

Workshop di consultazione della comunità scientifico/applicativa sulla missione ESA NGGM/MAGIC

Il giorno 26 gennaio 2021, l'ASI ha organizzato, in modalità remota, il primo workshop di consultazione della comunità scientifico/applicativa sulla missione ESA NGGM, con l'obiettivo di:

- presentare le caratteristiche della missione
- favorire il dialogo tra il comparto industriale e il mondo accademico
- raccogliere prospettive e idee innovative per il rafforzamento, la crescita e la valorizzazione delle eccellenze dell'industria e della ricerca italiana nel settore della gravità.

Il workshop ha visto la partecipazione di circa 40 partecipanti provenienti da enti di ricerca e università, rappresentanti ESA e dell'industria nazionale. Le presentazioni hanno riguardato gli obiettivi e lo stato della missione (ESA, Thales), e alcuni interessi scientifici ed applicativi espressi dalla comunità.

Di seguito sono elencati i principali spunti di interesse e le raccomandazioni emerse nel corso del Workshop sia dalle presentazioni illustrate che dalla discussione plenaria di fine giornata. Le presentazioni di dettaglio sono disponibili sulle pagine web ASI dedicate alla missione NGGM.

Sessione Introduttiva

Il documento di mission requirement (MRD) della missione NGGM/MAGIC, è stato finalizzato ad ottobre 2020 da ESA e NASA ed è disponibile per la comunità. I requisiti rispondono ad esigenze espresse dall'International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), dal ESA-NASA Interagency Gravity Science Working Group (IGSWG), dal piano Decadal Survey (DS) della National Academies of Science, Engineering and Medicine. I requisiti sono raggruppati per tematiche (hydrology, cryosphere, ocean, solid earth, climate, atmosphere) e rispondono a specifiche domande e obiettivi scientifici (identificati nella Science and Application Traceability Matrix).

ESA avvierà uno studio di fattibilità per la missione NGGM/MAGIC nel 2021. La configurazione che verrà studiata prevede due coppie di satelliti (costellazione "Bender"), una in orbita polare e una in un'orbita inclinata a circa 70 deg. La distanza tra i satelliti di ogni coppia viene misurata con un interferometro laser (con risoluzione del nm). Gli accelerometri previsti a bordo dei satelliti devono avere una precisione del pm/s².

[RF1] Next Generation Gravity Mission as a Mass change And Geosciences International Constellation (MAGIC), A joint ESA/NASA double-pair mission based on NASA's MCDO and ESA's NGGM studies. 30/10/2020

Interessi scientifici ed applicativi

Geodesia

Al fine di prepararsi alle attività di estrazione dai dati NGGM/MAGIC dei segnali di Terra Solida, Idrologia, Atmosfera, Oceani e Criosfera, il Workshop ha evidenziato anche la necessità di mettere a punto, in ambito

geodetico, simulazioni che tengano conto delle caratteristiche delle orbite dei satelliti, della durata del fly time della missione e degli errori nelle osservabili. In tal modo si potranno determinare le caratteristiche dei modelli di gravità stimabili a partire dai dati forniti dalla missione e valutare come sfruttare al massimo le potenzialità della strumentazione di bordo.

In particolare, il gruppo di geodesia spaziale del **Politecnico di Milano** (R. Barzaghi, F. Migliaccio, M. Reguzzoni) propone di studiare l'applicazione del metodo «space-wise» all'analisi dati di NGGM e alla stima di modelli globali di gravità, compreso il calcolo dell'error budget e relative implicazioni per studi geodetici (ad es. stima del geoide a livello locale e globale) e studi geofisici (inversione gravimetrica e circolazione geostrofica negli oceani). A tale scopo sarà necessario adattare il modello matematico dell'approccio space-wise e la conseguente strategia di analisi dati alle osservazioni fornite da NGGM. Si stima dunque che in questo ambito la SRL sia pari a 4 – 5 (Proof of concept - End-to-End Performance simulations).

