

# **Il tremore sismico: un rumore pieno di segnale**

Francesco Mulargia

Dipartimento di Fisica & Astronomia  
UniBO

# La misura del moto del suolo

Misurare il moto del suolo è traguardo relativamente recente

perseguito per studiare i terremoti

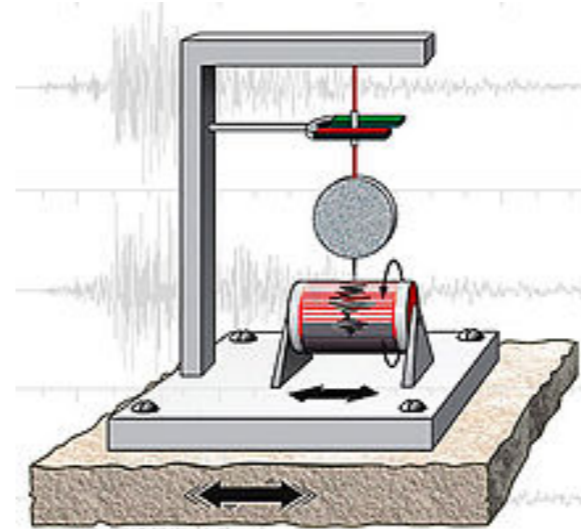


e per esplorare (= sfruttare) il sottosuolo

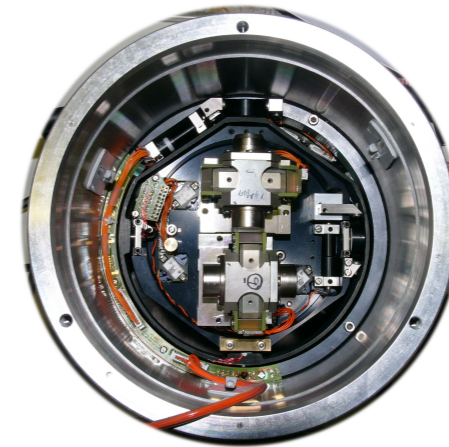


# La misura del moto del suolo

- Misurare il moto del suolo è diventato realtà quando si è compreso il ruolo dell'inerzia

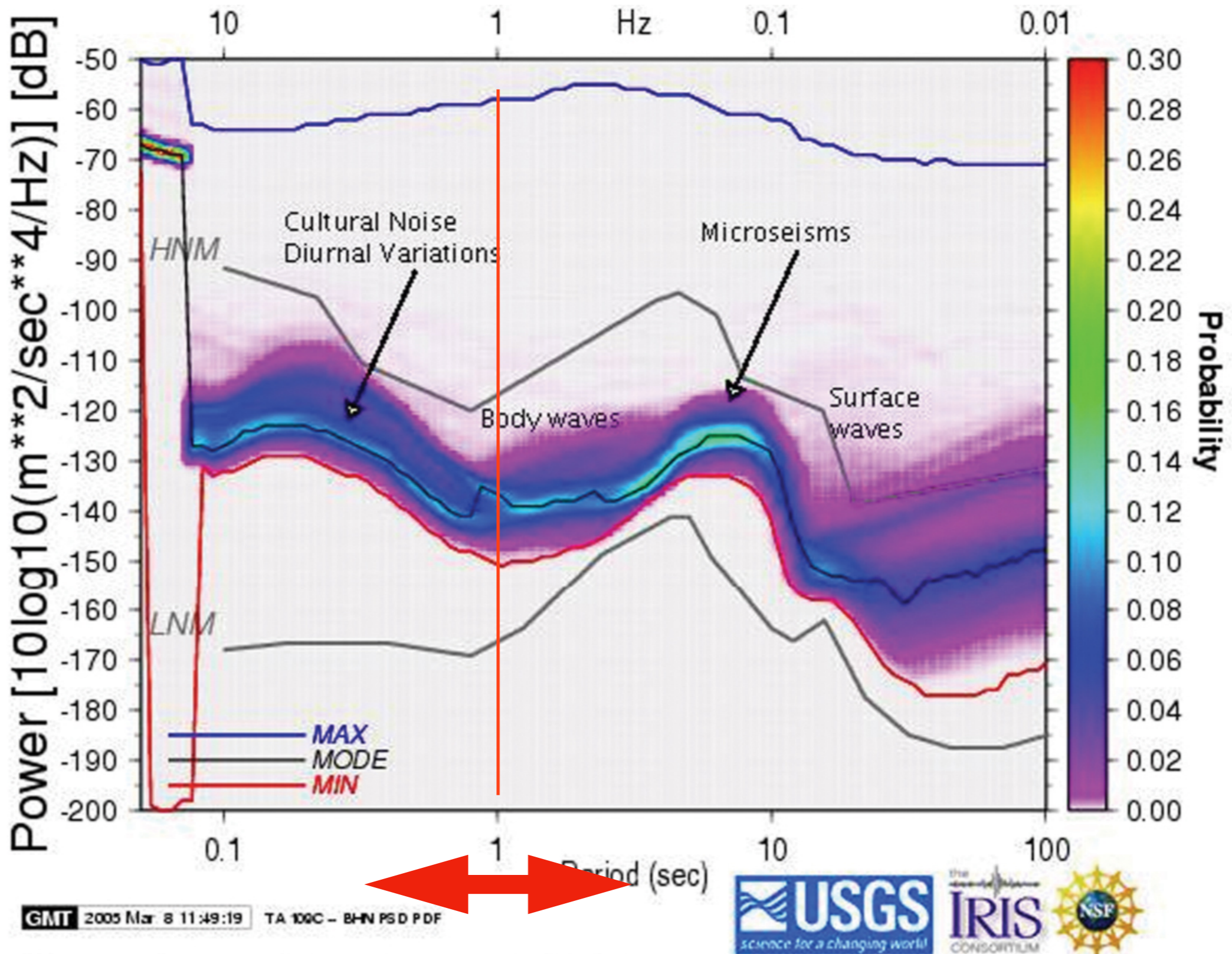


- Misura resa facile dall'avvento dell'elettronica digitale



- Misura che mostra come la Terra "tremi" sempre, anche senza terremoti

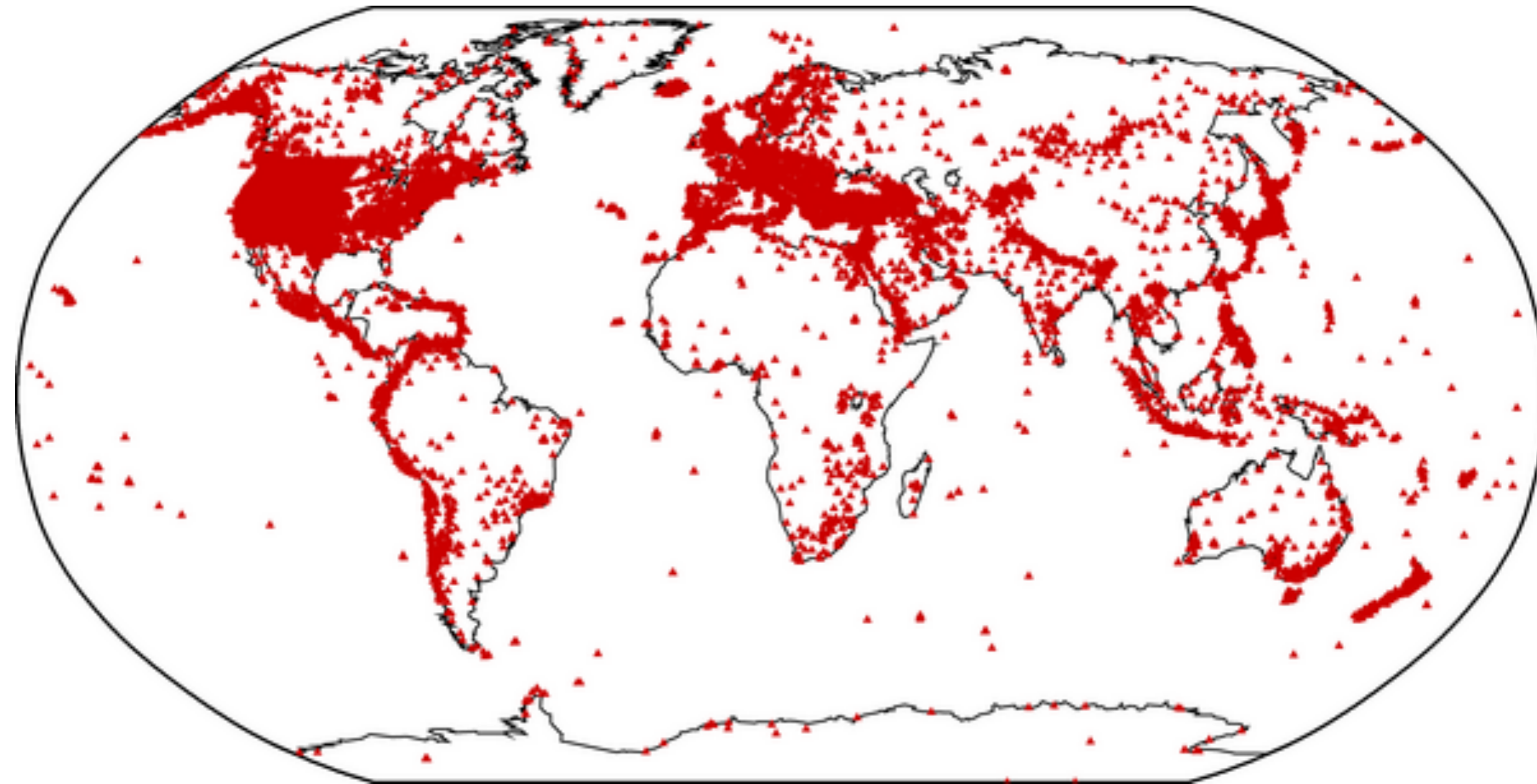
# Tremore antropico e tremore naturale



$f > 1$  Hz tremore antropico

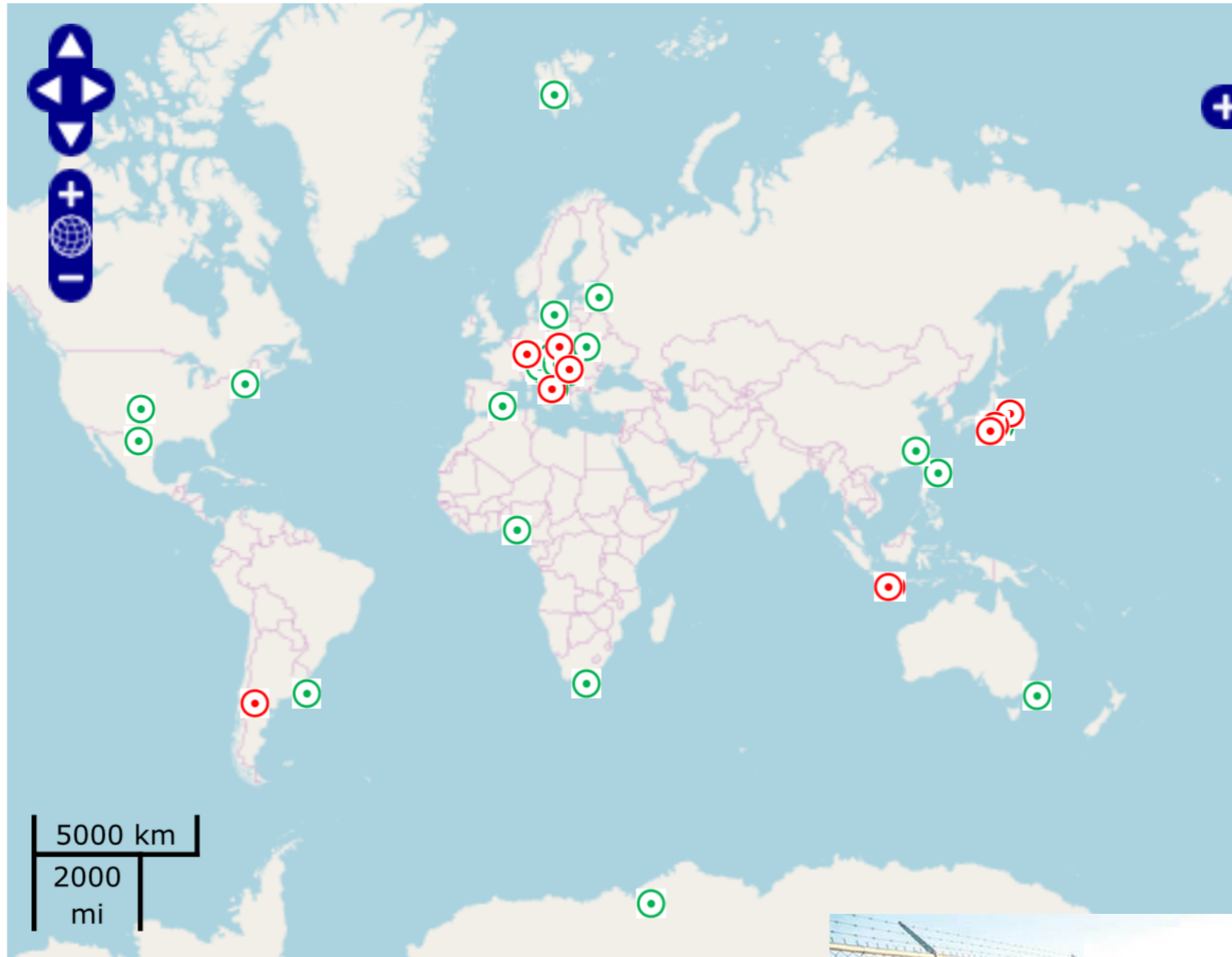
$f < 1$  Hz tremore naturale

# Le reti sismiche



$\sim 10^4$  sismografi digitali a larga banda ( $.001 < f < 10$  Hz)

