



III Congresso nazionale ANFeA

# I fisici e l'industria petrolifera: ruoli, tecnologie e prospettive

Vittorio De Tomasi  
Eni Upstream & Technical Services  
Roma, 27 novembre 2015

[eni.com](http://eni.com)

# Agenda

---

- Il gruppo Eni
- Il petrolio
  - Giacimenti
  - Formazione
  - Il sistema petrolifero
- La ricerca del giacimento
  - Metodi gravimetrici e magnetici
  - Metodo sismico
  - Log di pozzo e misure sui campioni
  - Rock physics
- Altre attività di interesse per i fisici
- Riferimenti e bibliografia



## Il gruppo Eni in breve

---

- 84000 dipendenti distribuiti in 83 paesi in varie società (Eni s.p.a., Versalis, Syndial, Saipem, ecc.)
- Eni si occupa di ricerca, produzione, trasporto, trasformazione e commercializzazione di idrocarburi
- Il 30% di Eni è posseduto dal Governo Italiano attraverso CDP, il resto è sul mercato
- 11.6 G€ di utile operativo adjusted (2014)
- Dati di produzione (2014):
  - Idrocarburi: 1.6 Mboe/giorno ( $\approx 1.7\%$  produzione mondiale)
  - Energia elettrica: 19.55 TWh ( $\approx 8.3\%$  produzione nazionale)
  - Vapore: 9 Mt
- R&D: 8800 brevetti, collaborazioni con numerose università e enti di ricerca nel mondo.



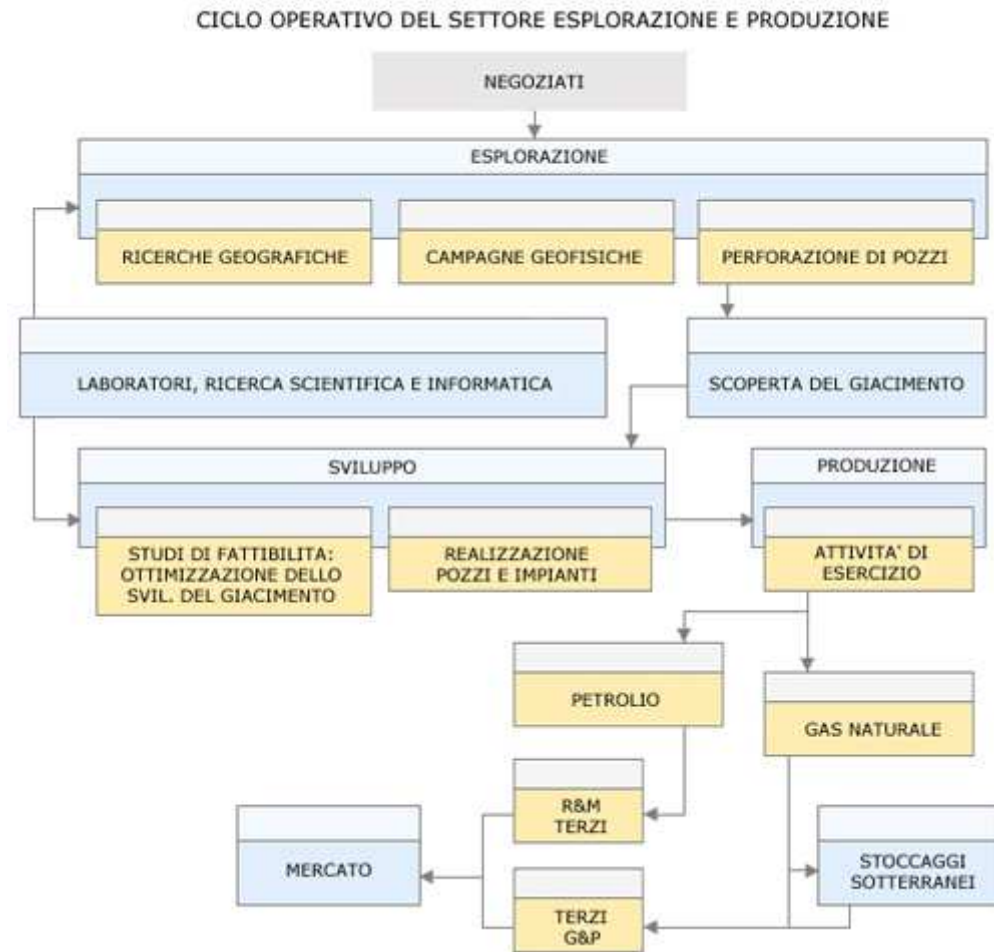
eni

# Il ciclo di upstream del petrolio

Ciclo operativo di Eni.

