

La prevenzione sulle coste del Mediterraneo

# Proteggersi dal maremoto

di Giuliano F. Panza\*, Tommaso Pinat\*\*, Fabio Romanelli\*\*

Un fenomeno legato alla sismicità che, tenendo presente la densità di popolazione lungo le coste italiane, non può essere trascurato, è lo *tsunami*, ossia il maremoto. Un maremoto è generato da una perturbazione di tipo impulsivo, o in ogni caso molto breve rispetto ai periodi caratteristici del maremoto stesso (dell'ordine di centinaia o migliaia di secondi), che coinvolge una considerevole massa d'acqua. Nella grande maggioranza dei casi tale perturbazione risulta essere un evento sismico, ovvero un terremoto. Per questa ragione talora le onde di maremoto vengono descritte con il termine *seismic sea wave*.

In realtà anche questo appellativo risulta incorretto (o riduttivo) per descrivere la totalità del fenomeno, poiché numerosi eventi hanno evidenziato come il maremoto possa avere anche origini completamente diverse, quali: eruzioni vulcaniche, impatti meteorici, frane aeree, semiaeree e sottomarine. Tuttavia resta l'evento sismico, sottomarino o nell'entroterra a pochi chilometri dalla costa, il principale produttore di maremoto e, tra l'altro, va detto che gli *tsunami* non generati da terremoti sono soggetti ad una più rapida dissipazione e, dunque, molto raramente riescono a raggiungere coste lontane dalla zona di generazione.

\* Socio del GLIS. Socio fondatore di ASSISI. Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Trieste. The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics - ICTP, Miramare, Trieste.

\*\* Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Trieste.

L'onda di tsunami si forma quando la massa d'acqua, praticamente incompressibile, investita dalla perturbazione sismica, tende a ritornare verso l'iniziale posizione di equilibrio per effetto della forza di gravità. È dunque la forza di gravità che, fungendo da forza di richiamo, dà effettivamente origine all'onda (che talora è detta appunto *gravitational wave*). Di conseguenza si può pensare allo *tsunami* come ad un fenomeno originato da energia che oscilla alternativamente tra le due forme di energia cinetica e di energia potenziale gravitazionale. È evidente allora come l'entità di un maremoto sia strettamente correlata alla profondità  $H$  dell'oceano o del mare in cui viene generato: tanto più grande è lo spessore  $H$  dello strato d'acqua in prossimità della sorgente, tanto maggiore sarà la massa d'acqua spostata dall'equilibrio e, quindi, tanto maggiore sarà l'ampiezza massima dell'onda.