# La rete gravimetrica SG-IGETS



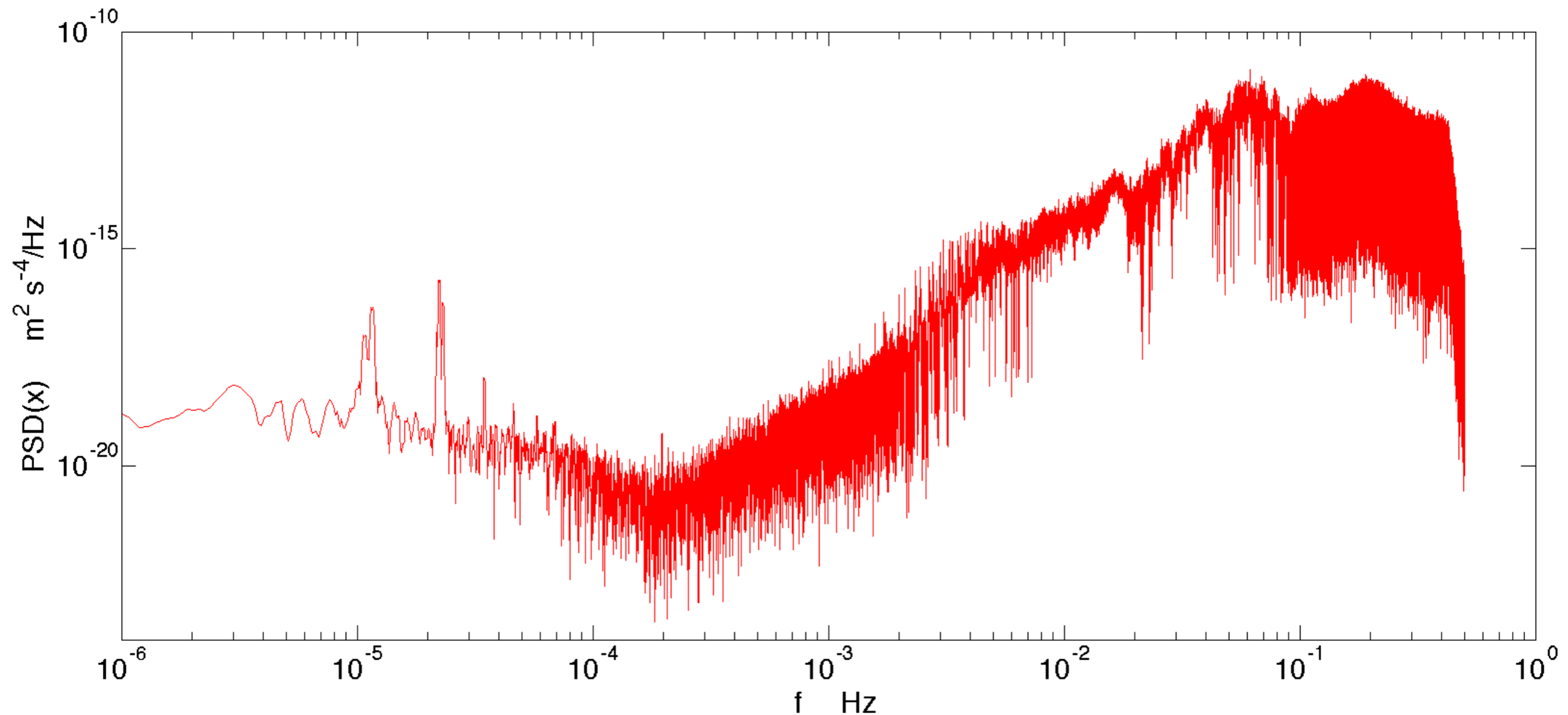
~25 gravimetri assoluti  
supercond. ( $f < 0.5$  Hz)



# DATA OF SUPERCONDUCTING ABSOLUTE GRAVIMETERS

- Data available since the last few years of previous millennium
- Only vertical component
- Corrected for tides and pressure by GFZ- Potsdam within a IAG-GGP project
- Web available at [igetsftp.gfz-potsdam.de](http://igetsftp.gfz-potsdam.de)

# Tremore naturale: lo spettro è noto con grande dettaglio

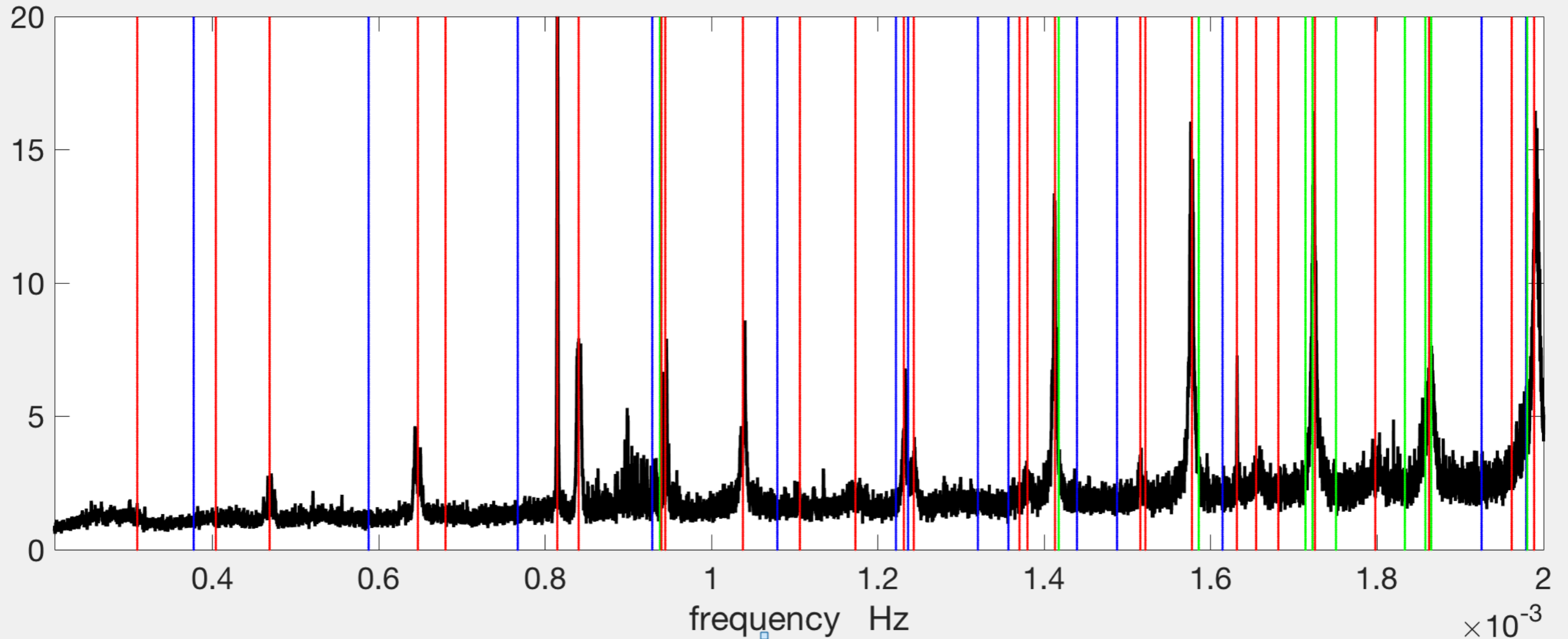


stacked displ. spectrum 13 supergrav. 11 yrs

(Mulargia, Monthly Not. Roy. Astr. Soc. 2017)

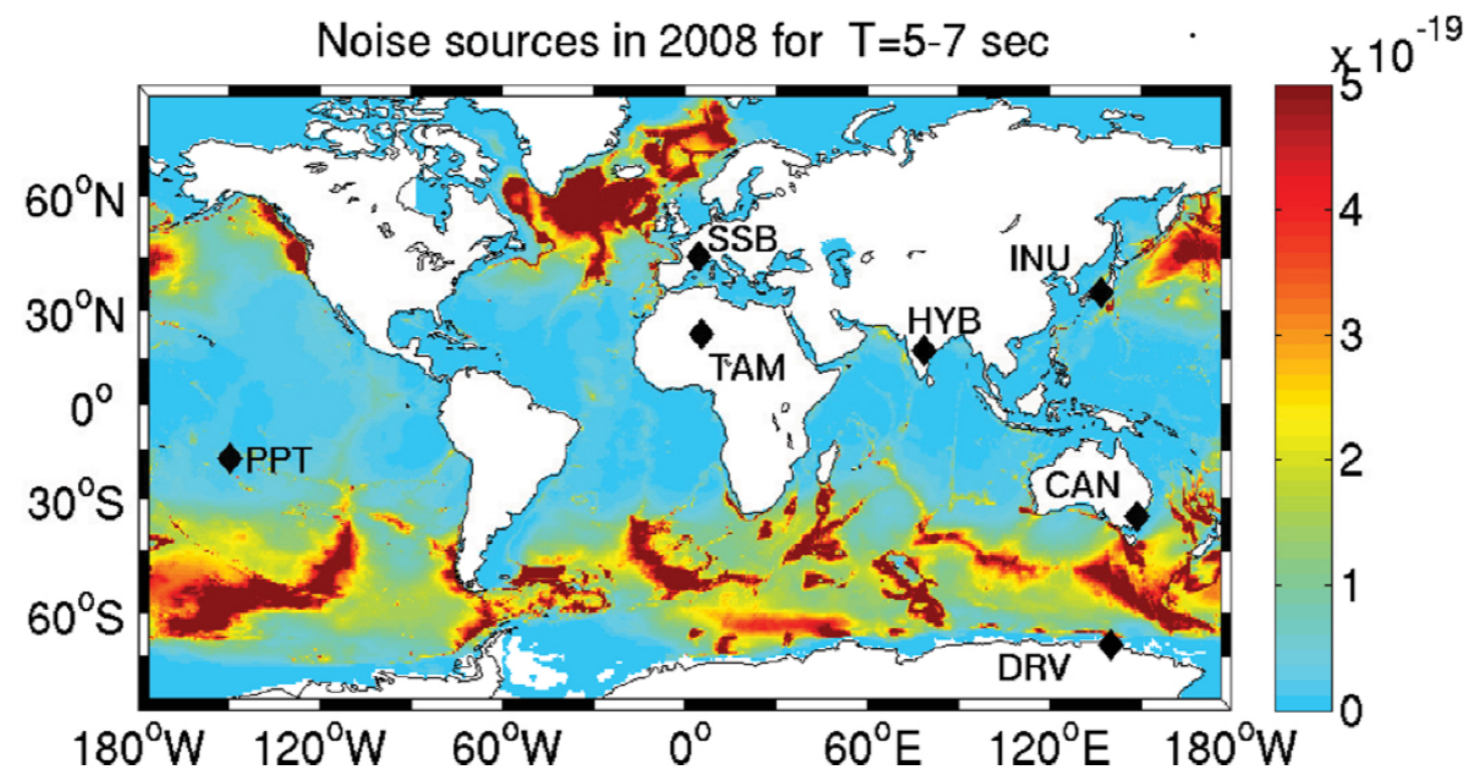
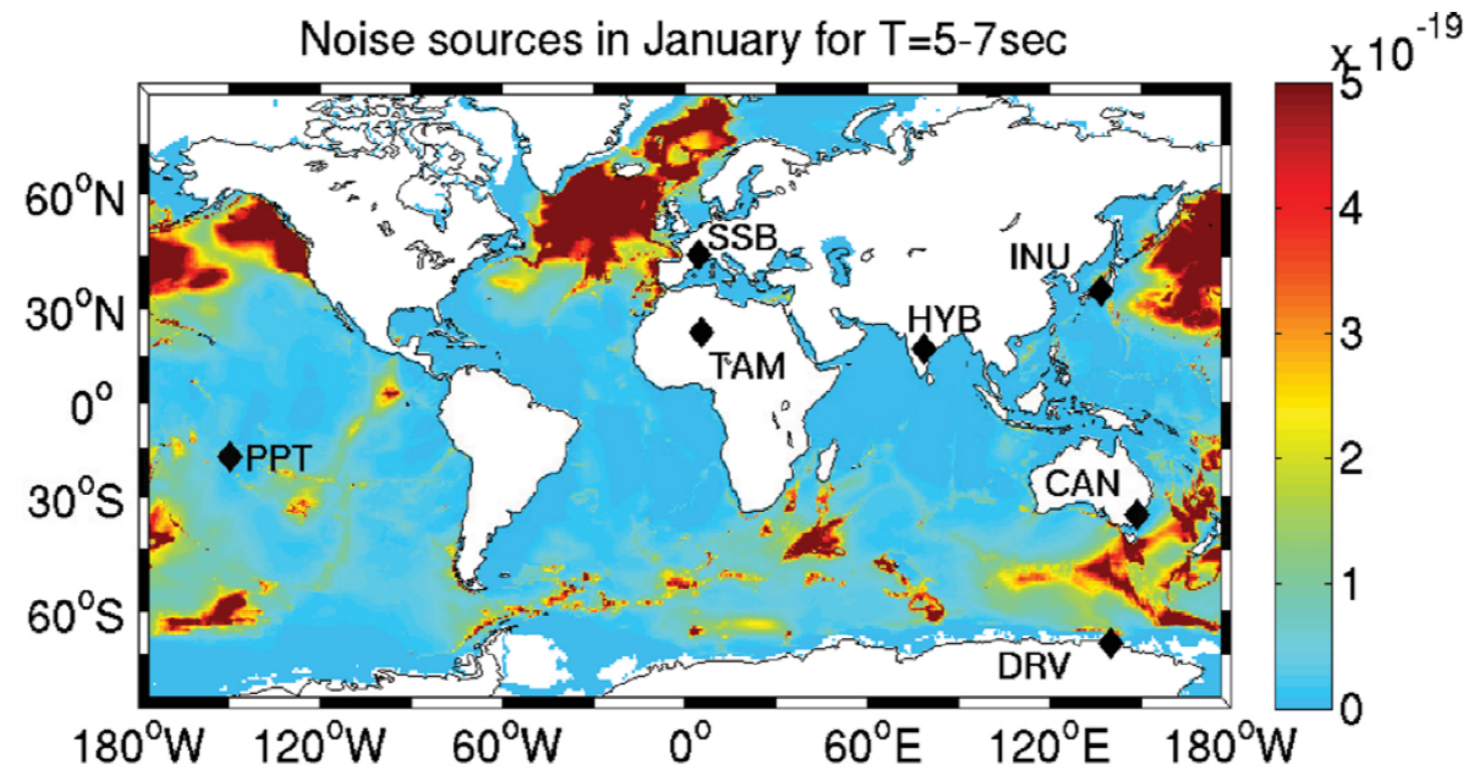


