

Università degli Studi di Salerno

Dipartimento di Matematica
Scienze Matematiche, Fisiche ed Informatiche
XI Ciclo - Nuova Serie
Curriculum in Fisica dei sistemi complessi e dell'ambiente



Ph.D. Thesis
in

**High-sensitivity strain measurements from underground
interferometric stations: geodynamic phenomena at Gran Sasso
and first records from Canfranc**

Candidate
Verdiana Botta

Supervisor
Prof. Luca Crescentini

Coordinator
Prof. Patrizia Longobardi

Academic Year 2011-2012

Abstract

La superficie della Terra e il suo interno si deformano continuamente a causa di processi geologici e geofisici. Per studiare tali fenomeni e comprendere meglio le caratteristiche reologiche della Terra, le misure di deformazione diventano di fondamentale importanza, anche al fine di ottimizzare la risposta al rischio ambientale e identificare potenziali aree di rischio.

Lo studio della deformazione crostale è un argomento di ricerca complesso ma molto importante che include diverse discipline scientifiche, quali ad esempio la geometria differenziale, la teoria dell'elasticità, la geodinamica e la fisica in generale.

Nel corso degli anni, l'uso di diversi tipi di dati geodetici per lo studio dei fenomeni geodinamici è stato sempre più potenziato, giocando un ruolo chiave nella conoscenza delle loro variazioni temporali e di intensità su diverse scale spaziali e temporali. Queste misure forniscono notevoli vincoli sulle caratteristiche della litosfera e dei processi che la deformano. Eppure ancora oggi, grandi porzioni della Terra sono ancora poco, o per niente, monitorate.

La deformazione superficiale può essere misurata in diversi modi, come movimento relativo di punti sulla superficie terrestre, attraverso misure di *strain* e di *tilt*, GPS (Global Positioning System), VLBI (Very Long Base Interferometry) e SLR (Satellite Laser Ranging). Tra i diversi tipi di strumenti gli interferometri laser, misurando lo spostamento tra due punti distanti da pochi metri a più di un chilometro, sono caratterizzati da elevata precisione e stabilità a lungo termine, caratteristiche necessarie per studiare processi di deformazione crostale locali e globali in una larga banda di frequenze.

Questo lavoro di tesi presenta i risultati relativi ad alcune analisi condotte sui dati registrati mediante due interferometri laser installati nei Laboratori sotterranei del Gran Sasso (Italia) e descrive l'installazione di due nuovi interferometri laser installati alla

fine dell'Agosto 2011 nel Laboratorio sotterraneo di Canfranc (Spagna), introducendo anche un'analisi preliminare delle prime sequenze di dati registrate con tali strumenti. Nel primo capitolo vengono introdotti alcuni concetti generali sulla deformazione, sulla deformazione crostale e sulle sue misure. Lo studio della deformazione in corrispondenza della superficie terrestre è stata notevolmente potenziata negli ultimi 50 anni, passando da un'analisi prevalentemente descrittiva e qualitativa ad un'analisi più quantitativa. Lo stato e l'entità dello sforzo all'interno della litosfera e, quindi della deformazione, svolgono un ruolo fondamentale nei vari processi geofisici, quali ad esempio i meccanismi che coinvolgono le placche tettoniche, il bilancio energetico terrestre, i terremoti e i movimenti crostali.

Nel Capitolo 2 vengono descritti il fenomeno mareale e la deformazione che esso produce. Le maree di Terra solida, che rappresentano un effetto diretto dell'attrazione gravitazionale del Sole, della Luna e degli altri corpi celesti, possono essere modellate con estrema precisione. Ad esse si aggiunge un secondo contributo, noto come carico oceanico, derivante dalle fluttuazioni delle masse oceaniche. Tale processo è anch'esso ben noto, ma la modellazione dei suoi effetti deve ancora essere migliorata. Ad ogni modo, la comprensione del fenomeno mareale è molto importante per l'analisi delle misure interferometriche perché esse sono chiaramente dominate dalle maree.

Nel Capitolo 3 viene introdotta l'interferometria laser e, in particolare, viene descritto il principio di funzionamento degli interferometri laser del Gran Sasso (Italia) che registrano segnali deformativi caratterizzati da un'elevata sensibilità, confrontando la lunghezza ottica di un braccio di misura lungo circa 90 metri e di un braccio di riferimento fisso (lungo circa 20 cm). Sebbene gli interferometri misurino in maniera diretta la deformazione, la presenza di cavità, la topografia e le disomogeneità locali della crosta possono modificare in maniera significativa tali misure. Anche gli effetti ambientali e antropici appaiono come segnali anomali o rumori in una larga banda di frequenze, che comprende ad esempio le maree terrestri. È necessario considerare alcuni o tutti questi possibili effetti a seconda del fenomeno studiato.

Nel Capitolo 4 i dati registrati con gli interferometri del Gran Sasso, inizialmente da soli e poi insieme a quelli prodotti da un terzo interferometro laser installato nel Laboratorio sotterraneo di Baksan (Russia), vengono utilizzati per stimare i parametri della *Free Core Nutation* (FCN). Sebbene il rapporto segnale-rumore nel caso dei segnali deformativi sia generalmente inferiore a quello dei dati gravimetrici, l'analisi dei dati deformativi appare promettente dal momento che le perturbazioni relative che ca-

