

Il percorso dei dati scientifici di Euclid

di Paola Maria Battaglia, Fabio Pasian
e Andrea Zacchei

Come si passa da semplici bit ai dati scientifici della missione? Scopriamolo con una descrizione dettagliata del segmento di terra scientifico della missione Euclid e dei suoi due strumenti, Vis e Nisp.

È

È noto che la missione Euclid è una missione scientifica dell'Agenzia spaziale europea (Esa) che ha come obiettivo quello di studiare l'origine dell'espansione dell'universo e altre tematiche cosmologiche di grande rilevanza, come la natura dell'energia oscura e della materia oscura e le condizioni iniziali che hanno portato alla formazione delle strutture cosmiche. La missione, lanciata il primo luglio 2023, ha completato la fase di *commissioning* e nel mese di ottobre ha intrapreso quella di *performance verification* (fase dedicata alla calibrazione sia degli strumenti sia del software di analisi, oltre che all'identificazione di eventuali sistematiche strumentali), dopo che i problemi individuati al sensore di guida fine (Fgs, dall'inglese Fine guidance sensor) sono stati risolti con l'upload da terra di un nuovo software per il sensore stesso. Quando il satellite e la sua strumentazione saranno pienamente operativi da un punto di vista scientifico, Euclid ef-

fettuerà la mappatura ad alta precisione del cielo nelle bande del visibile e del vicino infrarosso con lo scopo di misurare la struttura su larga scala dell'universo, e specificamente la forma e il *redshift* delle galassie oltre che la distribuzione degli ammassi di galassie in funzione del loro *redshift*.

Meno noto è il percorso che i dati scientifici seguono per trasformarsi da bit provenienti dall'elettronica dei due strumenti di bordo (Vis, il Visible Instrument e Nisp, il Near-Infrared Spectrometer and Photometer) in risultati scientifici utilizzabili per gli scopi sopra descritti. Questo percorso coinvolge diverse centinaia di persone con competenze tecniche e scientifiche molto diverse, collocate in una trentina di sedi distribuite in quattro continenti, e forma il cosiddetto Segmento di Terra.

I DUE STRUMENTI VIS E NISP

Per sei anni Euclid osserverà circa un terzo del cielo dal secondo punto lagrangiano del sistema Terra-Sole, posto a una distanza di 1,5 milioni di chilometri dalla Terra, e raccoglierà la luce emessa da oltre due miliardi di galassie dopo un viaggio durato 10 miliardi di anni. La materia oscura e l'energia oscura, che insieme costituiscono il 95% circa dell'universo, fanno avvertire la loro presenza indirettamente, producendo immagini distorte di galassie lontane, che ci appaiono così come anelli o archi evanescenti, e accelerando l'espansione dell'universo stesso.

Il grande specchio che si trova nel telescopio a bordo di Euclid (di 1,2 metri di diametro) convoglia la luce raccolta nel piano focale, dove si trovano i due strumenti Vis e Nisp. Il Vis è dotato di una fotocamera di quasi 600 megapixel sensibile principalmente alla luce visibile, e verrà impiegato per realizzare immagini ad altissima risoluzione delle galassie osservate, in modo da misurare la loro forma. Nisp ha 16 sensori sensibili alla luce infrarossa e con i suoi 66 megapixel è la più potente fotocamera a infrarossi a essere mai stata lanciata nello spazio. Essendo dotata di filtri e reticoli di diffrazione, potrà fare fotometria multibanda e spettroscopia, misurando così lo spostamento verso il ros-

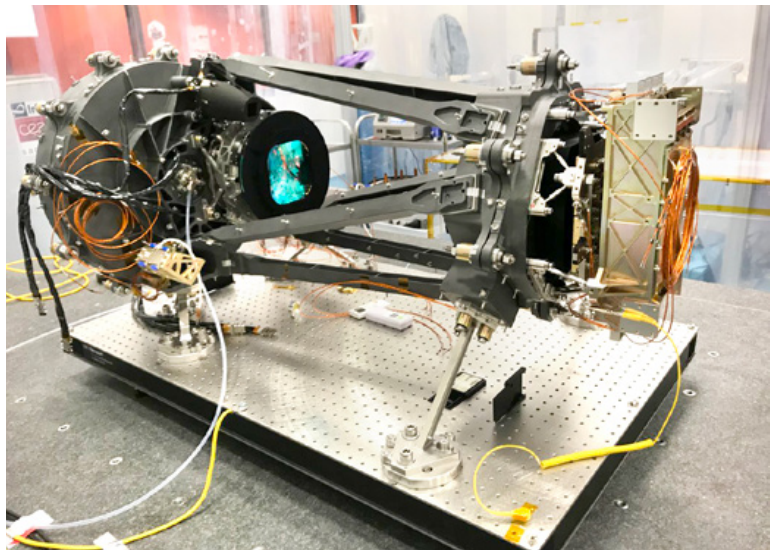
Il lancio è un momento molto delicato, durante il quale Euclid ha ricevuto parecchie vibrazioni che sono potenzialmente in grado di produrre malfunzionamenti o spostamenti di parti mobili