# Tremore: rumore o segnale?



zoomando attorno al mHz emergono i normal modes della Terra, che la sismologia classica vede solo dopo in grandi terremoti

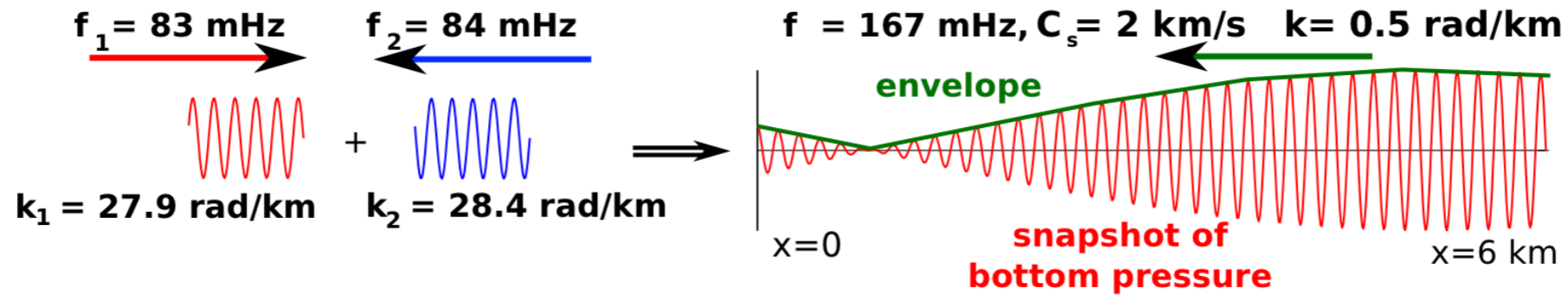
# Origine del tremore naturale: dove?



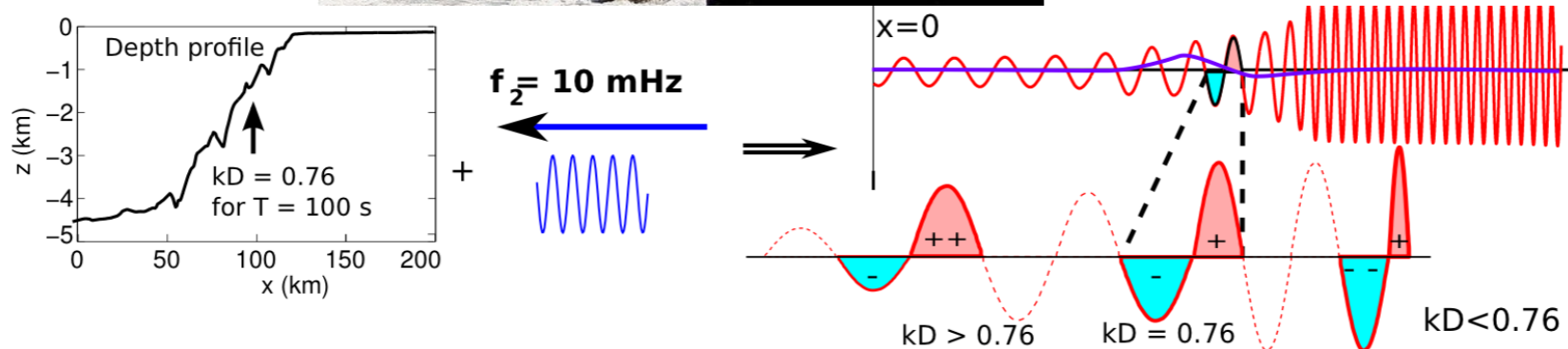
Negli oceani, ad alte latitudini

# Origine del tremore naturale: le onde di mare

1) al largo



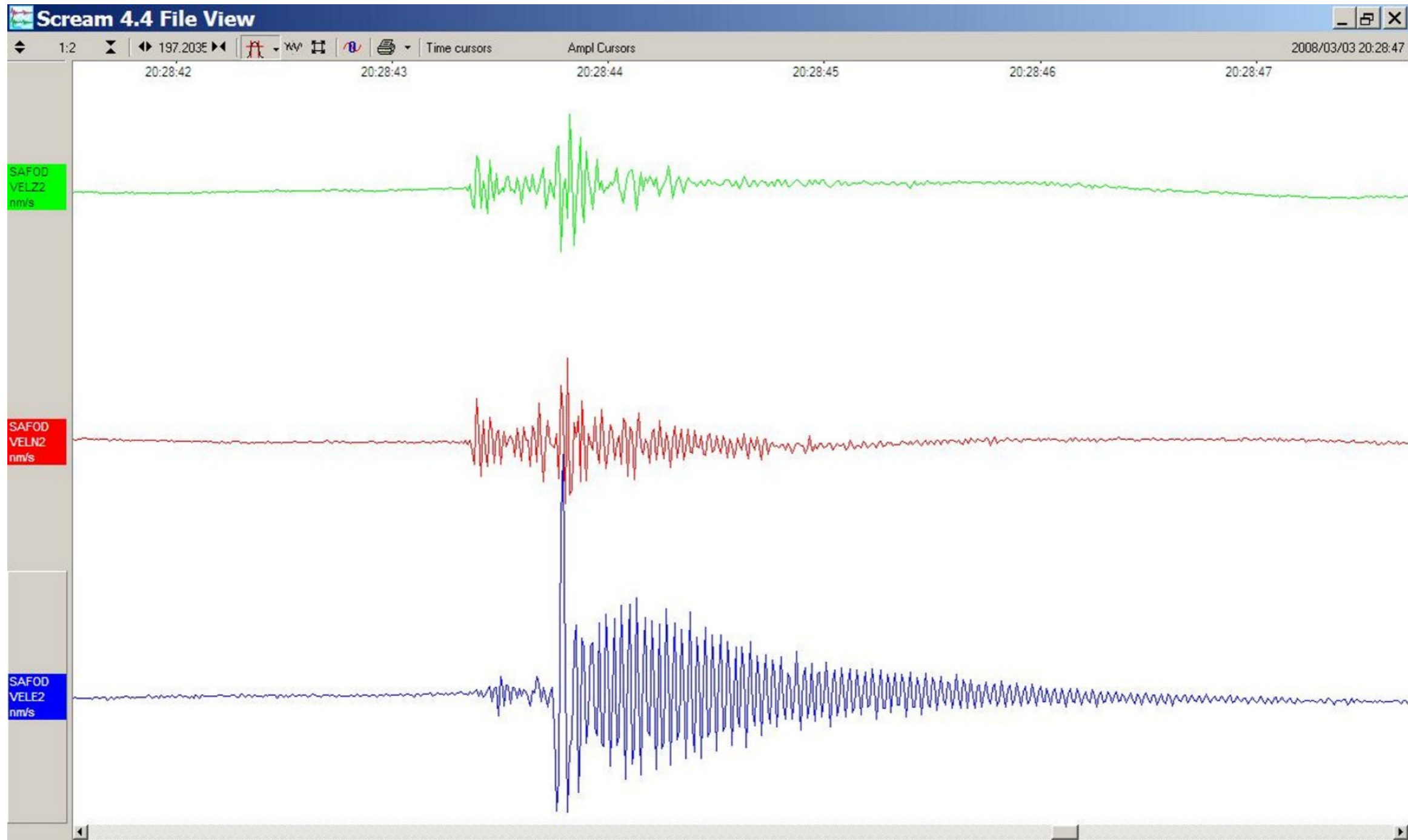
2) a riva



# Tremore sismico: rumore da filtrare o segnale da analizzare?

*Sismologia classica:*

*segnale = terremoto (o impulso artificiale)*

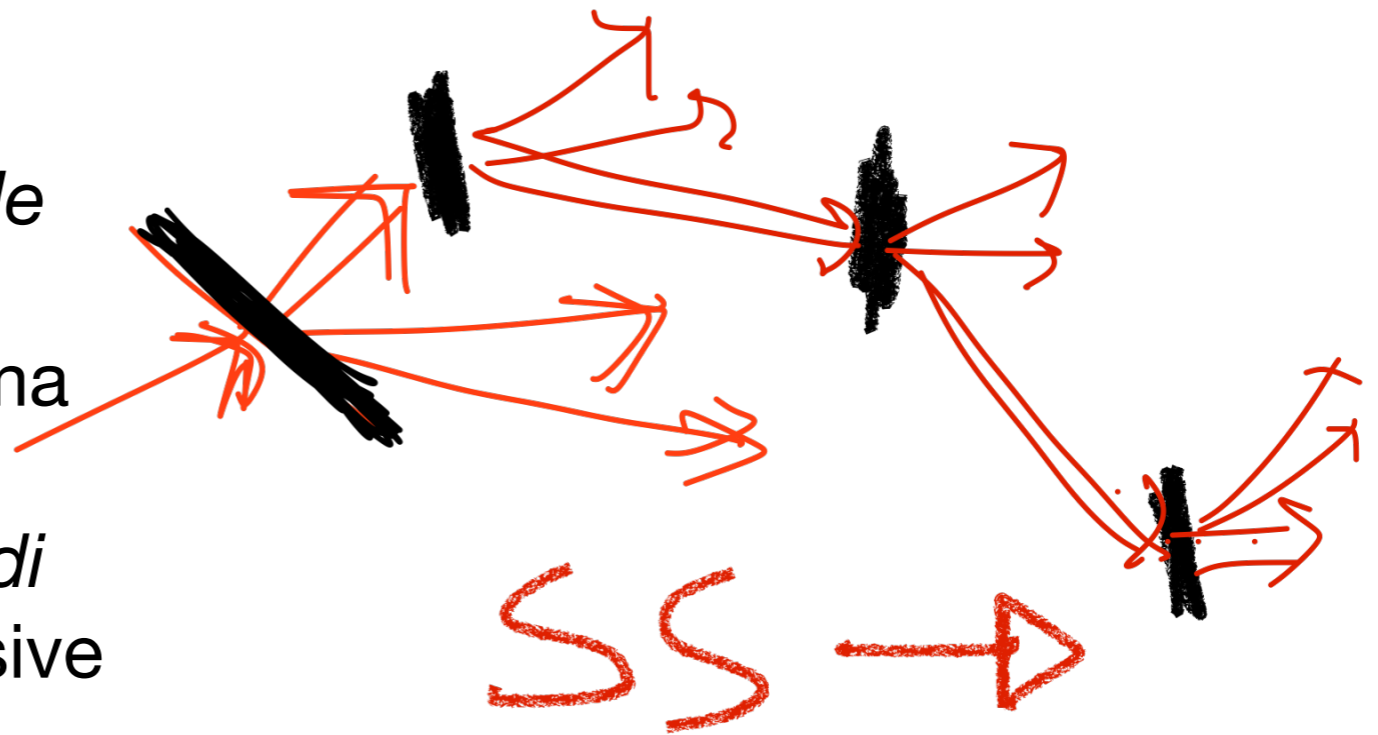


# Tremore naturale: come modellarlo?

Approccio classico (Longuet-Higgins, Phil. Trans. Roy. Soc. 1950): interazione meteomarina (scatter nonlin. onda-onda):  $F(\omega)$  è funzione della sorgente.