Molte delle attività elencate coinvolgono dei fisici o direttamente o in supporto alle operazioni. Fisici sono presenti anche in attività trasversali alle operazioni (HSE, IT, etc.) e nel management.

L'attività di ricerca scientifica si svolge inoltre in collaborazione con numerose università e centri di ricerca dove la presenza dei fisici è particolarmente rilevante.



[http://www.eni.com/it\\_IT/azienda/attivita-strategie/exploration-production/ciclo-operativo/ciclo-operativo.shtml](http://www.eni.com/it_IT/azienda/attivita-strategie/exploration-production/ciclo-operativo/ciclo-operativo.shtml)

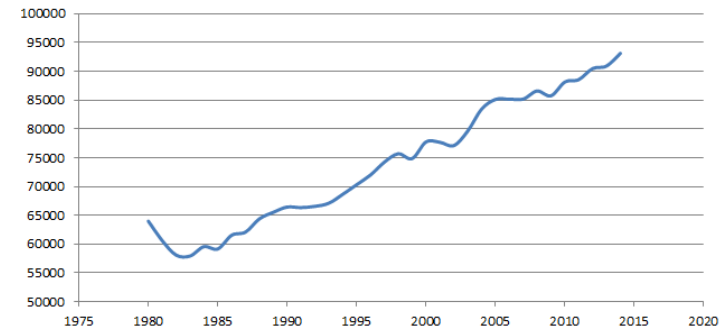


# Il petrolio in due grafici

Cushing, OK WTI Spot Price FOB



World oil production (kbbbl/day)



[www.eia.org](http://www.eia.org)

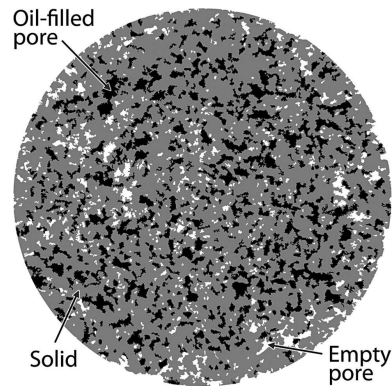
- La domanda di idrocarburi è in continua crescita
- I prezzi si sono consolidati
- La sfida è: produrre a costi inferiori massimizzando il ritorno del capitale.



# Il giacimento di petrolio

---

Gli idrocarburi si formano in una «roccia madre» a seguito di processi di decomposizione e maturazione delle sostanze organiche sepolte insieme ai sedimenti. Gli idrocarburi migrano poi verso la superficie, e possono venire intrappolati nelle rocce porose del giacimento. In alcuni casi la migrazione non avviene, e la roccia madre stessa costituisce il giacimento (sabbie bituminose, oil shale, ecc.)