so della luce proveniente dalle galassie osservate, e quindi la distanza.

LA STORIA DAL LANCIO

Dal 1 Luglio, giorno del lancio da Cape Canaveral, abbiamo iniziato a seguire attraverso i vari canali di comunicazione la vita operativa di Euclid. Dalle sale di controllo realizzate appositamente per il *commissioning*, ogni notte, per quasi quattro settimane consecutive, gli esperti del satellite e degli strumenti hanno aspettato l'*acquisition of signal*, ovvero il momento in cui Euclid tornava a essere visibile dalla Terra. Da quel momento e fino al termine della visibilità, tutte le energie sono state dedicate all'analisi delle telemetrie: lunghe, lunghissime serie di parametri che scorrono senza sosta sui monitor di controllo e che raccontano a occhi allenati lo stato di "salute" del satellite.

Il lancio è un momento molto delicato, durante il quale Euclid ha ricevuto parecchie vibrazioni che sono potenzialmente in grado di produrre malfunzionamenti o spostamenti di parti mobili. Anche se tali vibrazioni vengono simulate in specifici test a terra, è necessario verificare che quando gli strumenti vengono accesi nuovamente in volo tutto funzioni come atteso. Nel caso di Nisp, ad esempio, una importante prima verifica è stata quella legata alle ruote porta filtri e reticoli, per capire se si trovavano ancora nella posizione di riferimento in cui erano state messe prima del lancio. Il momento tanto atteso, tuttavia, è stata l'accensione del piano focale. I rivelatori di Nisp hanno raccolto i primi fotoni provenienti dallo spazio il 14 luglio: nella sala di controllo l'emozione era altissima e quando, ad accensione ultimata, le tante luci sui monitor erano tutte verdi, è risultato evidente che Nisp aveva completato con successo la sequenza di accensione.



Per vedere le prime immagini e i primi spettri si è dovuto attendere il giorno successivo, quando durante la visibilità di Euclid, i dati sono stati scaricati dalle memorie di bordo. Qualche imprevisto, com'è normale che sia, c'è stato: è apparso subito evidente ai colleghi dello strumento Vis che la loro prima immagine era contaminata da luce che arrivava dall'esterno del telescopio. E la preoccupazione di tutti era legata al cattivo funzionamento del sensore di guida, che di fatto impediva al telescopio di inseguire correttamente i soggetti inquadrati, restituendo tante "belle" foto mosse.

Vediamo ora come avviene il trasferimento delle osservazioni a terra, e cosa succede poi.

OPERATIONS GROUND SEGMENT

Durante specifiche finestre temporali, tre stazioni di terra (Cebreros in Spagna, Malargüe in Argentina, New Norcia in Australia) leggono, utilizzando un canale di trasmissione a 26 GHz (K-band), i dati raccolti a bordo di Euclid nelle ventiquattro ore precedenti

ASSEMBLAGGIO
Il modello di volo completamente assemblato dello strumento Nisp nella camera bianca dei laboratori di astrofisica di Marsiglia.
Crediti: Euclid Consortium/Nisp instrument team



NEI MINIMI DETTAGLI
 Il team di ingegneri al lavoro sul modulo di carico utile di Euclid nella sede italiana di Thales Alenia Space a Torino. Il carico viene attentamente ancorato al modulo di servizio per ridurre qualsiasi tipo di sollecitazione allo specchio del telescopio.
 Crediti: Esa/S. Corvaja

dagli strumenti Vis e Nisp ma anche da Fgs e da tutti i sensori che monitorano lo stato di satellite e strumenti (dati di telemetria). Le stazioni di terra sono distribuite geograficamente in modo tale da massimizzare la visibilità di Euclid; durante il periodo di *launch and early operations phase* sono state utilizzate stazioni di terra aggiuntive per garantire una copertura totale delle comunicazioni in tempo reale con il satellite.