ratterizzano le maree deformative sono circa 10 volte maggiori di quelle delle maree gravitazionali. Innanzitutto, l'inversione di parametri mareale sintetici (ottenuti dall'ampiezza e dalla fase di otto componenti mareali diurne osservate sperimentalmente) mostra che il potere risolutivo dei dati di gravità e di deformazione sembra confrontabile quando i dati sono invertiti utilizzando la norma \mathcal{L}^2 (generalmente usata), ma quando la minimizzazione viene effettuata mediante la norma \mathcal{L}^1 il potere risolutivo cresce sia nel caso dei dati di gravità che dei dati di deformazione e questo miglioramento è particolarmente evidente nel caso dei dati gravimetrici. Le inversioni dei dati sono state effettuate dopo aver introdotto le correzioni per la distorsione locale del campo di deformazione e gli effetti del carico oceanico. Per stimare i parametri delle Free Core Resonance, sono state utilizzate otto componenti mareali diurne (Q_1 , O_1 , P_1 , K_1 , Ψ_1 , Φ_1 , J_1 and OO_1) confrontando le misure (corrette per il carico oceanico) e le previsioni (corrette per la distorsione locale del campo di deformazione), minimizzando la funzione di misfit mediante la norma \mathcal{L}^1 . L'analisi dei dati del Gran Sasso fornisce un valore del periodo della FCN (circa 429 giorni siderali) robusto e paragonabile a quelli ottenuti analizzando i dati gravimetrici mediante l'inversione congiunta di dati acquisiti con più stazioni. L'accordo tra osservazioni e previsioni sembra migliore di quello ottenuto in qualsiasi lavoro precedente che fa uso di dati deformativi. L'analisi congiunta dei dati del Gran Sasso e di Baksan conferma, ma non migliora, i risultati recentemente ottenuti. Inoltre, in entrambi i casi il fattore di qualità non è ben vincolato a causa della grande indeterminazione sulla fase della Ψ_1 , ma i risultati sono consistenti con i valori pubblicati recentemente (≈ 20000).

Nel Capitolo 5 viene analizzato un nuovo tipo di fagliazione, scoperto negli ultimi decenni e noto come terremoto lento. Molti aspetti dello scorrimento lento rimangono tuttora inspiegati. Qui un tentativo di descrivere le caratteristiche della propagazione della rottura attraverso l'analisi dei segnali deformativi di tre diversi eventi lenti registrati in occasione del terremoto dell'Izu-Oshima (Giappone) nel 1978, nella regione di Durmid Hill (California) nel 1999 e in occasione del terremoto del Tokachi-oki (Giappone) nel 2003. I segnali registrati presentano caratteristiche peculiari, già osservate nelle sequenze deformative registrate al Gran Sasso durante il terremoto dell'Aquila del 6 Aprile 2009 che ha rappresentato la prima diretta osservazione del carattere diffusivo della propagazione lenta della rottura. Utilizzando due diversi meccanismi di scorrimento lungo percorsi rettilinei 1D, caratterizzati da una propagazione a velocità costante o diffusiva, l'andamento temporale della deformazione relativa ai due interferometri del

Gran Sasso è pienamente consistente con una propagazione diffusiva dello scorrimento. Non tutti gli eventi lenti analizzati sono consistenti con uno solo dei modelli testati. Due dei quattro terremoti lenti (L'Aquila e la faglia F3 dell'Izu-Oshima) sono consistenti unicamente con una propagazione dello scorrimento di tipo diffusivo; utilizzando una propagazione a velocità costante si ottiene un fit sui dati che non è in grado di riprodurre il minimo osservato sui segnali registrati dall'interferometro BA per quanto riguarda l'evento aquilano e dal dilatometro da pozzo SHI nel caso dell'Izu-Oshima. Per entrambi questi eventi, la densità di momento sismico diminuisce linearmente con la distanza lungo il percorso, così come avviene generalmente per i processi diffusivi 1D. Negli altri casi (Durmid Hill, Tokachi-oki e faglia F4 dell'Izu-Oshima) non è possibile discriminare il reale tipo di propagazione; le osservazioni sono infatti consistenti con entrambi i modelli, ma per essi l'andamento del momento sismico sembra poco realistico (distribuzione a campana piccata in corrispondenza della linea nodale). Questi risultati suggeriscono la necessità di approfondire le caratteristiche della sorgente, non ben vincolate in alcuni casi. Anche l'assunzione di percorsi 1D molto sottili potrebbe essere una fonte di errore.

Nell'ultimo capitolo viene descritta l'installazione, avvenuta alla fine dell'Agosto 2011, di due interferometri laser e viene effettuata un'analisi preliminare sulle prime sequenze di dati. Tali strumenti, in funzione dal Novembre 2011, sono stati installati nel Laboratorio sotterraneo di Canfranc (LSC) in Spagna. Il Laboratorio sotterraneo di Canfranc è situato in una delle zone più attive dal punto di vista sismico dell'Europa occidentale, in corrispondenza della catena dei Pirenei, che segna il confine tra la placca europea e la microplacca iberica. I primi test sui dati registrati evidenziano un elevato rapporto segnale-rumore e dunque la capacità di produrre chiari segnali a bassa frequenza, ad esempio legati alle onde sismiche, alle oscillazioni libere della terra, e all'eventuale rilascio asismico dello sforzo. Un'analisi mareale preliminare mostra un buon accordo tra le maree osservate e previste nella banda mareale diurna, suggerendo che gli effetti di distorsione locale del campo di deformazione, se presenti, sono piccoli. Le discrepanze osservate all'interno della banda semidiurna, invece, potrebbero essere una conseguenza di un inadeguato modello di Terra e/o di mare. Tali risultati necessitano di ulteriori indagini; in particolare sarebbe interessante approfondire l'effetto della distorsione locale nelle diverse bande di frequenza e stimare il carico oceanico in maniera più dettagliata, in particolare relativamente all'area del Golfo di Biscaglia, che potrebbe essere la fonte principale delle discrepanze osservate nella banda mareale semidiurna.