Microstruttura di una roccia di giacimento



Kimmeridge shale



Sabbia bituminosa



eni

## La ricerca del giacimento

---

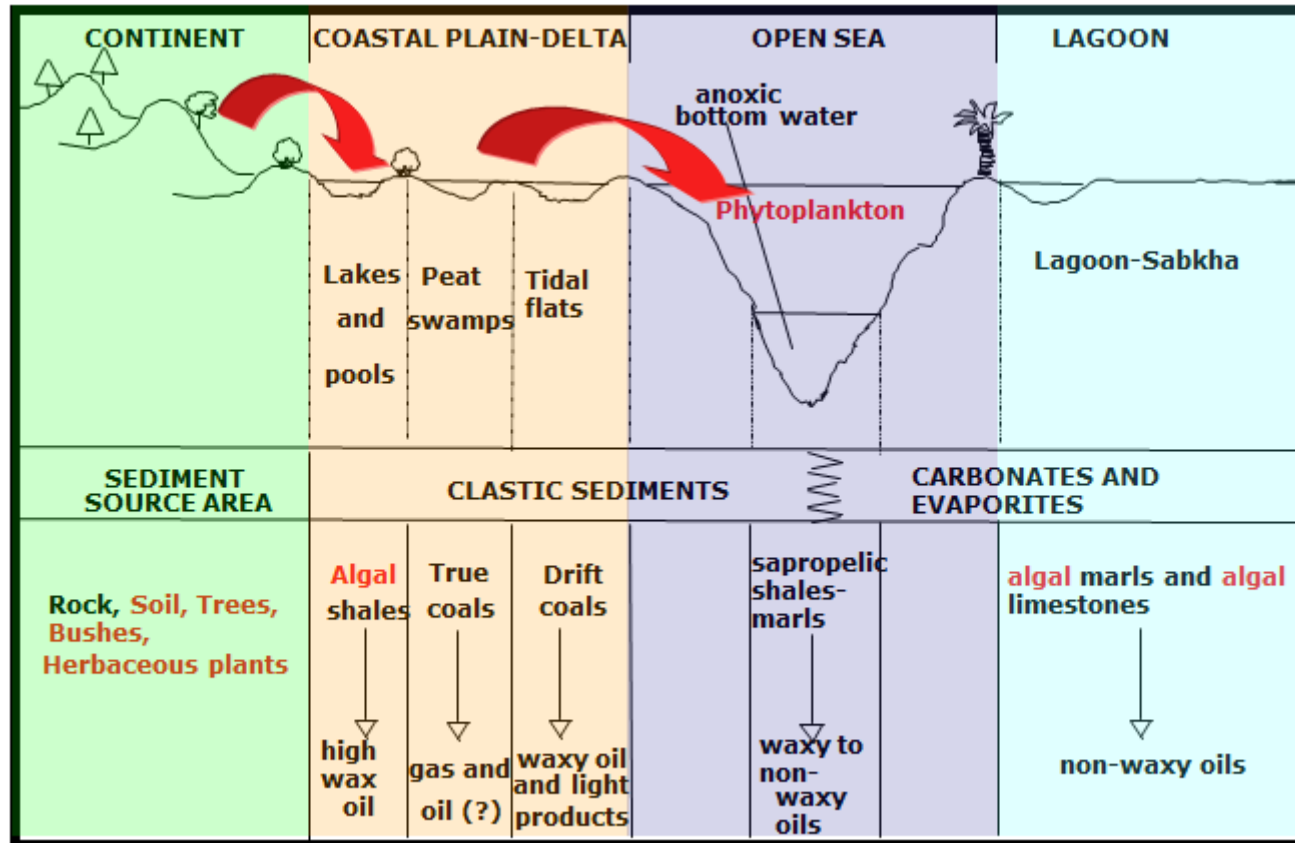
- Le fasi di ricerca di un giacimento:
  - Individuazione del bacino sedimentario
  - Stima del suo potenziale produttivo e livello di maturità
  - Prospezione del sottosuolo
  - Perforazione pozzo esplorativo
  - Sviluppo del giacimento

Queste fasi vengono spesso percorse iterativamente: la conoscenza delle caratteristiche del bacino è inizialmente limitata, e man mano che vengono raccolti dati si possono raffinare sia il modello deposizionale sia il modello di velocità del sottosuolo.