Approccio sismologico moderno (Aki, 1967); è un fenomeno di *single scattering* (SS):  $F(\omega)$  è funzione della sorgente e della struttura, ma il problema è trattabile solo semiempiricamente per le *onde di coda* tramite ray-tracing successive di scatteratori di Huygens

Questo crea un problema: *che onde sono?*



# Tremore naturale: onde di volume o di superficie? Tutte

	0				0.5					1				1.5				2			Hz
Douze 1968					R1/P					R1/P								R3/P			
Toksoz 1964/67	Ro		R+	P/R+	P																
Li 1984													R+	and / or	P						=> 20hz
Horike 1985							Ro								Ro / R+						=> 3 hz
Yamanaka 1994				Ro																	

**P** = Body waves

**R $n$**  = Rayleigh waves

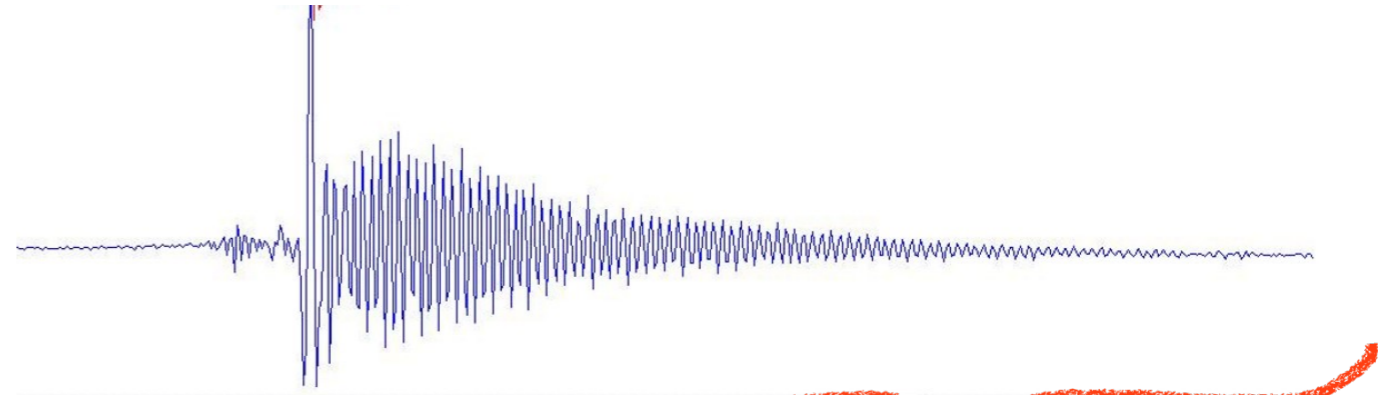
$n=0$  : fundamental mode

$n=1,2 \dots$  :  $n$  higher mode

$n=+$  : higher modes (no order precision)

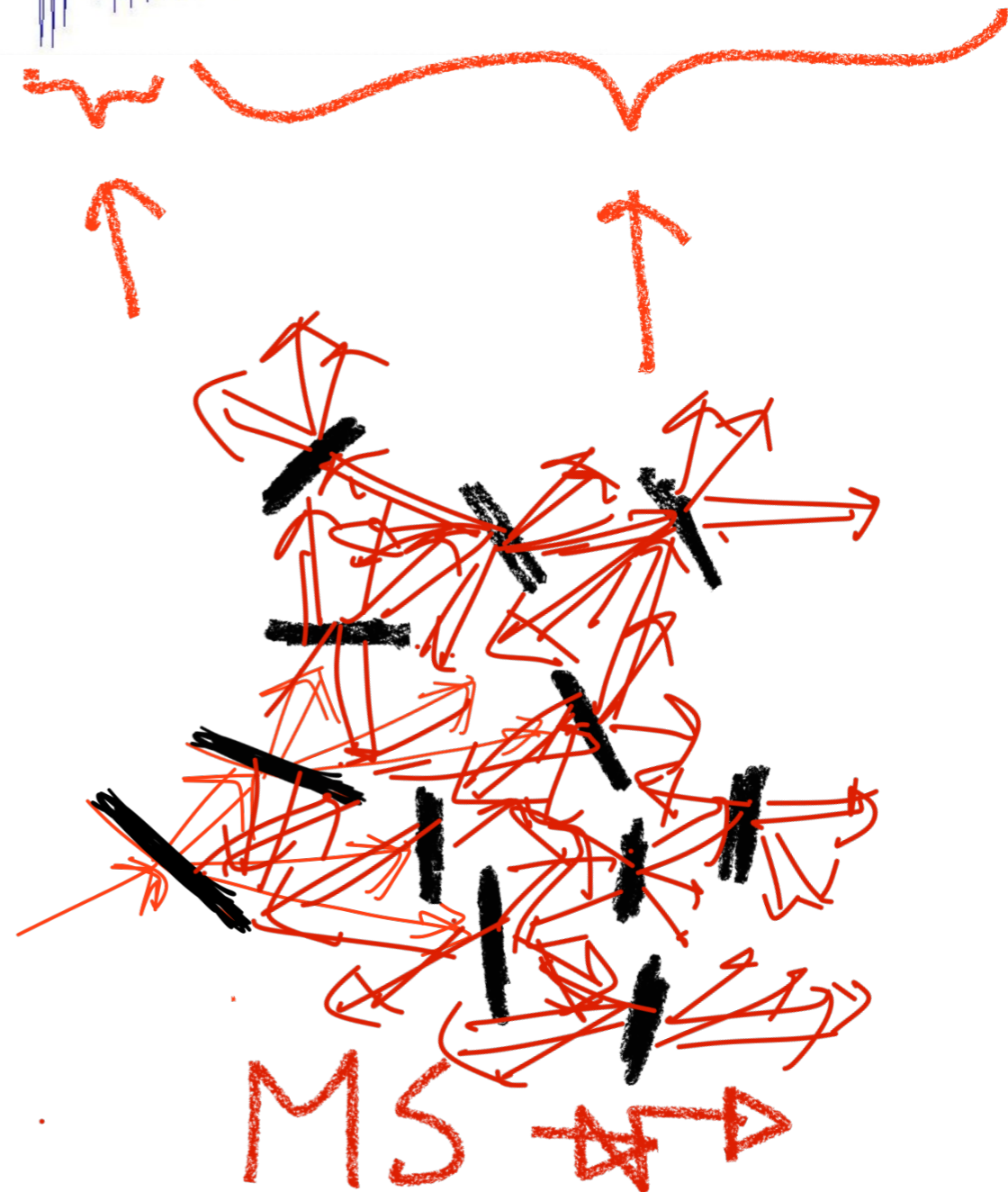
# SS è un modello valido?

Consideriamo le onde di coda



$$length_{coda} > 10 \times (length_{body+surface})$$

Quindi le onde di coda hanno  
“viaggiato molto”: scattering multiplo  
(MS) e non singolo (SS)!



# Trattare i campi d'onda MS

Il problema non è risolvibile analiticamente

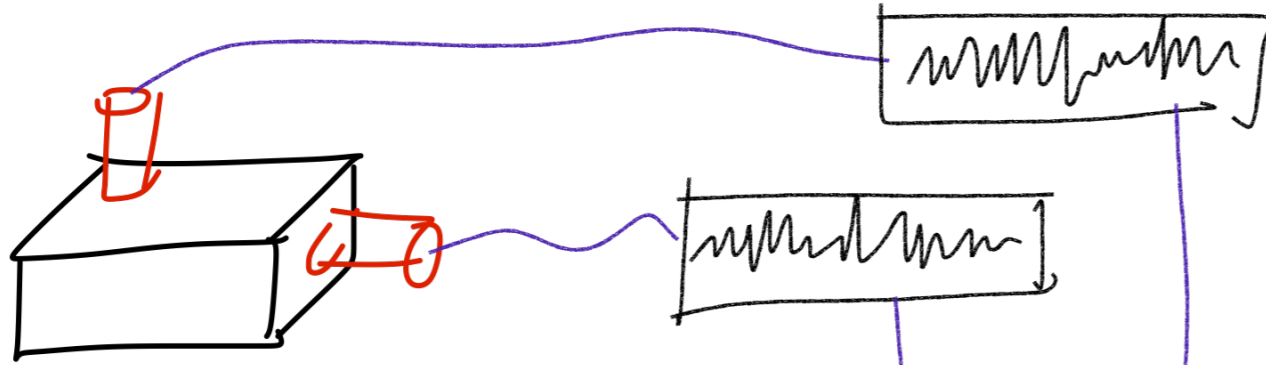
Ma gli scatteratori naturali sono spesso autosimili: è possibile un approccio statistico-meccanico

Quindi in ciascun punto esiste un campo isotropo random di onde piane: *campo d'onde diffuso*.

In un campo d'onde diffuso la crosscorrelazione spaziale di rumore è la f. di Green di un impulso: **sismologia passiva**



# in laboratorio: misure ultrasoniche passive



(Weaver&Lobkis, Phys.Rev.Lett. 2001)

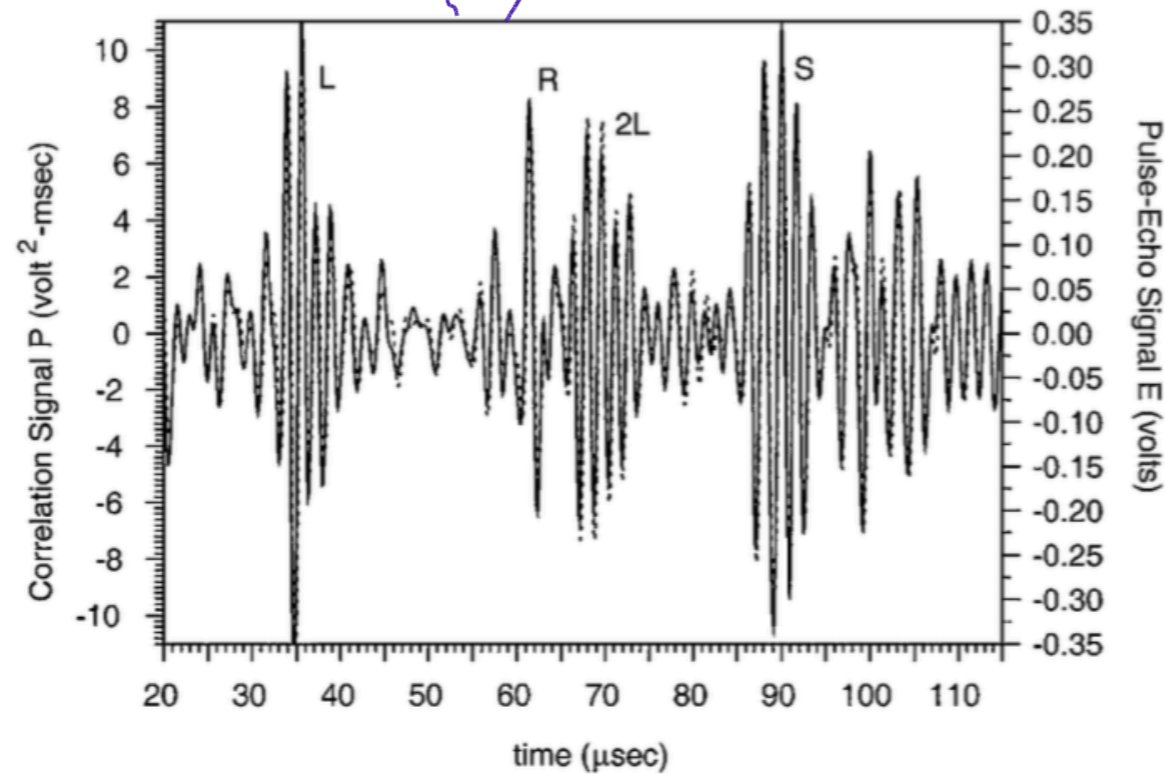
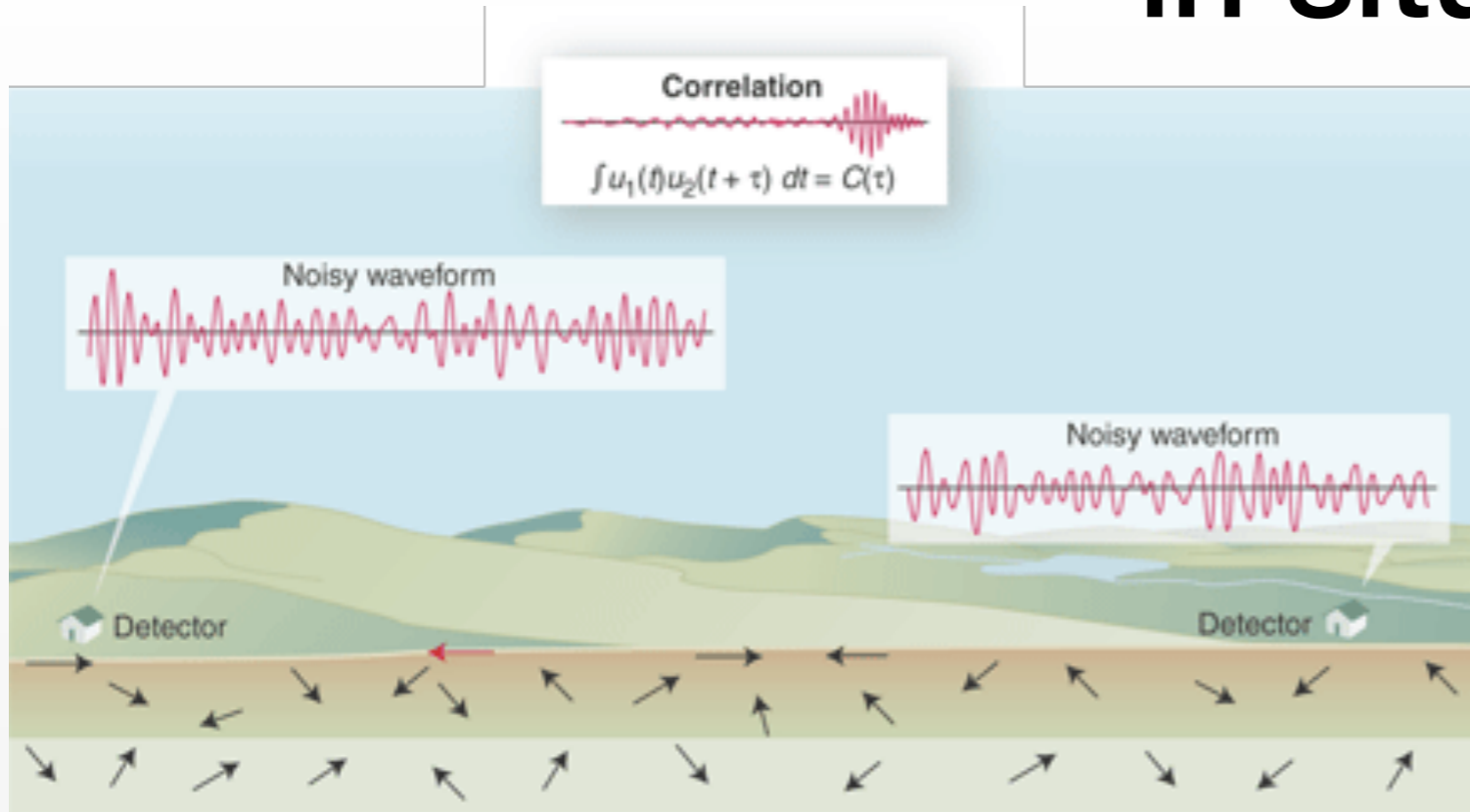