Dopo una verifica di completezza, i dati raccolti dalle stazioni di terra vengono spediti al Mission Operations Centre (Moc) situato presso Esoc, la sede di Esa a Darmstadt in Germania. Qui i dati di telemetria vengono sottoposti a una serie di controlli che hanno lo scopo di verificare la salute di satellite e strumenti, in modo da poter intervenire tempestivamente per bloccare, se necessario, un sistema malfunzionante. Il Moc infatti è l'unico centro autorizzato a inviare i telecomandi al satellite: la sequenza di spostamenti e tempi di esposizione per poter far eseguire correttamente agli strumenti le esposizioni volute, la modifica dei parame-

tri di funzionamento per strumenti e sistemi accessori, l'upload di nuovo software (ad esempio quello recente per Fgs) e così via. Il Moc si incarica infine di rendere disponibile al Science Operations Centre (Soc) tutti i dati (scientifici e tecnici) acquisiti. La rete delle stazioni di terra e il Moc formano l'Operations Ground Segment (Ogs), interamente di responsabilità Esa.

SCIENCE GROUND SEGMENT

Dopo la fase di controllo dello stato di salute di Euclid e dei suoi strumenti, la fase successiva riguarda il lavoro sui dati scientifici, e si svolge all'interno del segmento di terra scientifico (Science Ground Segment – Sgs). L'Sgs è di responsabilità Esa per quanto riguarda il Soc, situato nell'European Space Astronomy Centre (Esac), la sede di Esa a Villafranca del Castillo vicino a Madrid, in Spagna, e di responsabilità del Consorzio Euclid (Ec) per quanto riguarda la rete dei centri dati (Science Data Centres – Sdc) dove si svolgeranno le attività di verifica, elaborazione e analisi vere e proprie.

Il Soc è la sola interfaccia dell'Sgs verso il Moc, e quindi verso le operazioni della missione. Una delle principali attività del Soc comprende perciò l'invio della survey pianificata dal Consorzio Euclid sotto la guida scientifica italiana e creata sulla base di un programma di osservazione dedicato; il Soc verifica la compatibilità con i vincoli imposti dalla dinamica della missione e fornisce al Moc le sequenze di esposizioni necessarie per osservare i vari campi e ottenere le necessarie calibrazioni. Il Soc si occupa anche della gestione dei dati scaricati dal Moc e della loro verifica (per esempio mediante sistemi automatici e di *quick look*), generando rapporti giornalieri sulla qualità dei dati; esegue inoltre la formattazione dei dati di telemetria e prepara quelli che, una volta immessi nell'archivio, saranno a disposizione del Consorzio Euclid. Il Soc inoltre gestisce l'archivio ufficiale dei dati della missione e gli Euclid Archive Core Services (Eacs), cioè il sistema che tiene traccia di tutti i passi di elaborazione svolti nei vari Sdc e che permette di recuperare ogni dato di Euclid, indipendentemente dalla sede fisica in cui si trova.

L'Instrument Operation Team (Iot), elemento dell'Sgs a guida italiana, costituisce l'interfaccia tecnica, relativamente agli strumenti, con il Soc. L'Iot, infatti, ha la responsabilità di monitorare le performance degli strumenti sul breve e lungo periodo (*trend analysis*) e proporre, se necessario, modifiche alla loro configurazione per ottimizzarne i risultati. L'Iot è costituito da scienziati e tecnici che conoscono i dettagli degli strumenti: molti di essi hanno partecipato alla loro costruzione e test, e interagiscono con l'Sgs per la realizzazione di modelli da utilizzare durante l'analisi dei dati.

L'elaborazione e l'analisi dei dati, e la produzione dei risultati scientifici della missione sono invece realizzati dal Consorzio Euclid all'interno della parte dell'Sgs di propria responsabilità (Ec-Sgs), composta da nove Science Data Centres (Sdc) nazionali (situati in Finlandia, Francia, Germania, Italia, Olanda, Regno Unito, Spagna, Svizzera e Stati Uniti) e da altri contributi scientifici e tecnologici.