# Il sistema petrolifero: il kerogene

## Dal materiale organico al kerogene



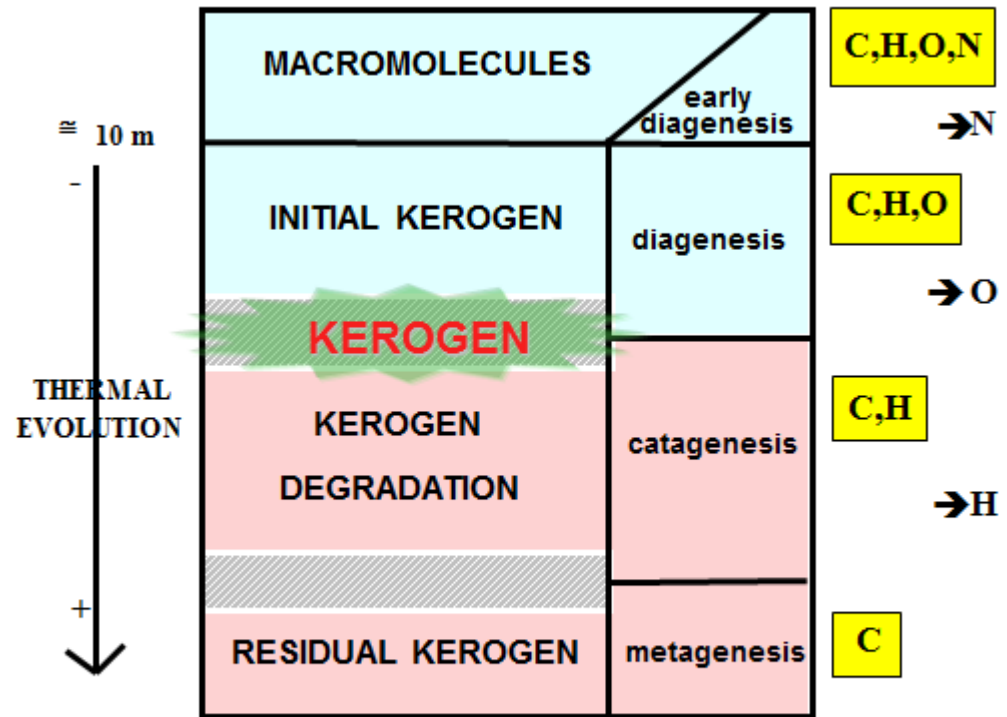
Sketch of the main source rock deposition environments

(modified after Cooper, 1990)



# Il sistema petrolifero: il kerogene

Le sostanze organiche sedimentate nel corso del tempo sono sottoposte a variazione di pressione ( $\approx 0 \leftrightarrow 100$  Mpa) e temperatura ( $\approx 20^\circ\text{C} \leftrightarrow 200^\circ\text{C}$ ).



(after Bordenave, 1993 modified)



# Il sistema petrolifero: il kerogene

La materia organica ha destini diversi in funzione della sua composizione e storia termica.

| ENVIRONMENT | KEROGEN TYPE   | KEROGEN FORM [ MACERAL ] | ORIGIN  | HC POTENTIAL |
|-------------|--|--------------------------|---|--------------|
| Aquatic     | I  | alginite                 | algal bodies  | OIL          |
|             |  | amorphous organic matter | structureless debris of algal bodies                                |              |
| II          | structureless, planktonic material, primarily of marine origin |                          |   |              |
|             | Terrestrial  | exinite                  | skins of spores and pollen, cuticle of leaves and herbaceous plants |              |
| III         |  | III                      | III   |              |
| IV          |  | IV                       | IV  | NONE         |



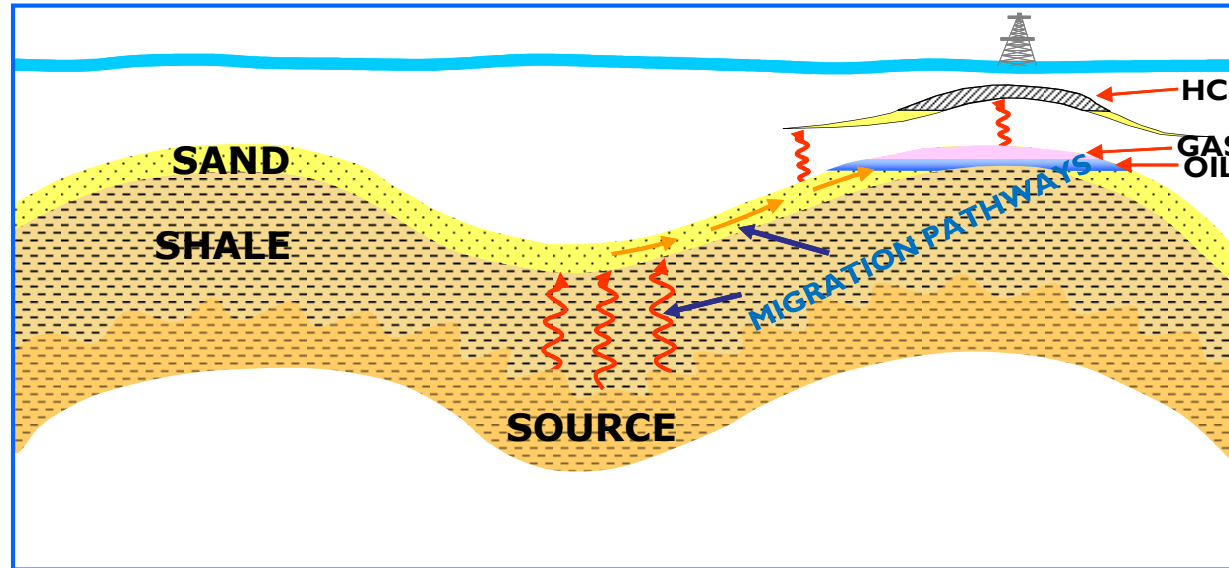
(modified, after Merrill, 1991)



