # Patch CT v.flight 1
+000_00:08:00 GIADA SAFE AGDS003A # Patch Sw v.2.3
+000_00:24:00 GIADA SAFE AGDS110A # Go to Normal mode
+000_00:26:00 GIADA NORMAL AGDS311A( \
VGDS037A = off [ENG] \ # Set GDS off
Description: "GIADA operative in normal mode, GDS off, cover closed"
+000_00:27:00 GIADA NORMAL AGDS037A( \
VGDS037A = off [ENG] \ # Set IS off
+000_00:28:00 GIADA NORMAL AGDS036A ( \
VGDS0031 = 0x05 \
VGDS0032 = 0x05 \
VGDS0033 = 0x0F \
VGDS0034 = 0x05 \
VGDS0035 = 0x14 \
VGDS0018 = Enabled [ENG] \
VGDS0019 = Enabled [ENG] \
VGDS0020 = Enabled [ENG] \
VGDS0021 = Enabled [ENG] \
VGDS0022 = Enabled [ENG] \
VGDS0023 = Low [ENG] \
VGDS0025 = High [ENG] \
VGDS0026 = High [ENG] \
VGDS0027 = High [ENG] \
VGDS0028 = High [ENG] \
VGDS0029 = High [ENG] \ # Set IS status and thresholds
+000_00:29:00 GIADA NORMAL AGDS037A( \
VGDS037A = on [ENG] \ # Set IS on
+000_00:30:00 GIADA NORMAL AGDS426A ( \
VGDS0010 = 0xF8 \
VGDS0011 = 0x04 \ # Calibrate IS
REPEAT = 8 \
SEPARATION = 00:05:00 )
#-----#
Linea 59, colonna 48

```

Figura 3.5 – L'*header* di un OIOR (immagine in alto) e la relativa *timeline* (immagine in basso). Il file si riferisce alla simulazione delle operazioni del *fly-by* di Steins durante l'*Active Payload Checkout* n. 8 (PC8).

Nel corso della fase di crociera si è reso più volte necessario effettuare:

1. la revisione delle *timeline* di GIADA per eliminare sequenze e procedure non più necessarie oppure obsolete e per ottimizzare i tempi di esecuzione delle operazioni (ad esempio, rendere GIADA operativo nel minor tempo possibile);

2. la preparazione di nuove *timeline* per gli *Active Payload Checkout* allo scopo di testare su GIADA procedure nuove e/o revisionate.

I criteri seguiti per la revisione e la preparazione delle *timeline* sono consistiti in:

- assegnare appropriati valori di soglia a tutti i parametri da memorizzare nella memoria dello strumento;
- aver cura che il “flusso” delle sequenze fosse strutturato in maniera tale da evitare conflitti e/o danni allo strumento;
- temporizzare opportunamente le sequenze per evitare pericolose sovrapposizioni di telecomandi o, al contrario, inutili tempi di inattività per GIADA.

3.2.4 Sequenze operative e procedure di controllo

Tutte le procedure necessarie a compiere la missione spaziale sono contenute nel documento *Flight Operations Plan* (FOP). Tali procedure racchiudono varie sequenze di comando (CS). L'insieme delle sequenze di comando e dei telecomandi (TC) è incluso nel *Rosetta Mission Implementation Base* (RMIB) che rappresenta un output elettronico del FOP. Le sequenze operative e le procedure di controllo che sono utilizzate continuamente durante la missione sono contenute nel volume 5 del FOP. I PI *team* possono richiedere aggiornamenti delle sequenze e delle procedure (dopo una serie di scambi iterativi con RSOC e RMOC) che sono implementati direttamente da RMOC seguendo le indicazioni e la guida degli stessi PI *team*.

Esistono tre tipi di procedure:

1. *Flight Control Procedures* (FCP): sono procedure di controllo atte a descrivere le attività dei *payload* in termini di azioni che coinvolgono l'esecuzione di molti telecomandi (TC), il controllo dello stato degli strumenti mediante la telemetria, la verifica di una corretta esecuzione dei telecomandi, il monitoraggio delle attività e la raccolta e l'analisi di dati pertinenti. Le FCP possono essere utilizzate per attività interattive con la Terra;
2. *Sequences* (SEQ): sono sequenze di comando atte a descrivere le attività che consistono solo in comandi separati da intervallati di tempo predefiniti senza azioni di monitoraggio;
3. *Contingency Recovery Procedures* (CRP): sono procedure che riguardano le azioni di recupero in seguito a contingenze di varia natura.

In aggiunta, le *On-Board Control Procedures* (OBCP) sono procedure di controllo memorizzate nella memoria dello *spacecraft* e possono essere modificate solo con l'intervento diretto di RMOC.

Le procedure (FCP, CRP) e le sequenze (SEQ) sono identificate da un nome del tipo “EX-TYP-*nnn*” dove:

- “EX” è un codice di due lettere che indica la forma contratta del nome dell'esperimento (per GIADA, EX = GD)
- “TYP” identifica il tipo FCP, SEQ o CRP
- “*nnn*” è un numero di 3 cifre scelto arbitrariamente dal *Principle Investigator*

Alcuni esempi di sequenze e procedure che riguardano GIADA sono le seguenti:

- GD-FCP-110 (Goto Normal+Sci TM);
- GD-SEQ-006 (GIADA Patch CF NVRAM);
- GD-CRP-200 (Emergency Close Cover).

Le SEQ e le FCP sono strutturate in modo molto simile tra loro. Il file rappresentativo di ogni procedura contiene: una descrizione degli obiettivi, un sommario dei vincoli a cui è sottoposta (ad esempio, essa non può essere eseguita durante un particolare modo operativo di GIADA), gli stati iniziale e finale relativi all'esecuzione della procedura, la sequenza operativa a cui il file fa riferimento, una cronologia delle modifiche implementate e corredate da dettagliate descrizioni, il diagramma di flusso (*flowchart*) delle operazioni (Figura 3.6) e infine la sequenza delle operazioni con le specifiche dei telecomandi e i dettagli sui valori dei parametri ad essi associati (Figura 3.7).

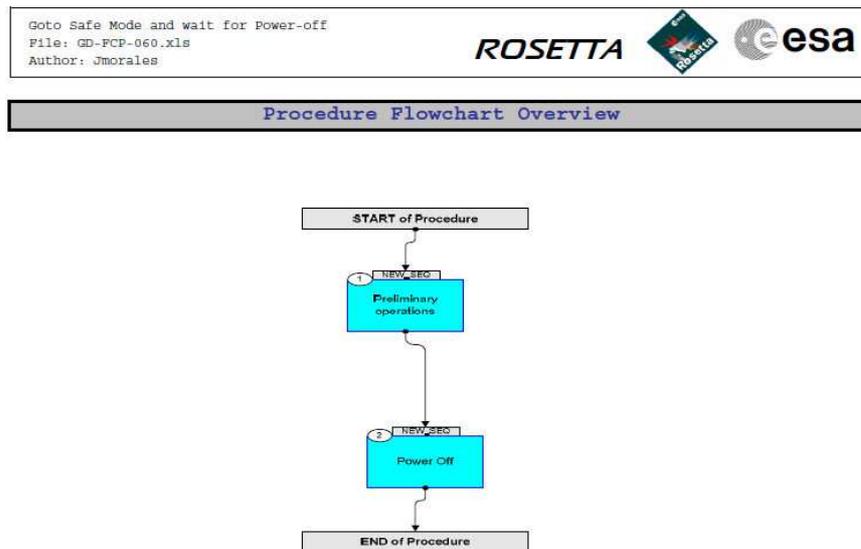


Figura 3.6 – Il diagramma di flusso della procedura GD-FCP-060 (Goto Safe Mode and wait for Power-off).

Step	Label/Time	Activity/Remarks/Branch	CK	Display
Goto Normal+Sci TM File: GD-PCP-110.xls Author: Jmorales				
ROSETTA  				
Beginning of Procedure				
Beginning of Sequence Go to normal+sci TM Time tag flags: NSY--1 Time tag type: B				
1		Goto Normal Mode Next step(s): -> END		
	00.00.00	Goto Normal Mode ZGD19611 Go to Normal Md TC Control Flags: GRM IL DSE --Y -- ---		
	00.01.30	Goto Normal Mode ZGD00010 EnableSciPkt TC Control Flags: GRM IL DSE --Y -- --- Command Parameters : PGDD0002 PID = 90 <dec> (Def)		
AGDS110A End of Sequence				
End of Procedure				

Figura 3.7 – La sequenza delle operazioni previste dalla procedura GD-FCP-110 (Goto Normal+Sci TM). Si noti che i due telecomandi sono separati da un intervallo di 1 min 30 sec per evitare pericolose sovrapposizioni.

Durante la fase di crociera si è posta più di una volta la necessità di effettuare:

- aggiornamenti/revisioni delle sequenze e delle procedure di controllo
- eliminazione di procedure considerate obsolete

I criteri seguiti per la revisione delle procedure di controllo erano finalizzati a:

- temporizzare opportunamente la sequenza delle operazioni
- introdurre operazioni atte ad evitare rischi per lo strumento e a migliorarne l'efficienza
- eliminare meccanismi che potessero generare *loop*, conflitti e sovrapposizioni tra le OBCP

Il lavoro di revisione delle procedure è stato svolto col supporto del *team* di RMOC che ha collaborato attivamente con il *team* di GIADA alla stesura finale delle nuove procedure.

A conclusione del paragrafo si riporta, a titolo di esempio, un breve resoconto del lavoro di aggiornamento di alcune procedure in seguito ad una *failure* verificatasi a bordo dello strumento.

Durante l'esecuzione del *Passive Checkout* n. 7 (PC7), la microbilancia n. 1 di GIADA (MBS#1) ha superato il valore massimo della temperatura di esercizio (80 °C), a causa della programmata operazione di riscaldamento (*heating*) unitamente al fatto che in quel momento essa stava puntando verso il Sole. Il superamento del valore limite di temperatura ha stimolato l'intervento automatico di una procedura di emergenza (la *Emergency Close Cover* OBCP) che ha provveduto a spegnere tutti i sottosistemi di GIADA, a modificare lo stato dello strumento in modalità di sicurezza (*Safe mode*) e a

chiudere il coperchio. L'esecuzione della *timeline* di GIADA, tuttavia, è proseguita fino alla fine, quando la procedura di spegnimento (lo *Switch Off* OBCP) ha richiamato una nuova procedura di chiusura del coperchio (*Close Cover* OBCP), anch'essa programmata, che però stavolta ha provocato la riapertura del coperchio. In sostanza, al termine delle operazioni del PC7, GIADA è stato lasciato col coperchio aperto, avendo ricevuto un doppio comando di chiusura (Figura 3.8). La ragione per cui si è verificata la *failure* è nota ed è stata già riscontrata su GIADA durante un precedente test in volo; quando lo strumento riceve un comando di "*Close Cover*" a coperchio già chiuso e in assenza di gravità, si verifica un effetto di "rimbalzo all'indietro" che produce la riapertura del coperchio.

Dopo aver riscontrato l'anomalia, il *team* di GIADA ha concordato con RMOC una procedura di recupero finalizzata alla chiusura del coperchio. La nuova *timeline* è stata eseguita pochi giorni dopo il termine delle operazioni del PC7 e finalmente GIADA è stato rimesso nella sua configurazione nominale e poi è stato spento con il coperchio chiuso. Tuttavia, onde evitare che la *failure* si manifestasse ancora in futuro, dopo vari scambi di informazioni con RMOC, si è giunti ad una soluzione condivisa per la revisione della *Emergency Close Cover* OBCP di GIADA nella maniera seguente:

- disabilitare la *Recovery action* per evitare l'esecuzione parallela di altre OBCP
- disabilitare l'esecuzione della *timeline*
- chiudere la Cover
- lasciare GIADA in *Safe mode*

Impiegando tale strategia, se la *Emergency Close Cover* OBCP di GIADA venisse in futuro chiamata in azione, si scongiurerebbe l'eventuale sovrapposizione di due o più procedure e si impedirebbe alla *timeline* di eseguire altri comandi potenzialmente pericolosi, lasciando lo strumento in modalità di sicurezza e con il coperchio chiuso. Tuttavia per poter spegnere lo strumento che si trovi in queste condizioni, è richiesto un intervento da Terra utilizzando una procedura preparata "ad hoc" da RMOC.

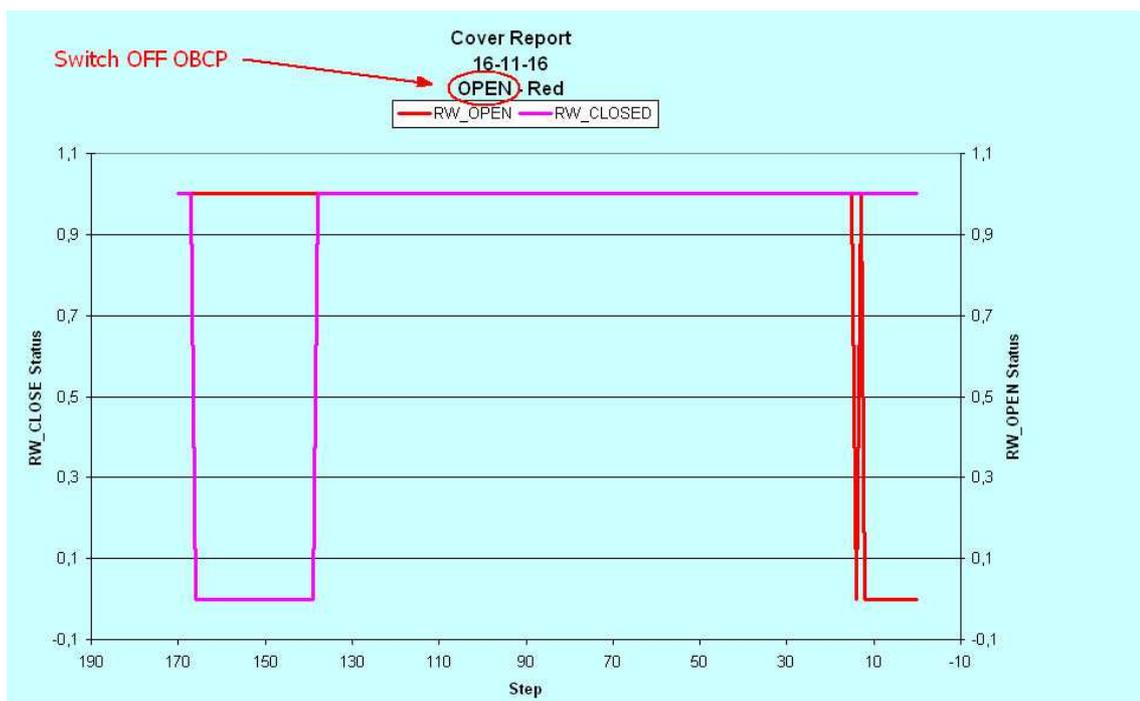
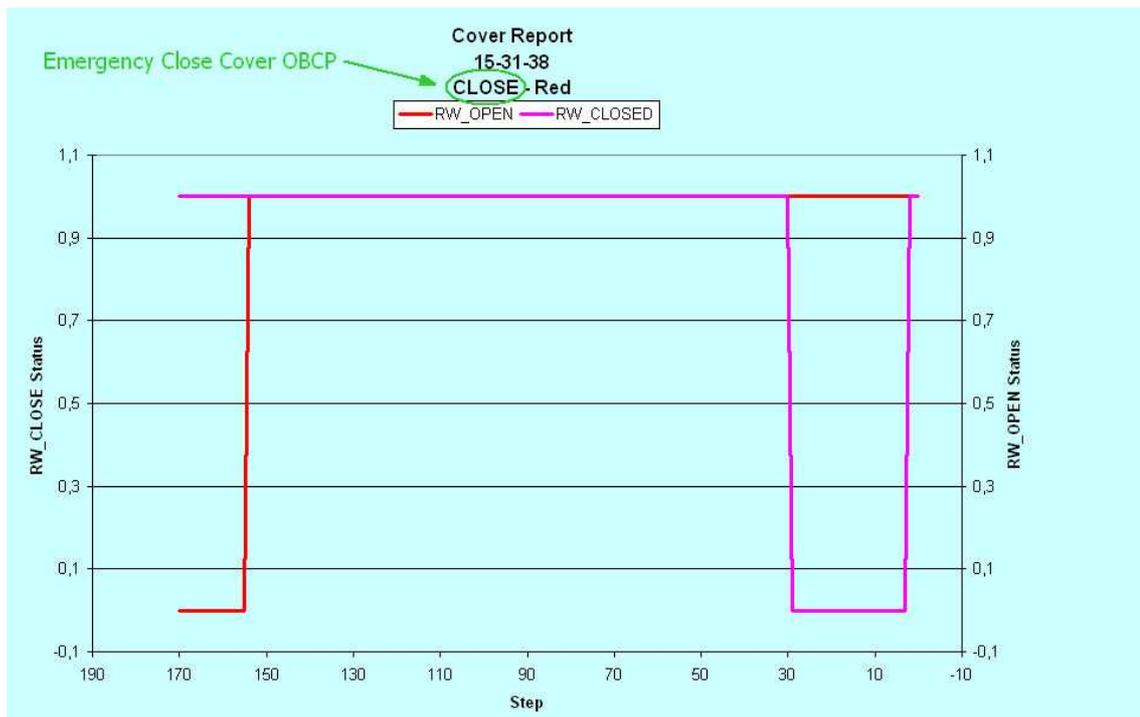


Figura 3.8 – Durante il *Passive Checkout* n. 7 (PC7), a causa di una contingenza termica, si è attivata una procedura di emergenza (*Emergency Close Cover OBCP*) che ha provocato la chiusura del coperchio di GIADA regolarmente (immagine in alto). Tuttavia, in seguito ad un secondo comando di chiusura incluso nella procedura di spegnimento (*Switch Off OBCP*), il coperchio si è riaperto (immagine in basso) lasciando GIADA esposto allo spazio interplanetario. Questo è un esempio significativo di conflitto tra due procedure.