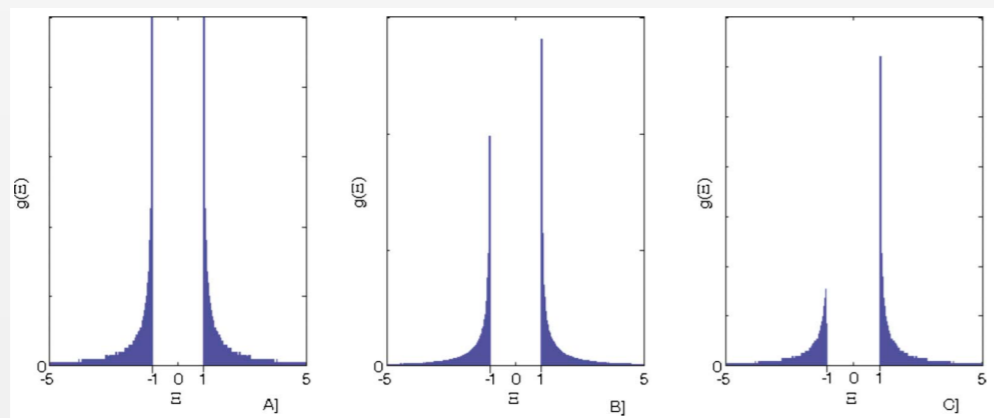
FIG. 2. Comparison of the noise autocorrelation function  $P$  (solid line) and the direct pulse/echo signal  $E$  (dotted line). They are substantially the same. The arrivals are not crisp, due to the long ring time of the transducer that was designed for sensitivity

# in situ



Xcorrelation=f. Green di sorgente impulsiva in ciascun detector se il campo d'onde è diffuso

(Snieder, Phys.Rev.E. 2004)



in generale il campo d non è diffuso, ma la proprietà vale lo stesso, senza simmetria

(Mulargia & Castellaro, Phys.Rev.Lett. 2008)

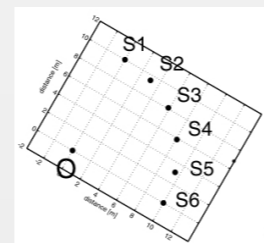
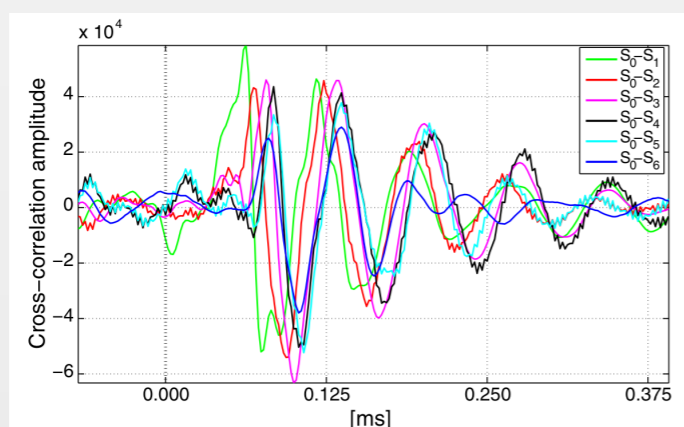
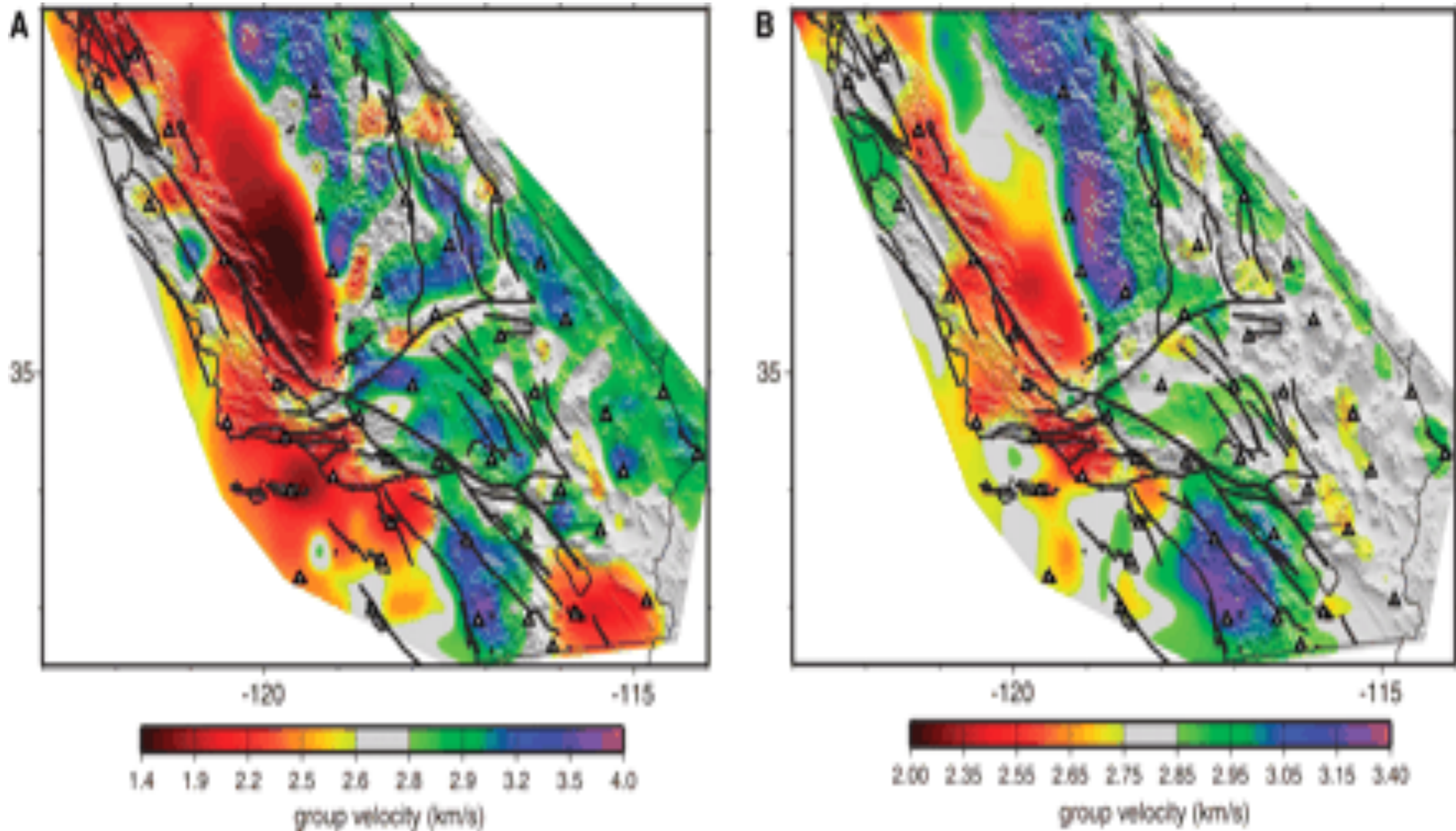


FIG. 2 (color online). The noise correlation function for the couples  $O-S_j$ ,  $j = 1, \dots, 6$

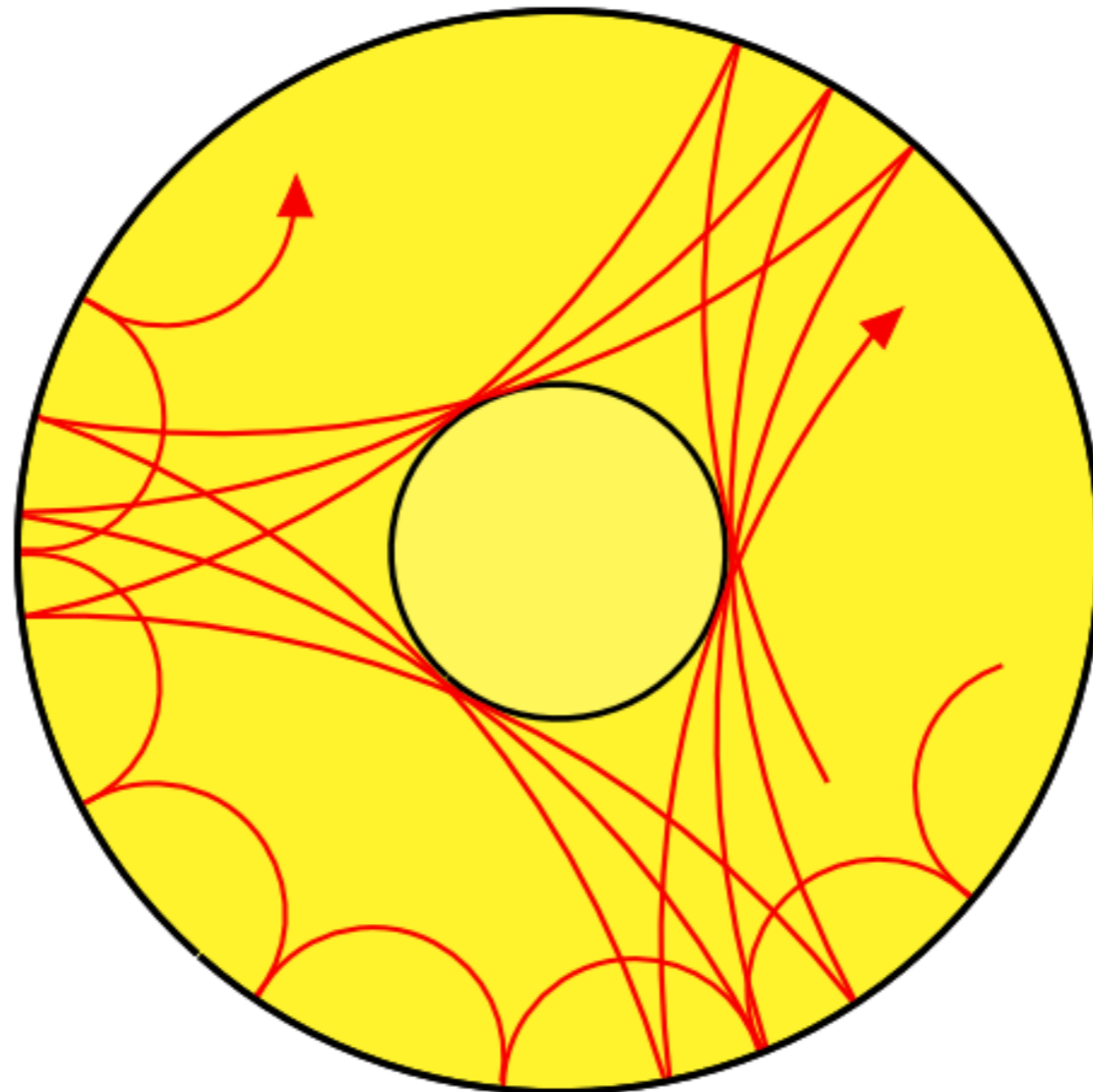
# Applicazione 1) - sismologia passiva: imaging del sottosuolo



(Shapiro et al, Science 2005)

# Applicazione 1) - Sismologia passiva: imaging del sottosuolo anche extraterrestre

**Asterosismologia:** xcorr del tremore della  
superficie delle stelle rivela la struttura interna



(Walker et al. Astr.Soc.Pac. 2003)

# Applicazione 2) - risposta sismica degli edifici



Primo periodo  
lungo X: 0.500 sec  
(2.00 Hz)



Primo periodo  
lungo Y: 0.460 sec  
(2.17 Hz)



Primo periodo tor-  
sionale: 0.149 sec  
(6.71 Hz)