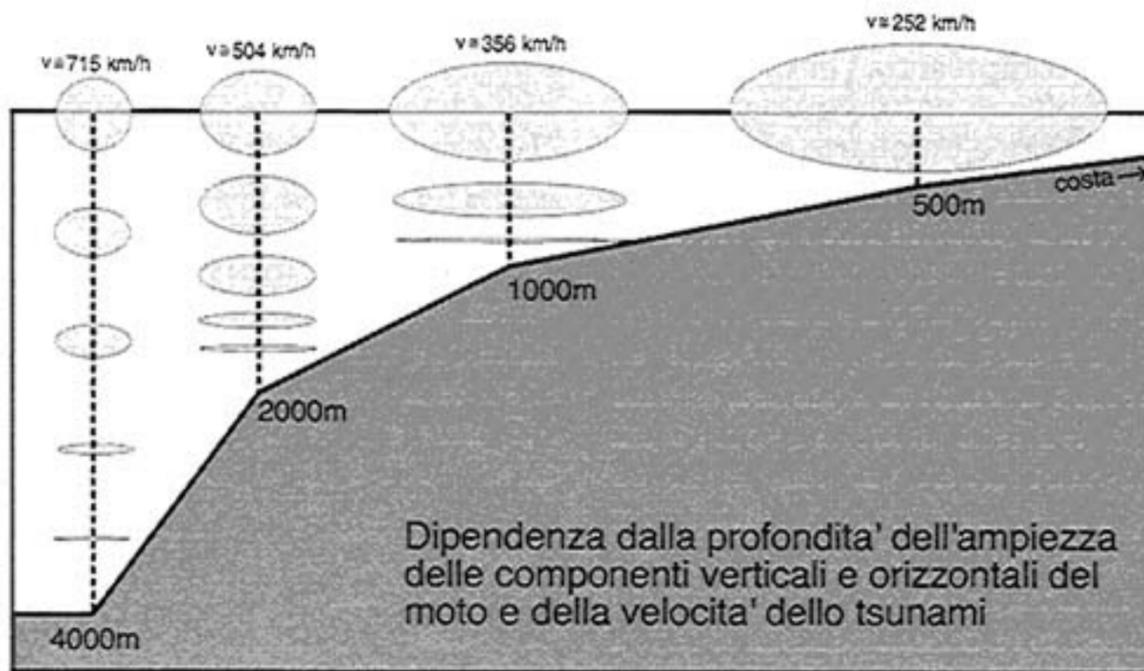
Le dimensioni delle onde di maremoto possono essere davvero enormi e raggiungere negli oceani ampiezze di alcuni metri; ampiezze che dopo un tragitto anche di migliaia di chilometri, arrivate in prossimità della costa, aumentano di un fattore che varia da 2 a 10, quando avviene lo *shoaling*, termine con cui si indica specificatamente la progressiva crescita dell'onda all'avvicinarsi alla terraferma (Fig. 1). Approssimandosi alla costa, a causa dell'assottigliamento dello strato liquido in cui si propaga, che causa una diminuzione della velocità dell'onda, lo *tsunami* viene ad occupare un volume d'acqua sempre minore. In rispetto del principio di conservazione dell'energia ed in conseguenza dell'incompressibilità dell'acqua, l'energia traspor-

tata dallo *tsunami* viene progressivamente ridistribuita, facendo aumentare l'ampiezza dell'onda.

Bisogna in ogni modo ricordare che i casi di maremoti di grandi proporzioni sono molto rari in quanto richiedono terremoti generatori di magnitudo prossima a 8. Terremoti di tale entità avvengono con una frequenza media di circa uno all'anno. Considerato che, all'incirca, solo uno ogni 10 di questi eventi si trova al di sotto o in prossimità di un oceano, e quindi nelle condizioni di generare un maremoto, si può affermare che *tsunami* molto rilevanti avvengono, su scala globale, con una frequenza minore o uguale ad uno ogni 10 anni.

Nonostante ciò, anche nel Mediterraneo sono stati osservati maremoti di proporzioni notevoli. Le coste dell'Egitto, di Cipro, di Creta e dell'Italia Meridionale e della Spagna Meridionale sono, da un'analisi dei cataloghi storici, le più esposte al fenomeno *tsunami*. Dal confronto di numerosi cataloghi emerge che, negli ultimi 2000 anni, non meno di una settantina di maremoti, correlati ad altrettanti eventi sismici, ha colpito le coste italiane<sup>1,2,3</sup>. In alcuni casi l'apice del *run-up* (ovvero la fase finale dello *shoaling*, in cui, ormai a ridosso della linea costiera, l'ampiezza dell'onda di *tsunami* aumenta in modo non lineare) ha raggiunto diversi metri.

Nel Mediterraneo, l'evento del 1303 è stato particolarmente distruttivo, con effetti dello *tsunami* conseguente a questo sisma osservati lungo tutte le coste del Mediterraneo orientale: a Creta, a Cipro, lungo le coste libanesi e, soprattutto, in Egitto<sup>4</sup>. Tra gli eventi che hanno colpito le coste dell'Italia meritano particolare menzione: il maremoto dovuto



**Fig. 1** Lo shoaling. Le ellissi rappresentano il moto di una particella d'acqua al passaggio di un maremoto. Avvicinandosi alla costa sia la componente orizzontale che quella verticale dell'onda aumentano (in rispetto del teorema di conservazione dell'energia), mentre la velocità di propagazione dell'onda ( $v$ ) decresce.