3.2.5 Test di verifica on-ground per le nuove procedure (EQM)

Una volta compiuta la revisione delle sequenze operative e delle procedure di controllo esse devono essere implementate a bordo dello *spacecraft* tramite un *uplink* e/o usate su GIADA tramite i telecomandi definiti in una *timeline*. Ciò vale anche per le sequenze e le procedure create *ex novo*. Qualora, però, le procedure nuove e/o revisionate non fossero state progettate correttamente, utilizzarle in volo senza alcun collaudo

preventivo potrebbe comportare seri rischi per la sonda e per i *payload*. Per evitare tali rischi le nuove procedure possono essere collaudate su un apposito modello *on-ground*, il cosiddetto *Electrical Qualification Model* (EQM). Il modello EQM di GIADA è situato ad ESOC in Germania e richiede l'intervento del personale di RMOC per poter funzionare. È dunque possibile preparare delle *timeline* specifiche da inviare ad RMOC ed avviare una "Campagna di validazione" sul modello EQM delle procedure nuove e/o aggiornate. In tal modo è possibile verificare che le procedure revisionate funzionino correttamente senza rischiare di mettere a repentaglio la sicurezza dello strumento in volo.

Nel preparare le *timeline* va tenuto conto che il modello EQM non è completamente rappresentativo dell'unità in volo. Infatti, sul modello EQM molti meccanismi sono semplificati, i valori di alcune soglie di *overflow* sono errati ed è presente un numero ridotto di sensori rispetto al modello *in flight*. I test delle nuove procedure possono soffrire per le differenze e le limitazioni del modello EQM e generare risultati errati e/o inaspettati. A causa di queste limitazioni, durante le fasi di collaudo su EQM, si sono rese necessarie continue interazioni con ESA per porre rimedio ai falsi messaggi di errore e al fallimento di alcuni test dovuto all'intervento di procedure automatiche di emergenza stimulate da valori dei parametri fuori scala. Dopo varie iterazioni con il *team* di RMOC e procedendo per raffinamenti successivi, si è potuto finalmente definire un "robusto" modello di *timeline* che tenga conto delle limitazioni dell'EQM e che permetta di collaudare le nuove procedure senza incorrere in fallimenti e in fastidiosi messaggi di errore.

3.3 RECUPERO DEI DATI DDS DA ESOC

I dati raccolti dalla sonda Rosetta durante la fase di crociera e relativi alle operazioni in volo, sono inviati a Terra e ricevuti attraverso la *Deep Space Antenna* del *Ground Segment* di New Norcia. Il *Ground Segment* invia i set di dati ad ESOC che ne effettua una prima elaborazione. I dati inviati dallo *spacecraft*, infatti, sono dati di telemetria “grezzi” (*raw data*) cioè sono dati in formato binario; si definiscono dati a “CODMAC level 0” secondo un sistema di codifica proprio di ESA. Ad ESOC i dati a livello 0 subiscono un primo processamento: sono ripuliti e raggruppati, ordinati nel tempo ed impacchettati secondo determinati criteri. In seguito a questo processamento i dati duplicati sono cancellati, i pacchetti mancanti sono corretti e i dati sono organizzati per date giornaliere. I dati che sono stati sottoposti a questa prima elaborazione e sono stati separati per ogni strumento sono ancora in formato binario ma ad un livello di codifica superiore, “CODMAC level 1”. Essi prendono il nome di *Data Disposition System* (DDS) e sono resi disponibili per tutti i *payload*. I *PI team* possono scaricare tali dati collegandosi al server di ESOC <http://rodds.esa.int>; ogni *team* è dotato di una UserID e di una password per poter accedere al server ed effettuare le richieste desiderate.

I dati DDS di GIADA sono recuperati mediante la *workstation* situata a Napoli presso l’INAF – Osservatorio Astronomico di Capodimonte. L’elaborazione e l’analisi dei dati viene eseguita mediante un *software* EGSE dedicato che è stato sviluppato e messo a punto dal *team* di GIADA. L’*Electrical Ground Support Equipment* (EGSE) permette anche la conversione dei dati nel formato standard Planetary Data System (PDS) della NASA di cui si parlerà nel Capitolo 4.

Il flusso delle operazioni di recupero e trattamento dei dati è mostrato in Figura 3.9.



Figura 3.9 – Recupero e trattamento dei dati di telemetria. I dati sono inviati a Terra, ricevuti dal *Ground Segment* di New Norcia in Australia e ritrasmessi ad ESOC per essere sottoposti ad una prima elaborazione. In tal modo i dati “grezzi” del satellite, identificati con la codifica ESA “CODMAC level 0”, possono essere ripuliti, impacchettati, ordinati nel tempo e separati per ogni *payload*. Dopo tale trattamento i dati prendono il nome di *Data Disposition System* (DDS), sono identificati con “CODMAC level 1” e sono disponibili per i *team* che possono scaricarli tramite il server DDS di ESOC. I dati DDS di GIADA sono elaborati ed analizzati mediante un *software* dedicato che è stato sviluppato e messo a punto dal *team* di GIADA.

4 L'elaborazione e l'analisi dei dati

4.1 IL SOFTWARE PER L'ELABORAZIONE E LA VISUALIZZAZIONE

Nel Capitolo 3 si è parlato del recupero e del trattamento di dati in formato DDS.

Si pone la necessità di convertire tali dati da DDS (di tipo binario) a dati interpretabili dall'utente. La conversione dei dati viene effettuata mediante un *software* dedicato che è stato realizzato per il *team* di GIADA dalle Officine Galileo Avionica di Firenze. Utilizzando questo *software*, si possono convertire i dati ad un secondo livello di codifica ESA, il CODMAC 2 level. In sostanza il *software* è progettato per la Conversione dei dati da “CODMAC 1 level” (dati DDS in formato binario) a “CODMAC 2 level” (parametri ingegneristici in formato decimale) che sono utilizzati e interpretati dal *team* di GIADA per l'analisi critica del comportamento dello strumento e per il controllo dei parametri di tutti i suoi sottosistemi.

4.1.1 Vecchia e nuova architettura del software

Di recente il *software* è stato revisionato perché troppo lento, obsoleto, affetto da *bug* e non esportabile sulle nuove *Workstation*. Il nuovo *software* realizzato è molto più veloce, snello ed efficiente e può essere esportato su diverse piattaforme. Le figure Figura 4.1 e Figura 4.2 mostrano le due architetture.



Figura 4.1 – Struttura, funzionamento e output del “vecchio” *software* EGSE.

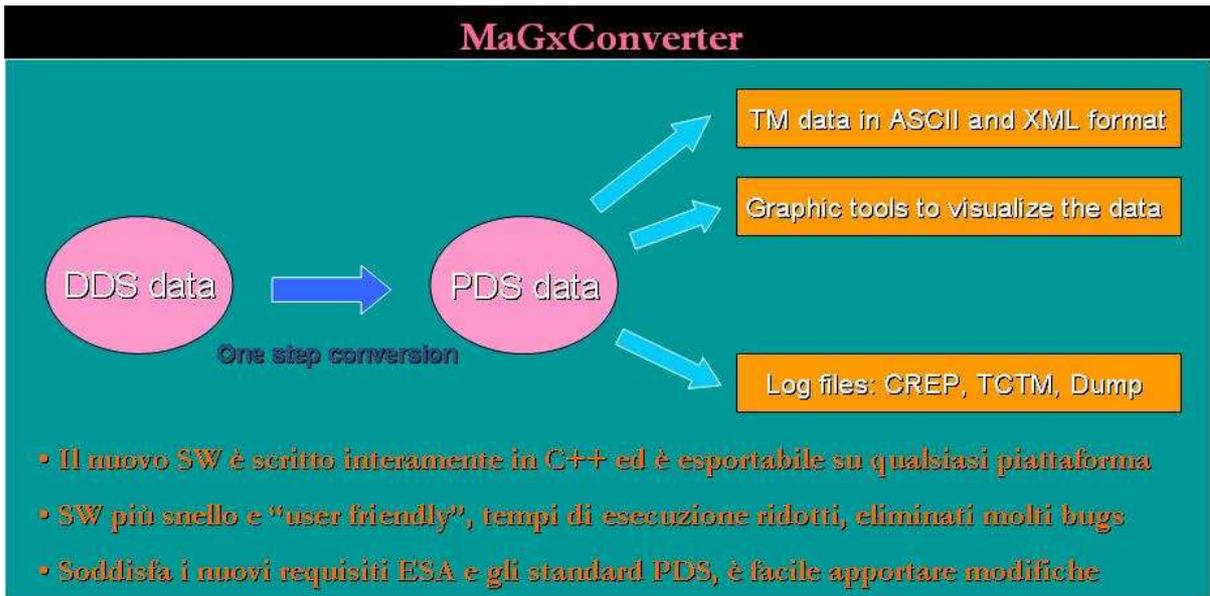


Figura 4.2 – Struttura, funzionamento e output del “nuovo” *software* MaGxConverter.

4.2 ANALISI DEI DATI

L'attività di ricerca descritta nella presente tesi è dedicata essenzialmente allo studio del comportamento dello strumento GIADA in volo durante la fase di crociera di Rosetta e in varie condizioni operative. Come si è visto nel capitolo 3, prima che siano eseguiti i test periodici durante i *Payload Checkout* ed alcuni test specifici (richieste di puntamento, interferenze con altri *payload*, ecc.) è necessario impostare una serie di operazioni preliminari finalizzate alla progettazione e alla pianificazione delle strategie di osservazione, alla revisione di procedure di controllo e sequenze operative e alla stesura delle *timeline* che ciascuno strumento deve eseguire durante la fase di crociera. In seguito, una volta conclusi i test, è possibile scaricare i relativi dati DDS da ESOC ed elaborarli mediante l'uso di un *software* EGSE dedicato (sezione 3.3). L'analisi critica di tali dati conduce ad una valutazione sullo stato generale di GIADA e dei suoi sottosistemi nel tempo e permette di verificare l'affidabilità dello strumento in determinate condizioni di criticità. I dati elaborati ed oggetto di attenta ed accurata analisi sono sostanzialmente di tre tipi:

1. dati di *Housekeeping*, utili a monitorare lo stato di "salute" dei sottosistemi di GIADA attraverso il controllo dei loro parametri ingegneristici (temperatura, potenza, consumo di corrente, ecc.);
2. dati di Calibrazione in volo, utili a monitorare il comportamento dei sottosistemi di GIADA;
3. dati Scientifici, utili a monitorare durante la fase di volo gli eventi di rumore e a rivelare eventuali eventi definibili come "reali".

Nei paragrafi seguenti è illustrata l'analisi critica dei dati relativi ad alcuni test della *Cruise phase* di Rosetta particolarmente significativi per GIADA, facendo riferimento ai tre tipi di dati citati.

4.2.1 Risultati dei test in volo durante i Payload Checkout

Dopo il lancio di Rosetta (2 marzo 2004), GIADA è stato acceso molte volte (sezione 3.1) per i test di verifica e calibrazione in volo. Tutti i test relativi alla fase di crociera sono mirati al monitoraggio dei parametri di *Housekeeping*, a controllare periodicamente i livelli di sensibilità dei sensori ed a verificare che i sottosistemi non subiscano contaminazioni durante il volo. Non è previsto che GIADA raccolga dati scientifici (*dust events*) durante la crociera nello spazio interplanetario in quanto i flussi di polvere attesi sulle aree sensibili dello strumento sono così bassi che la probabilità di intercettare una particella di polvere (*Interplanetary Dust Particle*, IDP) nell'intervallo standard del tempo di funzionamento (circa 12 ore) è prossima a zero. Pertanto, i dati prodotti da GIADA durante la *Cruise phase* si riferiscono esclusivamente al controllo dello strumento e non ci dovrebbero essere dati scientifici rivelati da GDS, IS e GDS+IS. Ogni evento registrato da tali sottosistemi deve essere considerato, dunque, come evento falso o di rumore.

Di seguito sono discussi i risultati relativi all'*Active Payload Checkout* n. 10 (PC10) che rappresenta il test in volo di GIADA più recente.

L'Active Payload Checkout n. 10 (PC10) è il quarto di una serie di cinque Active PC previsti prima di ogni importante attività di Rosetta durante la crociera. Esso si è svolto circa 7 settimane prima dell'Earth swing-by 3 di Rosetta (13 novembre 2009); inoltre è stato utilizzato come test di preparazione alle operazioni scientifiche da eseguire durante il fly-by di Lutetia (10 luglio 2010) e durante la comet phase.

Per GIADA il PC10 è costituito da due fasi. La prima fase, definita GD01, è il test "passivo" che viene eseguito regolarmente ogni 6 mesi durante i Payload Checkout; la seconda fase è un test "attivo" ed è suddiviso in tre test denominati GD02, GD03 e GDINT.

Il test passivo (GD01) è stato effettuato consecutivamente sulle interfacce elettriche Main e Redundant, eseguendo procedure simili per entrambi i casi. Inoltre, a partire dall'Active PC4 in avanti, non sono stati né modificati né aggiunti nuovi telecomandi alle procedure dell'ultimo test "passivo" modificato (PC2) e dunque le due timeline utilizzate nel PC10 GD01 per le interfacce elettriche Main e Redundant sono del tutto simili a quelle usate durante i test PC2, PC4, PC5, PC6, PC7, PC8 e PC9.

Il GD02 è un test effettuato in parallelo con le operazioni dello spettrometro VIRTIS ed è progettato per studiare eventuali interferenze tra GIADA e VIRTIS; inoltre, essendo stato concepito per essere eseguito cronologicamente dopo il GD03, esso rappresenta anche un test per verificare che l'aggiornamento del Context file nella memoria dello strumento sia avvenuto correttamente.

Il GD03 rappresenta un test eseguito in una configurazione non usuale per GIADA in quanto è progettato per aggiornare i valori di alcuni parametri del Context file nella memoria permanente dello strumento, allo scopo di aumentarne l'efficienza e la sicurezza. Inoltre il test GD03 comprende una serie di operazioni mentre GIADA è in funzione in Flux mode, una modalità operativa non ancora esplorata finora.

Il GDINT è un test in configurazione standard eseguito su richiesta del team di ROSINA per studiare le possibili interferenze con GIADA. Tale test è stato richiesto dal team di ROSINA dopo che erano già state pianificate le operazioni per GIADA e di conseguenza ESA ha dovuto programmare la timeline ove disponibile, ossia tra l'esecuzione dei test GD03 e GD02.

Tutte le operazioni programmate per GIADA sono state preliminarmente memorizzate a bordo dello spacecraft e successivamente inviate allo strumento dopo l'accensione.

In Tabella 1.2 sono riportati la data di inizio e la durata di ciascun test.

Nome del test	Data ed ora di inizio	Durata
GD01 (Main)	19/09/2009 – 06:25:00	circa 12 ore
GD01 (Redundant)	19/09/2009 – 18:25:00	circa 12 ore
GD03	20/09/2009 – 06:25:00	1 ora
GDINT	21/09/2009 – 22:35:00	1 ora
GD02	22/09/2009 – 00:30:00	4 ore e 20 minuti

Tabella 4.1 – Cronologia dei test di GIADA durante l'Active Payload Checkout n. 10 (PC10).

Le attività previste per GIADA durante il PC10 sono organizzate secondo le timeline descritte in sezione 3.2.3. Nella Tabella 4.2 è mostrata, a titolo di esempio, la timeline del PC10 GD01 relativa all'interfaccia elettrica Main.

Sequence	Timeline GD01 – Main Interface
AGDS001A	VGD0001B = "nom. Branch" [ENG] \ # GIADA on Main IF VGD0001A = "YES" [ENG]) # Context exists
AGDS003A	Patch SW v.2.3
AGDS035A	Go to Cover Mode
AGDF090A	Open cover
AGDS065A	Go to Safe mode
AGDS110A	Go to Normal mode (science enabled)
AGDS038A	Set GDS L/R receiver thresholds to 1.60/1.18 V
AGDS037A	Set IS Off
AGDS036A	Set IS PZTA/B/C/D/E threshold to 0.05/0.05/0.15/0.05/0.20 V Range = L – Gain = H/H/H/H/H
AGDS037A	Set IS On
AGDS120A	Calibrate GDS – IS – MBS at 5 min intervals
AGDF100A	Self-interference test
AGDF055A	MBS # 1-2-3-4-5 heating
AGDF060A	GIADA Switch-off (with Cover close operation in the Power-off OBCP)

Tabella 4.2 – Le attività pianificate per GIADA durante il test PC10 GD01 per l’interfaccia elettrica *Main*. I valori di soglia e dei parametri relativi a GDS e IS sono riportati in grassetto.

Lo stato generale di GIADA e dei suoi sottosistemi si può controllare in Figura 4-3. Numerosi grafici “a gradini” dimostrano in modo semplice e netto il funzionamento regolare di tutti gli elementi di GIADA.

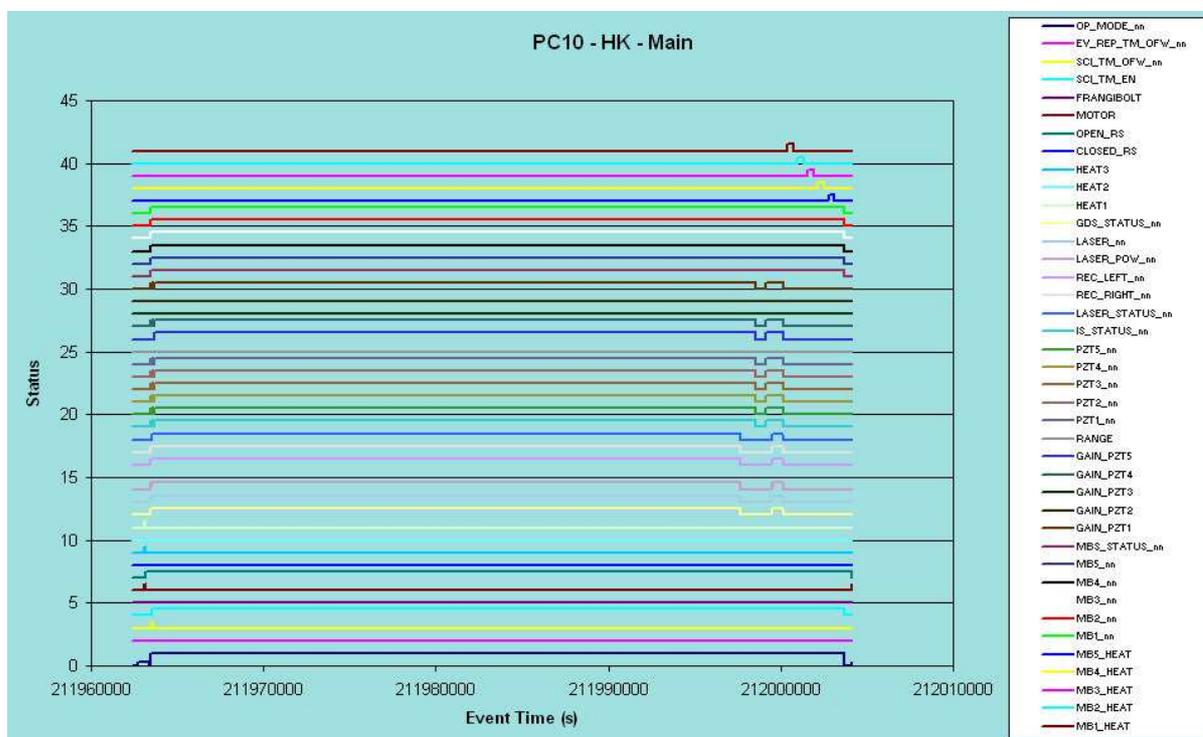


Figura 4-3 – Descrizione dello stato generale di GIADA durante il test PC10 GD01 per l’interfaccia elettrica *Main*. Si osserva l’andamento nel tempo dei parametri caratteristici di ogni sensore e sottosistema come le accensioni e gli spegnimenti di GDS, IS e MBSs, lo stato di funzionamento dei laser e dei sensori piezoelettrici, il riscaldamento delle microbilance, l’azione del motore del coperchio, il cambio di modo operativo di GIADA, ecc. (vedere la leggenda a destra del grafico).