Il gruppo del Politecnico ha una pluridecennale esperienza, comprese le attività svolte nell'ambito dell'analisi dati della missione GOCE (partecipazione al consorzio ESA GOCE EGG-C HPF, 2004 – 2020) e attività in collaborazione con Thales Alenia Space (fra cui lo studio ESA Laser Doppler Interferometry – LDI, 2004 – 2005, il primo di una serie di studi che hanno portato a NGGM).

In anni recenti (dal 2017) il gruppo di Geodesia Spaziale del Politecnico di Milano si è dedicato a studi di future missioni di gravimetria quantistica (prime contractor per due diversi studi di missione finanziati da ASI per la determinazione del campo di gravità a partire da misure di "Cold Atom Interferometry"). L'interesse per questa tecnologia è dovuto al fatto che entro il prossimo decennio si verificherà il cosiddetto "quantum breakthrough" anche in ambito geodetico. Nel frattempo, sarà comunque fondamentale mantenere in Italia competenze sull'analisi dati delle prossime missioni "classiche" di geodesia spaziale, in attesa della maturazione della tecnologia quantistica.

NGGM misurerà la distanza tra i due satelliti con un laser di precisione. A bordo di ciascun satellite è inoltre previsto un ricevitore GNSS di precisione. Il gruppo dell'**Università di Padova** (E. Lorenzini, A. Caporali, J. Zurutuza) propone di elaborare i dati GNSS in modo da stimare, con cadenza da 1 a 10 Hz, le tre componenti del vettore congiungente i centri di fase delle due antenne. Questo dato è importante in quanto, nel confronto con le distanze laser tra i centri di massa dei due satelliti, è in grado di fornire informazioni quantitative che riguardano l'assetto relativo dei due satelliti, essendo il centro di massa fisicamente separato dal centro di fase. La precisione della misura GNSS può raggiungere il millimetro. Il gruppo ha esperienza di dinamica del volo in formazione e sulla elaborazione di precisione dei dati GNSS in modalità differenziale. La disponibilità dei dati GRACE e GRACE FO rappresenta un punto di partenza per lo sviluppo di procedure basate sul software Bernese BSW 5.2. Si ritiene che un livello SRL pari a 4.

Idrologia

Il gruppo di idrologia del **CNR-IRPI di Perugia** (Stefania Camici, Luca Brocca e Christian Massari) ha illustrato tre attività che potrebbero beneficiare della miglior risoluzione spaziale e temporale della missione NGGM. La prima attività riguarda il monitoraggio della siccità da misure di anomalia di contenuto di acqua nel sottosuolo ottenibili da NGGM (in modo simile ai suoi predecessori GRACE e GRACE-FO). Il CNR-IRPI ha già impiegato misure satellitari di umidità del suolo in India (Modanesi et al., 2020, doi: 10.1029/2019WR025855) e di GRACE a scala globale (Forootan et al., 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.231) per il monitoraggio della siccità. In particolare, la miglior risoluzione spaziale di NGGM potrebbe garantire il monitoraggio dell'area del Mediterraneo, un "hot spot" per lo studio

dei cambiamenti climatici. Per questa attività è stato indicato un SRL uguale a 3. La seconda attività è relativa alla possibilità di stimare le precipitazioni da dati NGGM (SRL=3), sfruttandone la buona risoluzione temporale (Behrangi et al., 2016, doi: 10.1002/2016GL071832). Tale attività, testata con successo utilizzando dati satellitari di umidità del suolo (Brocca et al., 2014, doi: 10.1002/2014JD021489), ha permesso di sviluppare al CNR-IRPI un dataset globale di pioggia (Brocca et al., 2019, doi: 10.5194/essd-11-1583-2019). Infine, l'attività con il più alto livello di maturità (SRL=4-5) è indirizzata alla stima del deflusso e della portata fluviale utilizzando dati gravimetrici (insieme alle precipitazioni e all'umidità del suolo). Tale attività è stata sviluppata nell'ambito del progetto ESA STREAM (Camici et al., 2021, doi: 10.5194/gmd-2020-399) che è attualmente in corso nella sua continuazione STREAMRIDE.

