

$V_s$  e  $V_{s30}$  NON sono misurabili  
con errori inferiori a 20% con  
nessun metodo

# Experimental Uncertainty on the $V_s(z)$ Profile and Seismic Soil Classification

Francesco Mulargia and Silvia Castellaro  
Università di Bologna, Italy

Please take  
your copy!

## INTRODUCTION

The shear wave velocity profile in the shallow subsol plays a predominant role in quantitative seismic site characterization. In particular, the average velocity of shear waves in the first 30 meters ( $V_{30}$ ) is central to the present seismic soil classification of most western countries (NEHRP 1997; Eurocode 8 2003). Doubts have been raised about the validity of  $V_{30}$  as a proxy to seismic amplification (cf. Castellaro *et al.* 2008 and references therein) and some alternatives “beyond  $V_{30}$ ” are currently being explored. Some of these still rely on the value of shear wave velocity averaged over some depth ( $z$ ) value, e.g.,  $V_{10}$  (Boore 2004; Gallipoli and Mucciarelli 2009) and are therefore all affected by experimental uncertainties on  $V_s(z)$ . We analyze the effect of experimental uncertainty on the National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP) soil classification scheme by using the classical tools of experimental physics.

## THE EXPERIMENTAL ACCURACY OF THE $V_s(z)$ PROFILE

The  $V_s(z)$  profile can be measured through three classes of geophysical methods. These are, in order of decreasing cost:

1. **Invasive methods**, which involve the drilling of one or more boreholes and the direct measure of the vertical velocity profile by placing a wave source and/or a motion sensor at a given depth (cross-hole, downhole, suspension log, seismic cone).
2. **Non-invasive active methods**, which rely on a wave source and an array of motion sensors deployed on the ground to measure the velocity profile from either the refracted/reflected phase velocities or from the inversion of surface waves ( $\beta$ -wave refraction/reflection, SASW, MASW, FTAN).
3. **Non-invasive passive methods**, which rely on one or several sensors deployed on the ground to infer the velocity profile from natural noise spectral coherence at an array of stations (SPAC, ESAC, ReM1) or at a single station ( $H/V$ ).

As with any physical measure, the measure of the  $V_s(z)$  profile is affected by experimental errors. Invasive methods are more direct (Austin and Boore 2005), but involve point measurements and are therefore exposed to the presence of small-scale lateral heterogeneities in the subsol. This means that the validity of the measured  $V_s(z)$  beyond the close neighborhood of the borehole is questionable. At the same time, array techniques based on the dispersion of surface waves assume in their inversion a homogeneous subsol 1D geometry, which is violated by the presence of lateral heterogeneities. This affects the measurements to an unknown extent.

As a consequence, an estimate of the magnitude of the experimental errors on  $V_s(z)$  requires an empirical evaluation of intra-method and inter-method scatter. According to basic experimental physics, an empirical estimate of experimental scatter is itself subject to sampling uncertainty. Namely, the standard deviation of the standard deviation is (Worthing and Geffner 1943, 202)

$$\sigma_{\sigma_{V_{30}}} = \frac{\sigma_{V_{30}}}{\sqrt{2(n-1)}}$$

and the relative estimate of sample variance  $s^2$

$$\sigma_{V_{30}} = \frac{s_{V_{30}}}{\sqrt{2(n-1)}}$$

where  $n$  is the number of independent data upon which the estimate is based. This shows how, for example, using a sample of  $n = 3$  data, an estimate of  $\sigma_{V_{30}}$  with a 50% standard deviation can be obtained. In practice,  $n \geq 10$  independent measurements are necessary to achieve a worthwhile estimate of experimental scatter. Unfortunately, independent measurements at the same site are rarely available for cost reasons. It is important that these are not confused with repeated borehole measurements within the same hole, which may have a high intrinsic repeatability but cannot be taken as independent replicates because they do not account for any bias introduced

An elephant is shown in profile, standing on a riverbank. Its trunk is extended upwards, reaching towards the branches of a tree. The background features a river, some trees, and a hazy, blue-tinted sky. The text is overlaid on the elephant's trunk and head area.

# Array sismico zampigitale (con proboscide)

Francesco Mulargia

Dipartimento di Fisica

Università di Bologna

# Cosa sappiamo davvero della Fisica dei terremoti?

- Tutto, secondo i “guru” che appaiono in televisione
- Ma di fatto....

Ari Ben-Menahem, in *A Concise History of Mainstream Seismology: Origins, Legacy, and Perspectives*, BSSA 1995, p. 1216:

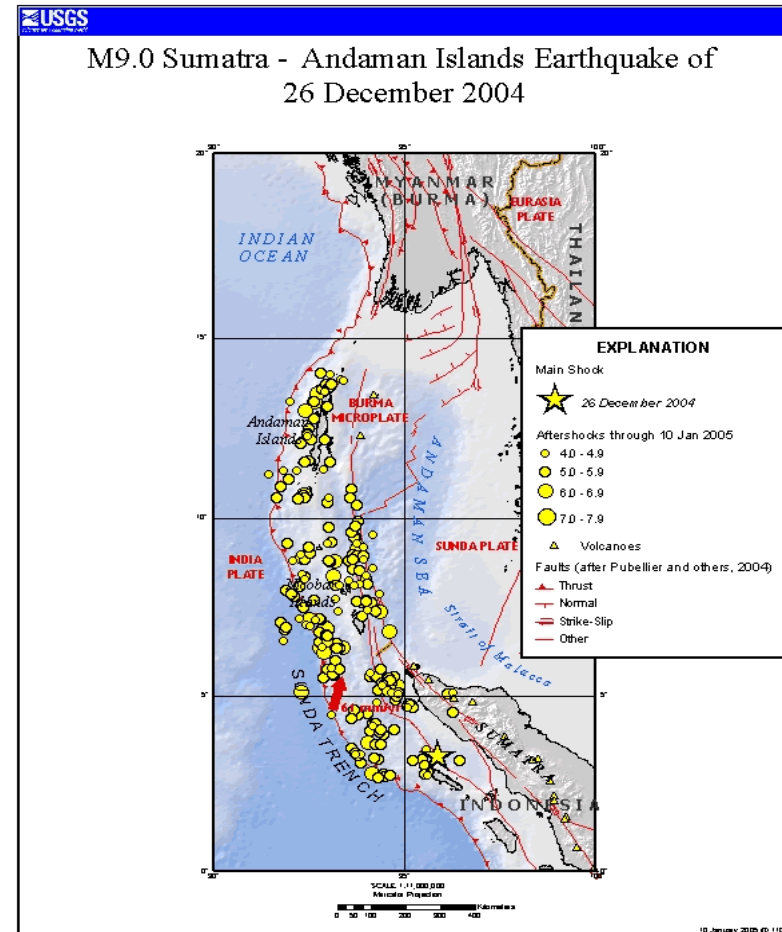
*“1992 14 April. Unpredicted earthquake of magnitude 6 in the heart of Europe, amidst hundreds of seismographs, computers, and professors of seismology.*

*Just another reminder that even with all the accumulated seismological lore since the Lisbon earthquake (1755), we are still as surprised by earthquakes now as we were then.”*