Il primo pacchetto di dati non è stato ricevuto per nessuno dei 5 test del PC10, a causa di un errore di sincronizzazione dei tempi UTC tra GIADA e lo *spacecraft*. Dopo un confronto con il *team* di RMOC si è compreso che un simile comportamento è normale quando ci sono pacchetti di telemetria non sincronizzati che non sono ricevuti in tempo reale. Ad eccezione dei primi, nessun altro pacchetto di telemetria, né di *Housekeeping* né Scientifico, è andato perduto nei test.

L'esito dell'apertura e della chiusura del coperchio di GIADA si può controllare leggendo i *Cover Reports* (CREP). Tali rapporti testimoniano un comportamento nominale delle operazioni di apertura/chiusura durante tutti i test del PC10 (Figura 4.4).

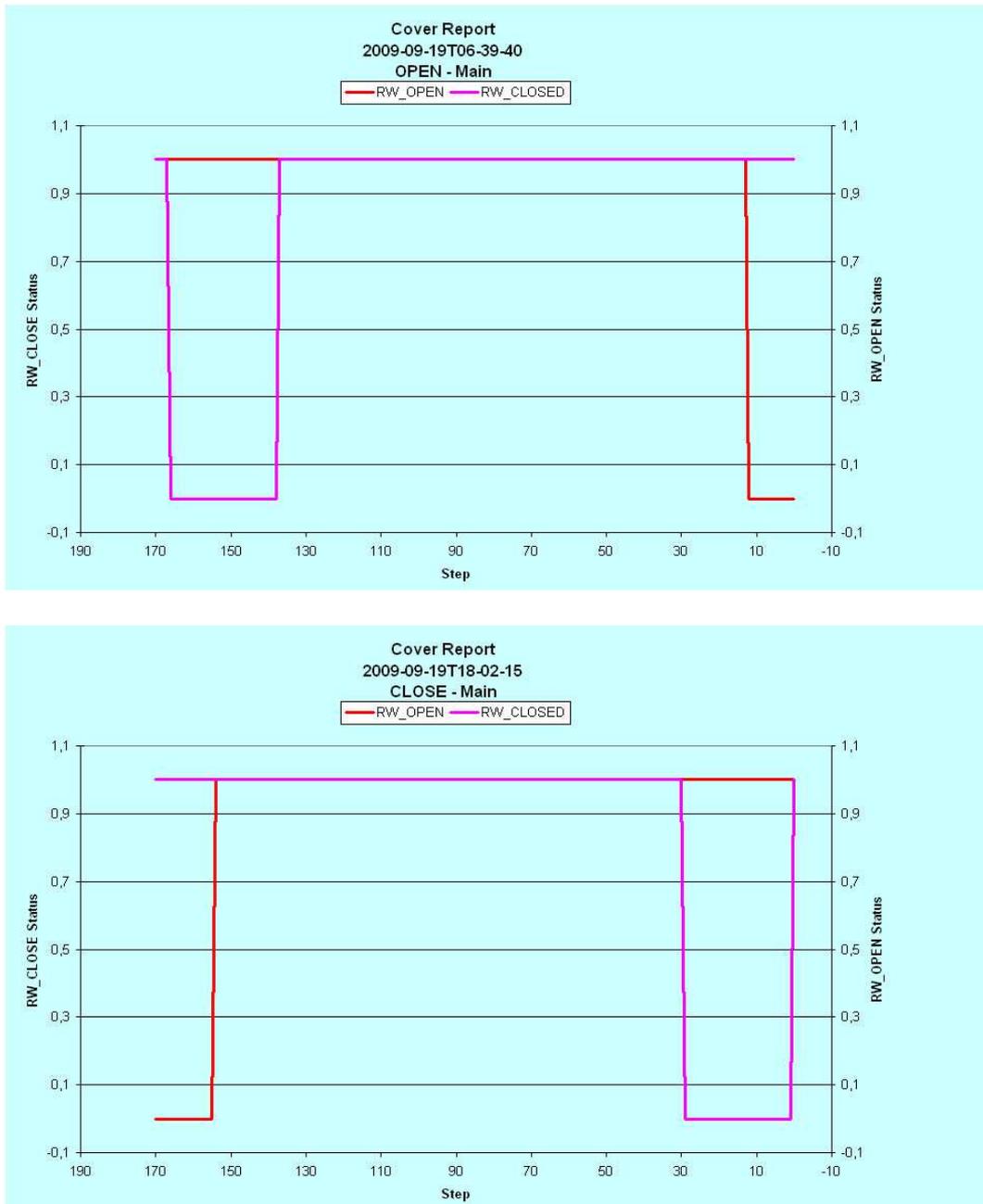


Figura 4.4 – I *Cover Reports* (CREP) permettono di monitorare l'apertura (immagine in alto) e la chiusura (immagine in basso) del coperchio di GIADA. Le immagini, riferite al test PC10 GD01 per l'interfaccia elettrica *Main* dimostrano che le operazioni di apertura/chiusura sono state regolari.

Durante le operazioni in volo il consumo di energia è tenuto costantemente sotto controllo. La Figura 4.5 mostra il comportamento delle tre linee di alimentazione a +15 V, -15 V e +5 V dalle quali si può ricavare il profilo del consumo di energia nel tempo, riferito al test PC10 GD01 per l'interfaccia elettrica *Main*. Tutti i parametri funzionali misurati risultano entro i limiti e il comportamento è quello previsto. Le 5 “punte” che si osservano sulla linea +5 V nella parte destra del diagramma sono dovute al riscaldamento applicato in successione alle 5 MBSs. Tale processo, che riscalda i cristalli di quarzo per molti minuti fino a ad un massimo di 80 °C, si ripete periodicamente durante la crociera di Rosetta allo scopo di valutare la dipendenza frequenza-temperatura e di effettuare la pulizia della superficie dei cristalli dal materiale volatile che vi si è eventualmente depositato sopra.

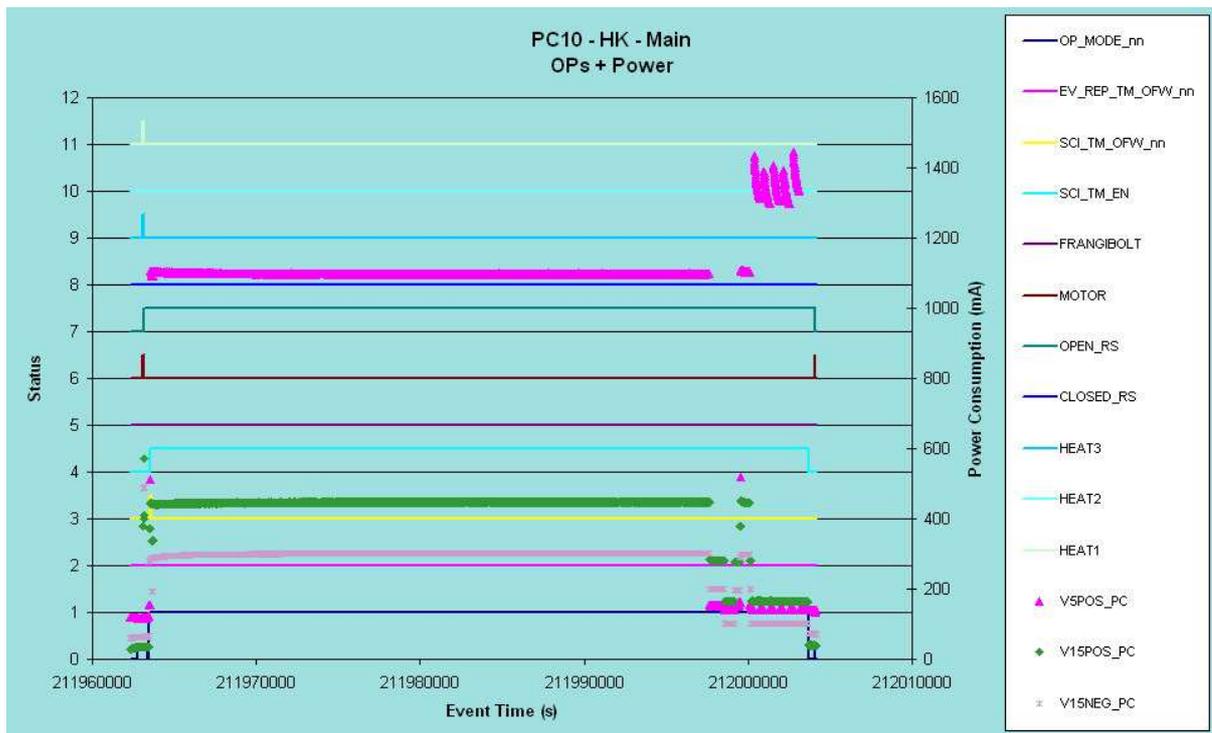


Figura 4.5 – Il consumo di energia di GIADA durante il test PC10 GD01 per l'interfaccia elettrica *Main*. Si distinguono le tre linee di alimentazione +5 V (triangoli viola), +15 V (rombi verdi) e -15 V (asterischi rosa). Inoltre è riportato lo stato dei sottosistemi di GIADA. Le variazioni repentine sulla linea di alimentazione +5V che si notano sulla parte destra del diagramma sono determinate dall'applicazione di un processo di riscaldamento alle 5 MBS.

GIADA è dotato di una serie di sensori atti a controllare la temperatura in diverse posizioni fondamentali. La Figura 4.6 mostra che l'andamento delle temperature è regolare per tutti gli elementi. I picchi visibili all'inizio dei profili di temperatura del Frangibolt e dell'IS sono artefatti dovuti all'incremento temporaneo del consumo di energia all'accensione dei riscaldatori del motore.

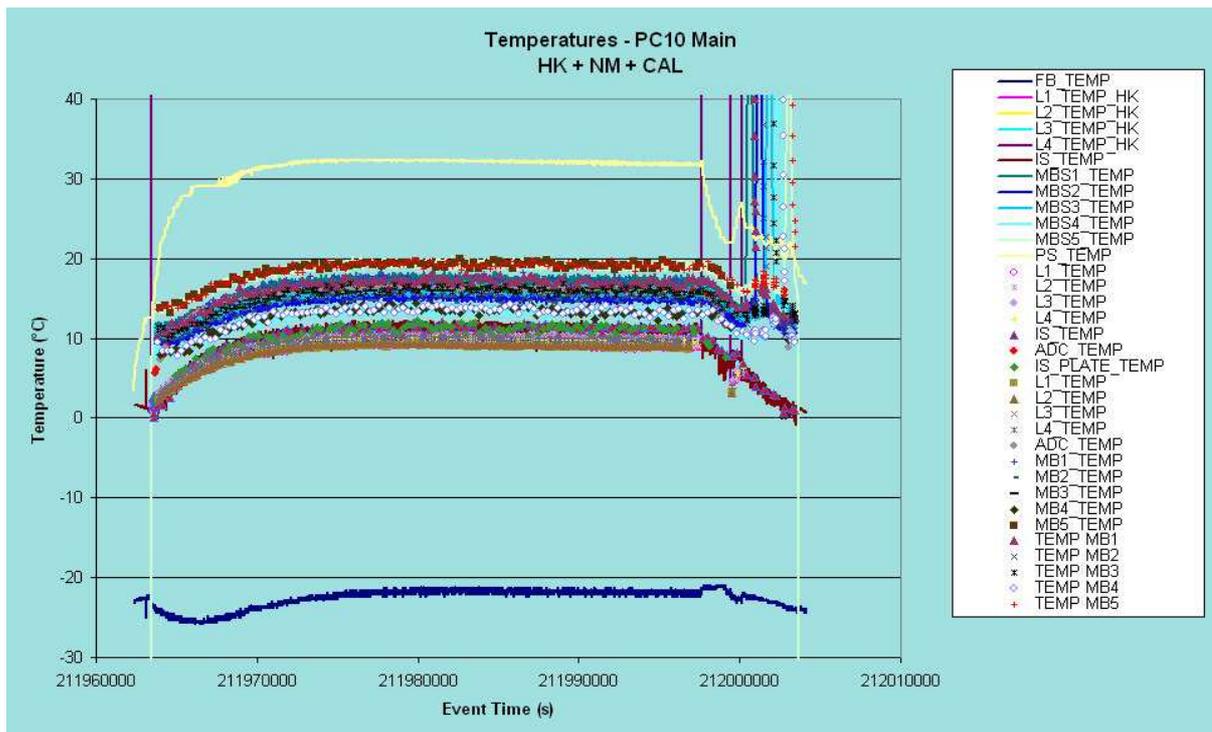


Figura 4.6 – Il profilo di temperatura dei sensori di GIADA durante il test PC10 GD01 per l’interfaccia elettrica *Main*. L’immagine dimostra che il comportamento è nominale per tutti gli elementi. I picchi visibili sui profili di temperatura del Frangibolt e dell’IS sulla parte sinistra del diagramma sono artefatti dovuti all’aumento temporaneo del consumo di energia all’accensione degli *heaters* del motore.

A differenza di quanto è accaduto in alcuni test precedenti, durante il PC10 non si è mai verificato il superamento dei limiti di *Soft alarm* e *Hard alarm* applicati alle linee di alimentazione e ai sensori di temperatura. Questo comportamento “nominale” è dovuto al fatto che tali limiti sono stati recentemente aggiornati dopo un’analisi statistica nel tempo di tutti i parametri relativi. Infatti, tutti i limiti definiti per il consumo di energia sono ricavati essenzialmente sulla base di prove approfondite di laboratorio effettuate sullo strumento prima del lancio. Pertanto è stato eseguito uno studio globale dei dati raccolti e accumulati durante tutta la crociera per quantificare l’effetto del consumo di energia sulla temperatura, al fine di implementare una raffinata messa a punto dei limiti relativi.

Il GDS non è dotato di un dispositivo per la calibrazione in volo. Di conseguenza, l’unica grandezza che può essere tenuta sotto controllo è il livello di *stray-light* interna generata dalla luce laser, a meno che il GDS non sia saturo. Durante il PC10 il GDS non si è saturato per cui i dati di calibrazione hanno esibito livelli di *stray-light* interna conformi a quelli misurati nei precedenti test in volo e ancor prima in laboratorio. Inoltre, come ci si aspettava, i test in volo dimostrano che, quando la luce del Sole entra in GIADA ad un angolo minore di 80 gradi rispetto alla direzione dell’asse verticale (asse +Z), i foto-rivelatori del GDS si saturano. La Figura 4.7 mostra i livelli di *stray-light* interna per i due lati sinistro (circa 1.0 V) e destro (circa 0.18 - 0.19 V) dei rivelatori laser, con riferimento al test PC10 GD01 per l’interfaccia elettrica *Main*. In figura sono riportati anche tutti i profili di temperatura del sottosistema.

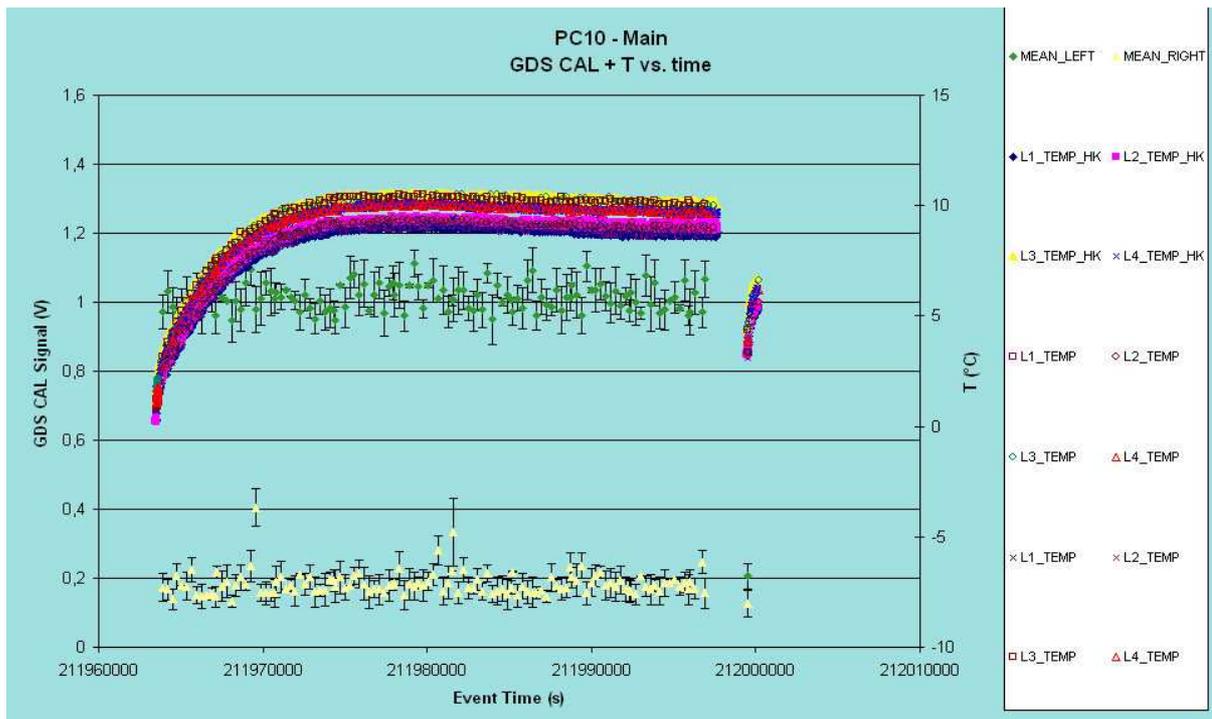


Figura 4.7 – I livelli di *stray-light* interna sui due lati sinistro (rombi verdi) e destro (rombi gialli) dei rivelatori laser del GDS, durante il test PC10 GD01 per l’interfaccia elettrica *Main*. La figura mostra anche tutte le temperature del sottosistema. Il “salto” nei profili di temperatura che si osserva sulla parte destra del diagramma è dovuto al cambio di modo operativo di GIADA.