eni

## Il sistema petrolifero: il bacino

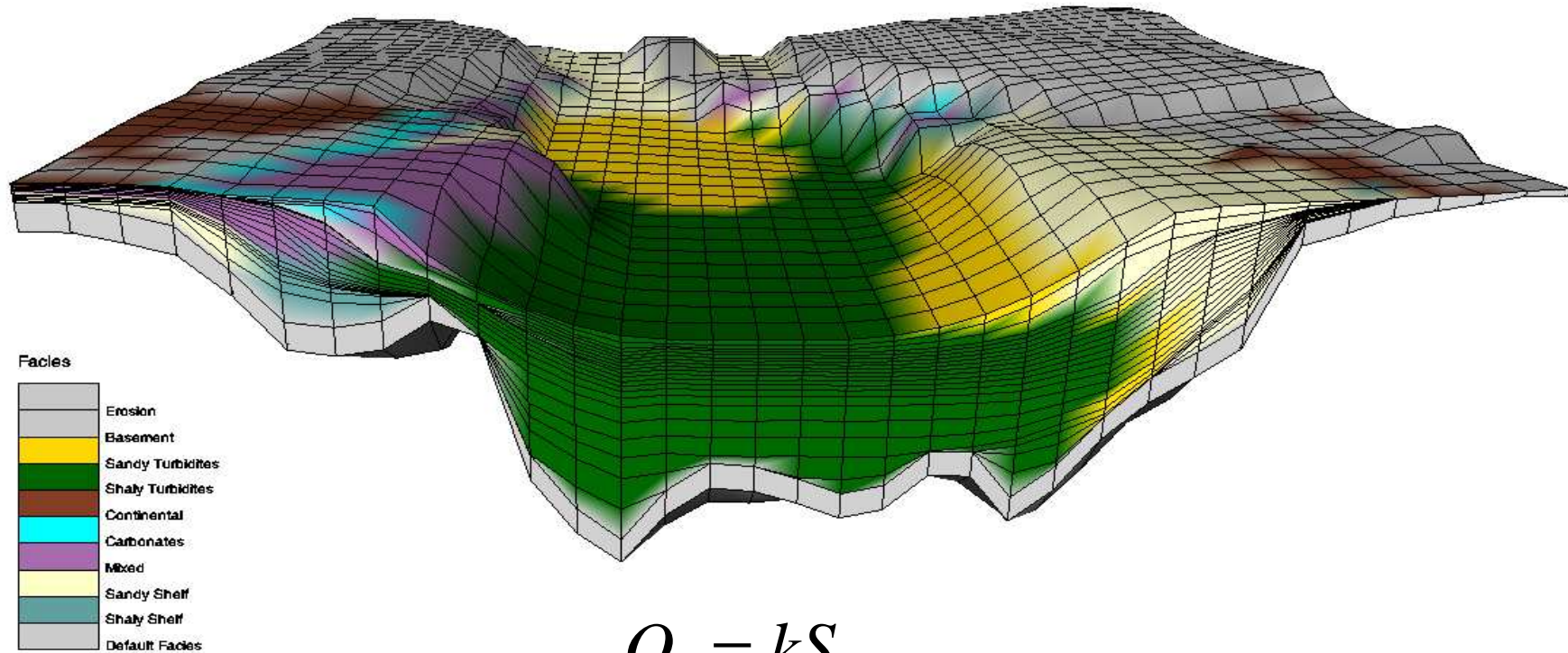
---



Questo è come appare oggi: ma come era 1, 10 100 milioni di anni fa ?!?