*Consideriamo un caso specifico:*

## Il terremoto dell'Oceano Indiano, 26 dicembre 2004, $M_W=9.3$

- Una rottura della crosta lunga 600 km e larga 100
- Il secondo terremoto più grande mai registrato strumentalmente
- Energia rilasciata  $10^{17}$  J, pari a 1500 Hiroshima (Circa  $\frac{1}{2}$  della TBomba)
- 230.000 vittime, quasi tutte dovute al conseguente grande tsunami









Questo evento non ha prodotto  
vittime tra gli elefanti e tra molti  
altri animali

*Perché?*



Sismologi al Seismolab, Caltech, Los Angeles

# Hanno a disposizione

- L'intelligenza e la preparazione dei ricercatori “migliori del mondo”
- 10.000 stazioni sismiche digitali e teletrasmesse
- I computer cluster più potenti al mondo
- I satelliti della NASA
- Fondi di ricerca praticamente illimitati

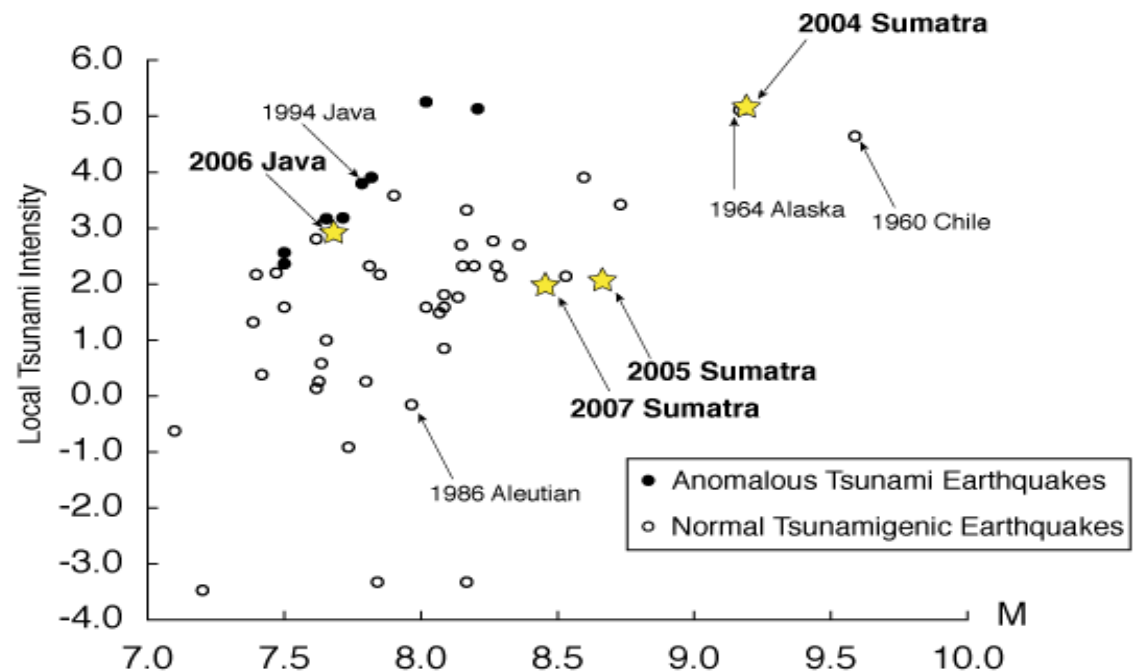
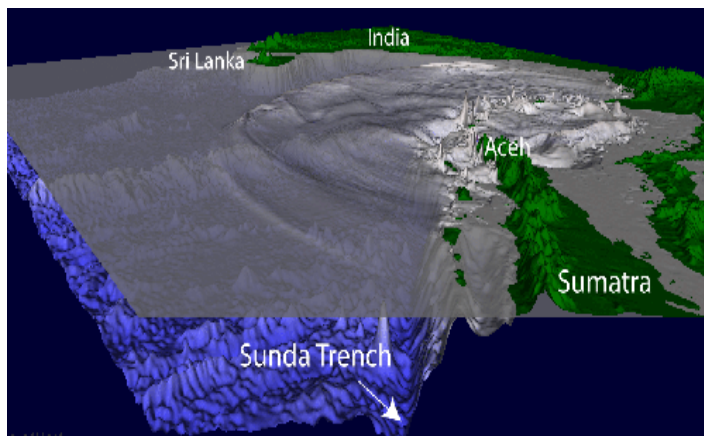
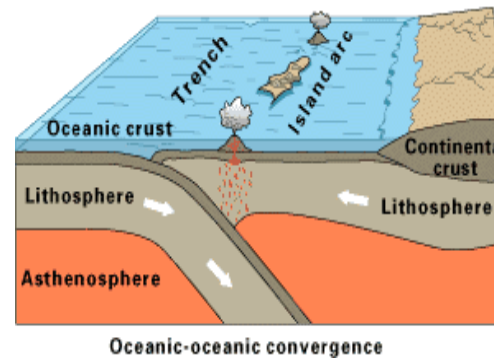


Elefanti sulle rive dell'Oceano Indiano

# Hanno a disposizione

- Un lunghissimo naso
- Quattro grosse zampe
- Due grandi orecchie
- Nessun finanziamento di ricerca
- ?

# *Dopo* qualche giorno i sismologi hanno capito tutto del terremoto



# 9.0 Sumatra - Andaman Islands Earthquake of 26 December 2004

Prepared in cooperation with the Global Seismographic System

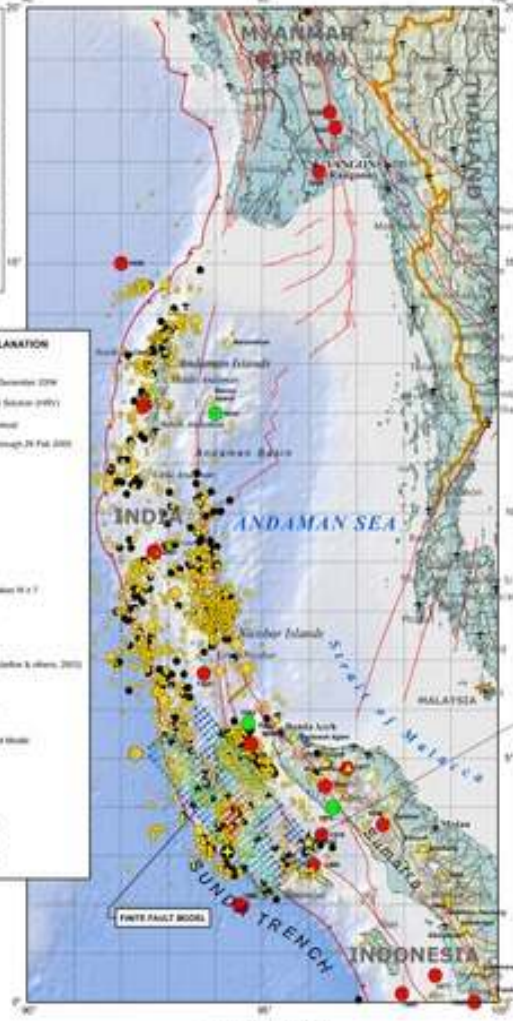


**RELATIVE PLATE MOTIONS**

The tectonic plates shown represent the motion of the Indian and Eurasian plates with respect to the motion of the Eurasian plate. The motion of the Indian plate is generally westward, and the motion of the Eurasian plate is generally eastward. The relative motion of the Indian plate with respect to the Eurasian plate is shown in the inset map. The inset map shows the Indian plate moving westward at a rate of approximately 15 cm/yr, and the Eurasian plate moving eastward at a rate of approximately 10 cm/yr. The relative motion of the Indian plate with respect to the Eurasian plate is therefore approximately 5 cm/yr westward.