Poiché durante il PC10 non c’è stata saturazione, il GDS ha rivelato alcuni eventi. La maggior parte di tali eventi si è manifestata all’accensione del sottosistema oppure sono al livello di saturazione di 6.9 V (Figura 4.8, immagine in alto). Gli eventi di rumore visibili all’accensione del GDS sono dovuti al fatto che inizialmente le soglie dei canali sinistro e destro non sono regolate in modo efficiente, ovvero i disturbi generati all’accensione del GDS non sono “filtrati” in modo efficace dai rivelatori laser. La Figura 4.8 (immagine in basso) mostra che i valori iniziali delle soglie del GDS sono di circa 0.8 V per entrambi i canali. Successivamente, in accordo con la *timeline*, le soglie dei ricevitori sinistro e destro sono regolate rispettivamente sui valori 1.60 V e 1.18 V attraverso la sequenza AGDS038A (Tabella 4.2). Come è stato detto, uno degli scopi del PC10 era quello di aggiornare i valori di alcuni parametri del *Context file* nella memoria non volatile di GIADA (compresi i valori di soglia del GDS e dell’IS) in modo da rendere permanenti le modifiche e aumentare l’efficienza e la sicurezza dello strumento. In effetti questo è proprio ciò che è successo durante il test GD03: i valori di soglia indicati in grassetto nella Tabella 4.2 sono stati riportati nella memoria permanente di GIADA in modo che, al momento dell’accensione, le soglie di GDS e IS siano regolate direttamente su quei valori. Una verifica che l’aggiornamento del *Context file* nella memoria dello strumento sia andato a buon fine si può ottenere osservando i dati relativi al GDS e all’IS durante il test GDINT che è consecutivo al GD03. Come si vede in Figura 4.9 (immagine in alto), dopo la *patch* del *Context file* il GDS si accende subito sui valori ottimali di soglia di 1.60 V (canale sinistro) e 1.18 V (canale destro) in modo tale che gli eventi di rumore finora registrati all’accensione sono efficacemente filtrati (Figura 4.9, immagine in basso).

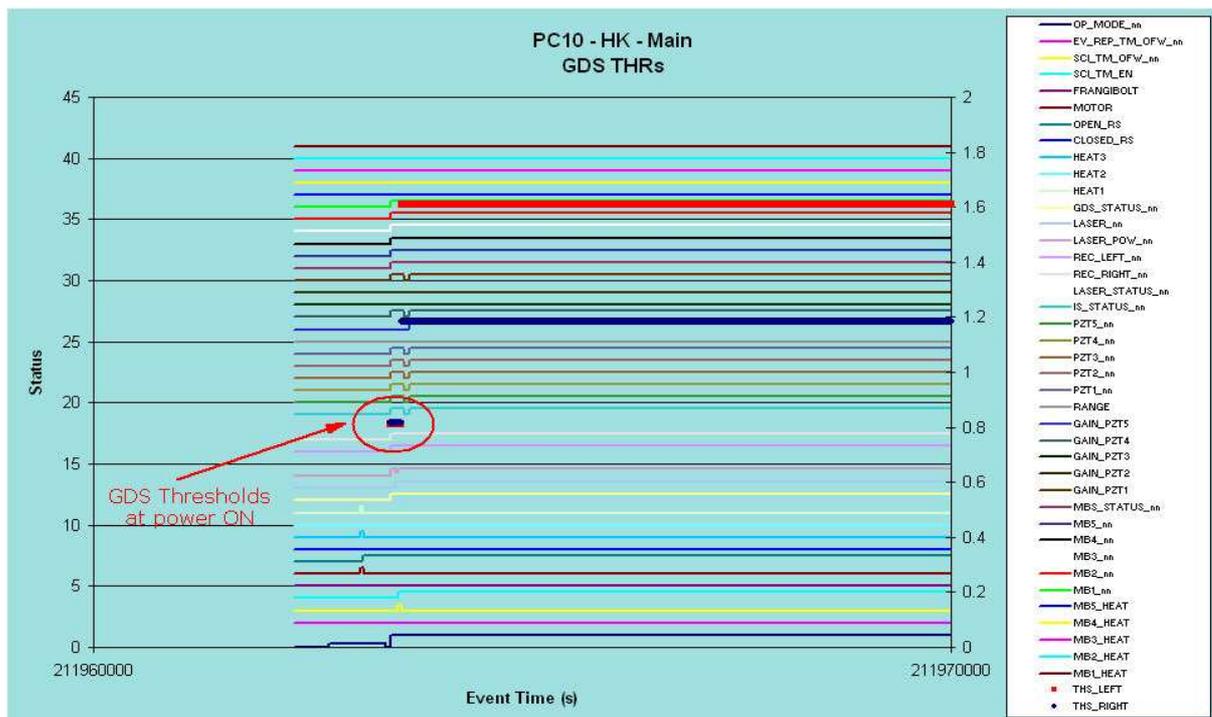
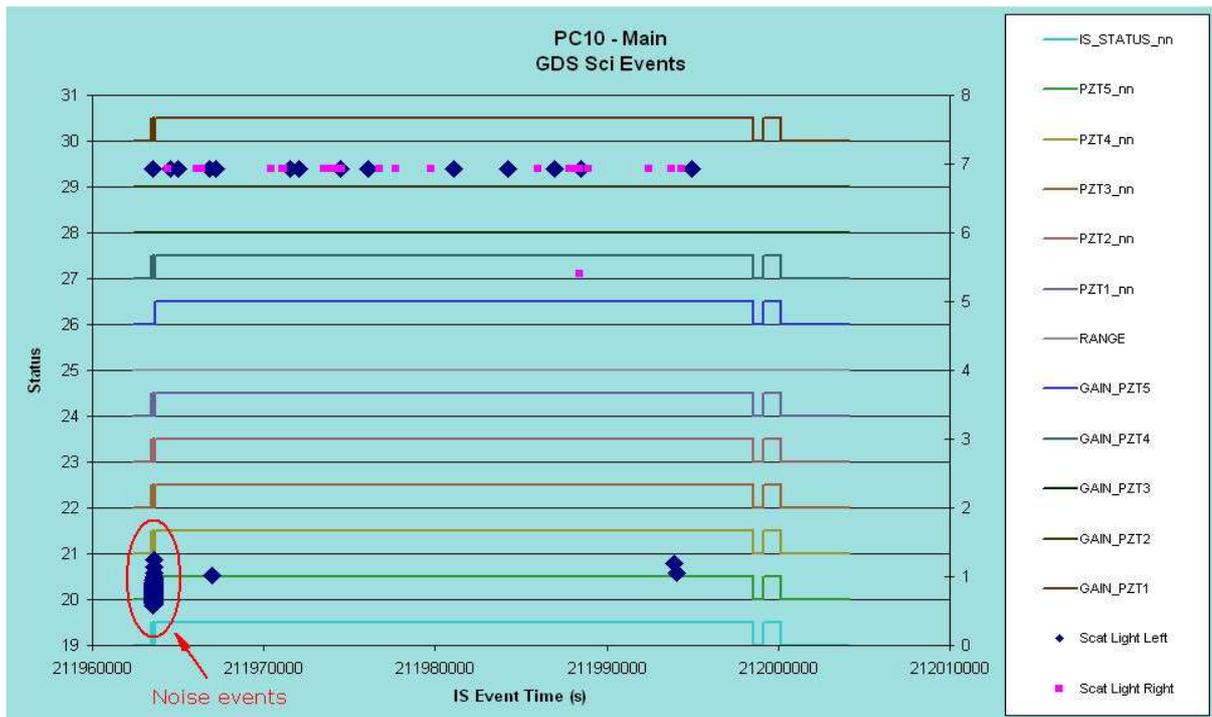


Figura 4.8 – Gli eventi di rumore registrati dal GDS (immagine in alto) e i relativi valori di soglia (immagine in basso) durante il test PC10 GD01 per l'interfaccia elettrica *Main*. I numerosi eventi di rumore presenti all'accensione del GDS sono dovuti al fatto che inizialmente le soglie dei canali sinistro e destro non sono regolate in modo efficiente, ovvero i disturbi generati all'accensione del GDS non sono filtrati efficacemente dai rivelatori laser.

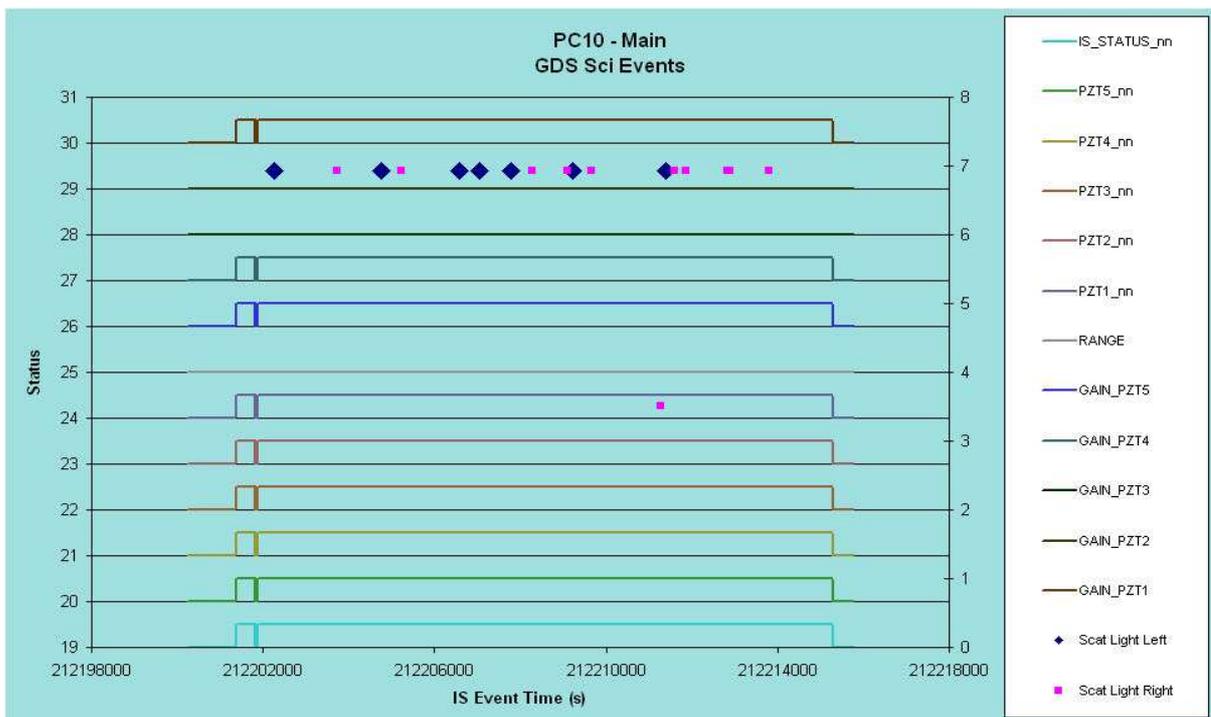
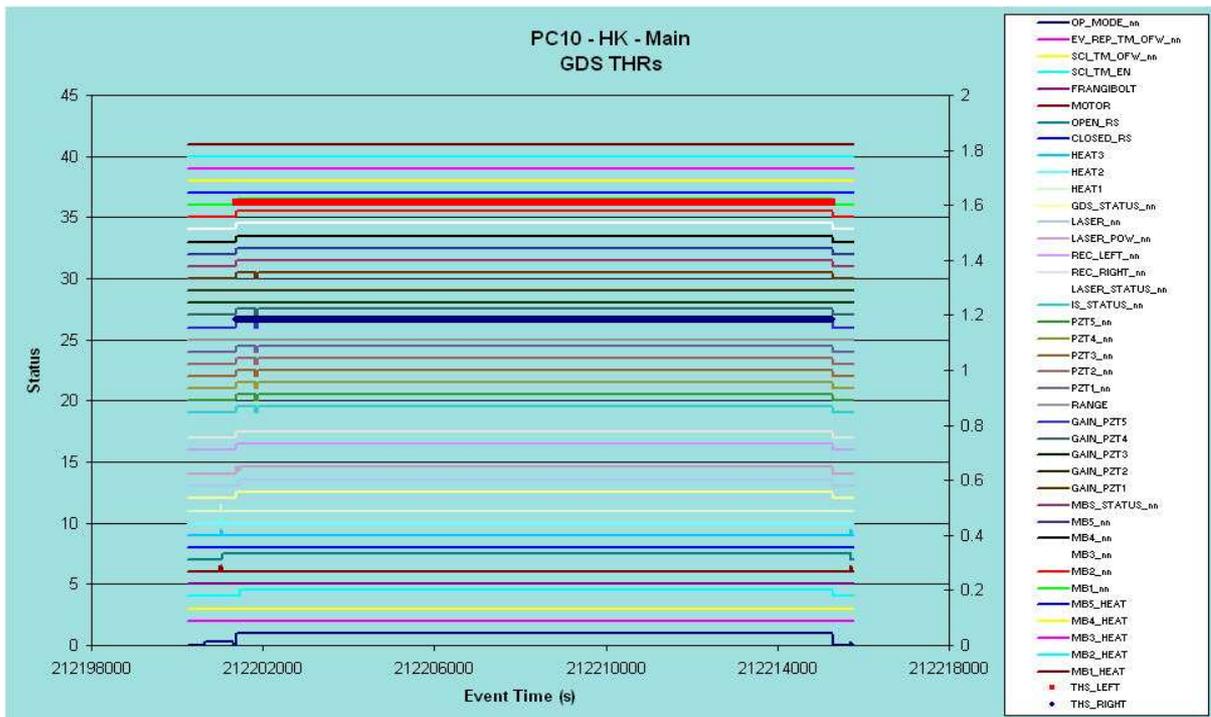


Figura 4.9– Le nuove soglie (immagine in alto) e i gli eventi (immagine in basso) generati dal GDS durante il test PC10 GDINT. Come si può notare, dopo la *patch* del *Context file*, le soglie del GDS sono subito sui valori ottimali di 1.60 V (canale sinistro) e 1.18 V (canale destro) e gli eventi di rumore registrati all'accensione sono efficacemente filtrati.

L'Impact Sensor è dotato di un'unità di stimolo dei sensori piezoelettrici che possono essere periodicamente alimentati da un'onda quadra di ampiezza assegnata. La Figura 4.10 mostra la risposta del sensore PZT1 in seguito allo stimolo. La discesa dell'onda quadra applicata è più ripida della salita; pertanto l'impulso generato sulla piastra dell'IS è più alto nel primo caso. Questo effetto genera due risposte diverse dai sensori piezoelettrici. Anche in questo caso, come per il GDS, i livelli del segnale sono quelli previsti dai test in laboratorio. Durante i test in volo i sensori PZT rivelano anche alcuni "eventi". Tali eventi non sono quasi mai registrati simultaneamente da tutti e 5 i sensori e devono essere considerati eventi accidentali non legati ad alcuna rivelazione reale di polvere.

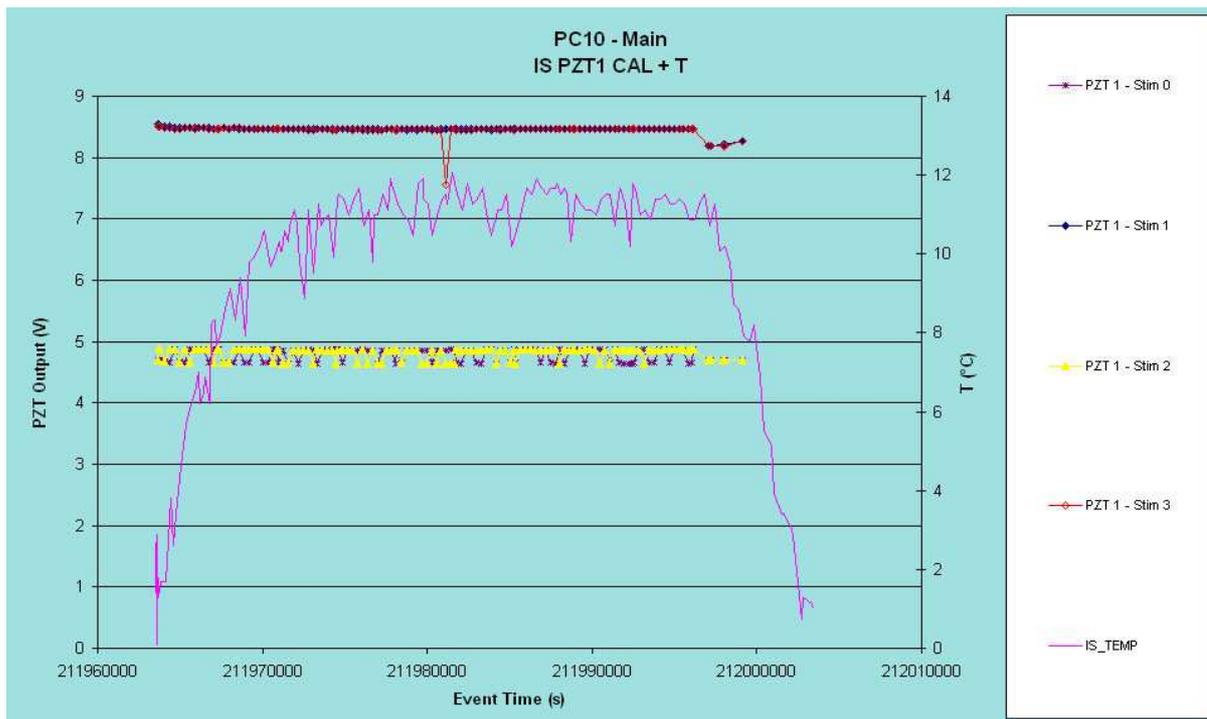


Figura 4.10 – Segnale di risposta del sensore PZT1 dell'IS allo stimolo di 10 V applicato periodicamente allo stimolatore interno. Le due risposte si riferiscono rispettivamente alla salita (triangoli gialli) e alla discesa (rombi rossi) dell'onda quadra applicata. La figura mostra anche l'andamento della temperatura del sensore IS. I dati si riferiscono al test PC10 GD01 per l'interfaccia elettrica *Main*.