all'evento sismico del 14 aprile 1672 nell'Adriatico centrale, quello conseguente al terremoto di Messina del 28 dicembre 1908 e quello presso la Sciara del Fuoco (Stromboli) del 30 dicembre 2002 (quest'ultimo originato da una frana semiaerea). Anche se dal punto di vista statistico il Mar Tirreno risulta la zona italiana maggiormente esposta (soprattutto in seguito alla presenza di diversi vulcani sommersi), è difficile fare una graduatoria di rischio; la maggior parte delle coste italiane può essere severamente colpita, come riportato dai molti cataloghi storici<sup>1,2,3</sup>. Ad esempio, in un mare come l'Adriatico, bacino di dimensioni piuttosto modeste e con sismicità locale di livello medio, le segnalazioni di *tsunami* storici nelle cronache sono numerose (Fig. 2). È quindi evidente che è necessario agire per mettere in sicurezza le aree costiere italiane in caso di maremoto.

L'educazione della popolazione a questo fenomeno, spesso sottovalutato, è sicuramente il primo passo da compiere. È opportuno insegnare a chi si trova in aree a rischio (autoctoni, turisti e visitatori in genere) che un sisma in prossimità di una costa può con buona probabilità dare luogo ad

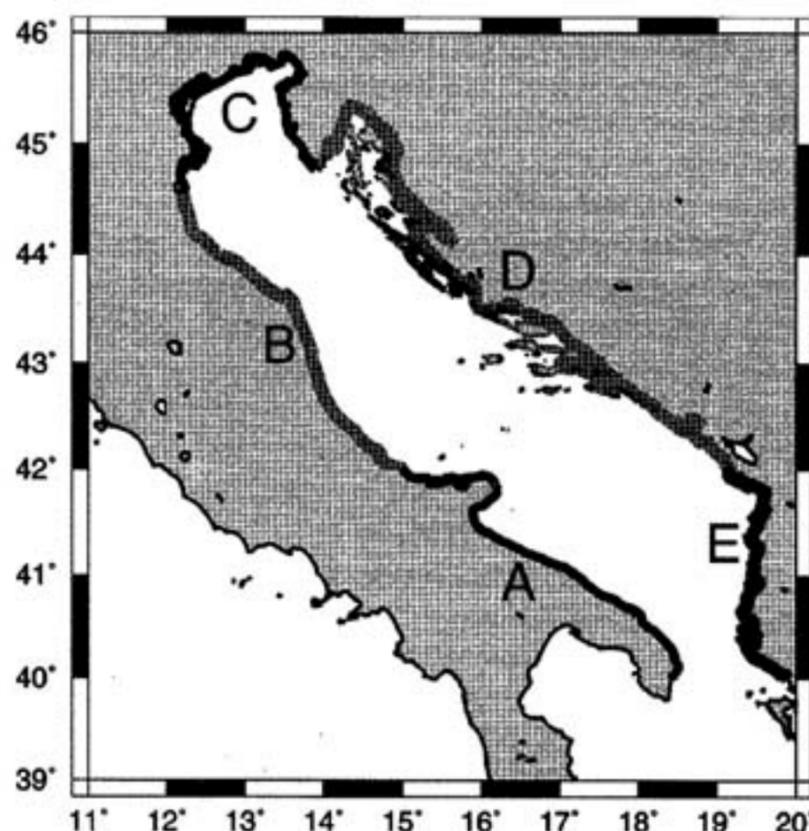
uno *tsunami*. Inoltre, per talune aree, è auspicabile la pianificazione di esercitazioni di evacuazione ed eventualmente la costruzione di rifugi dislocati sul territorio, tenendo conto della pericolosità della zona.

Ad ogni modo è la prevenzione la migliore alleata contro il maremoto. Le strade che possono essere intraprese in questo senso sono due: (1) *rilevare* e (2) *prevedere*.