**EXPLANATION**

Star: 26 December 2004  
 Earthquake through 26 February 2005  
 Earthquake M<sub>s</sub>:  
 8.5-9.0  
 8.0-8.4  
 7.5-7.9  
 7.0-7.4  
 6.5-6.9  
 6.0-6.4  
 5.5-5.9  
 5.0-5.4  
 4.5-4.9  
 4.0-4.4  
 3.5-3.9  
 3.0-3.4  
 2.5-2.9  
 2.0-2.4  
 1.5-1.9  
 1.0-1.4  
 0.5-0.9  
 0.0-0.4



The 2004 earthquake of 26 December 2004 occurred at the epicenter of the 2004 earthquake. The earthquake was a result of the collision of the Indian Plate and the Eurasian Plate. The Indian Plate is moving westward, and the Eurasian Plate is moving eastward. The collision of the two plates has resulted in the formation of the Sumatran subduction zone. The 2004 earthquake occurred at the northern end of this subduction zone, where the Indian Plate is being subducted beneath the Eurasian Plate. The earthquake was a result of the rupture of a fault in the Indian Plate. The fault is oriented north-south, and the rupture occurred along a segment of the fault that is approximately 1000 km long. The earthquake was a result of the rupture of a fault that is oriented north-south, and the rupture occurred along a segment of the fault that is approximately 1000 km long.

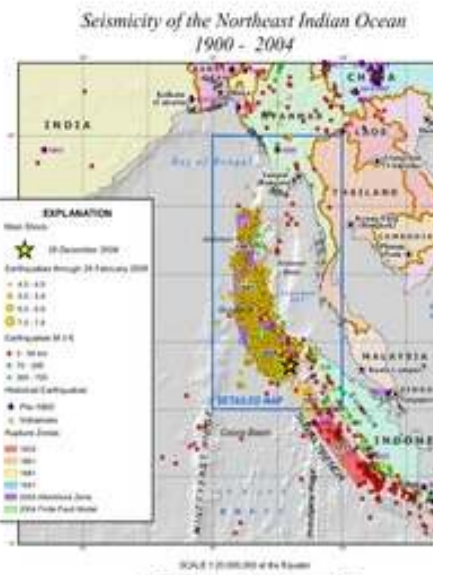
**REFERENCES**

Beck, S. L., 2001. An updated global model of plate boundaries. *Geological Society of America Bulletin*, v. 113, p. 1633-1636.

Engel, A. B., and Wallace, J., 2004. Global Seismology, 1994-2004. *Journal of the Geological Society of America*, v. 116, p. 1-10.

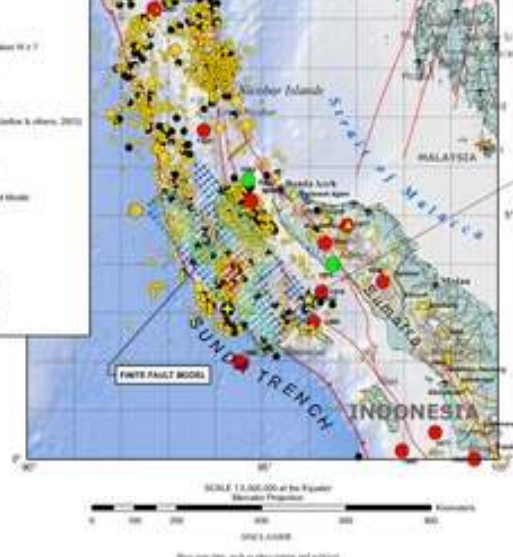
Engel, A. B., Wallace, J. W., and Wallace, J. W., 2004. Global Seismology, 1994-2004. *Journal of the Geological Society of America*, v. 116, p. 1-10.

Engel, A. B., Wallace, J. W., and Wallace, J. W., 2004. Global Seismology, 1994-2004. *Journal of the Geological Society of America*, v. 116, p. 1-10.



**EXPLANATION**

Star: 26 December 2004  
 Starburst: 26 December 2004 (M<sub>s</sub> 9.0)  
 Circle: Centroid  
 Earthquake through 26 Feb 2005  
 Earthquake M<sub>s</sub>:  
 8.5-9.0  
 8.0-8.4  
 7.5-7.9  
 7.0-7.4  
 6.5-6.9  
 6.0-6.4  
 5.5-5.9  
 5.0-5.4  
 4.5-4.9  
 4.0-4.4  
 3.5-3.9  
 3.0-3.4  
 2.5-2.9  
 2.0-2.4  
 1.5-1.9  
 1.0-1.4  
 0.5-0.9  
 0.0-0.4



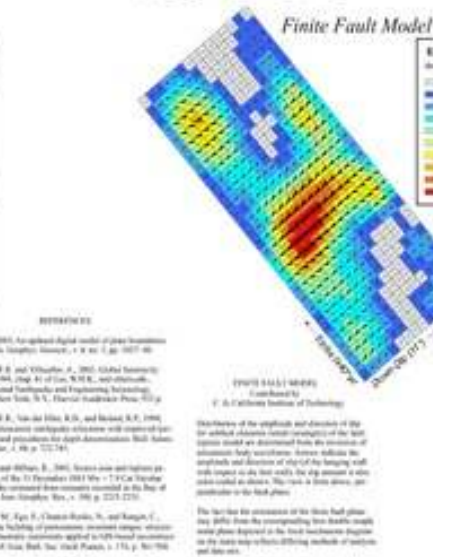
**REFERENCES**

Beck, S. L., 2001. An updated global model of plate boundaries. *Geological Society of America Bulletin*, v. 113, p. 1633-1636.

Engel, A. B., and Wallace, J., 2004. Global Seismology, 1994-2004. *Journal of the Geological Society of America*, v. 116, p. 1-10.

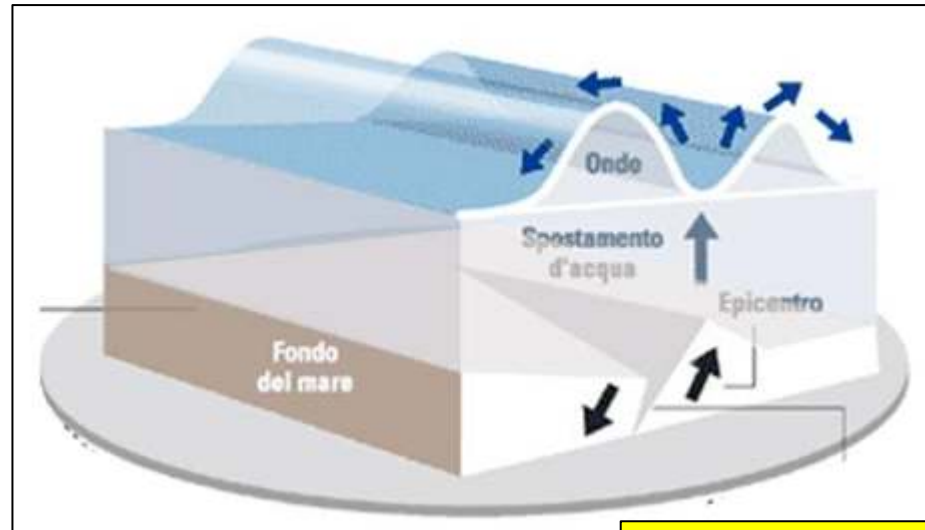
Engel, A. B., Wallace, J. W., and Wallace, J. W., 2004. Global Seismology, 1994-2004. *Journal of the Geological Society of America*, v. 116, p. 1-10.