Il comportamento delle microbilance si può valutare analizzando l'andamento della frequenza (che è legata alla massa depositata sul cristallo di quarzo sensibile) in funzione della temperatura, anche durante il riscaldamento dei sensori eseguito per rimuovere materiale eventualmente depositato sui cristalli durante l'esposizione allo spazio interplanetario. La Figura 4.11 mostra l'andamento della frequenza e della temperatura in funzione del tempo (immagine in alto) e il profilo di temperatura insieme allo stato in funzione del tempo (immagine in basso) per la MBS n. 3.

Dopo un'analisi critica e una discussione approfondita dei risultati del test in esame, si può affermare in sintesi che:

- i dati di *Housekeeping* (HK) sono nominali in tutti i test del PC10;
- i dati di Calibrazione in volo sono altrettanto nominali;
- non si è verificato alcun superamento dei limiti di *Soft alarm* e *Hard alarm* e tutti i sottosistemi si comportano come previsto;

- le operazioni di apertura/chiusura del coperchio sono regolari in tutti i test;
- il *Context file* è stato aggiornato correttamente nella memoria dello strumento.

Pertanto, le attività dell'*Active Payload Checkout* n. 10 (PC10) si sono concluse con pieno successo per GIADA: lo strumento ha un comportamento nominale.

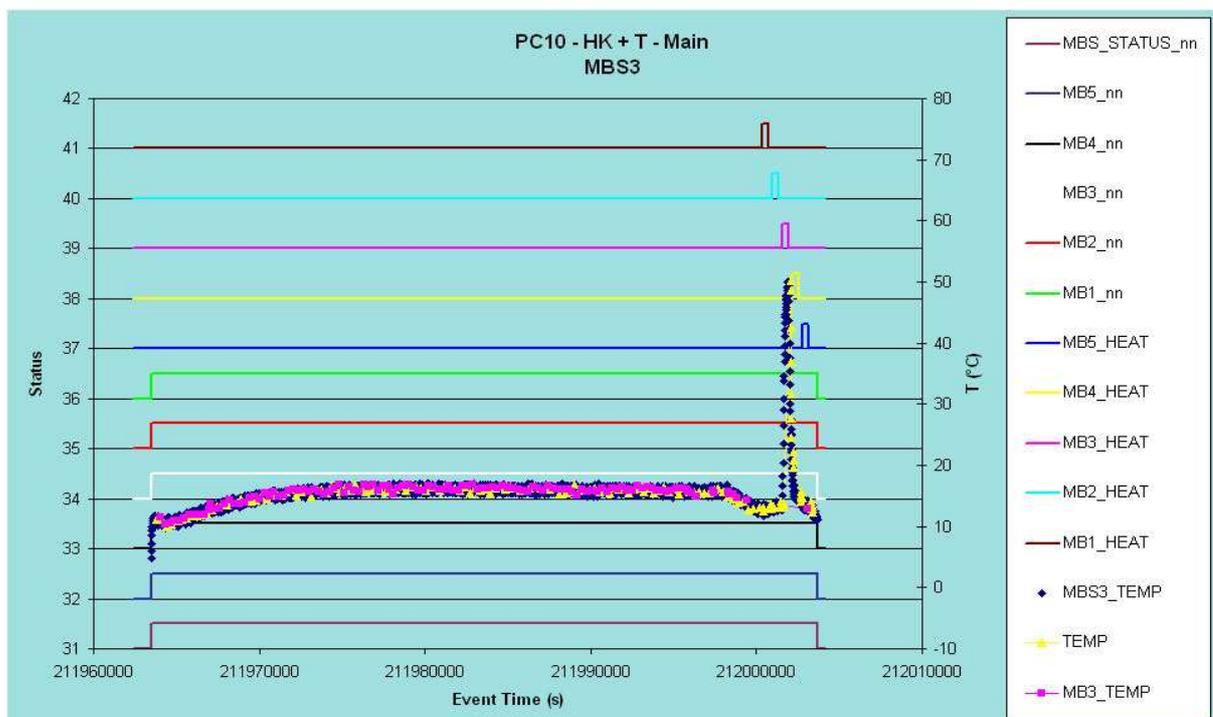
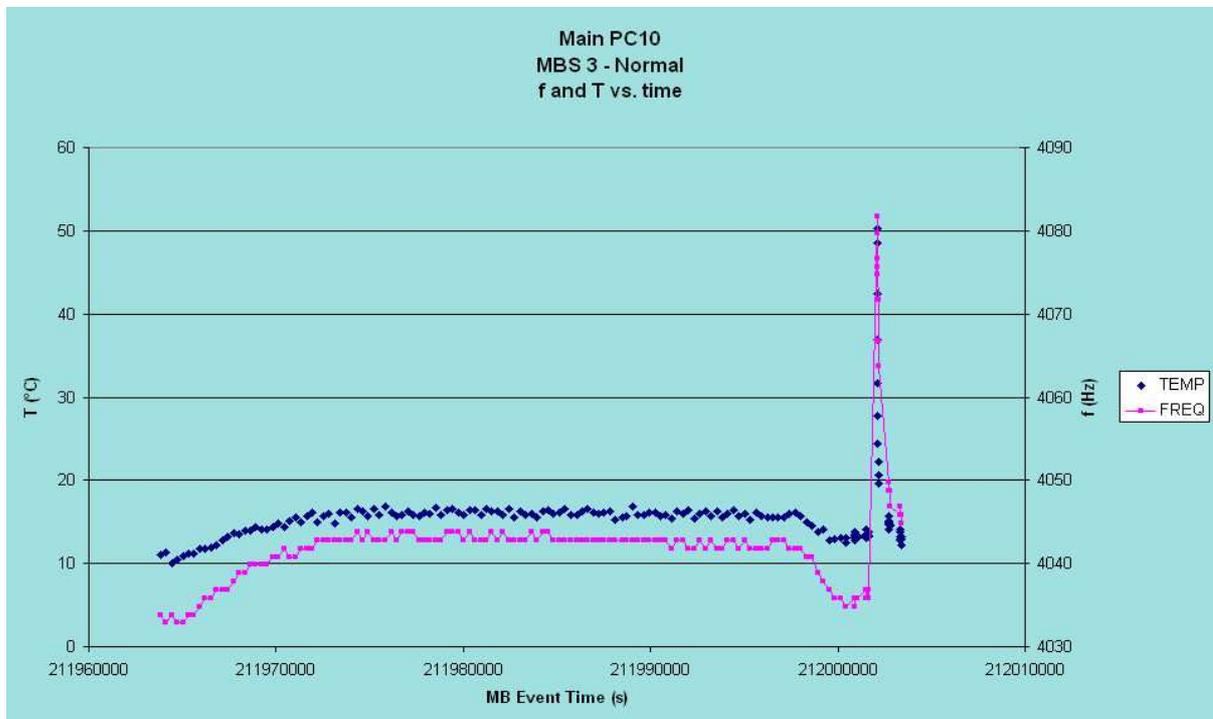


Figura 4.11 – La frequenza e la temperatura in funzione del tempo (immagine in alto) e il profilo di temperatura insieme allo stato in funzione del tempo (immagine in basso) per la MBS n. 3. Si noti il picco di temperatura nella parte destra del diagramma dovuto all'*heating* della microbilancia. I dati si riferiscono al test PC10 GD01 per l'interfaccia elettrica *Main*.

4.2.2 Analisi comparativa dei dati

Durante la fase di crociera, i sottosistemi di GIADA sono stati tenuti costantemente sotto controllo in occasione delle accensioni periodiche. Comparando tra loro tutti i parametri provenienti dai numerosi test in funzione del tempo, si può ottenere la cronologia degli eventi e un quadro generale del loro comportamento. Ad esempio, la Figura 4.12 mostra l'andamento del potenziale della sorgente laser n. 3 del GDS in funzione della temperatura, lungo tutto l'arco temporale della *Cruise phase*. I dati provenienti da tutti i test da prima del lancio ad oggi e l'andamento lineare del diagramma V-T dimostrano che il dispositivo laser n. 3 ha mantenuto la sua stabilità nel tempo.

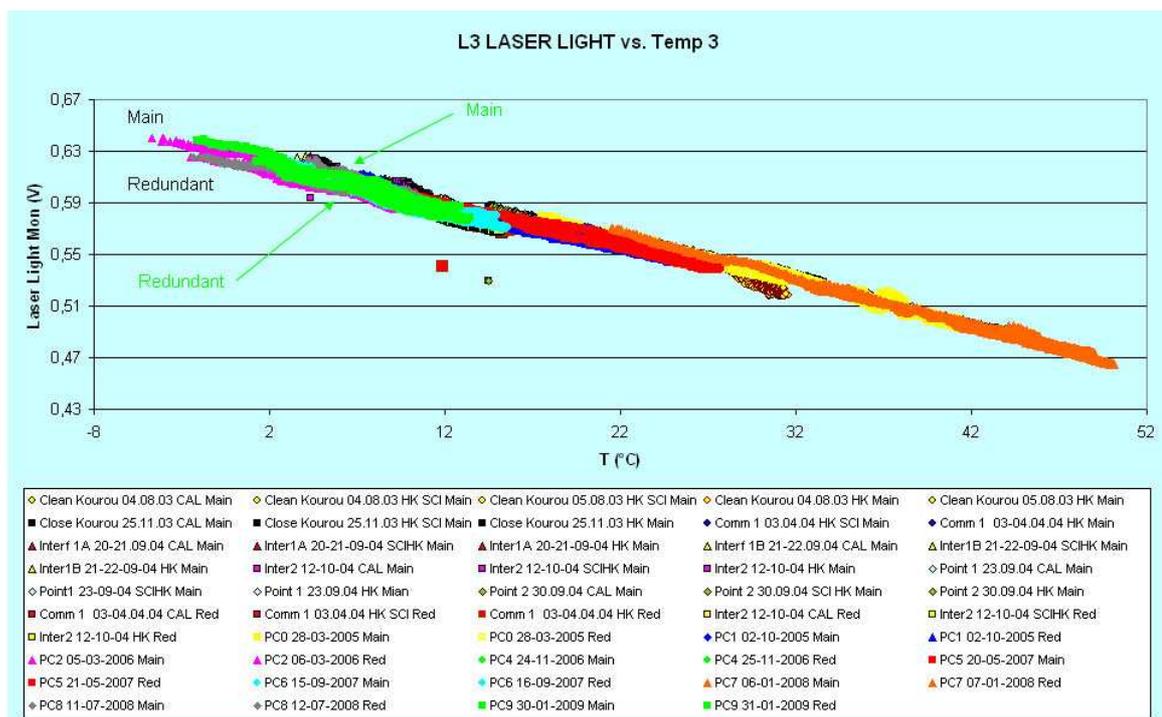


Figura 4.12 – Comportamento del potenziale del sensore laser n. 3 del GDS in funzione della temperatura. Sono stati confrontati i dati acquisiti da prima del lancio e durante i test in volo fino al PC9. L'andamento lineare del diagramma dimostra che il comportamento del sensore è nominale.

Dopo la prima accensione nella fase di *Commissioning*, si è riscontrato un incremento della frequenza su tutte le microbilance, sebbene di diversa entità per ciascuna di esse. La Figura 4.13 mostra il comportamento nel tempo della MBS n. 3 comparando tutti i dati acquisiti durante la crociera fino al PC9. Si nota un notevole incremento della frequenza (circa 1700 Hz) dopo la prima accensione in fase di *Commissioning*; successivamente tale effetto non si osserva più e i valori di frequenza rimangono sostanzialmente costanti per tutti i test della fase di crociera. Se l'effetto del salto di frequenze è ascrivibile al deposito di materiali, essi non possono essere volatili in quanto i frequenti cicli di riscaldamento delle microbilance ne avrebbero dovuto produrre l'evaporazione. È molto probabile che, dopo le prime fasi della missione, alcuni materiali inquinanti, ad esempio espulsi da parti dello *spacecraft* sotto forma di gas, abbiano ricoperto i cristalli sensibili delle MBSs in modo permanente. Per fortuna la contaminazione ha modificato solo marginalmente il *range* di frequenza dei sensori e non ne ha compromesso il funzionamento in modo significativo.

In Figura 4.14 è illustrato l'andamento della frequenza della MBS n. 4 in funzione della temperatura; si noti che il suo comportamento è sostanzialmente regolare.

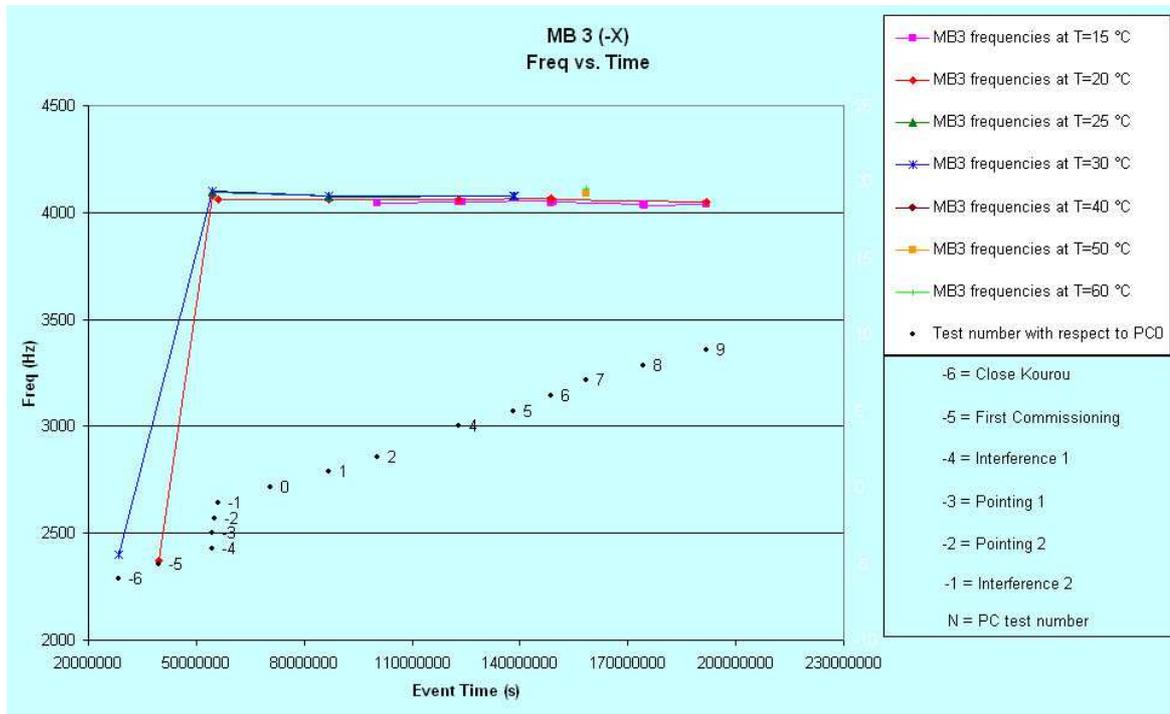


Figura 4.13 – Diagramma relativo alla frequenza della MBS n. 3 in funzione del tempo. Sono stati confrontati i dati acquisiti fino al PC9. La figura evidenzia l'incremento di frequenza registrato dopo la prima accensione in fase di *Commissioning*; in seguito tale comportamento non si è più manifestato ed i valori di frequenza sono rimasti sostanzialmente invariati.

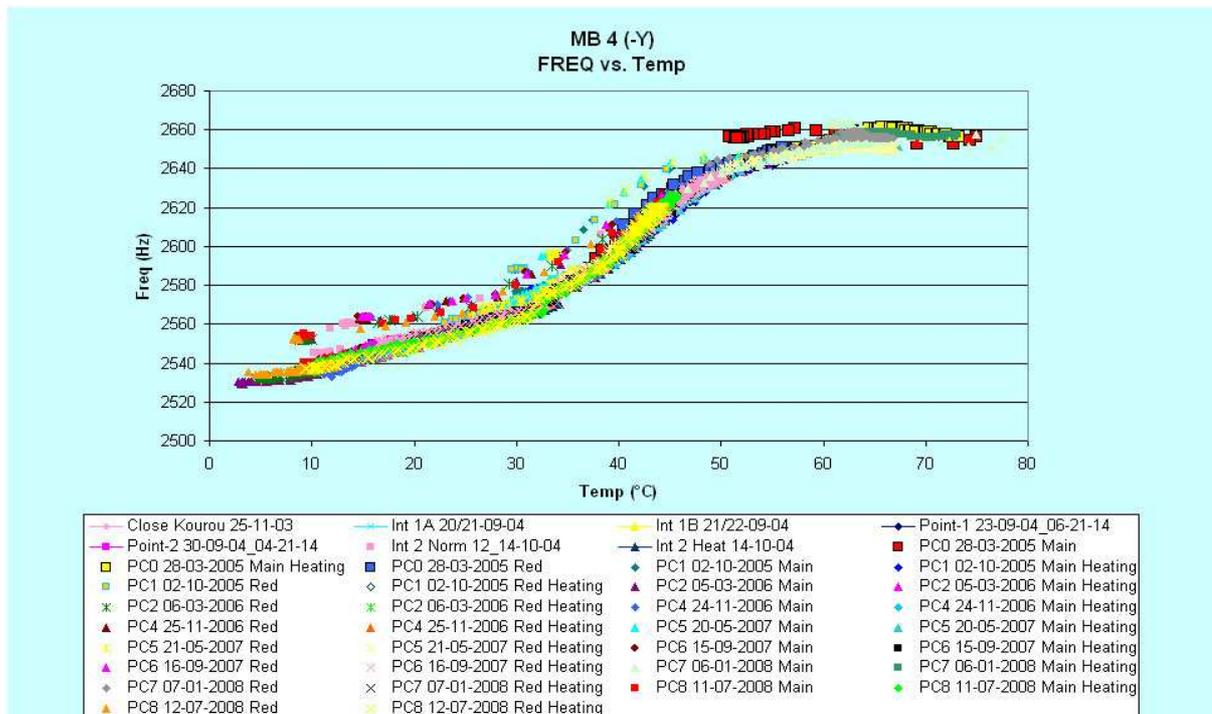


Figura 4.14 – Diagramma relativo alla frequenza della MBS n. 4 in funzione della temperatura. Si sono confrontati i dati acquisiti da prima del lancio alla base di Kourou fino al PC8. Il comportamento della MBS n. 4 appare nominale.