Dato che le onde sismiche viaggiano ad una velocità almeno

cinque volte superiore a quella del maremoto, esse rappresentano un ottimo precursore deterministico per il maremoto stesso. La possibilità di *rilevare* la propagazione di uno tsunami è legata alla realizzazione di una rete di sensori (tipicamente sensori di pressione come quelli del sistema DART, Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis, del Pacifico settentrionale) al largo delle coste, capace di segnalare l'avvicinamento di un'onda di maremoto in tempo utile per la messa in sicurezza di persone e cose lungo i litorali.

Questo sistema, largamente impiegato in area oceanica dove i tempi di percorrenza degli *tsunami* superano abitualmente le diverse ore, potrebbe essere utilmente impiegato in gran parte del Mediterraneo, mentre risulta inadeguato in bacini di modesta estensione, come l'Adriatico, le cui coste sono interessate da eventi potenzialmente tsunamigenici, localizzati anche in terra ferma. In questo caso, infatti, le distanze tra la sorgente del maremoto (ipocentro) e le coste possono essere talmente brevi che i tempi di percorrenza non sono sufficientemente lunghi da permettere le operazioni di rilevazione e trasmissione dell'allarme alle



**Fig. 2** - Distribuzione, per zone costiere, di maremoti storici nel bacino dell'Adriatico:

- A= Coste Italiane Meridionali (11 eventi);
- B= Coste Italiane Centrali (14 eventi);
- C= Coste dell'Alto Adriatico (10 eventi);
- D= Coste Croate e Serbo-Montenegrine (10 eventi);
- E= Coste Albanesi (13 eventi).

zone a rischio, con conseguente evacuazione della popolazione.

Un esempio calzante, ricavabile dal relativamente recente passato, è costituito dal terremoto del 1511. L'epicentro di questo evento sismico è stato localizzato nell'entroterra<sup>5</sup>, in prossimità della costa su cui si affaccia la città di Trieste. Da numerose testimonianze storiche esso risulta aver generato un maremoto, anche se di modesta entità, che colpì tutte le coste dell'alto Adriatico, comprese Trieste e Venezia. In questo caso le distanze tra l'epicentro e le località principali interessate dall'evento sono comprese tra circa 20 km (Trieste) e circa 120 km (Venezia); di conseguenza i tempi di percorrenza del maremoto stimati per tali distanze, pur in presenza di uno strato d'acqua molto sottile che impedisce velocità

molto elevate (da 50 a 90 km/h), sono compresi tra i circa 10 minuti impiegati per raggiungere Trieste e l'ora e un quarto circa necessari a raggiungere Venezia. È dunque evidente come, in condizioni di questo tipo, il rilevare la propagazione del maremoto risulta di scarsa utilità al fine di una comunicazione di allarme sufficientemente tempestiva, tale da consentire la messa in sicurezza delle aree interessate.

La previsione del maremoto, in questi casi, è quindi strettamente legata alla previsione del sisma generatore. Tuttavia i terremoti, non sono prevedibili con precisione deterministica, ma solo con incertezze spaziali di centinaia di chilometri ed incertezze temporali di centinaia di giorni. Dunque, *quando la distanza dalla costa della sorgente sismica è piccola, la previ-*

*sione del maremoto, nelle zone circostanti, deve essere intesa come individuazione delle aree tsunamigeniche, ovvero delle aree in cui può verificarsi un sisma in grado di produrre lo sviluppo del maremoto.*

Una volta individuate tali aree, la metodologia da applicare è quella del calcolo di scenari di pericolosità. Ciò viene realizzato tramite il calcolo di mareogrammi (ovvero gli equivalenti, per i maremoti, dei sismogrammi per i terremoti), ottenuti sia con metodi analitici<sup>6,7</sup> che con metodi numerici<sup>8</sup>. In base ai modelli analitici sviluppati, è evidente che uno tsunami può essere generato sia da sismi con ipocentri sotto il fondo marino che da eventi nell'entroterra, ma in prossimità della linea di costa. Tale fatto modifica notevolmente, aumentandolo, il numero delle zone sismiche capaci di produrre maremoti.