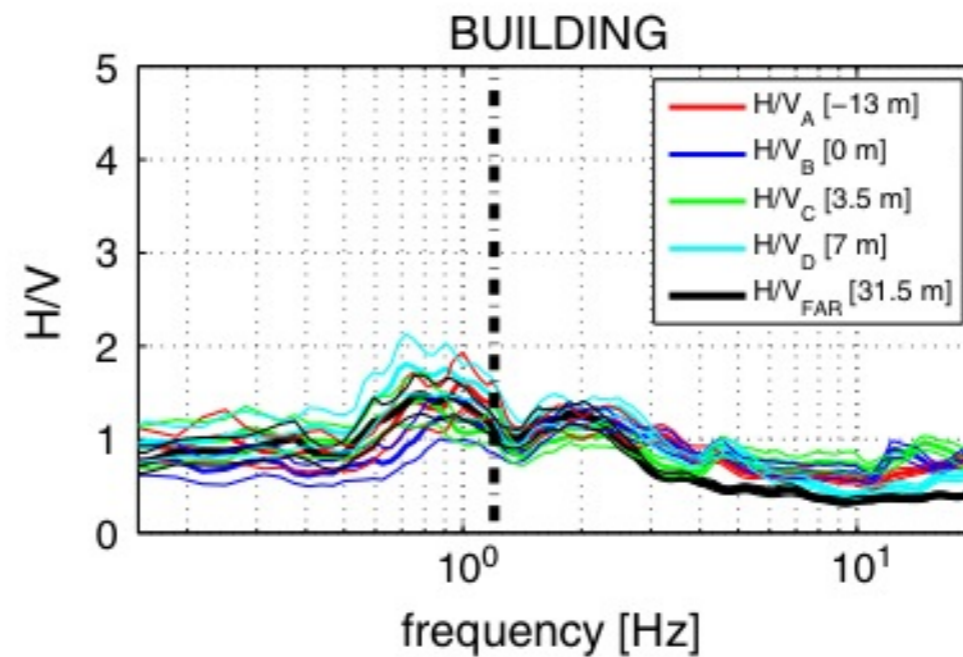
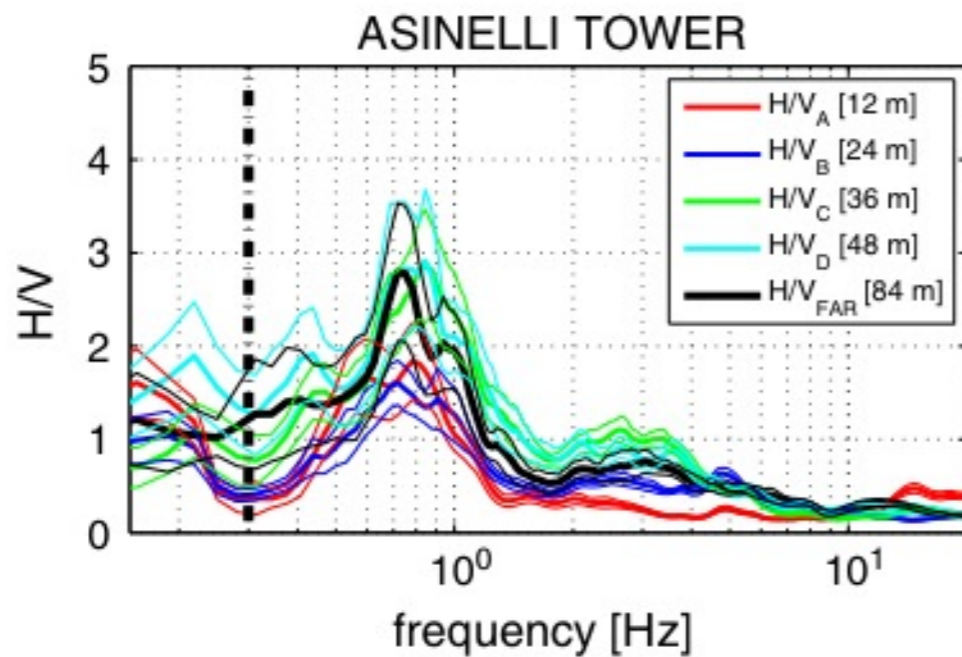
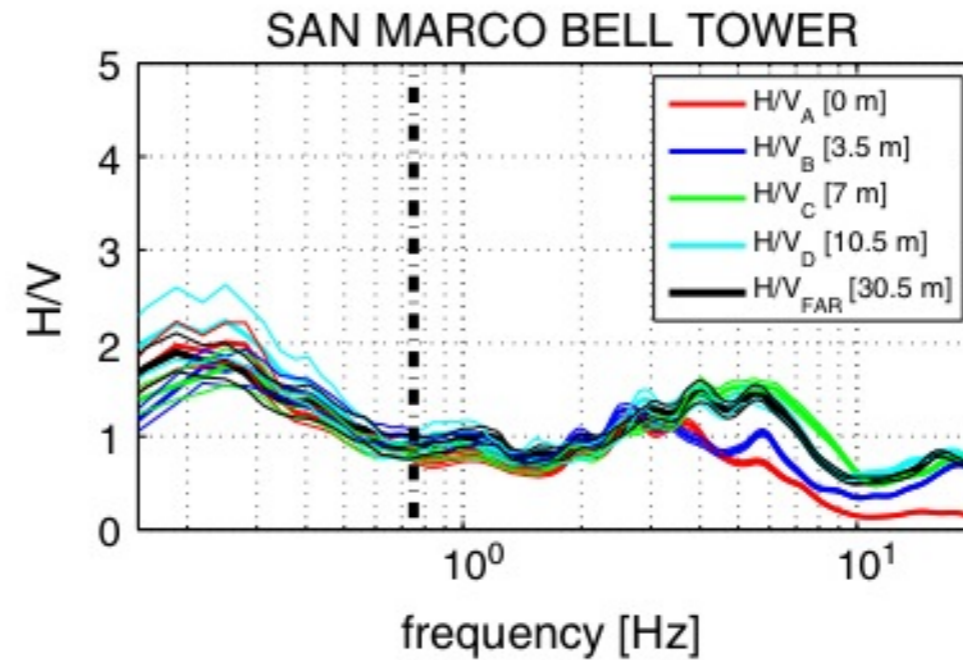
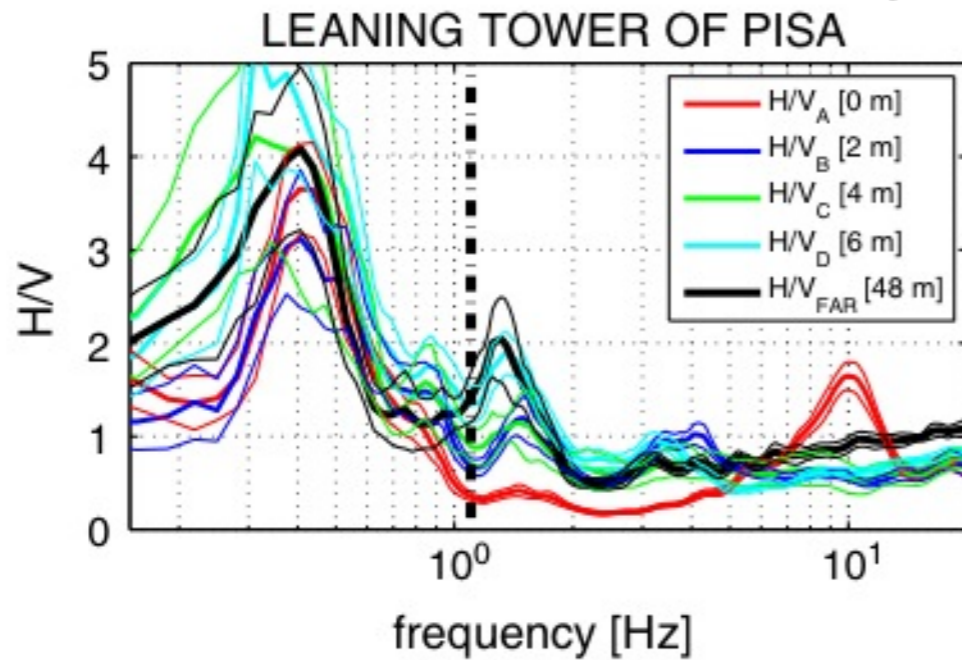
Secondo periodo  
lungo X: 0.117 sec  
(8.55 Hz)



Secondo periodo  
lungo Y: 0.111 sec  
(9.01 Hz)

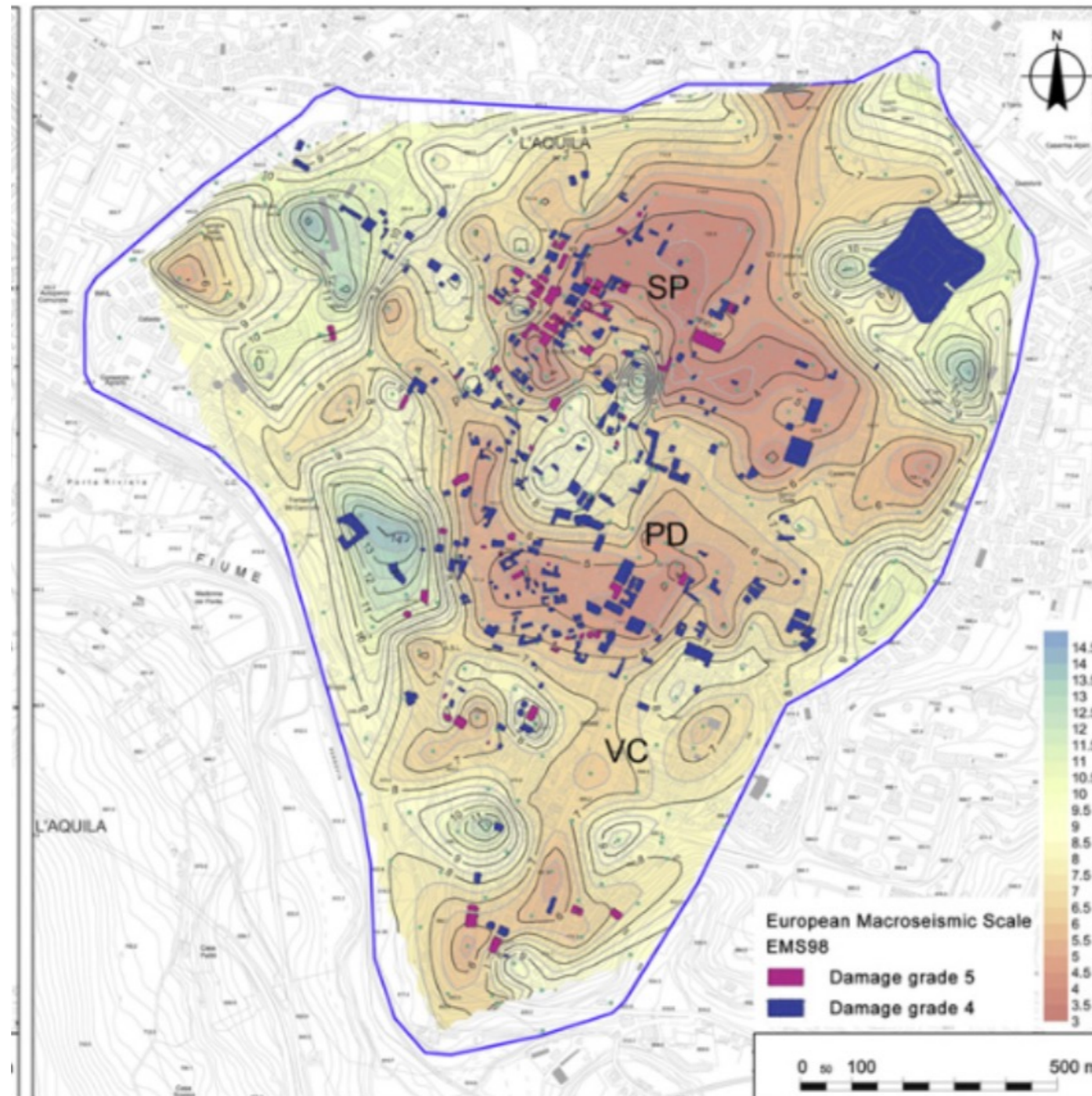
# Applicazione 2) - risposta sismica degli edifici

S. Castellaro and F. Mulargia  
Bull.Seismol.Soc.Am.2010



**Risposta del suolo + risposta degli edifici =  
amplificazione sismica**

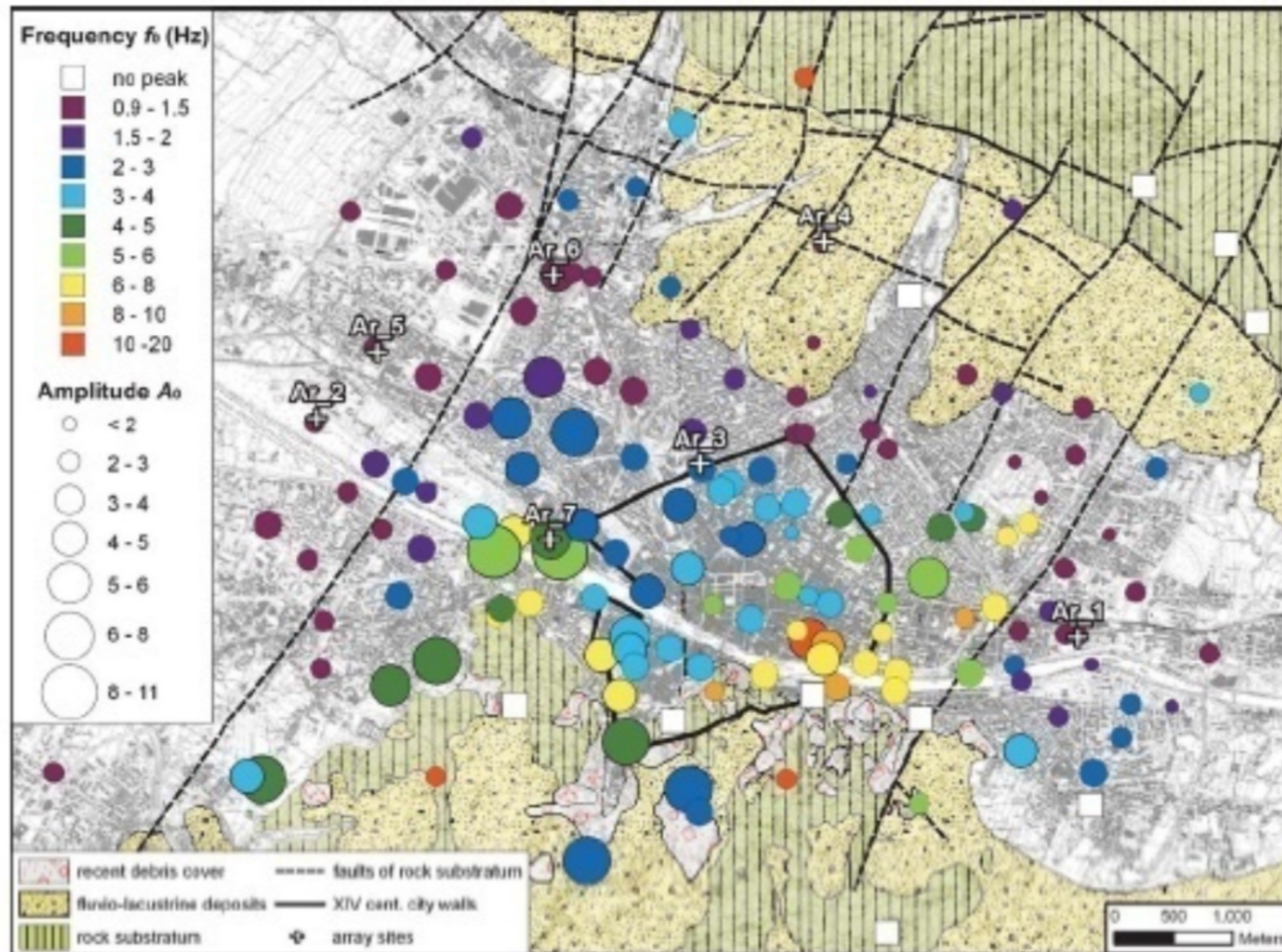
# Applicazione 3) - risposta sismica del sottosuolo