4.2.3 Analisi dei dati di GIADA su un caso di notevole interesse

In questo paragrafo si è preso in considerazione un caso speciale in cui l'analisi dei dati di GIADA ha fatto emergere ulteriori potenzialità di misura e di indagine per i sensori dello strumento. La singolarità si è presentata durante l'*Active Payload Checkout* n. 6 (PC6), il secondo di una serie di cinque *Active PC*, che si è svolto dal 17 settembre 2007 al 1 ottobre 2007, ossia circa 7 settimane prima dell'*Earth swing-by* 2 di Rosetta (13 novembre 2007). L'analisi critica dei dati è del tutto simile a quella descritta al paragrafo 4.2.1 per il PC10 e pertanto l'attenzione sarà focalizzata soltanto sull'elemento di novità.

Durante le attività del PC6 lo *spacecraft* effettuò una serie di scansioni *raster* ruotando nel piano XZ intorno alla direzione dell'asse Y ed alternando continuamente e regolarmente il senso di rotazione. La variazione di assetto (*attitude*) dello *spacecraft* fu richiesta dal *team* di ALICE per le operazioni scientifiche e comportò un cambiamento continuo del *Sun Aspect Angle* (SAA) rispetto alla direzione dell'asse principale +X dello *spacecraft*, vicino al valore zero. La Figura 4.15 illustra la variazione del SAA durante l'esecuzione del PC6 per GIADA.

Alcuni sensori di GIADA registrarono la variazione di *attitude* in modo eccellente. Ad esempio, durante il PC6 la MBS 1 puntava sempre in direzione del Sole e le sue variazioni di frequenza, seppure nell'intervallo limitato di 20-30 Hz, riproducono fedelmente le fluttuazioni del *Sun Aspect Angle* (Figura 4.16). Analogamente il sensore esterno di temperatura (Frangibolt) registrò leggere fluttuazioni termiche proprio in corrispondenza delle variazioni di *attitude* della sonda (Figura 4.17). Questo risultato è molto interessante perché apre nuove prospettive alle capacità investigative di GIADA che finora non erano state considerate e che potrebbero tornare utili anche durante la fase di esplorazione della cometa.

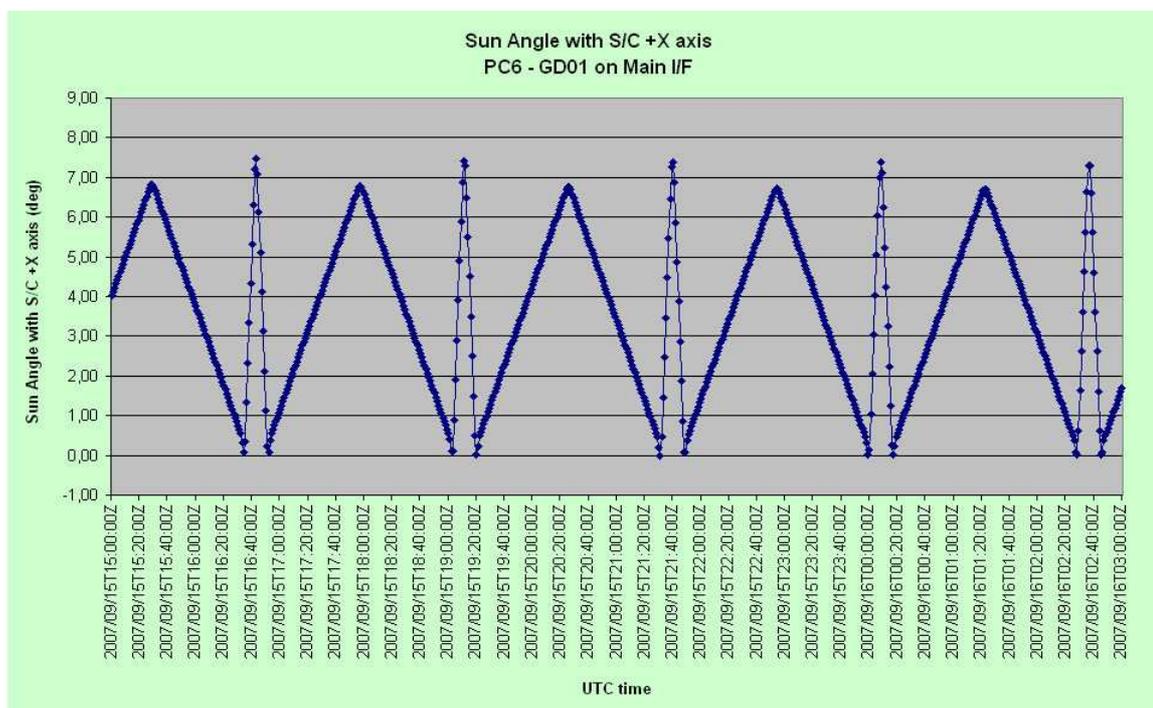


Figura 4.15 – Variazione del *Sun Aspect Angle* rispetto alla direzione dell'asse principale +X dello *spacecraft*, vicino al valore zero. I dati sono riferiti al periodo di attività di GIADA durante l'*Active Payload Checkout* n. 6 (PC6).

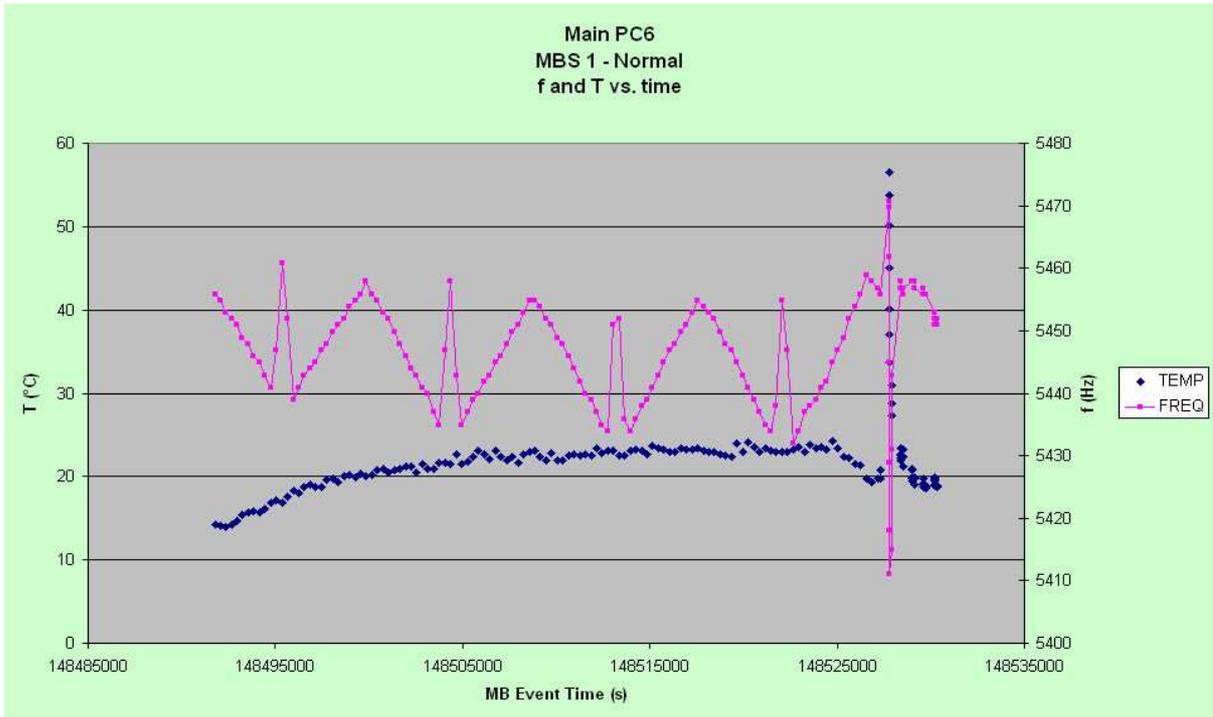


Figura 4.16 – Variazioni di frequenza della MBS 1 in coincidenza delle scansioni *raster* della sonda Rosetta durante l'esecuzione del PC6. La MBS 1 puntava costantemente in direzione del Sole e le fluttuazioni di temperatura, dovute al moto continuo dello *spacecraft*, hanno generato nella MBS cambiamenti di frequenza di 20-30 Hz che riproducono quasi esattamente le oscillazioni del *Sun Aspect Angle*.

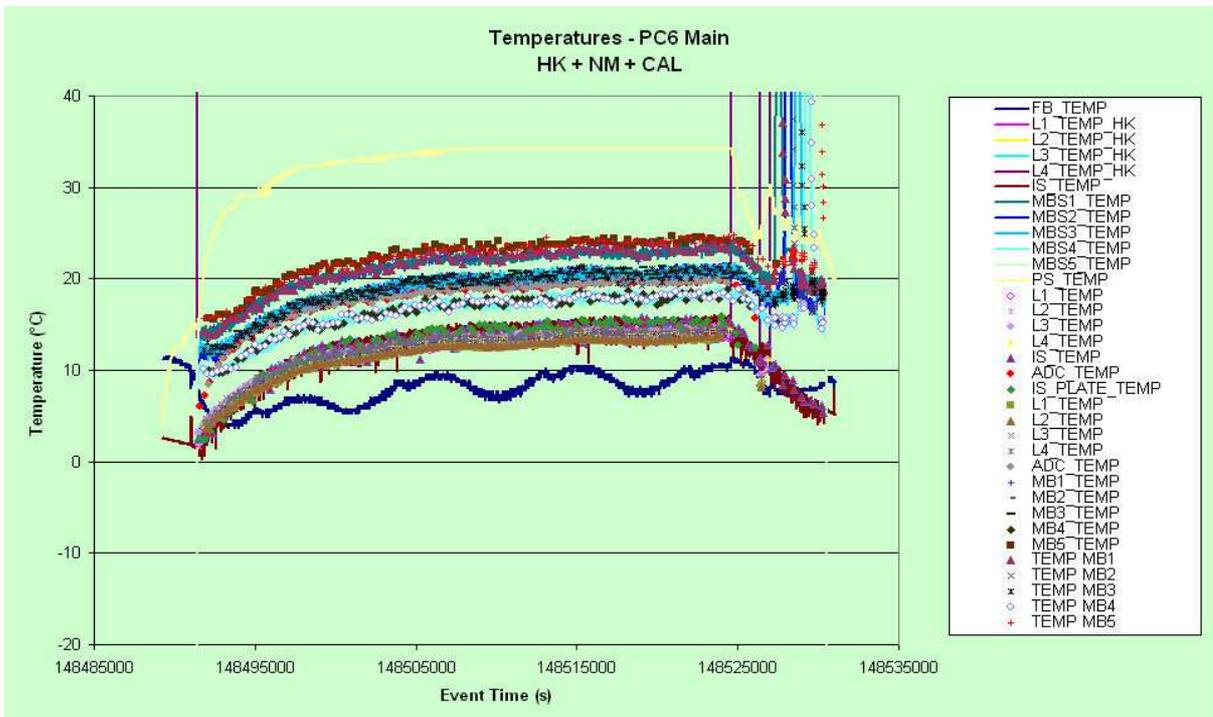


Figura 4.17 – Fluttuazioni nel profilo di temperatura del sensore del Frangibolt (linea blu continua). Le oscillazioni sono sovrapponibili alle variazioni del *Sun Aspect Angle* causate dalle scansioni *raster* della sonda. Si può notare, inoltre, una leggera fluttuazione dei valori di temperatura anche sui profili degli altri sensori.

4.2.4 Il sorvolo dell'asteroide Steins

L'asteroide (2867) Steins è stato il primo obiettivo scientifico della missione Rosetta (se si escludono i *fly-by* dei pianeti) e il primo *fly-by* di un asteroide da parte dell'ESA. Il *Closest approach* (CA, punto di distanza minima dal *target*) è stato raggiunto il 5 settembre 2008 alle 18:38:20 UTC alla distanza di circa 800 km dall'asteroide; tale distanza era la minima possibile che permettesse l'inseguimento continuo (*tracking*) dell'asteroide da parte di Rosetta e contemporaneamente permettesse di attraversare lo *Zero phase angle** (angolo di fase nullo) una volta fissati i parametri geometrici del *fly-by*. La Figura 4.18 dimostra che la geometria del *fly-by* richiedeva un *flip* dello *spacecraft* di 180° prima di raggiungere il *closest approach*. Le manovre del *flip* sono cominciate 40 minuti prima del CA e sono terminate 20 minuti prima del CA; era il giusto compromesso trovato fra due requisiti altrimenti incompatibili: minimizzare l'esposizione al Sole dei pannelli -X e ±Y dello *spacecraft* (*flip* il più tardi possibile) e minimizzare l'impatto sulle operazioni scientifiche (*flip* il più presto possibile). Il *fly-by* di Steins è stato molto veloce in quanto la distanza tra Rosetta e l'asteroide cambiava di un ordine di grandezza entro 15 minuti prima e dopo il *fly-by*. In Tabella 4.3 sono elencati i parametri geometrici più significativi del *fly-by*.

Parametri geometrici	Valori dei parametri
tempo al <i>Zero phase angle</i>	5 settembre 2008 – 18:36:23 UTC
distanza al <i>Zero phase angle</i>	1280 km
tempo al <i>Closest Approach</i>	5 settembre 2008 – 18:38:20 UTC
distanza al <i>Closest Approach</i>	802.6 km
velocità relativa	8.62 km/s
distanza dal Sole	2.14 U.A.
distanza dalla Terra	2.41 U.A.
ritardo nelle telecomunicazioni	circa 20 minuti

Tabella 4.3 – I parametri geometrici relativi al *fly-by* dell'asteroide (2867) Steins (Cortesia ESA).

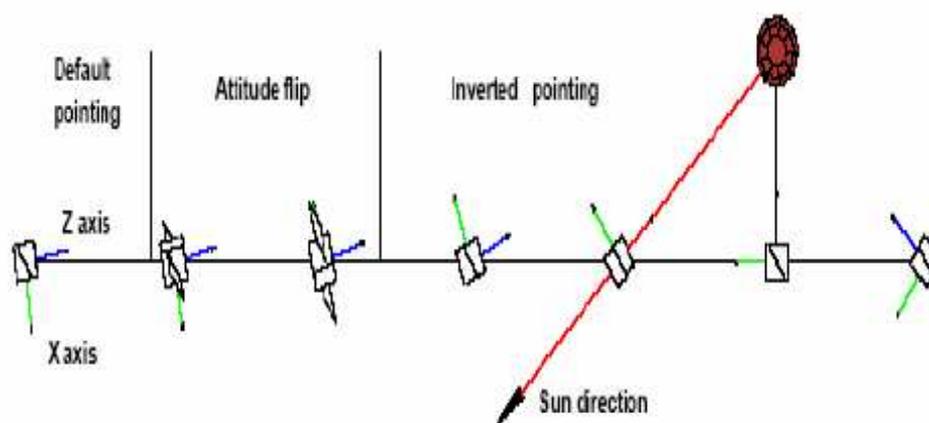


Figura 4.18 – Attitude dello *spacecraft* durante il *fly-by* di Steins. È richiesto un *flip* di 180° prima del *closest approach* per garantire la continuità delle operazioni scientifiche (l'asse +Z deve puntare sempre verso Steins) e limitare l'esposizione al Sole dei pannelli -X e ±Y dello *spacecraft* (Cortesia ESA).

* L'angolo di fase nullo (*Zero phase angle*) è la posizione sulla traiettoria in cui la sonda, il Sole e il target risultano allineati. Nel caso del *fly-by* di Steins è l'istante in cui lo *spacecraft* provoca un'eclisse dell'asteroide.

Le prime immagini dell'asteroide (2867) Steins sono pervenute dalla *Wide Angle Camera* (WAC) di OSIRIS (Figura 4.19). Si tratta di un asteroide appartenente alla classe spettrale di tipo “E” che ha la forma di un diamante ed è caratterizzato dalla presenza di un cratere da impatto, del diametro di circa 2 km, alla sua sommità. Sul suo fianco si contano altri 7 crateri disposti in fila, probabilmente dovuti ad un antico impatto con uno sciame meteorico mentre l'asteroide ruotava. Altre caratteristiche dell'asteroide sono le seguenti:

- raggio massimo: 2.87 km
- periodo di rotazione: 6.052 ± 0.007 ore
- albedo: 0.45 ± 0.10

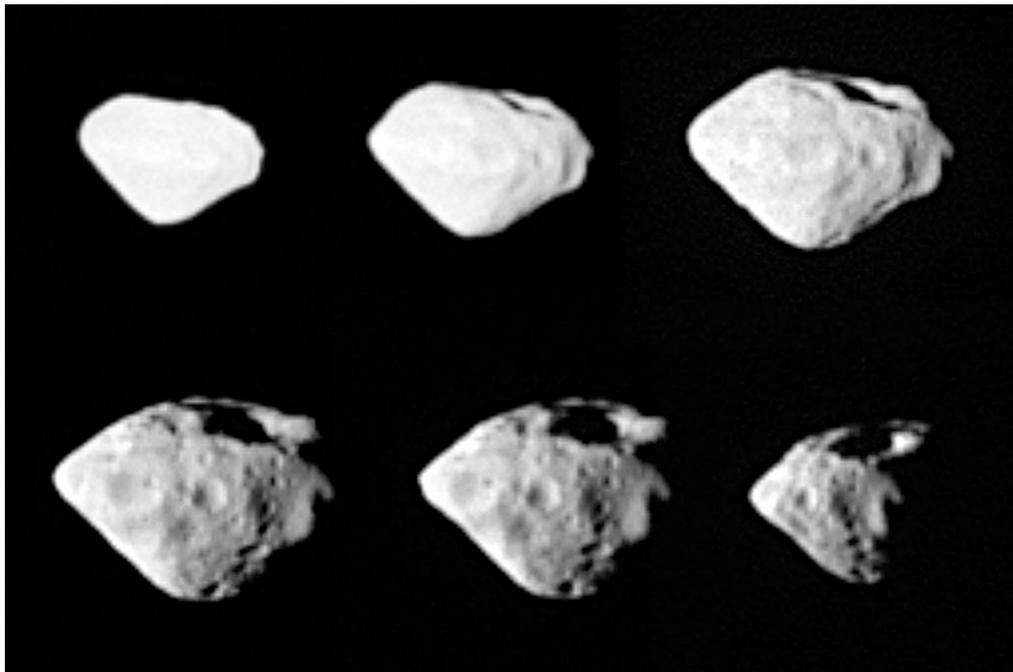


Figura 4.19 – Fotomosaico delle prime immagini dell'asteroide Steins riprese dalla *Wide Angle Camera* (WAC) di OSIRIS a bordo della sonda Rosetta (Cortesia ESA).