La modellazione è stata applicata con successo allo studio dell'evento del 1303<sup>3</sup>: le massime ampiezze calcolate per numerosi siti lungo le coste mediterranee orientali sono risultate in buon accordo con i dati storici ed è stato inoltre possibile utilizzare i mareogrammi ottenuti per discriminare fra la presenza di una singola sorgente sismica oppure di due, favorendo la seconda ipotesi. La stessa modellazione è stata applicata, a scopo preventivo, per calcolare mareogrammi sintetici per alcune località costiere dell'Adriatico ed è quindi possibile stimare quali proporzioni potrebbe raggiungere un maremoto che dovesse abbattersi su di esse, in funzione delle caratteristiche tipiche della sismicità locale e della batimetria dei fondali anti-stanti.

Per il già citato caso del 1511 sono stati realizzati diversi esperimenti di simulazione, facendo variare i parametri più significativi per la tsunamigenesi (ad esempio: profondità  $H$  del mare attraversato, distanza  $d$  e profondità ipocentrale  $h$  della sorgente dalla costa, magnitudo  $M_W$ , etc.). I risultati ottenuti hanno

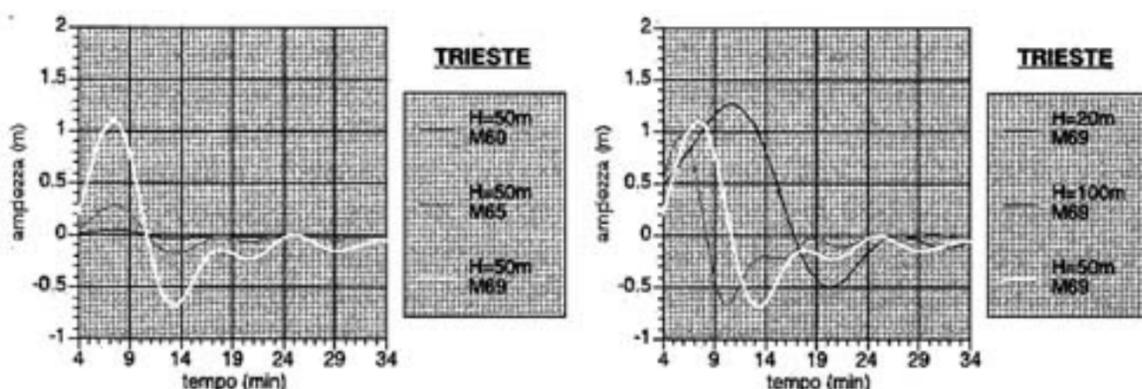


Fig. 3 - Mareogrammi sintetici relativi allo tsunami del 1511, generato da una sorgente localizzata in terraferma, calcolati per la città di Trieste in funzione (a sinistra) della magnitudo ( $M_W=6.0; 6.5; 6.9$ ) e (a destra) dello spessore dello strato liquido attraversato ( $H=20m; 50m; 100m$ ). Qui sono mostrati i risultati ottenuti fissando la sorgente sismica nell'entroterra, ad una distanza  $d=17$  km dalla linea di costa e ad una profondità ipocentrale  $h=10$  km.