(Del Monaco et al, Eng.Geol.2013)

2009 L'Aquila: corrispondenza 1-1 picchi tremore e danni

# Applicazione 3) - risposta sismica del sottosuolo



Il centro di Firenze

(D'Amico et al,  
Bull.Seismol.Soc.Am..2008)



# Applicazione 4) - risposta sismica del sottosuolo+edifici=amplif. sismica



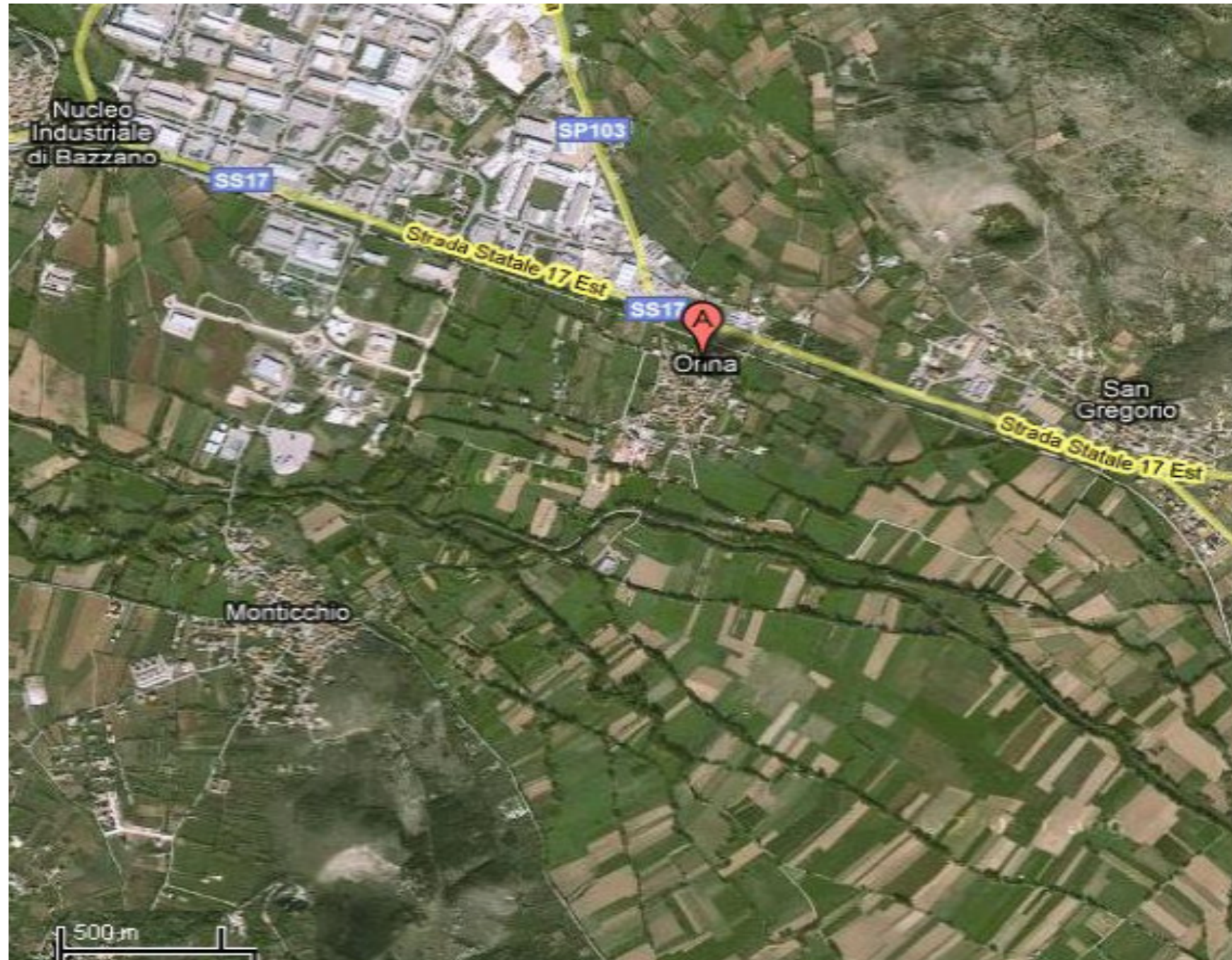
Distruzione totale a Onna, 41 vittime, il  
15% degli abitanti



Pochi cornicioni caduti a  
Monticchio, nessuna vittima

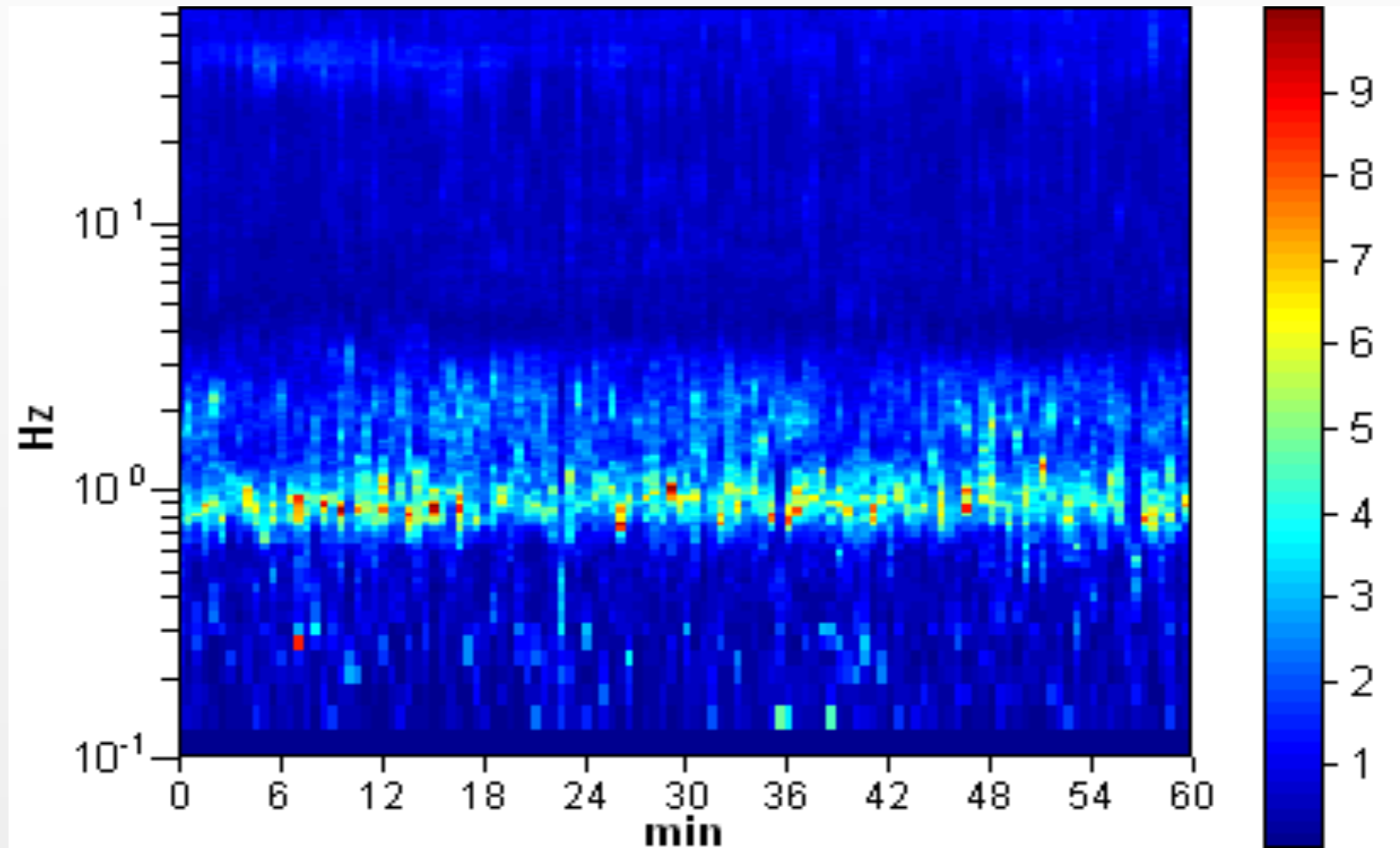
Terremoto de L'Aquila, Aprile 2009

# Applicazione 4) - risposta sismica del sottosuolo+edifici=amplif. sismica

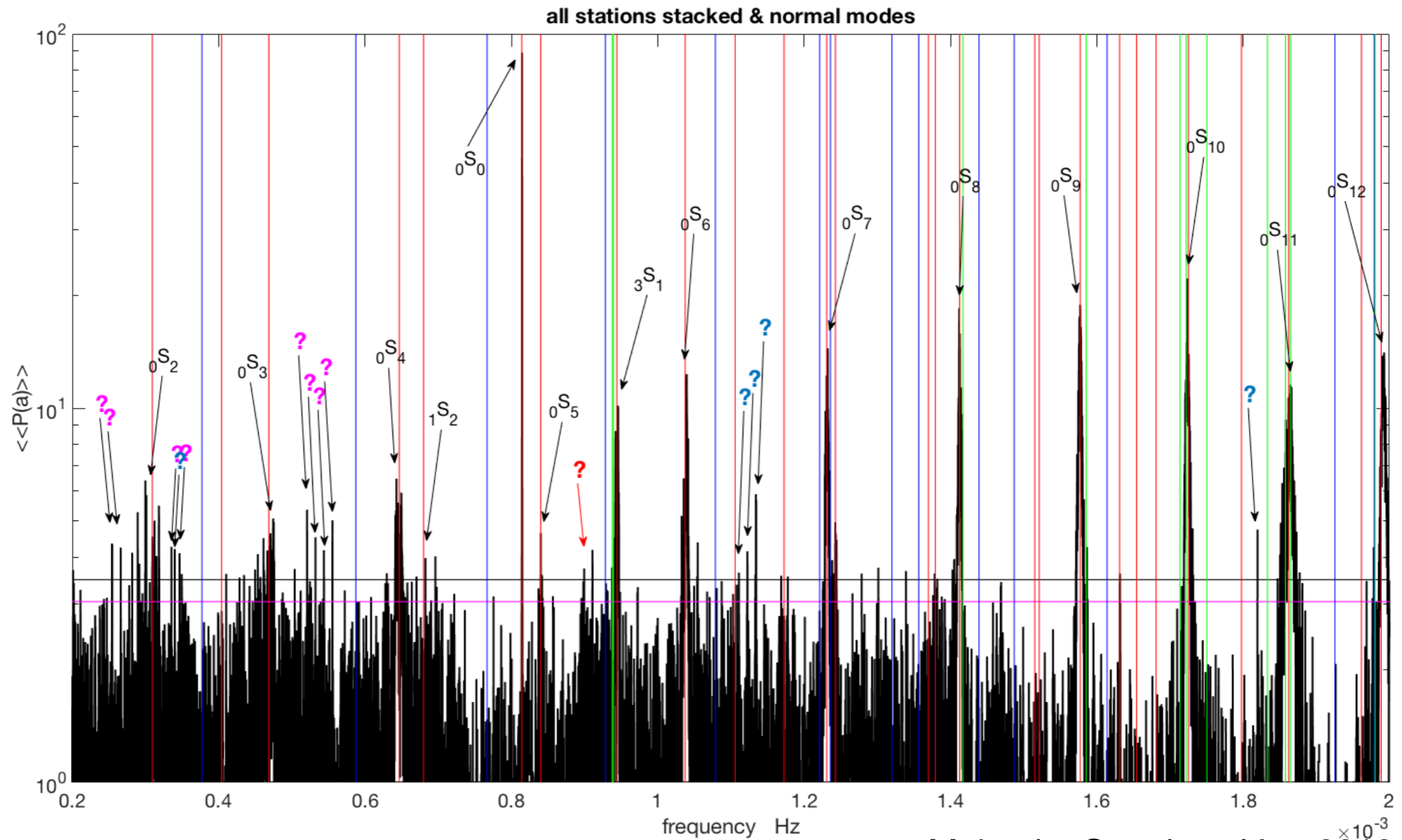


Orina e Monticchio erano a 1 chilometro l'uno dall'altro, esattamente all'epicentro del terremoto dell'Aquila e quindi con identica pericolosità. Avevano identiche costruzioni.