Engel, A. B., Wallace, J. W., and Wallace, J. W., 2004. Global Seismology, 1994-2004. *Journal of the Geological Society of America*, v. 116, p. 1-10.



# E dello tsunami

Il maremoto prodotto nell'Oceano Indiano nel dicembre 2004 è stato generato da un terremoto



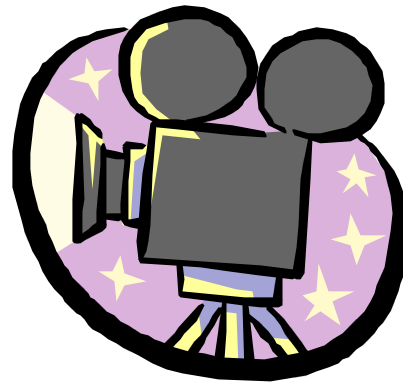
Gli avvallamenti e i sollevamenti del fondo del mare creati dal terremoto si trasferiscono alla massa d'acqua soprastante

In media, al suo arrivo sulla costa, il maremoto ha un'ampiezza pari a circa 10 volte quella in mare aperto

Avvicinandosi alle coste il maremoto riduce la sua velocità a causa della diminuzione della profondità del mare, ma al contempo aumenta l'altezza dell'onda



*Dopo* qualche mese hanno fatto dei bellissimi  
modelli matematici



## *Prima, però...*

Gli elefanti hanno “sentito” l’arrivo dello tsunami e si sono messi in salvo. I sismologi no.

Risultato:

Elefanti battono Uomini 230.000  
(morti) a 0.

## *Perché?*

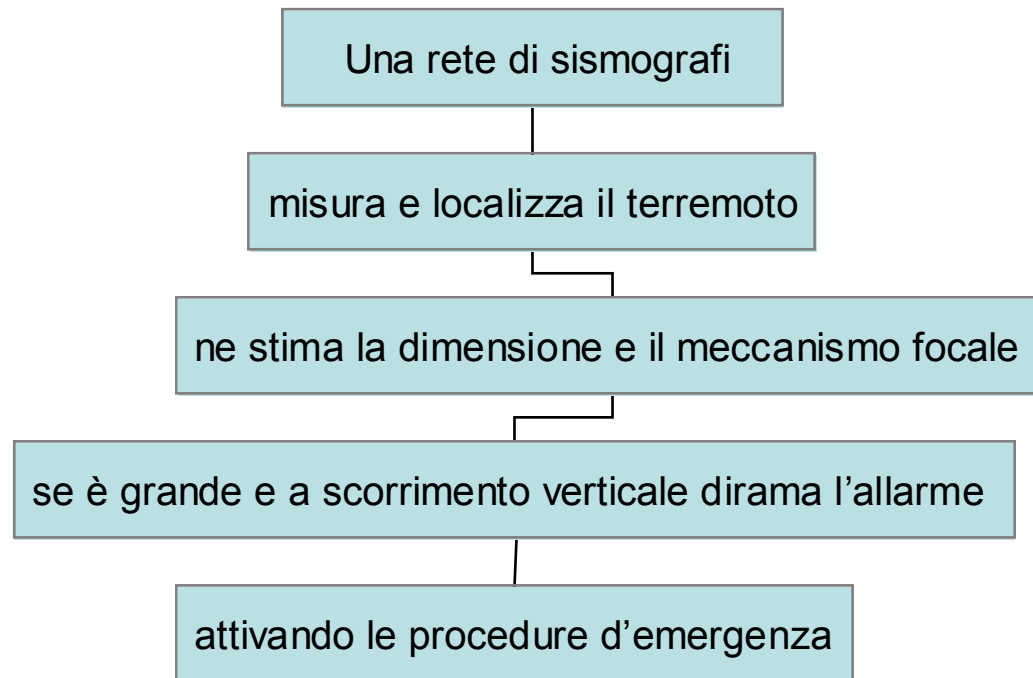
# Una risposta sciocca\*

Perché nell'Oceano Indiano non era operativo un sistema di Allerta Tsunami come quello dell'Oceano Pacifico

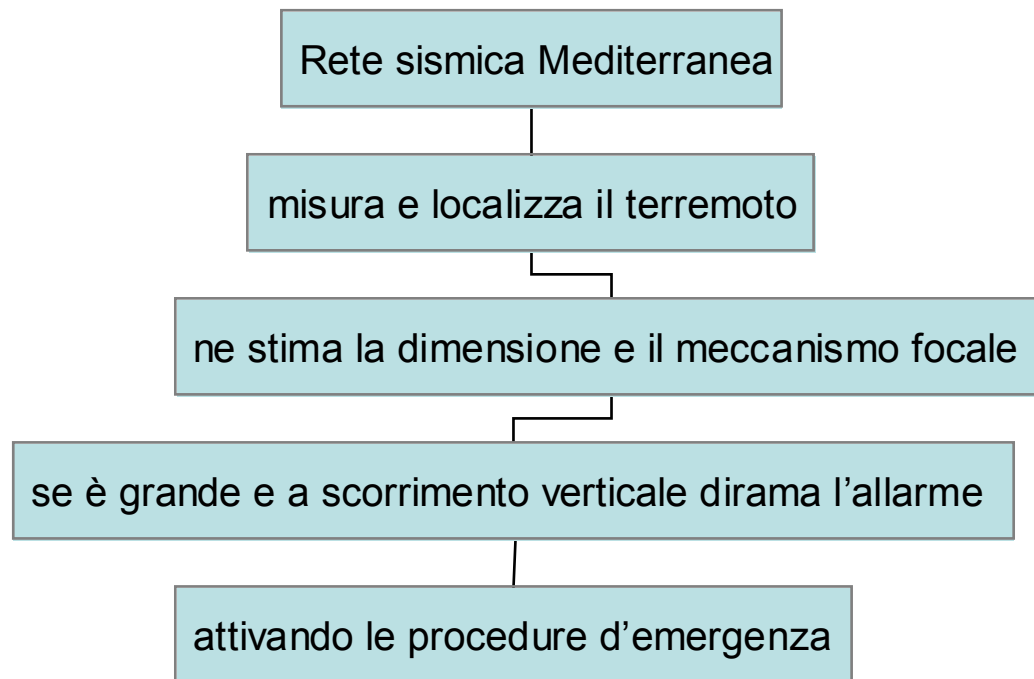
Ma, visto che dei terremoti si è capito tutto, basterà allestirne una (stanziamento previsto dall'ONU:  $>10^9$  US\$)