Per saperlo occorre modellare i processi di sedimentazione, generazione e trasporto degli idrocarburi e, partendo dalle condizioni «finali» trovare la distribuzione di sedimenti e idrocarburi in tempi remoti.

# Il sistema petrolifero: il bacino



$$Q_s = kS$$

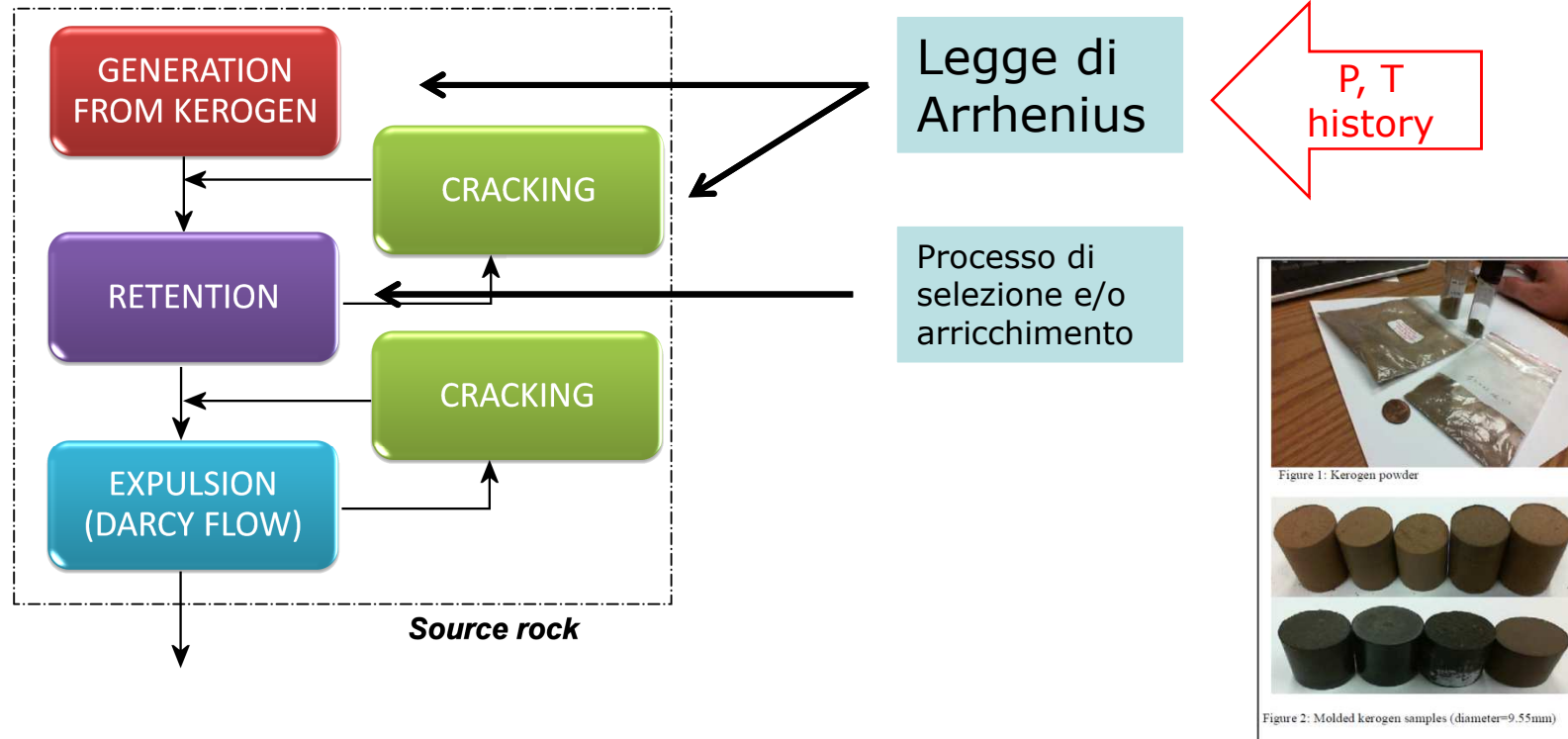
$Q_s$  = Sediment Flux    $k$  = Sediment mobility    $S$  = topographic slope