Terra Solida

Riguardo la Terra Solida, diversi interventi hanno mostrato l'interesse di questa comunità in vari aspetti di questo settore.

Sono stati presentati alcuni risultati dal progetto ESA Gravitational Seismology, (G. Cambiotti, A.M. Marotta, R. Sabadini, **Università degli Studi di Milano**) in ambito NGGM, relativi alla modellazione di alcuni processi geodinamici lenti, di terremoti e della loro segnatura gravitazionale, a partire cioè dai processi tettonici responsabili della fase di caricamento che genera i terremoti fino ai terremoti stessi, con la fase co-sismica e post-sismica.

Riguardo la modellazione dei processi geodinamici lenti, il gruppo di ricerca di Geofisica della Terra Solida dell'Università degli Studi di Milano ha sviluppato modelli fisico-matematici per simulare la dinamica del sistema crosta-mantello sia lungo i margini convergenti in cui avviene la subduzione sia lungo i margini divergenti che evolvono da rifting a oceanizzazione. I modelli sono stati convalidati attraverso il confronto con i modelli globali più recenti del campo gravitazionale terrestre (e.g. EIGEN6C4) e la loro applicazione alle subduzioni di Sumatra e delle Marianne (aree in cui si verificano terremoti di magnitudo $M_w = 9$), e alle regioni dell'East African Rift (una delle regioni di oceanizzazione attive più giovani), ha permesso di dimostrare che la segnatura gravitazionale dei processi tettonici lenti non è costante ma varia nel tempo con un tasso massimo di $0.05 \mu\text{Gal}/\text{anno}$ nel caso di subduzione giovane, di circa un ordine di grandezza maggiore nel caso di estensione, in prossimità del margine passivo. Lo studio ha anche dimostrato come dalla analisi della segnatura gravitazionale dei processi lenti si possano ricavare informazioni sulla reologia dell'area in cui viene enucleato il terremoto e sul grado di accoppiamento fra le placche, fornendo così indicazioni sulla intensità del momento sismico rilasciato. Le attività di ricerca relative ai processi di tettonica lenta si collocano al livello SRL4 (Proof of concept del SCIENTIFIC READINESS ASSESSMENT, SRA), con un requisito di missione di circa $0,5 \mu\text{Gal}$ su 10 anni di tempo di volo NGGM. Il passaggio al livello SRL5 (End-to-End Performance Simulations) potrà avvenire attraverso l'implementazione di una modellistica tridimensionale, una close loop simulation che permetta di catturare i trend lineari dei processi tettonici lenti e lo sviluppo di nuove tecniche avanzate di analisi delle serie temporali in modo che si riesca a distinguere i trend lineari della tettonica lenta dalla firma dei terremoti. Si propone quindi che uno degli aspetti rilevanti di NGGM/MAGIC consista nella possibilità di sfruttare al meglio la strumentazione laser al fine di estrarre i trend lineari, che caratterizzano durante il tempo di volo della missione la segnatura gravitazionale della tettonica lenta, tramite il simulatore geodetico end-to-end.

Il potenziale della missione NGGM/MAGIC riguardo la comprensione delle fasi inter-, co- e post-sismiche è stato dimostrato mediante un simulatore geodetico end-to-end all'interno del progetto Gravitational Seismology finanziato dall'ESA che contemplava le principali sorgenti di errore: da quelle strumentali dovute

agli accelerometri e interferometri a quelle dovute ai prodotti di de-aliasing dei segnali oceanici e atmosferici di alta frequenza e alle variazioni del campo gravitazionale all'interno del periodo di campionamento associate ai cinque comparti principali AOHIS (Atmosphere, Ocean, Hydrology, Continental Ice and Solid Earth) del sistema Terra.