GIADA ha partecipato alle operazioni del *fly-by* di Steins, nonostante l'ambiente circum-asteroidale sia sostanzialmente sconosciuto e non privo di rischi per lo strumento a causa della possibile presenza di particelle “iperveloci” (fino a 8 km s^{-1}). D'altra parte, occorre rammentare che la probabilità di intercettare una particella nel mezzo interplanetario (anche in presenza di asteroidi) è estremamente bassa su intervalli di tempo dell'ordine di 12 ore (i tempi massimi di esercizio di GIADA durante la crociera). Infatti, calcoli eseguiti sulla base dei dati di Galileo (Gruen et al., 1997) dimostrano che il flusso di particelle sulle aree sensibili di GIADA dovrebbe essere inferiore a $5 \cdot 10^{-2}$ per ora nelle condizioni più favorevoli, valore determinato da un'estrapolazione approssimata delle prestazioni dell'IS in regime di alta velocità. Ad ogni modo, il *team* di GIADA ha deciso di esplorare l'ambiente circum-asteroidale utilizzando lo strumento in configurazione “non nominale”, ossia col coperchio chiuso ed il GDS spento allo scopo di mantenere lo strumento in condizioni di sicurezza, ma con i sensori IS e MBSs attivi e pronti ad intercettare ogni possibile impatto secondario durante il *fly-by* dell'asteroide. Inoltre la configurazione “non nominale” offre il vantaggio di limitare il fabbisogno di risorse in termini di flusso dati ed energia.

Durante le operazioni del *fly-by* di Steins, GIADA è stato acceso il 5 settembre 2008, dalle 14:01:11 UTC alle 19:14:21 UTC, ossia si è acceso circa 4 ore e 30 minuti prima del *closet approach* e si è spento circa 35 minuti dopo, restando operativo nelle fasi cruciali delle operazioni di *fly-by*.

Le attività previste per GIADA durante il sorvolo dell'asteroide erano organizzate secondo la *timeline* riportata in Tabella 4.4 ed eseguita solamente sull'interfaccia elettrica *Main*.

Sequence	Timeline GD01 – Main Interface
AGDS001A	VGD0001B = "nom. branch" [ENG] \ # GIADA on Main IF VGD0001A = "YES" [ENG] # Context exists
AGDS002A	Patch CT v. flight 1
AGDS003A	Patch SW v.2.3
AGDS110A	Go to Normal mode (science enabled)
AGDS311A	Set GDS Off
AGDS037A	Set IS Off
AGDS036A	Set IS PZTA/B/C/D/E threshold to 0.05/0.05/0.15/0.05/0.20 V Range = L – Gain = H/H/H/H/H
AGDS037A	Set IS On
AGDS426A	Calibrate IS at 5 min intervals
AGDS065A	Go to Safe mode
AGDS035A	Go to Cover Mode
AGDF090A	Open cover
AGDF060A	GIADA Switch-off (with Cover close operation in the Power-off OBCP)

Tabella 4.4 – Le attività pianificate per GIADA durante il *fly-by* di Steins. I valori di soglia e dei parametri relativi a GDS e IS sono riportati in grassetto. Come si nota il GDS è rimasto spento e il coperchio chiuso.

I risultati delle operazioni di GIADA sono stati positivi. Lo strumento si è comportato come previsto e tutti i sottosistemi sono risultati in ottimo stato. Tuttavia non si è registrato nessun evento scientifico. Di seguito sono riportati i risultati in forma grafica di un estratto dei dati concernenti l'attività di GIADA su Steins.

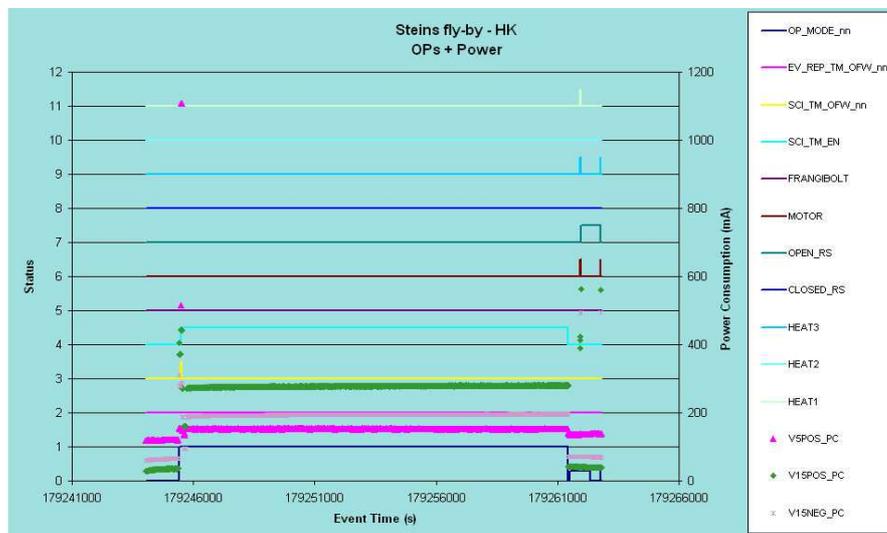


Figura 4.20 – Il consumo di energia di GIADA durante il *fly-by* di Steins.

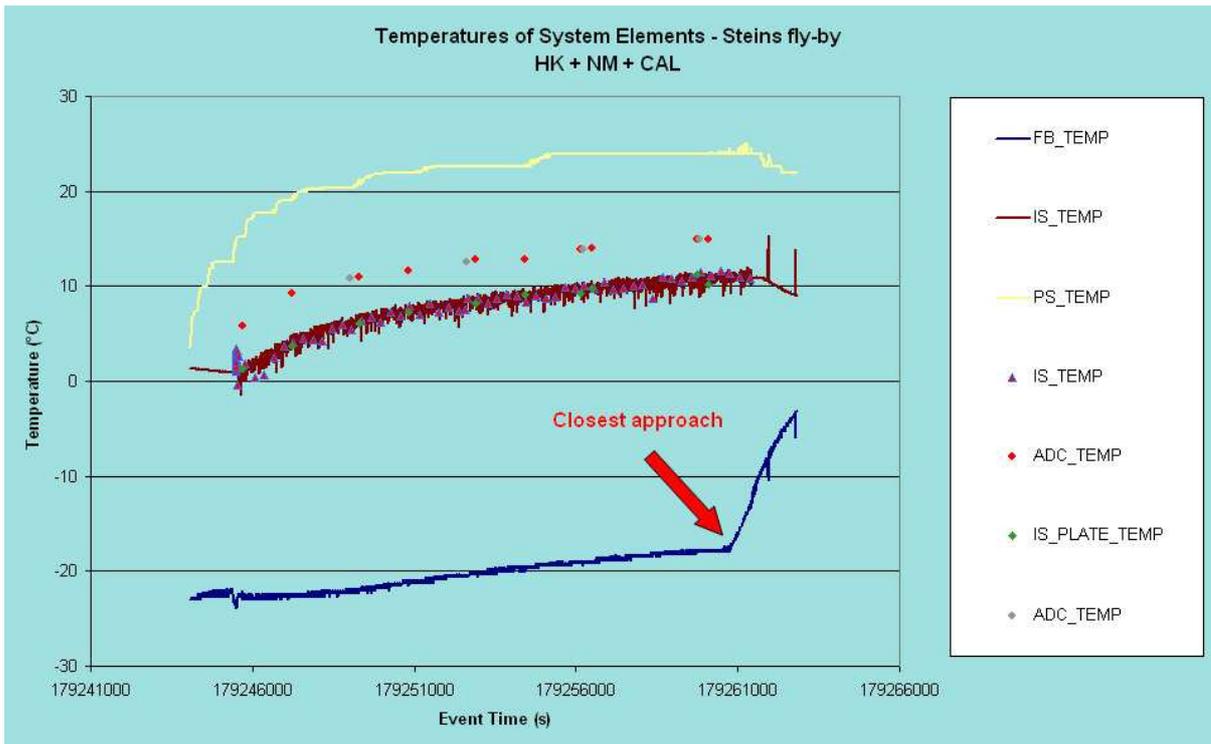


Figura 4.21 – Profili di temperatura di alcuni sensori di GIADA durante il *fly-by* di Steins. Si distingue l'improvviso incremento di temperatura sul sensore del Frangibolt, sensibile alla variazione di *attitude*, come già discusso nel paragrafo 4.2.3. I picchi visibili sui profili di temperatura del Frangibolt e dell'IS sulla parte destra del diagramma sono artefatti dovuti all'aumento temporaneo del consumo di energia all'accensione degli *heaters* del motore.

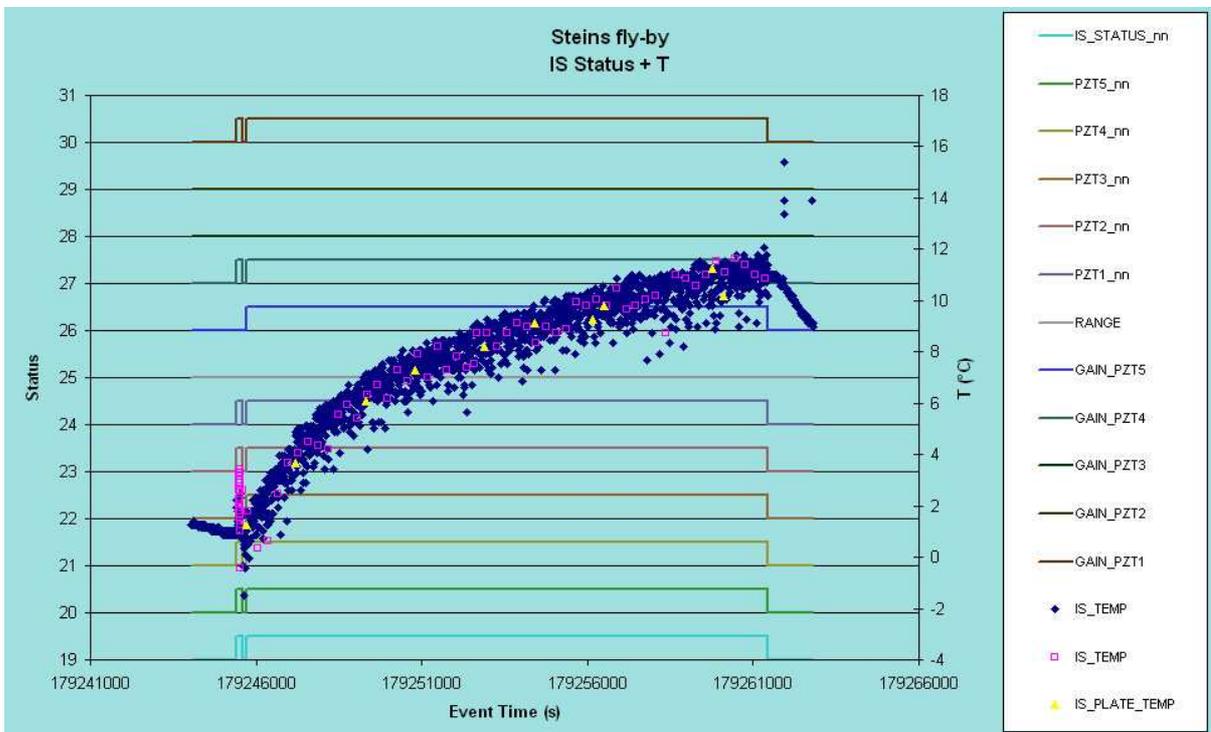


Figura 4.22 – Temperatura e stato del sottosistema IS durante il *fly-by* di Steins.

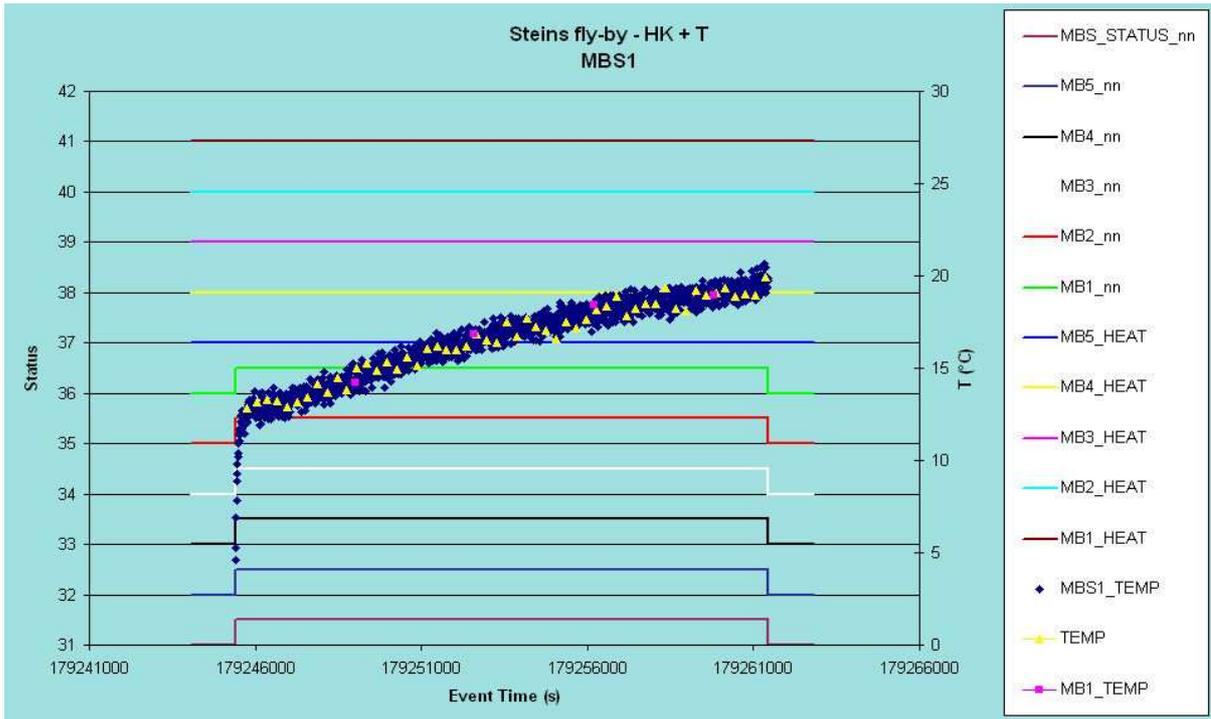


Figura 4.23 – Temperatura e stato della MBS1 durante il *fly-by* di Steins.

Conclusioni

Grazie al presente lavoro di dottorato ho avuto l'opportunità di collaborare e fornire il mio contributo a tutte le principali fasi di controllo ed *upgrade* di uno strumento dedicato all'esplorazione dello spazio interplanetario. La novità straordinaria consiste nell'aver partecipato alle operazioni in volo di verifica e collaudo di uno strumento volto allo studio delle polveri cometarie, un ambiente finora mai esplorato così in dettaglio dall'uomo. Fondamentali sono state, inoltre, le interazioni con la comunità scientifica italiana ed internazionale. Grazie alle conoscenze tecniche e scientifiche acquisite durante queste fasi è stato possibile collaborare attivamente alla missione, mettendo a punto delle strategie finalizzate al miglioramento del funzionamento e dell'efficienza di GIADA e allo stesso tempo di mantenerlo in condizioni di sicurezza. Per quanto concerne lo strumento, grazie all'intenso e innovativo lavoro di ricerca si è potuto concludere che:

- GIADA ha un comportamento nominale;
- GIADA effettuerà misure di importanza fondamentale per comprendere i meccanismi evolutivi delle comete e della loro origine;
- GIADA consentirà lo sviluppo di nuovi modelli che descrivono l'attività e la dinamica delle comete;
- i dati raccolti da GIADA saranno combinati con quelli di altri strumenti a bordo della sonda Rosetta, contribuendo in modo decisivo alla missione;
- GIADA gioca un ruolo essenziale per la salvaguardia degli altri strumenti e dell'intera missione;
- i dati recentemente elaborati saranno utili a definire nuove curve di calibrazione per i sensori di GIADA.

Più in generale, tutto il lavoro svolto era finalizzato allo studio del comportamento dello strumento GIADA in volo e a tal scopo sono state messe a punto e collaudate le operazioni preparatorie ai test in volo su GIADA, sono state eseguite 9 sessioni di test in volo, sono state sviluppate e messe a punto tutte le metodologie di analisi ed archiviazione dei dati. L'insieme delle attività svolte in questi anni e i risultati ottenuti dall'analisi critica dei dati provenienti sia dai singoli test in volo sia dall'analisi comparativa nel tempo, dimostrano che GIADA ha un comportamento nominale ed è pronto per le fasi successive di missione.

Bibliografia

- A'Hearn, M. F., Millis R. L., Schleicher D.G., Osip D. J. Birch and P. V. (1995). The ensemble properties of comets: results from narrowband photometry of 85 comets, 1976-1992. *Icarus* 118, pp. 223-260.
- Agarwal J., Müller M. and Grün E. (2007) Dust environment modelling of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Space Science Reviews*, Volume 128, p. 79-131.
- Belton M. J. and Members of the Deep Impact Science Team (2006) The Internal Structure of Jupiter Family Cometary Nuclei: The Talps or Layered Pile Model. *American Astronomical Society, DPS meeting Vol. 38*, p.513
- Belyaev N. A, Kresak L., Pittich E. M. and Pushkarev A. N. (1986) *Catalogue of Short-Period Comets*. Astron. Inst. Slovak Academy of Sciences, Bratislava.
- Bibring J.-P., Rosenbauer H., Boehnhardt H. et al. (2007) The ROSETTA Lander PHILAE investigations. *Space Sci. Rev. Vol. 128*. p. 205–220.