Modello dei processi di sedimentazione



eni

# Il sistema petrolifero: la roccia madre



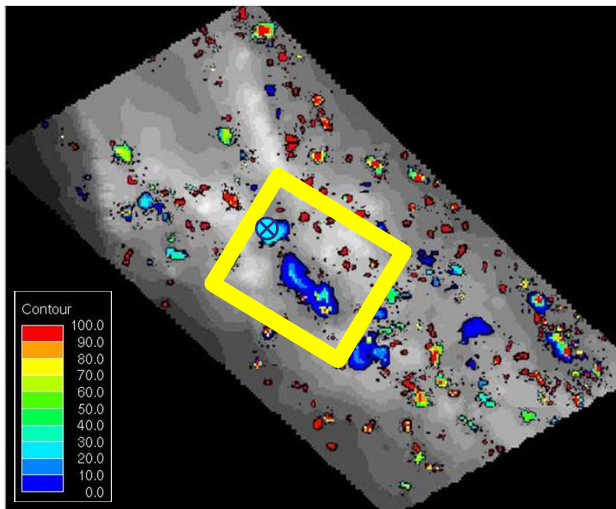
Kerogene (Yan, 2013)

I processi che portano alla formazione ed accumulo di idrocarburi sono non lineari, dissipativi, e non del tutto noti.

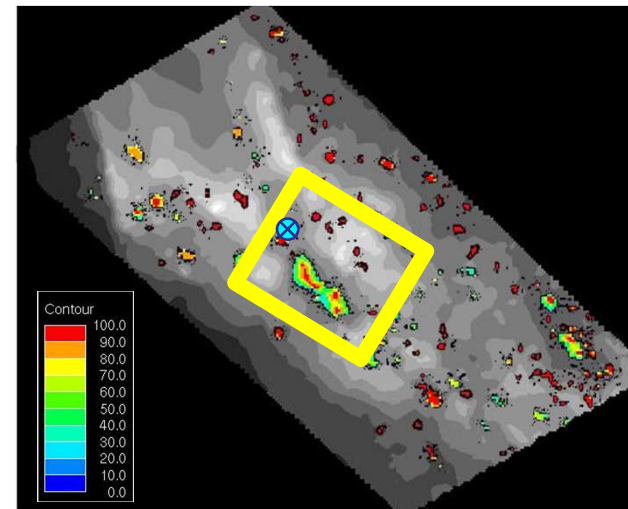


# Il sistema petrolifero: le incertezze

Il risultato è espresso in forma di probabilità di riempimento delle formazioni, e tiene conto delle incertezze dei dati e dei processi.



- ✓ no geometric uncertainty
- ✓ no calibration



- ✓ geometry uncertainty
- ✓ calibration

## La prospezione del sottosuolo

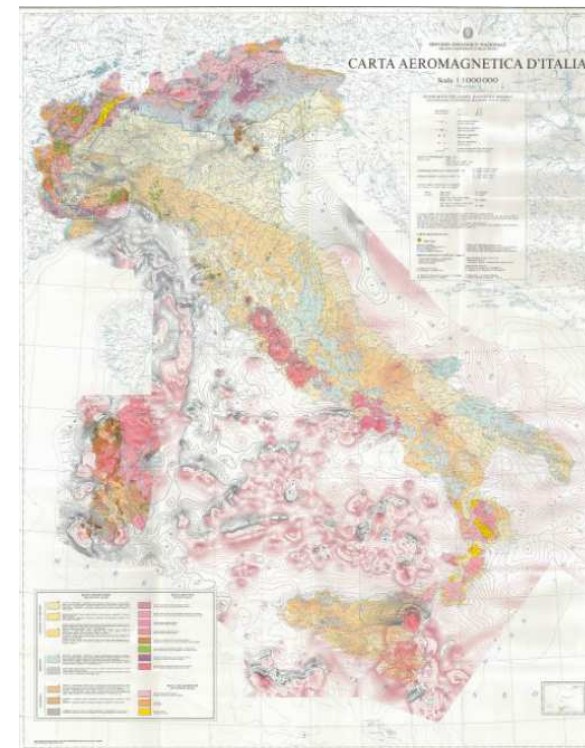
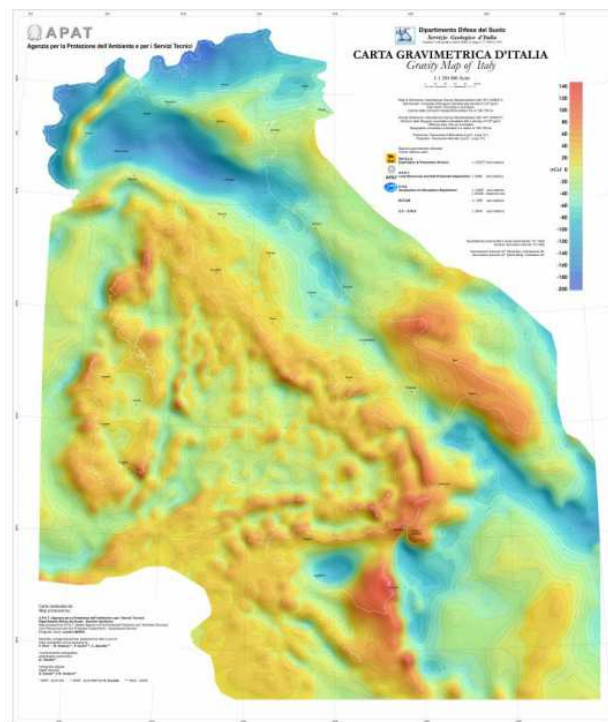
---