*\*Purtroppo quella che ha prevalso, confermando l'inferiorità sismologica dell'uomo rispetto all'elefante*

# Il sistema di Allerta Tsunami dell'Oceano Pacifico



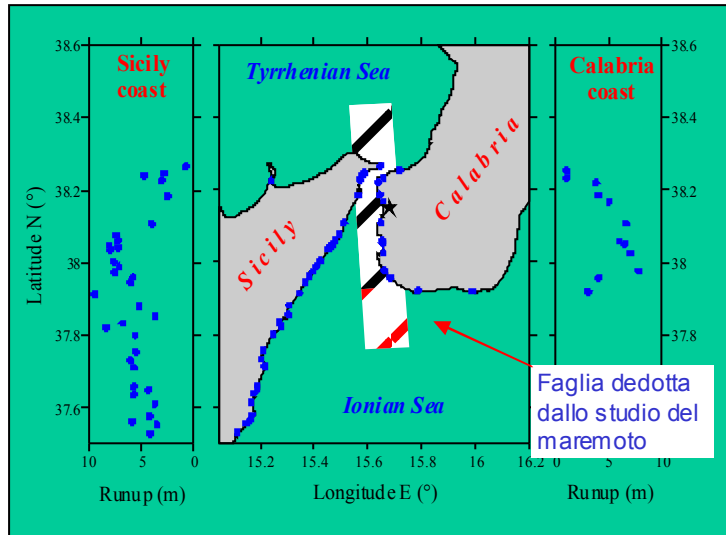
# Non solo, è addirittura in sviluppo un sistema di Allerta Tsunami per il Mediterraneo!



Progettata dimenticando –  
ignorando?! -  
che ....

- I terremoti nel Bacino del Mediterraneo sono relativamente “piccoli” (M max 7.5) e danno solo maremoti locali
- E quindi con tempi di allerta di pochi minuti, insufficienti per qualsiasi intervento!
- E che comunque a livello locale i terremoti l’allerta la emanano essi stessi

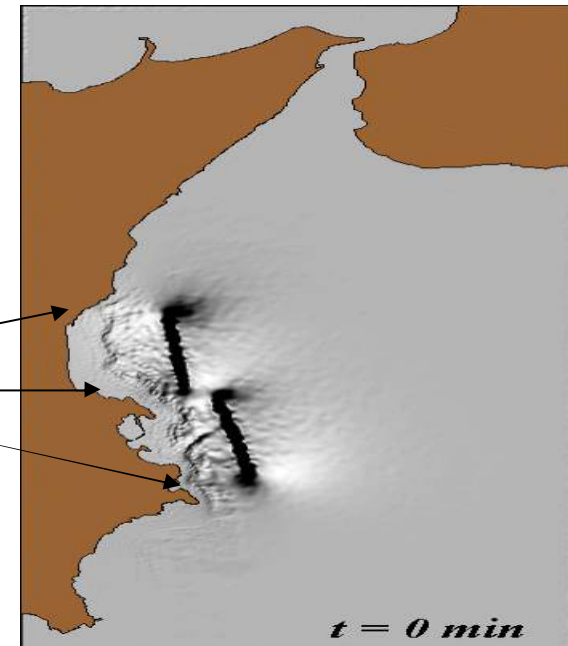
# La Sicilia, terra dei massimi tsunami del Mediterraneo: 1908, $M=7.2$ e 1693, $M=7.5$



Il terremoto del 1908 nello Stretto di Messina provocò più di 60000 morti. Determinò un maremoto che fece circa 2000 vittime. Raggiunse a riva altezze superiori a 10 m, causando distruzione ed estese inondazioni lungo le coste, soprattutto in Sicilia.

Se il terremoto del 1693 si verificasse ancora una volta genererebbe un maremoto che colpirebbe anche le città di:

- Catania,
- Augusta
- e Siracusa.



C'è una risposta meno sciocca?

Sì!

Capire perché gli elefanti si sono salvati



Forse gli elefanti hanno previsto  
il terremoto?

*Ma è possibile prevedere i terremoti ?*

Cos'è un terremoto dal punto di  
vista fisico?

*Sicuramente il fenomeno base è una  
frattura in un mezzo - la crosta  
terrestre - che si carica e si rompe  
continuamente*