- Boice D., Huebner W. (1999) *Physics and Chemistry of Comets*. In *Encyclopedia of the Solar System*. Editors: Weissman P. R., McFadden L. e Johnson T. V., Academic Press.
- Boice, D. C.; Soderblom, L. A.; Britt, D. T.; Brown, R. H.; Sandel, B. R.; Yelle, R. V.; Buratti, B. J.; Hicks, M. D.; Nelson, R. M.; Rayman, M. D.; Oberst, J.; Thomas, N. (2002) The Deep Space 1 Encounter with Comet 19p/Borrelly. *Earth, Moon, and Planets*, v. 89, Issue 1, p. 301-324
- Bonnet, R.M.(1985) The New Mandatory Scientific Programme for ESA. *ESA Bulletin* 43, 8-13
- Chyba C. F., Sagan C. (1997) Comets as a Source of Prebiotic Organic Molecules for the Early Earth. In *Comets and the Origin and Evolution of Life*. Editors: Thomas P. J., Chyba C. F., McKay C. P., Springer.
- Colangeli L., Della Corte V., Esposito F., Mazzotta Epifani E., Palomba E., Lopez–Moreno J.J., Rodriguez J., Morales R., Lopez–Jimenez A., Herranz M., Moreno F., Palumbo P., Rotundi A., Cosi M. and the International GIADA Consortium (2004). The GIADA experiment for the ROSETTA mission, in *The new Rosetta targets - observation, simulations and instrument performances*. eds. L. Colangeli, E. Mazzotta Epifani, P. Palumbo (Kluwer Academic Publishers), *Astrophysics and Space Science Library*, 311:271-280.
- Colangeli L., Lopez-Moreno J. J., Palumbo P., Rodriguez J., Cosi M., Della Corte V., Esposito F., Fulle M., Herranz M., Jeronimo J. M., Lopez-Jimenez A., Mazzotta Epifani E., Mora-les R., Moreno F., Palomba E., Rotundi, A. and the International GIADA Consortium (2007). The Grain Impact Analyser and Dust Accumulator (GIADA) Experiment for the Rosetta Mission: Design, Performances and First Results. *Space Science Reviews*, 128:803-821.

- Crifo, J.F. (1995). A general physicochemical model of the inner coma of active comets. 1: Implications of spatially distributed gas and dust production. *Astrophysical Journal*, 445: 470-488.
- Crifo J.F. and Rodionov A.V. (1997). The dependence of the circumnuclear coma structure on the properties of the nucleus. *Icarus*, 127:319–353.
- Donn B., Rahe J. (1982) *Comets*. Editor: Wilkening L. L., p. 203
- Donn B. (1991) The accumulation and structure of comets. In *Comets in the Post-Halley era*, editors: Newburn et al., Kluwer, Dordrecht.
- Duncan M. J., Levison H. F. and Dones L. (2004) Dynamical Evolution of Ecliptic Comets. In “Comets II”, eds. M. C. Festou, H. U. Keller, H. A. Weaver. University of Arizona Press, Tucson, pp. 745, p.193-204.
- Edberg S. J., Newburn Jr. R. L., Rahe J. (1988) *The International Halley Watch. In Exploration of Halley’s Comet*, editors: Grewing M, Praderie F., Reinhard R., Springer-Verlag.
- Edgeworth K. E. (1949) The origin and evolution of the Solar System. *Monthly Notice of Royal Astronomical Society*, Vol. 109, p. 600.
- Esposito F., Colangeli L., Della Corte V., Palumbo P. and the International GIADA Team (2002). Physical aspect of an impact sensor for the detection of cometary dust momentum onboard the Rosetta space mission. *Adv. Space Res.*, 29:1159–1163.
- Fulle, M., Colangeli, L., Mennella, V., Rotundi, A., Bussoletti, E. (1997). Simulation of the dust flux on the ROSETTA probe during the orbiting phase around comet 46P/Wirtanen. *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, 126:183-195.
- Fulle M., Crifo J.F. and Rodionov A.V. (1999). Numerical simulation of the dust flux on a spacecraft in orbit around an aspherical cometary nucleus - I. *Astronomy and Astrophysics*, 347:1009–1028.
- Fulle M., Barbieri C., Cremonese G., Rauer H., Weiler M., Milani G., Ligustri R. (2004). The dust environment of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Astronomy & Astrophysics*, 422:357-368.
- Goldstein R., Altwegg K., Fuselier S. A., Goldstein B. E., Balsiger H., Jost F., Coates A., Neubauer F. M., Rosenbauer H. (1994) Giotto ion mass spectrometer measurements at comet P/Grigg-Skjellerup. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, no. A10, p. 19,255-19,265.
- Green, S.F.; McDonnell, J.A.M.; McBride, N.; Colwell, M.T.S.H.; Tuzzolino, A.J.; Economou, T.E.; Tsou, P.; Clark, B.C.; Brownlee, D.E. (2004). The dust mass distribution of comet 81P/Wild 2. *Journal Geophysical Research*, 109: E12S04, 13pp.

- Grün E., Staubach P., Baguhl M., Hamilton D.P., Zook H.A., Dermott S., Gustafson B.A., Fechtig H., Kissel J., Linkert D., Linkert G., Srama R., Hanner M.S., Polanskey C., Horanyi M., Lindblad B.A., Mann I., McDonnell J.A.M., Morfill G.E. and Schwehm G. (1997). South-North and Radial Traverses through the Interplanetary Dust Cloud. *Icarus*, 129:270-288.
- Gurnett D. A., Averkamp T. F., Scarf F. L., Grün E. (1986) Dust particles detected near Giacobini-Zinner by the ICE plasma wave instrument. *Geophysical Research Letters*, Vol. 13, pp. 291-294.
- Hammel, H. B.; Storrs, A. D.; Cruikshank, D. P.; Telesco, C. M.; Decher, R. M.; Campins, H. (1986) Albedo maps of Comets P/Giacobini-Zinner and P/Halley. In *ESA Proceedings of the 20th ESLAB Symposium on the Exploration of Halley's Comet. Volume 2: Dust and Nucleus* p 73-76 (SEE N87-25908 19-90)
- Hansen K. C., Alexander C., Bagdonat T., Combi M. R., Cravens T. E., Gombosi T. I., Jia Y.-D., Motschmann U., Robertson I. P. (2007) The Plasma Environment of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko Throughout the ROSETTA Main Mission. *Space Science Reviews*, Volume 128, Issue 1-4, pp. 133-166.
- Huber, M.C.E.; Schwehm, G. (1991) Comet Nucleus Sample Return - Plans and capabilities. *Space Science Reviews* (ISSN 0038-6308), vol. 56, April 1991, p. 109-115
- Ip W.-H. (2004) Global solar wind interaction and ionospheric dynamics. In *Comets II*, M. C. Festou, H. U. Keller, and H. A. Weaver (eds.), University of Arizona Press, Tucson, pp. 745, p.605-629.
- Johnstone A. D., Coates A. J., Huddleston D. E., Jockers K., Wilken B., Borg H., Gurgiolo C., Winningham J. D., Amata E. (1993) Observations of the Solar Wind and Cometary Ions during the Encounter Between Giotto and Comet Grigg-Skjellerup. *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 273, L1-L4. Letter.
- Keller H. U., Arpigny C., Barbieri C., Bonnet C. M., Cazes S., Coradini M., Cosmovici C. B., Delamere W. A., Huebner W. F., Hughes D. W., Jamar C., Malaise D., Reitsema H. J., Schmidt H. U., Schmidt W. K. H., Seige P., Whipple F. L., Wilhelm K. (1986) First Halley Multicolour Camera Imaging results from Giotto. *Nature*, Vol. 321, pp. 320-326.
- Kissel J., Brownlee D. E., Buchler K., Clark B. C., Fechtig H., Grün E., Hornung K., Igenbergs E. B., Jessberger E. K., Krueger F. R., Kuczera H., McDonnell J. A. M., Morfill G. M., Rahe J., Schwehm G. H., Sekanina Z., Utterback N. G., Volk H. J., Zook H. A. (1986) Composition of comet Halley dust particles from Giotto observations. *Nature*, Vol. 321, p. 336, 337.
- Kissel J., Altwegg K., Clark B. C., Colangeli L., Cottin H., Czempiel S., Eibl J., Engrand C., Fehringer H. M., Feuerbacher B., Fomenkova M., Glasmachers A., Greenberg J. M., Grün E., Haerendel G., Henkel H., Hilchenbach M., von Hoerner H., Höfner H., Hornung K., Jessberger E. K., Koch A., Krüger H., Langevin Y., Parigger P., Raulin F., Rüdener F., Rynö J., Schmid E. R., Schulz R., Silén J., Steiger W., Stephan T., Thirkell L., Thomas R., Torkar K., Utterback N. G., Varmuza K., Wanczek K. P., Werther W. and Zscheeg H. (2007). Cosima High Resolution Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometer for the Analysis of Cometary Dust Particles onboard Rosetta. *Space Science Reviews*, 128:823-867.

- Korth A., Richter A. K., Mendis D. A., Anderson K. A., Carlson C. W. (1987) The composition and radial dependence of cometary ions in the coma of comet P/Halley. *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 187, no. 1-2.
- Lamy P. L., Davidsson B. J. R., Groussin O., Gutierrez P., Jorda L., Kaasalainen M., Lowry S. and Toth, I (2007) A Portrait of the Nucleus of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Space Science Reviews*, 128 (1-4), p. 23-66.
- Langevin Y., Kissel J., Bertaux J-L., Chassefière E. (1987) First statistical analysis of 5000 mass spectra of cometary grains obtained by PUMA 1 (VEGA 1) and PIA (Giotto) impact ionization mass spectrometers in the compressed modes. *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 187, pp. 761-766.
- Mazzotta Epifani E., Bussoletti E., Colangeli L., Palumbo P., Rotundi A., Vergara S., Perrin J.M., Lopez Moreno J.J. and Olivares I. (2002). The grain detection system for the GIADA instrument: design and expected performances. *Adv. Space Res.*, 29:1165–1169.
- McDonnell J. A. M., Alexander W. M., Burton W. M., Bussoletti E., Clark D. H., Grard J. L., Grün E., Hanner M. S., Sekanina Z., Hughes D. W. (1986) Dust density and mass distribution near comet Halley from Giotto observations. *Nature*, Vol. 321.
- McDonnell J. A. M., Alexander W. M., Burton W. M., Bussoletti E., Evans G. C., Evans S. T., Firth J. C., Grard R. J. L., Green S. F., Grün E., Hanner M. S., Hughes D. W., Igenbergs E., Kissel J., Kuczera H., Lindblad B. A., Langevin Y., Mandeville J. –C., Nappo S., Pankiewicz G. S. A., Perry C. H., Schwehm G. H., Sekanina Z., Stevenson T. J., Turner R. F., Weishaupt U., Wallis M. K., Zarnecki J. C. (1987) The dust distribution within the inner coma of comet P/Halley 1982i: encounter by Giotto's impact detectors. *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 187, p. 719-741.
- McDonnell J.A.M., Lamy P.L. and Pankiewicz G.S. (1991). Physical properties of cometary dust, in *Comets in the post Halley era*. Eds. R.L. Jr. Newburn, M. Neugebauer, J. Rahe (Dordrecht, Kluwer), 1043–1073.
- McDonnell J. A. M., McBride N., Beard R., Bussoletti E., Colangeli L., Eberhardt P., Firth J. G., Grard R., Green S. F., Greenberg J. M., Grün E., Hughes D. W., Keller H. U., Kissel J., Lindblad B. A., Mandeville J. C., Perry C. H., Rembor K., Rickman H., Schwehm G. H., Turner R. F., Wallis M. K., Zarnecki J. C. (1993) Dust particle impacts during the Giotto encounter with Comet Grigg-Skjellerup. *Nature*, Vol. 362.
- McDonnell J. A. M., McBride N., Beard R., Bussoletti E., Colangeli, L., Eberhardt P., Firth J. G., Grard R., Green S. F., Greenberg J. M. (1993). Dust particle impacts during the Giotto encounter with comet Grigg-Skjellerup. *Nature* (ISSN 0028-0836), vol. 362, no. 6422, p. 732-734.
- McKenna-Lawlor S. M. P., Daly P. W., Kirsch E., O'Sullivan D., Thompson A., Wenzel K.-P., Afonin V. (1993) Energetic ions at Comet Grigg-Skjellerup measured from the Giotto spacecraft. *Nature*, Vol. 363, no. 6427, p. 326-329.

- Morbidelli A. and Brown M.E. (2004) The Kuiper Belt and the Primordial Evolution of the Solar System. In “Comets II”, eds. M. C. Festou, H. U. Keller, H. A. Weaver. University of Arizona Press, Tucson, p. 175–191.
- Moreno F., Lara L.M., Muñoz O., López Moreno J.J. and Molina, A. (2004). Dust in Comet 67P/Churyumov/Gerasimenko. *Astrophysical Journal*, 613:1263-1269.
- Mukai T., Miyake W., Terasawa T., Kitayama M., Hirao K. (1986) Plasma observation by Suisei of solar-wind interaction with comet Halley. *Nature*, Vol. 321.
- Neubauer F. M., Marschall H., Pohl M., Glassmeier K.-H., Musmann G., Mariani F., Acuna M. H., Burlaga L. F., Ness N. F., Wallis M. K., Schmidt H. U., Ungstrup, E. (1993) First results from the Giotto magnetometer experiment during the P/Grigg-Skjellerup encounter. *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 268, no. 2, p. L5-L8.
- Oort J. H. (1951) Origin and development of comets. *The Observatory*, Vol. 71, p. 129-144.
- Palomba E., Colangeli L., Palumbo P., Rotundi A., Perrin J.M. and Bussoletti E. (2002). Performance of micro-balances for dust flux measurement. *Adv. Space Res.* 29:1155–1158.
- Patzold M., Edenhofer P., Bird M. K., Volland H. (1993) The Giotto encounter with Comet P/Grigg-Skjellerup - First results from the Giotto Radio-Science Experiment. *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 268, no. 2, p. L13-L16.
- Reinhard R. (1986). The Giotto Encounter with Comet Halley. *Nature*, 321:313-318.
- Riedler W., Torkar K., Jeszenszky H., Romstedt J., Alleyne H. St. C., Arends H., Barth W., Biezen J. V. D., Butler B., Ehrenfreund P., Fehringer M., Fremuth G., Gavira J., Havnes O., Jessberger E. K., Kassing R., Klöck W., Koeberl C., Lvasseur-Regourd A. C., Murette M., Rüdener F., Schmidt R., Stangl G., Steller M. and Weber, I. (2007) MIDAS The Micro-Imaging Dust Analysis System for the Rosetta Mission. *Space Science Reviews*, 128:869-904.
- Rotundi A. and Rietmeijer F. J. M. (2008) Carbon in Meteoroids: Wild 2 Dust Analyses, IDPs and Cometary Dust Analogues. In *Earth Moon Planet.* Springer Science + Business Media. DOI 10.1007/s11038-007-9218-7
- Schulz R., Stüwe J. A., Böhnhardt, H. (2004) ROSETTA target comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Astron. Astrophys.*, 422, L19.
- Schwem G. and Schulz R. (1999) ROSETTA goes to comet Wirtanen. *Space Science Reviews*, Volume 90, pp. 313-319.
- Sunshine J. M., A’Hearn M. F., Groussin O., Li J.-Y., Belton M. J. S.; Delamere W. A.; Kissel J.; Klaasen K. P.; McFadden L. A.; Meech K. J.; Melosh H. J.; Schultz P. H.; Thomas P. C.; Veverka J.; Yeomans D. K.; Busko I. C.; Desnoyer M.; Farnham T. L.; Feaga L. M.; Hampton D. L.; Lindler D. J.; Lisse C. M.; Wellnitz D. D. (2006) Exposed Water Ice Deposits on the Surface of Comet Tempel 1. *Science*, vol. 311, pp. 1453-1455.

Sykes M. V. and Walker R. G. (1992) Cometary dust trails, *Icarus*, 95, 180.

Tsou, P.; Brownlee, D. E.; J. D. Anderson, S. Bhaskaran, A. R. Cheuvront, B. C. Clark, T. Duxbury, T. Economou, S. F. Green, M. S. Hanner, F. Hörz, J. Kissel, J. A. M. McDonnell, R. L. Newburn, R. E. Ryan, S. A. Sandford, Z. Sekanina, A. J. Tuzzolino, J. M. Vellinga, M. E. Zolensky (2004) Stardust encounters comet 81P/Wild 2. *J. Geophys. Res.*, 109, E12S01, doi:10.1029/2004JE002317.

Weaver H. A., A'Hearn M. F., Arpigny C., Boice D. C., Feldman P. D., Larson S. M., Lamy P., Levy D. H., Marsden B. G., Meech K. J., Noll K. S., Scotti J. V., Sekanina Z., Shoemaker C. S., Shoemaker E. M., Smith T. E., Stern S. A., Storrs A. D., Trauger T., Yeomans D. K., Zellner B. (1995) The Hubble Space Telescope observing campaign on comet P/Shoemaker-Levy 9, *Science*, Vol. 267.

Whipple F.L. (1950) A Comet Model I. The Acceleration of Comet Encke, *Astrophysical Journal* 111, 375–394.

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato possibile grazie al finanziamento della borsa di dottorato, della quale ho usufruito, da parte dell'INAF – Osservatorio Astronomico di Capodimonte che pertanto desidero ringraziare. Ringrazio in particolare il gruppo del Laboratorio di Fisica Cosmica e Planetologia ed il team internazionale di GIADA che hanno costituito l'ambiente di riferimento (sia scientifico, sia tecnologico) per lo svolgimento ottimale di questo lavoro.

Desidero formulare un particolare ringraziamento al relatore della tesi e mio tutor, prof. Luigi Colangeli, che ha seguito con grande impegno ed attenzione sia la stesura dell'elaborato sia il lavoro di ricerca, fornendo un validissimo contributo sul piano scientifico nonché sul piano umano. Il mio ringraziamento va anche al prof. Pasquale Palumbo per la sua fondamentale assistenza e la grande competenza messe a mia disposizione durante l'attività di ricerca.

Ringrazio ancora tutti i componenti del gruppo del Laboratorio di Fisica Cosmica e Planetologia ed in particolare la prof.^{ssa} Alessandra Rotundi e la dott.^{ssa} Francesca Esposito per il loro supporto umano e scientifico.

Infine ringrazio il prof. Antonio Moccia, coordinatore della Scuola di Dottorato, per la sua assistenza e la sua disponibilità relativamente all'attività didattica.