È di responsabilità dell'Inaf la gestione del Sdc italiano: tutto il lavoro di integrazione del codice relativo alle *processing function* assegnate all'Italia è stato svolto sotto il coordinamento di un team situato all'Osservatorio Astronomico di Trieste

Gli Sdc sono specializzati, nel senso che codificano e integrano il codice dedicato a particolari analisi basandosi sul principio che il software sviluppato può essere eseguito in ogni Sdc indipendentemente dall'hardware sottostante e che soddisfi determinati requisiti di qualità. Complessivamente, i dati utilizzati per ottenere i risultati scientifici della missione saranno oltre 50 Petabyte contenuti in parecchi milioni di immagini.

È di responsabilità dell'Inaf la gestione del Science Data Centre italiano (Sdc-It): in particolare, tutto il lavoro di integrazione del codice relativo alle *processing function* assegnate all'Italia – quali Nip, Mer, Sir e parzialmente il Le3 – è stato svolto sotto il coordinamento di un team situato all'Osservatorio Astronomico di Trieste dell'Inaf. Anche l'industria italiana dà un contributo importante in questo campo: infatti la Altec di Torino ha realizzato e opera il Centro operativo scientifico di Sdc-It supportando la funzionalità e la continuità del servizio di hosting dei dati e del relativo calcolo scientifico.

LA VOCE DEL SILENZIO

Il telescopio spaziale Euclid in camera anecoica, un ambiente di laboratorio strutturato in modo da ridurre il più possibile la riflessione di segnali sulle pareti.
Crediti: Esa/M. Pedoussaut





PRONTI AL LANCIO

Euclid viene incapsulato dalla carenatura SpaceX del Falcon 9. Alto 4,7 metri e con un diametro di 3,7 si adatta perfettamente alle forme del razzo.
Crediti: SpaceX



LA TRAVERSATA
Euclid salpa dal porto di Savona verso gli Stati Uniti e il porto vicino al sito di lancio a Cape Canaveral, in Florida.
Crediti: Thales Alenia Space/Imagin



LIFT OFF
Primo luglio 2023: il telescopio spaziale Euclid decolla sul cielo di Cape Canaveral, in Florida, a bordo di uno SpaceX Falcon 9.
Crediti: SpaceX

Il coordinamento dell'intero Ec-Sgs è anch'esso di responsabilità dell'Inaf, e un *project office* guidato dall'Ec-Sgs manager si occupa degli aspetti di management tecnico/scientifico dell'Sgs, inclusi il controllo del progetto, il *quality assurance*, il coordinamento dell'Iot e la definizione della schedula.

L'ELABORAZIONE DEI DATI

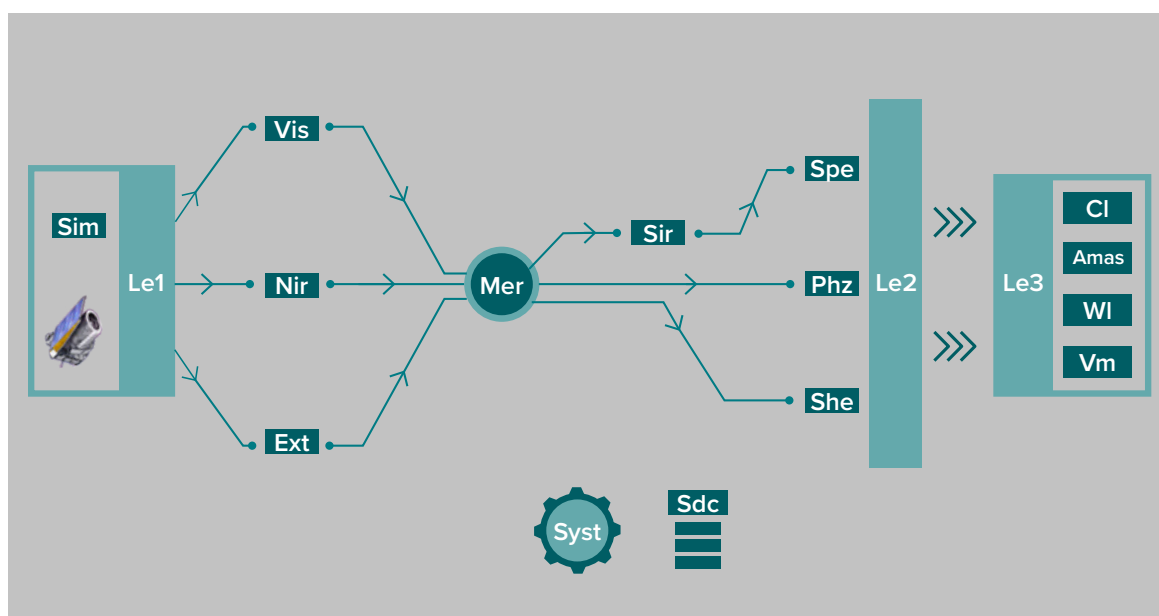
La figura sotto rappresenta la struttura dell'elaborazione dati nell'Sgs. Le immagini di Euclid e quelle delle survey esterne vengono elaborate in un primo momento dalle rispettive *processing function* (Vis, Nip, Ext), quindi Mer ne estrae un unico catalogo omogeneo. Dalle immagini spettroscopiche vengono ottenuti gli spettri (Nis), poi altre *pipeline* estraggono informazioni scientifiche dai dati ridotti: i parametri ricavabili dagli spettri (Spe), lo *shear* relativo al fenomeno del *lensing* (She), le velocità radiali calcolate fotometricamente (Phz). Il livello 3 dell'analisi (Le3) si occupa di preparare i prodotti scientifici finali della missione. Tutti i dati, intermedi e finali, vengono inseriti nell'archivio. Il software relativo alle varie *processing function* è stato sviluppato all'interno di team del Consorzio Euclid (Organisation Units) che hanno definito e sviluppato (e continuano a migliorare) gli algoritmi necessari. Questo software prototipale viene