Le fratture sono processi fortemente  
nonlineari



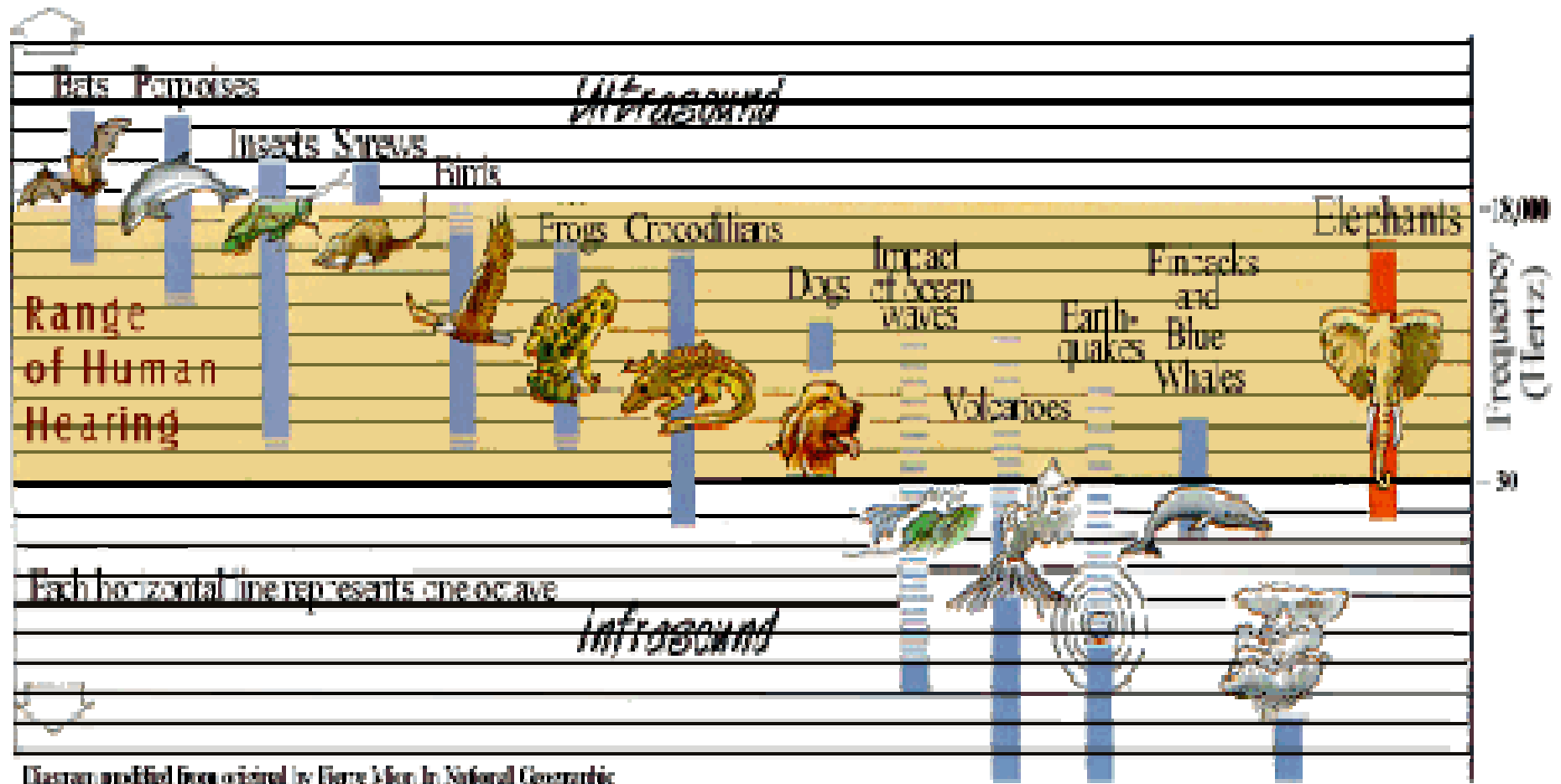
Modello.exe

*Quindi:  
I terremoti non si possono  
prevedere!*

*Sono solo possibili stime  
statistiche!*

*E allora, che cosa ha salvato gli elefanti?*

# *Gli elefanti potrebbero avere “udito” l’arrivo dello tsunami*



Spettro della curva uditiva degli animali

Oppure avere una padronanza  
della sismologia superiore a  
quella dell'uomo

*E' ipotizzabile?*

Sì. Gli elefanti sono capaci di una cosa che all'uomo è sconosciuta: la *Comunicazione a Onde Sismiche*

- Gli elefanti comunicano tra loro a distanze sino a 50 km (Garstang, Comp. Physiol., 2004)
- Sono capaci di vocalizzazioni broad band da 10 a 20 KHz  
(<http://www.elephantvoices.org/multimedia-resources/elephantvoices-calls-database-call-types.html>)
- I segnali a bassa frequenza accoppiano col suolo

# Comunicazione a onde sismiche

- I vocalizzi degli elefanti hanno un'armonica fondamentale a 12-13 Hz e 112 dB a 1m. Questa produce onde di Rayleigh (O'Connell; Arnason & Hart, JASA, 1997; Am. Zool., 2001; Gunther et al., GRL, 2004; Garstang, Comp. Physiol. 2004)

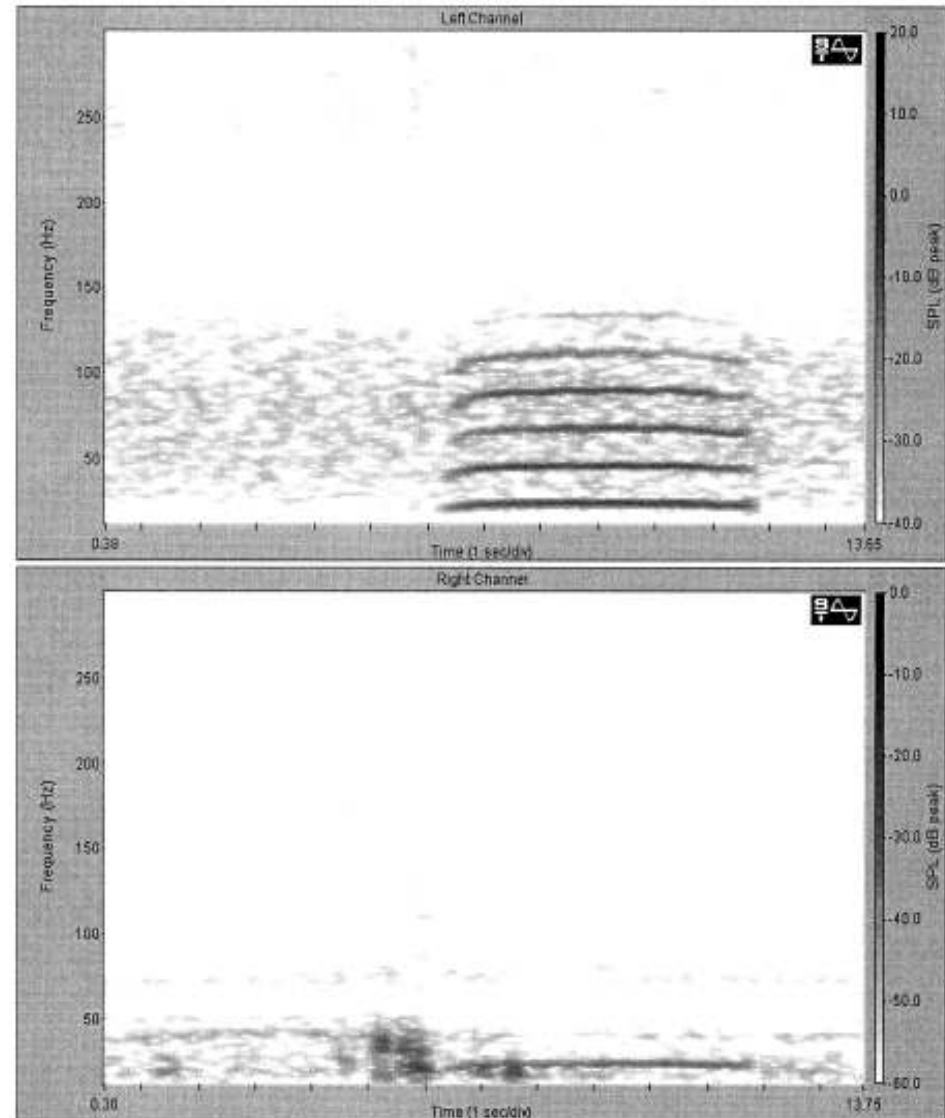


FIG. 4. Acoustic and seismic spectrogram of an Asian elephant vocalization. The fundamental frequency is at 20 Hz, with few monotonic harmonics, the second and third harmonics carrying the most power.