Spettro di tremore stabile nel tempo:  
per misurare le risposte bastano 15'  
(con strumenti portatili)



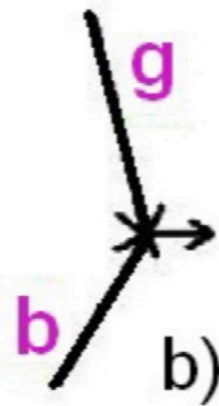
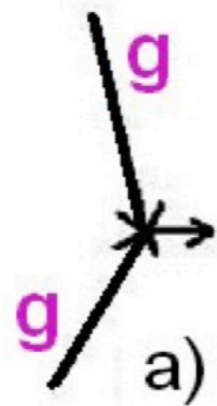
# Applicazione 5) - Onde gravitazionali?



Mulargia, Geophys.J.Int. 2018

oltre ai modi normali della Terra ci sono alcuni picchi “inspiegabili”

# Origine del tremore



La sezione d'urto gravitazionale della Terra a 1mHz è grande

$$\sigma = \frac{4\pi^2}{15} \left( \frac{r_g f}{c} \right)^2 q A,$$



f=0.001 Hz



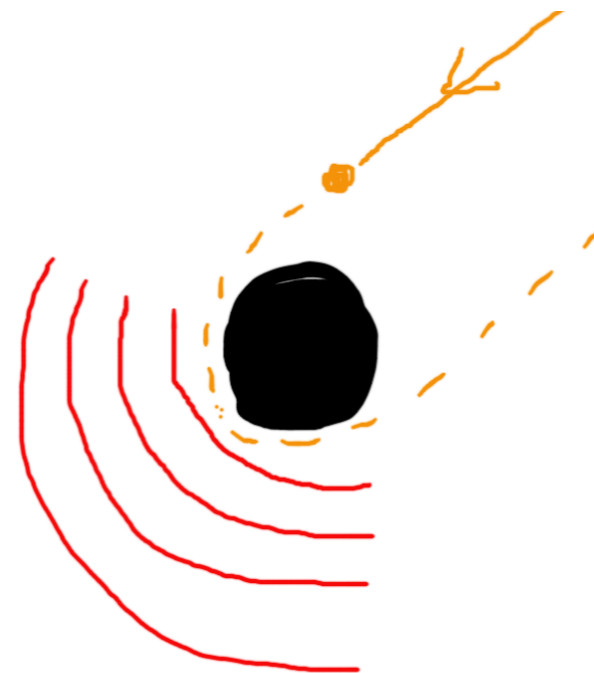
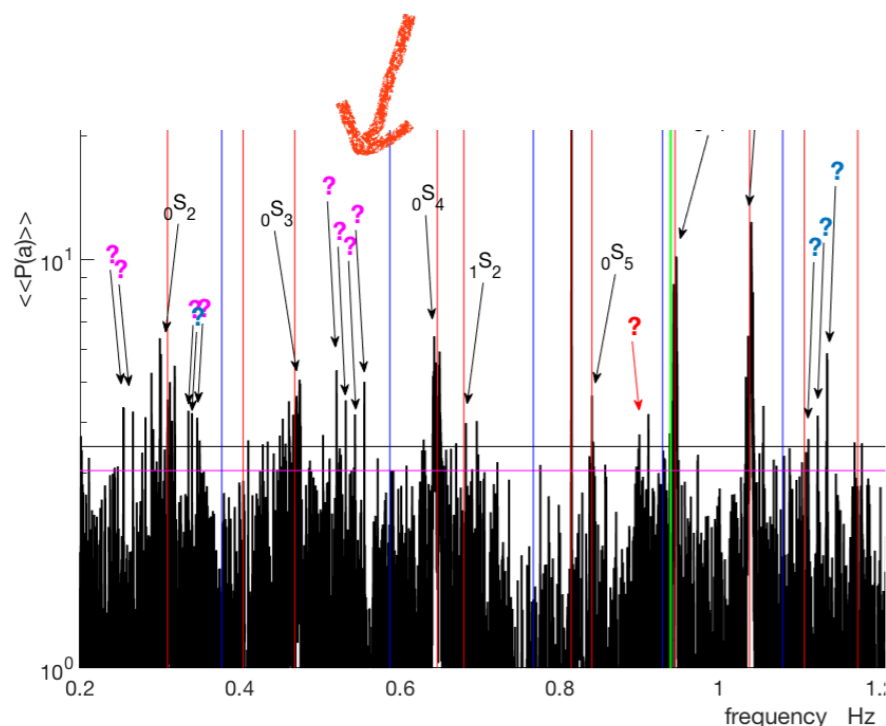
f=0.01 Hz

# quali sorgenti GW ipotizzabili?

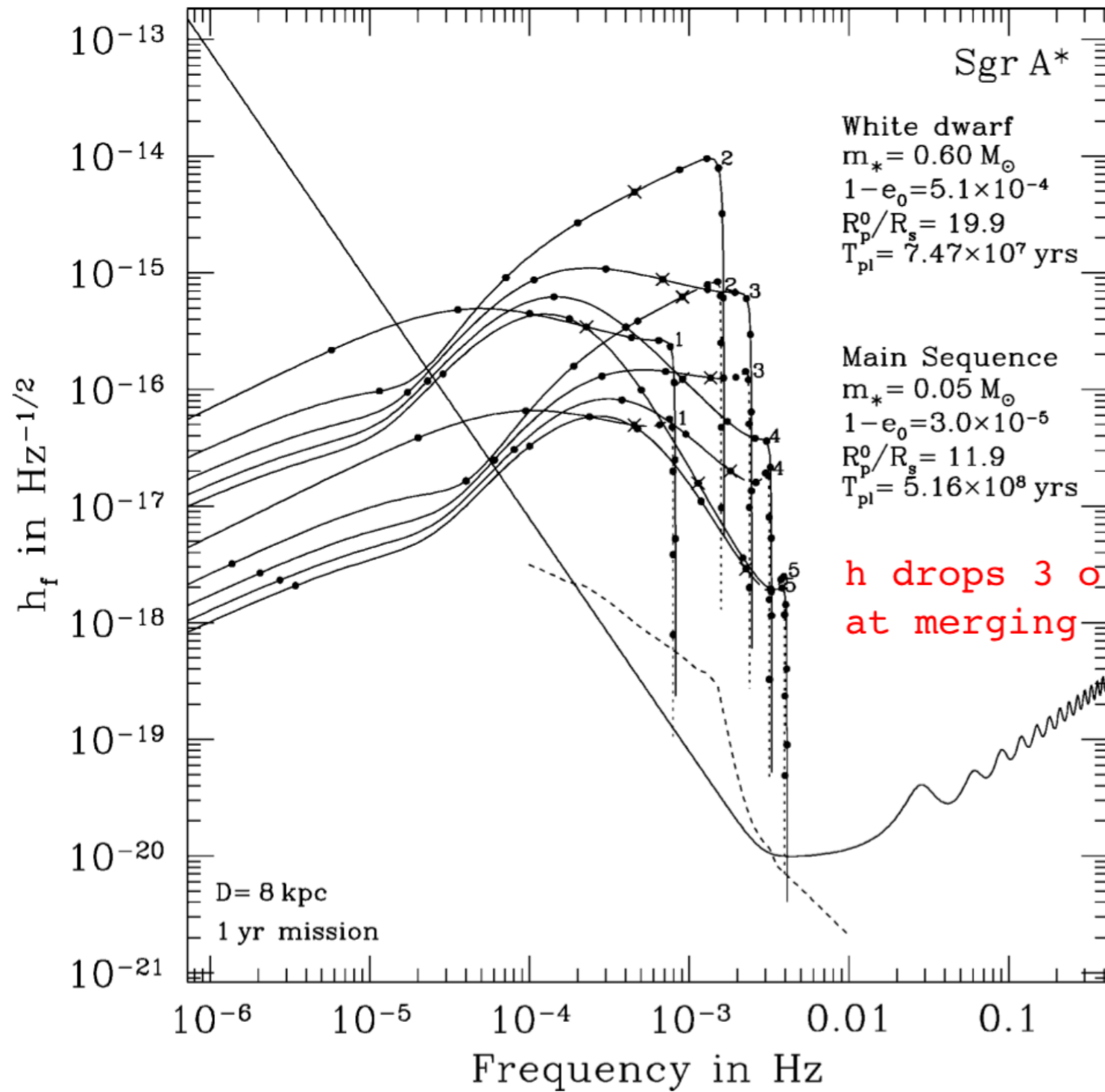
- Emissione GW a freq.  $f$ : is sistema binario con massa totale  $M_b$  a dist.  $d$

$$\frac{(f M_b)^{10/3}}{d^2} \simeq \Psi \frac{c^5}{(2\pi G)^{7/3}},$$

- Secondo **simulazioni indipendenti** compatibili con l'evidenza cosmologica (Sigurdsson, Monthly N.Roy.Astr.Soc. 1998; Freitag, Astrophys.J. 2003; Barack&Cutler, Phys.Rev. 2004) best candidates: binari con SgrA\* e oggetto compatto binario catturato a 5-20  $r_g$



# GW strain $h$ stimato per binary compact di SgrA\*



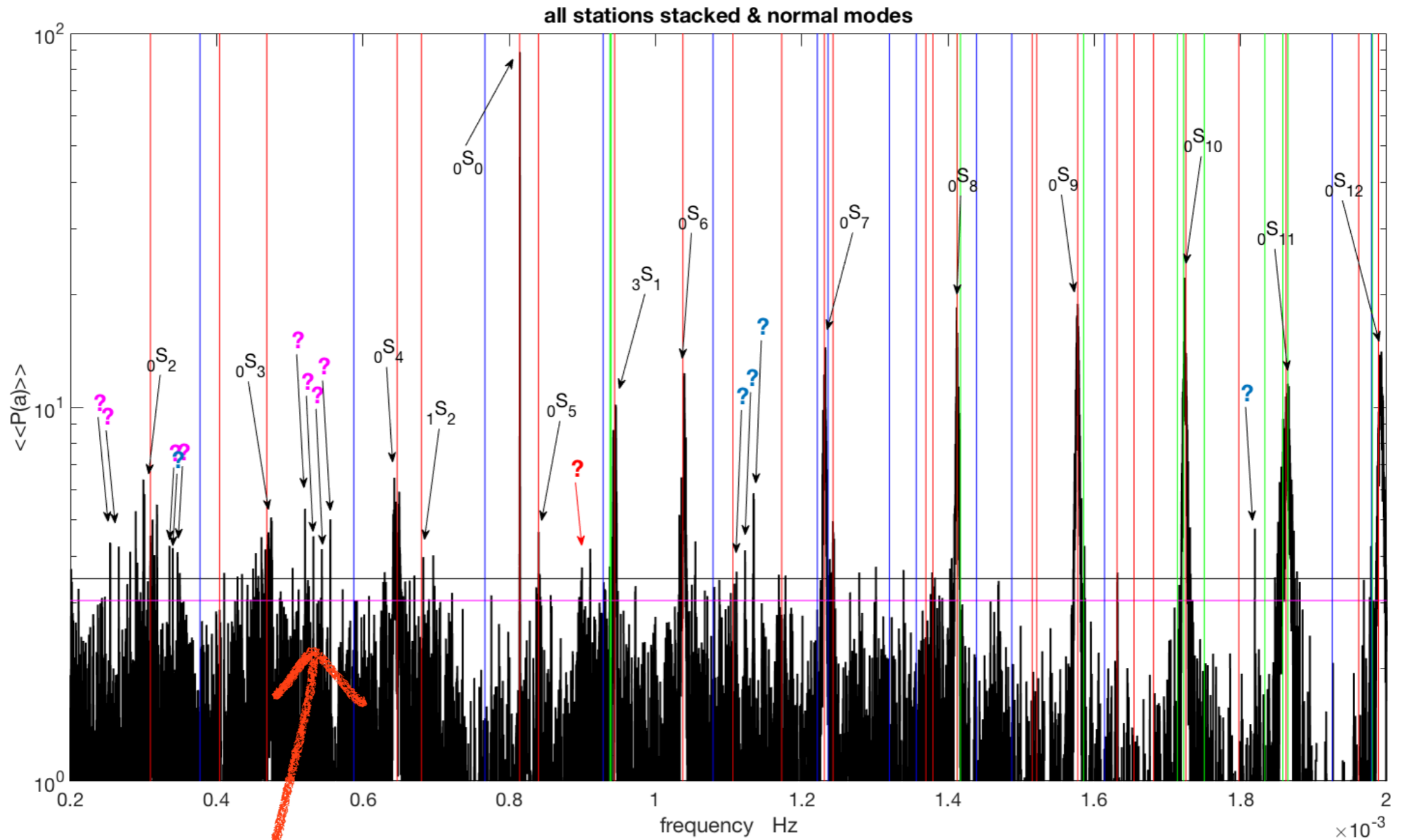
simulazioni  
indipendenti

$$h_{\text{RMS}} = h_f / (T)^{0.5}$$

$$\sim 10^{-3} h_f \sim 10^{-17} \div 10^{-18}$$

h drops 3 o.m.  
at merging

(Freitag, Astrophys.J. 2003)



Best bet: stella  $\sim 1/5 M_{\odot}$  in orbita stretta di SgrA\* in 134'



# Tremore sismico: un rumore pieno di segnale

1. Permette di inferire la struttura interna della Terra e delle stelle: *Sismologia passiva* e *Asterosismologia*
2. Dà la risposta sismica del terreno: *Imaging non-invasivo del sottosuolo*
3. Dà la risposta dinamica degli edifici: *Caratterizzazione dinamica nondistruttiva*
4. Combinando 3 e 4 dà l'*amplificazione locale*, variabile cruciale nel *rischio sismico*
5. Alcuni picchi “inspiegabili” sono compatibili con GW originate da una stella con massa  $1/5 M_{\odot}$  in orbita stretta di SgrA\*: *Astronomia gravitazionale?*