Mediante tecniche di localizzazione spaziale del dato di gravità e di analisi spazio-temporale delle serie di dati sintetici è stato dimostrato come la NGGM sia in grado di monitorare le deformazioni inter-sismiche che avvengono lungo i principali margini di placca e di rilevare terremoti fino ad una magnitudo minima di 7. Quest'ultima possibilità, che estenderebbe il potenziale applicativo della missione gravitazionale allo studio della sismicità intraplacca, è però soggetta alla capacità della comunità scientifica di discriminare i segnali di Terra Solida da quelli dei rimanenti comparti del sistema Terra. Impiegando semplici modelli deterministici per la modellazione dei rimanenti segnali la magnitudo minima rivelabile si eleva a 7.8 e per mitigare questa circostanza il gruppo di Terra Solida di UNIMI sta lavorando alla definizione di metodi stocastici spazio-temporali per l'analisi dei dati gravitazionali che tengono conto della variabilità nel tempo dei trend e delle componenti cicliche dei segnali geofisici. Il SRL è dunque pari a 5 (End-to-End Performance simulations) e sono state individuate le principali problematiche su cui la comunità scientifica deve ancora progredire per un utilizzo ottimizzato degli attesi dati gravitazionali.

Il gruppo dell'**Università di Padova** (A. Caporali, S. Casotto) propone di concentrare l'attenzione sulla gravità della regione Himalayana, in particolare la zona Pakistana, dove la collisione India Eurasia è tuttora in atto, come dimostrato dalle misure GNSS con ricevitori in loco, e coinvolge quantità di massa sia in superficie che a profondità fino a 80 100 km sufficientemente vaste da poter lasciare un segnale nei dati di gravità misurati da NGGM. A Padova è disponibile una mappa di dettaglio della gravità in quelle zone avendo effettuato tra il 1987 e il 1999 rilievi gravimetrici di dettaglio che hanno integrato le misure di gravità svolte durante le spedizioni del Prof. A. Desio tra il 1930 e il 1970. La regione è coperta da ghiacciai per un'estensione di circa 500 x 500 km, in fase di diminuzione per i cambiamenti climatici. Si propone pertanto di esaminare l'interazione criosfera-terra solida, in quanto la diminuzione dello spessore dei ghiacci può comportare sia un segnale gravimetrico dipendente dal tempo, sia una variazione del carico sulla crosta con conseguente rilassamento post glaciale della litosfera osservabile come variazione locale del campo di gravità. Per queste attività si ritiene SRL8 adeguata, trattandosi di analisi di dati gravimetrici e loro interpretazione e integrazione con dati preesistenti.

Si è mostrato (Carla Braitenberg, **Università di Trieste**) come le missioni gravitazionali siano in grado di fornire informazioni fondamentali sulla geologia e la struttura della crosta terrestre, sulla idro- e crio- sfera, e su fenomeni tettonico-vulcanici, e come a tal fine sia necessaria una conoscenza approfondita del campo di gravità ad alta risoluzione, a partire dal campo statico fino alla componente dipendente dal tempo. La possibilità di simulare i dati NGGM/MAGIC suggerisce anche per il nostro Paese ricadute rilevanti per la messa in sicurezza del nostro territorio, vulnerabile ad esempio rispetto a fenomeni vulcanici attivi nel Tirreno centrale, ed a fenomeni legati al cambiamento climatico, con possibili ricadute negative sull'approvvigionamento idrico e sulle riserve idriche nei ghiacciai e nelle falde acquifere. Le simulazioni sulla idro- e criosfera vertono sulla risoluzione di volumi idrici di laghi e di ghiacciai delle Ande e dell'area del Himalaya-Tibet, allo scopo di definire il livello di accuratezza di missioni gravitazionali innovative, in termini di curva di rumore spettrale. Mentre l'estensione areale di laghi e ghiacciai può essere osservata da missioni satellitari che impiegano sistemi attivi e passivi elettromagnetici, rimane il problema della definizione delle masse, alle quali è sensibile solo una missione gravitazionale. L'attività vulcanica sottomarina è un altro tema affrontato, che potenzialmente può portare a disastri ecologici. Le simulazioni riguardano eruzioni