poi integrato all'interno dell'ambiente Sgs dagli Sdc a ciò delegati, con il supporto del System Team (Syst). Nel corso degli anni le *processing function* (tramite Ou e Sdc) e il System Team hanno sviluppato molte decine di migliaia di righe di codice ciascuno, per un totale di diverse centinaia di migliaia di righe di codice, e oltre 200 Fte (anni-persona) di lavoro per anno.

LA FASE DI VERIFICA

Per due mesi circa, durante la *performance verification phase*, si effettueranno delle osservazioni speciali, il cui scopo è quello di preparare Euclid a fare scienza: i rivelatori dei due strumenti verranno verificati nel loro funzionamento e calibrati. Gli Iot confronteranno la loro risposta in volo con quella vista durante i test a terra; si misureranno caratteristiche fondamentali come il rumore causato da diverse sorgenti, la *persistence*, i *dark*, i *flat field*, ecc. Questi ultimi sono delle speciali immagini di calibrazione che hanno lo scopo di mappare le differenze di sensibilità dei pixel del rivelatore e le disomogeneità del piano focale, come ad esempio la vignettatura, ovvero una perdita di luce ai bordi.

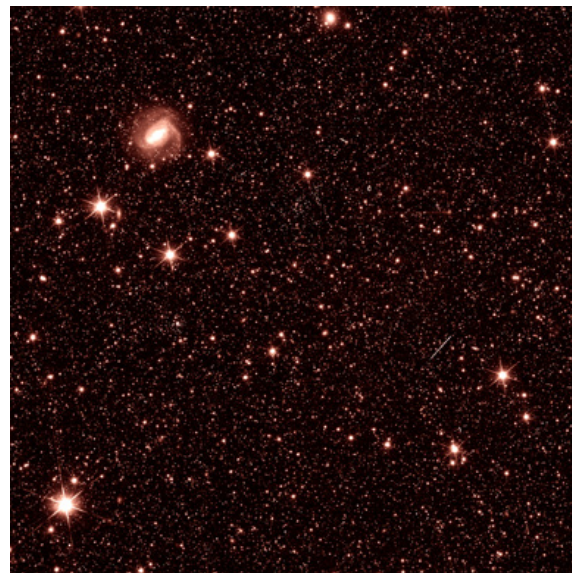
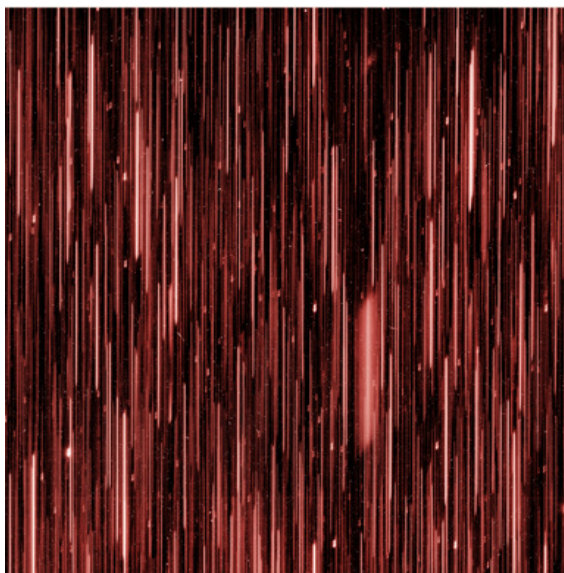
Per chi è costantemente impegnato nelle cosiddette operazioni di strumento, quello della fase di verifica è un momento