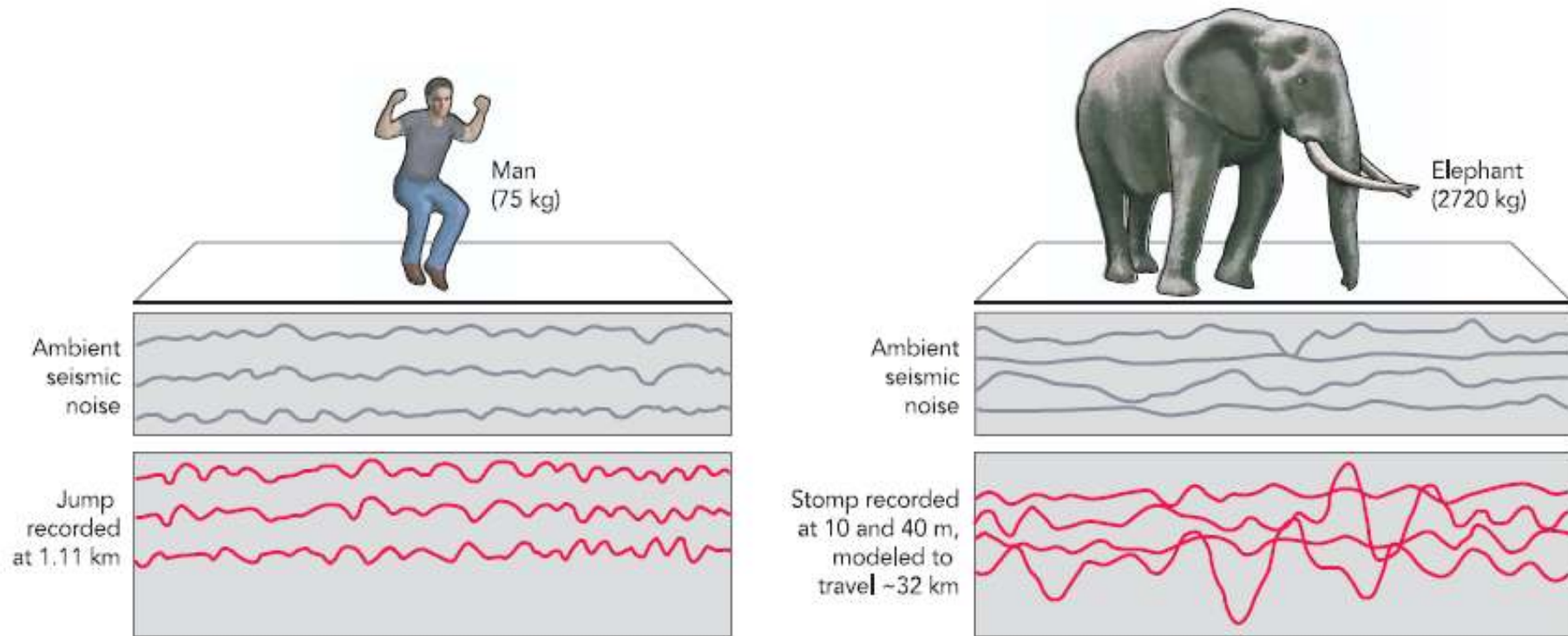
# Comunicazione a onde sismiche

- I vocalizzi a bassa frequenza degli elefanti hanno una firma sonora simile a quella di un motore diesel da nave all'accensione: le dimensioni della laringe e dei cilindri sono le stesse (a=250, c=400 mm)



V20, 7400kW, 1300 rpm

# Comunicazione a onde sismiche

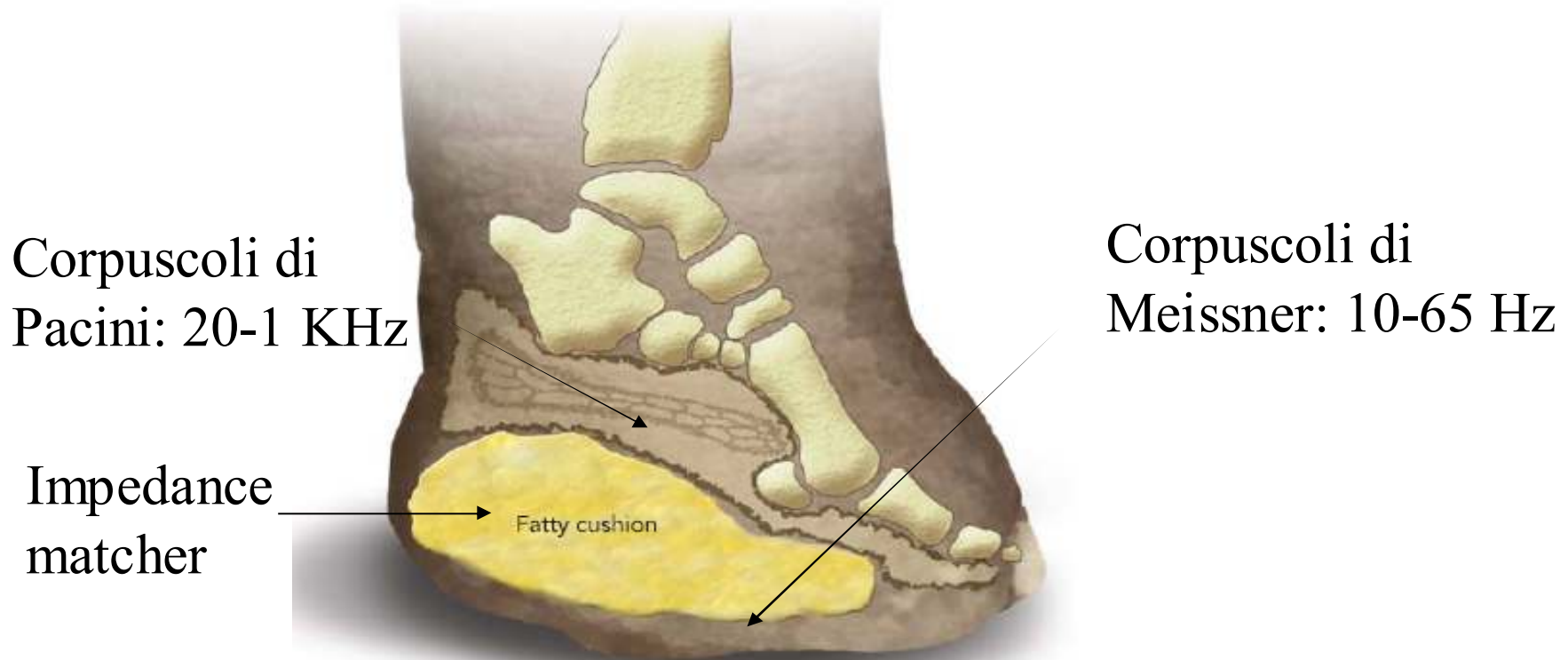


Gli elefanti in corsa producono onde di Rayleigh molto potenti a 10-20 Hz (O'Connell; Arnason & Hart, JASA, 1997; Am. Zool., 2001; Gunther et al., GRL, 2004)

# Comunicazione a onde sismiche

- Ha un range molto maggiore:
  - Le onde sonore si attenuano con la distanza con una funzione  $r^{-2} \sim r^{-1}$
  - Le onde di Rayleigh si attenuano con la distanza con una funzione  $r^{-1} \sim r^{-0.5}$
- E' più stabile:
  - le onde di Rayleigh non sono influenzate dal vento
- E' difficile da analizzare: richiede sensori ad array “tuned” e focalizzabili e software di analisi vettoriali molto più raffinati di quelli usati in sismologia (per non parlare della sismica)

# L'array zampigitale di un elefante: i sensori



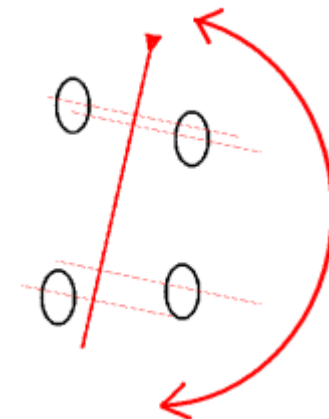
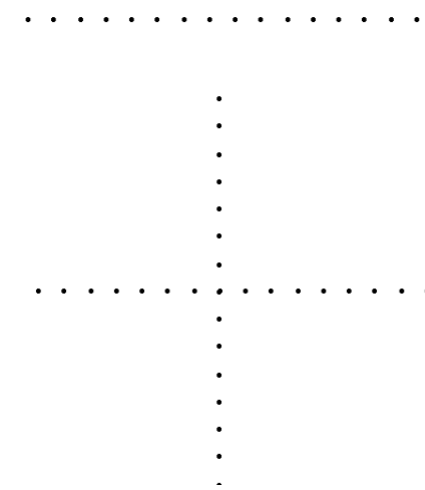
- Ha sensori di moto broad-band con accoppiamento a match di impedenza (quasi nessun sismografo umano ce l'ha), capaci di risolvere i moti Browniani (Makous, et al. J.Neurosc. 1995; Rasmussen&Munger, Anat. Rec., 1996)