sottomarine realistiche, che presentano una sfida per una futura missione gravitazionale, sia in termini di accuratezza del segnale, che nella risoluzione spaziale e temporale. Il gruppo ha dimostrato ampia esperienza nelle simulazioni, avendo sviluppato metodologie e software nell'ambito dei progetti di satelliti che sfruttano sensori ad atomi freddi (ASI MOCASS e MOCAS+), e durante le attività nell'ambito del Gruppo di lavoro IUGG per la definizione delle NGGM.

Le ricerche attuali sono da collocarsi nella SRL4, dove è centrale l'analisi di trade-off basata sulle curve spettrali di rumore del payload, in funzione delle diverse scelte strumentali e opzioni di costellazione del satellite. Sono state definite le strategie per la definizione delle caratteristiche della NGGM/MAGIC necessarie per raggiungere un significativo miglioramento della completezza del fenomeno geofisico monitorato, e conseguentemente un significativo impatto sulla società rispetto alle osservazioni fornite da missioni satellitari esistenti e passate (GRACE/FO e GOCE). Per portare le ricerche al livello della SRL5, focalizzato alle simulazioni End to End (E2E), si propone di espandere le attività attuali, allo scopo di contribuire allo sviluppo del segmento geofisico del software utilizzabile dalla comunità scientifica, che dovrà essere flessibile per essere in grado di valutare le performance di diverse possibili costellazioni satellitari e strumentali della NGGM.

I dati della missione satellitare NGGM/MAGIC permetteranno studi inediti a carattere ambientale e strutturale, anche al fine della ricerca di risorse energetiche (M. Fedi, G. Florio, V. Paoletti, U. Riccardi, **Università degli Studi di Napoli "Federico II"**). Si propone di collaudare nuove metodologie che possano affiancare quelle più usuali e permettere di sfruttarne l'elevata risoluzione spaziale e temporale. Tra queste l'analisi spettrale nel dominio di wavelet permetterà di caratterizzare localmente il campo di gravità e di ricavare informazioni sulla struttura crostale intermedia e profonda, mentre nuovi metodi di Fast Mass Estimation basati sull'imaging DEXP e sulla decomposizione del campo, in time/space-frequency atoms o in space hypercompact atoms, permetteranno di avere informazioni time-dependent su aree soggette a variazioni di massa, quali ad es. quelle soggette a variazioni degli spessori glaciali e del TWS (Terrestrial Water Storage) anche supportati da dati gravimetrici disponibili in database open access. A ciò si aggiunga la definizione di modelli di densità che siano complementari rispetto alle informazioni ottenute dalla tomografia sismica, non soffrendo le limitazioni di questa ultima, dove il passaggio da anomalie nelle velocità delle onde sismiche a quelle in densità è tipicamente soggetta ad errore. Per quanto riguarda il livello SRL si ritiene che parte di tali studi siano in SRL4 (proof of concept) e parte in SRL5, avendone già sperimentato l'applicazione a dati di potential fields su aree a scala continentale.

Validazione

A valle del Workshop è giunto un contributo dall'**Università di Bologna e dall'Università di Napoli Federico II** sulla validazione delle misure satellitari proponendo l'utilizzo di gravimetri superconduttore in Europa Occidentale.

Conclusioni

Il Workshop ha mostrato come in Italia esistano interessi e competenze legate alla missione NGGM. In particolare esistono le potenzialità R&D per migliorare la modellistica nei diversi comparti che costituiscono la Terra, necessaria per discernere nel segnale gravitazionale NGGM/MAGIC le signature gravitazionali dei diversi processi che avvengono nella parte solida e in quella fluida sfruttando al meglio le potenzialità della strumentazione, al fine non solo di un fondamentale avanzamento nella nostra conoscenza della Terra ma anche di migliorare la nostra capacità di mettere in sicurezza il territorio del nostro Paese.