ELABORAZIONE DATI

Struttura semplificata dell'elaborazione dati nel Science Ground Segment: spiegazioni nel testo.

Courtesy Euclid Consortium/Esa/SGS Team



Per due mesi circa, durante la *performance verification phase*, si effettueranno delle osservazioni speciali, il cui scopo è quello di preparare Euclid a fare scienza

LO STRUMENTO NISP

Il Near-Infrared Spectrometer and Photometer di Euclid, misura la quantità di luce che le galassie emettono a ciascuna lunghezza d'onda.

Crediti: Esa/Euclid/Euclid Consortium/Nasa

PROVA GENERALE

Il primo scatto di Nisp, il Near-Infrared Spectrometer and Photometer di Euclid. Uno scatto di prova con esposizione di 100 secondi.

Crediti: Esa/Euclid/Euclid Consortium/Nasa

di intensa attività in cui si calibrano gli strumenti e si mettono a punto tutte le strategie necessarie per controllare che tutto funzioni a dovere nei prossimi sei anni. Il team di ricercatori coinvolti è pronto ad affrontare eventuali problemi che potranno insorgere nella vita operativa degli strumenti. Questo periodo è molto importante, infatti, anche per provare tutte quelle procedure automatiche, e non, che sono state preparate nel corso dei lunghi anni di sviluppo. Quando questo articolo uscirà, Euclid avrà già terminato la fase di collaudo e avrà iniziato la sua osservazione del cielo alla ricerca di tracce di materia oscura ed energia oscura.

IL FUTURO

La fase di *performance* e *verification* si è conclusa a fine novembre. I risultati acquisiti in questa fase saranno presentati a Esa durante la *mission commissioning readiness review*, con lo scopo di verificare se le performance strumentali reali sono in linea con quelle previste. La PV sarà poi seguita da un'altra fase di calibrazione detta Pdc (*phase diversity calibration*), della durata di circa due mesi, il cui scopo sarà quello

di determinare al meglio la forma della Psf (*point spread function*) con tecniche basate sull'acquisizione di immagini fuori fuoco. Alla fine della Pdc inizierà finalmente la prima fase di acquisizione scientifica chiamata *early survey operations phase* della durata di circa quattro mesi. In questa fase l'Sgs inizierà a estrarre i prodotti scientifici utilizzando le calibrazioni determinate durante la Pv e la Pdc. I risultati dell'analisi della Esop saranno presentati a Esa alla *data processing readiness review* nell'estate 2024, per verificare se soddisfano i requisiti scientifici della missione. Dopo la Esop, inizierà il periodo di osservazione nominale la cui durata prevista sarà di circa sei anni in cui l'Sgs lavorerà a pieno regime.

Euclid rilascerà i dati alla comunità astronomica in periodi cadenzati: la prima release, che comprenderà una piccola parte delle osservazioni, è prevista per l'inverno del 2024, ma la vera prima pubblicazione dei dati, che comprenderà circa un anno di osservazioni, è prevista per la fine del 2025. Le successive release sono previste a intervalli biennali fino al rilascio di tutti i sei anni di osservazioni.

Siamo certi che i risultati scientifici di Euclid, a cui l'Italia partecipa massicciamente grazie ad Asi, Inaf, Infn e al contributo di molte università, ripagheranno gli anni di lavoro e l'impegno delle molte persone che hanno partecipato alla progettazione e alla realizzazione del segmento di terra della missione, e che nei prossimi anni ne gestiranno le operazioni. ■