# L'array zampigitale di un elefante: la geometria

- Le onde di Rayleigh vicino alla superficie viaggiano a 200- 250 m/s
- A 10 ~ 20 Hz la lungh. d'onda è  $\lambda=10 \sim 20$  m.
- L'interdistanza tra le zampe davanti e dietro degli elefanti è 2 ~ 2.5 m e cioè  $\lambda/8 \sim \lambda/4$  assolutamente perfetta per le analisi di correlazione vettoriale (Mulargia&Castellaro, PRL 2008)
- L'elefante ha altre due zampe che può mettere a piccola distanza davanti o dietro le altre; ciò permette un'analisi vettoriale del campo d'onde

# L'array zampigitale di un elefante: la geometria

- Gli array della sismica hanno disposizione 1) elementare e 2) fissa
- L'array dell'elefante è vettorizzabile: l'elefante lo ri-orienta in modo dinamico
- L'array dell'elefante è fine-tunable in frequenza: l'elefante ha altre due zampe che può mettere a piccola distanza davanti o dietro le altre regolando  $\lambda_{\max}$  (tunable dynamic coarray)



# Conclusione: perché gli elefanti hanno battuto l'uomo?

- Gli elefanti non hanno un “sesto senso”, non prevedono il futuro, né prevedono i terremoti
- Gli elefanti semplicemente conoscono e usano la Sismologia delle onde superficiali meglio dell'uomo
- Hanno sensori e capacità di analisi di campo d'onde vettoriale molto più raffinati di quelli dei sismologi
- Tanto da essere in grado di comunicare efficacemente attraverso onde sismiche
- Hanno un sistema di allerta e “Protezione Civile” che opera h24

# Conclusione finale: perché gli elefanti hanno battuto l'uomo?

- Il terremoto ha prodotto abbondanti onde di Rayleigh a partire da decine di minuti prima dello tsunami, e che sono durate molti minuti nel campo diffuso delle onde di coda
- Gli elefanti ne hanno localizzato la provenienza – dal mare – e sono fuggiti dalla parte opposta, mettendosi in salvo
- Gli elefanti hanno “avvisato” gli altri animali



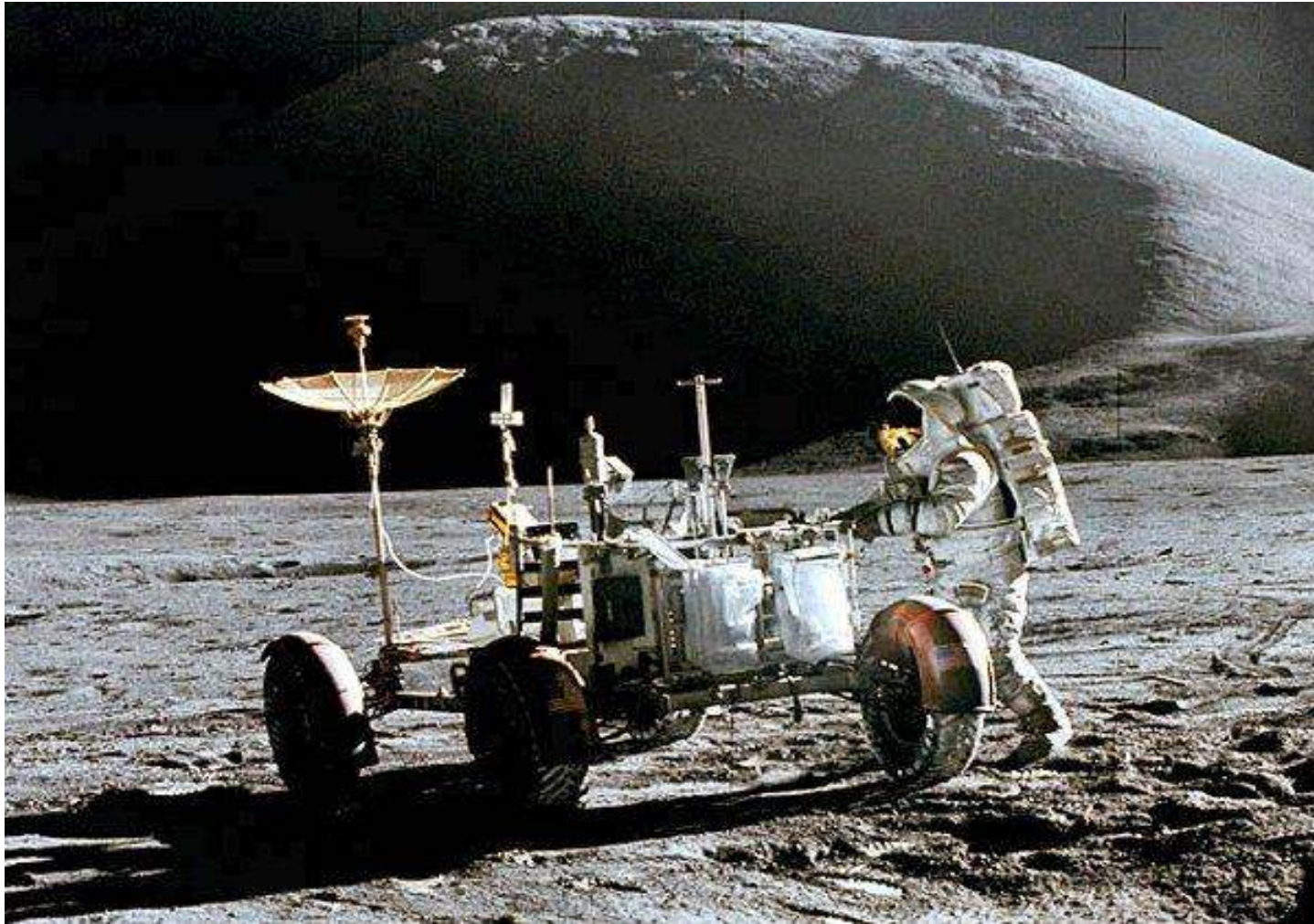
Conclusione generale



VIVIAMO NELL'ERA DIGITALE:  
PERFETTA E SUPEREFFICIENTE



**CAPACE DI MISSIONI  
IMPOSSIBILI**



PERSINO DI CONQUISTARE  
ALTRI MONDI

LA DOMANDA E'



RIUSCIRA' LA NOSTRA TECNOLOGIA  
"DIGITALE" A RIPRODURRE QUELLA  
"ZAMPIGITALE" DEGLI ELEFANTI?