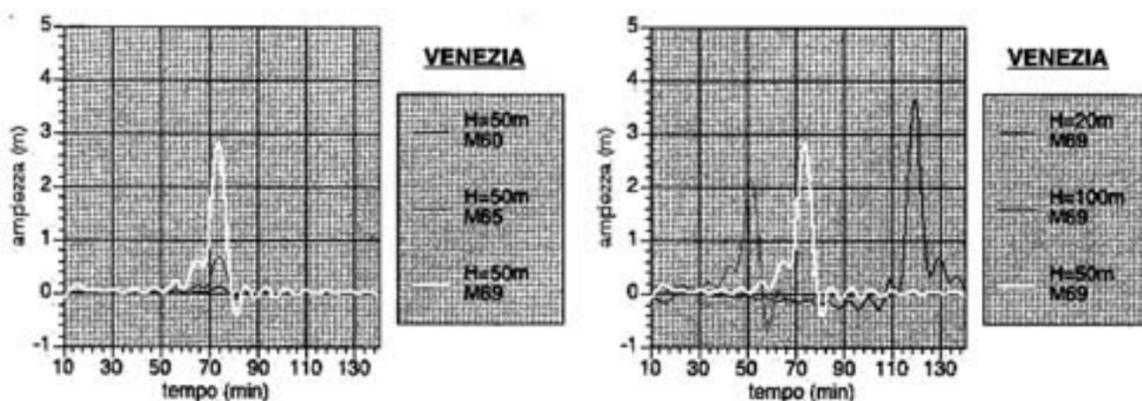


Fig. 4 - Mareogrammi sintetici relativi allo tsunami del 1511, generato da una sorgente localizzata in terraferma, calcolati per la città di Venezia in funzione (a sinistra) della magnitudo ( $M_W=6.0; 6.5; 6.9$ ) e (a destra) dello spessore dello strato liquido attraversato ( $H=20m; 50m; 100m$ ). Qui sono mostrati i risultati ottenuti fissando la sorgente sismica nell'entroterra, ad una distanza  $d=17$  km dalla linea di costa e ad una profondità ipocentrale  $h=10$  km.

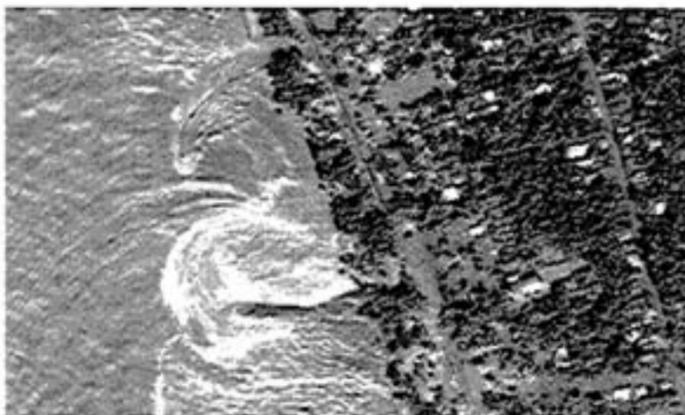
fornito dei valori per le ampiezze massime fino a 1.2 m a Trieste (Fig. 3) e fino a 3.5 m a Venezia (Fig. 4) e risultano in buon accordo con quanto riportato nelle cronache dell'epoca, nelle quali si riferisce che: «Un maremoto...violento fu quello causato dal disastroso terremoto del 1511 (...). Le ondate provocate dal sommovimento del mare costrinsero la popolazione di Trieste a mettersi in salvo nella parte alta della città, mentre a Venezia le onde si elevarono fino all'altezza delle finestre delle case...»<sup>1</sup> e «Si sentirono orribilissimi terremoti, uno dei quali, il 26 marzo (1511), tra le ore due e le tre dopo mezzogiorno... molti villaggi restarono rovinati, e sì grande era l'accrescimento del mare, che gli abitanti di Trieste si trasportarono ad alloggiare sotto il Castello»<sup>9</sup>.

In conclusione, tramite l'analisi dei dati storici ed il calcolo degli scenari è possibile determinare le aree maggiormente a rischio,

e quindi fornire un elemento essenziale per la scelta di dove sia più opportuna la dislocazione di una rete di rilevamento e di allarme per i maremoti, nonché la costruzione di una rete di rifugi opportunamente distribuiti sul territorio.

### Bibliografia

- <sup>1</sup> Caputo, M. and Fajta, G., 1984. *Primo catalogo dei maremoti delle coste italiane*, Atti Accademia Nazionale dei Lincei, Memorie Classe Scienze Fisiche, Matematiche, Naturali, s. VIII, 17, 213-356, Roma.
- <sup>2</sup> Bedosti B. and Caputo, M., 1986. *Primo aggiornamento del catalogo dei maremoti delle coste italiane*, Atti della Accademia Nazionale dei Lincei, Rendiconti Classe Scienze Fisiche, Matematiche, Naturali, s. VIII, 80, 570-584, Roma.
- <sup>3</sup> Tinti S., Maramai A., Graziani L., 2004, *The new catalogue of the Italian tsunamis*, Natural Hazards, 33, 439-465.
- <sup>4</sup> El-Sayed, A., Romanelli, F., Panza, G.F., 2000. *Recent seismicity and realistic waveforms modeling to reduce the ambiguities about the 1303 seismic activity in Egypt*, Tectonophysics, 328, 341-357.
- <sup>5</sup> Fitzko, F., Suhadolc, P., Aoudia, K., Panza, G.F., 2005. *Constraints on the location and mechanism of the 1511 Western-Slovenia earthquake from active tectonics and modeling of macroseismic data*, Tectonophysics, in press.
- <sup>6</sup> Panza, G.F., Romanelli, F., Yanovskaya, T.B., 2000. *Synthetic tsunami mareograms for realistic oceanic models*, G.J.I., 141, 498-508
- <sup>7</sup> Yanovskaya, T.B., Romanelli, F., Panza, G.F., 2003. *Tsunami excitation by inland/coastal earthquakes: the Green function approach*, NHES, 3, 353-365
- <sup>8</sup> Tinti S., Gavagni I., Piatanesi A., 1994. *A finite-element numerical approach for modelling tsunamis*, Annali di Geofisica, 37, 1009-1026
- <sup>9</sup> Storia Cronografica di Trieste dalla sua Origine all'Anno 1695, *Annali dal 1695 al 1848* del Procuratore Civico Pietro Kandler.



The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics  
In co-operation with  
Università degli Studi di Trieste  
Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale

## Tsunami Physics and Preparedness

24 March 2005 • Trieste, Italy

The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics  
Main Lecture Hall

09.00 – 09.45: Introduction Session  
**Katepalli R. Sreenivasan**, Director of ICTP  
**Iginio Marson**, President of OGS  
**Giuliano F. Panza**, ICTP and University of Trieste  
 Chairman: **Katepalli R. Sreenivasan**  
 09.45 – 10.30: **François Schindele** (UNESCO, Paris)  
*Tsunami Warning System*  
 10.30 – 10.45: Break  
 10.45 – 11.15: **Karim Aoudia** (ICTP, Italy)  
*2004 Sumatra Giant Earthquake*  
 11.15 – 12.00: **Steven Ward** (UC Santa Cruz, USA)  
*Physics of Tsunamis*  
 12.00 – 12.30: **Lareef Zubair** (Columbia University, USA)  
*Science, Disaster Management and the Tsunami in Sri Lanka*  
 12.30 – 13.00: **Claudio Tuniz** (ICTP, Italy)  
*New Clocks for Paleotsunamis*

13.00 – 14.30: Lunch  
 Chairman: **Steven Ward**  
 14.30 – 15.00: **Fabio Romanelli** (University of Trieste, Italy)  
*Modeling of Earthquake Tsunamis in Mediterranean*  
 15.00 – 15.30: **Elpidio Caroni** (University of Trieste, Italy)  
*Tsunami Run-Up and Its Impacts on the Northern Adriatic Coast*  
 15.30 – 16.00: **Renzo Mosetti** (OGS, Italy)  
*Implementation of a Tsunami Monitoring System in Adriatic Sea*  
 16.00 – 16.30: Break  
 16.30 – 17.30: Roundtable Discussion

contacts: The Abdus Salam International Centre  
for Theoretical Physics  
tel. +39 040 2240251 - fax +39 040 2240410  
e-mail: aoudia@ictp.it