- Le tecniche di prospezione sfruttano alcune proprietà fisiche delle rocce. In particolare:
  - Le rocce sedimentarie hanno densità e suscettività magnetica minore delle rocce ignee.
  - Le rocce porose hanno impedenza (densità x velocità) inferiore rispetto alle rocce compatte
  - La presenza di gas riduce ulteriormente l'impedenza acustica
- I metodi di prospezione utilizzati sono
  - Rilievo gravimetrico e magnetico per individuare i sedimenti
  - Rilievo sismico per individuare il giacimento
  - Misure dirette sulle rocce di giacimento raggiunte dal pozzo



## Metodi magnetici e gravimetrici

La misura delle anomalie dei campi magnetici e gravitazionali di superficie permette di individuare i bacini sedimentari. Si usano anche rilievi EM con sorgenti attive (CSEM) o passive (AMT, ecc.).



<http://www.isprambiente.gov.it/it/cartografia/carte-geofisiche-a-piccola-scala/index>





## Metodo sismico: generalità

---

Il sottosuolo viene indagata in dettaglio mediante l'impiego di onde sismiche. La tecnica è simile ai metodi ecografici comunemente utilizzati in medicina o nei controlli non distruttivi, ma con alcune importanti differenze:

- Le frequenze in gioco: [10 - 150] Hz per rilievi di superficie, [10-500] Hz per rilievi in pozzo (→ risoluzione ridotta)
- La velocità di propagazione delle onde varia fra ~200 m/s nell'aerato e ~7000 m/s nei carbonati (→ mappa tempo->spazio non lineare)
- Il sottosuolo è un mezzo anelastico, il Q medio delle rocce è di 80-100, ma in presenza di gas o rocce incoerenti può scendere anche fino a 5-10. (→ risoluzione peggiora con la profondità)
- L'angolo di illuminazione del bersaglio è limitato e diminuisce con la profondità (→ limite nella ricostruzione degli oggetti)

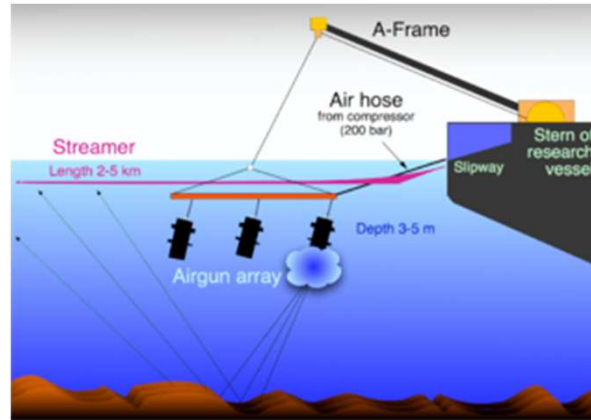
Si usano in generale onde di pressione, talvolta anche di taglio. Il modello di propagazione usato può essere acustico, elastico, viscoelastico, anisotropo, visco-anisotropo.



# Metodo sismico: sistemi di acquisizione



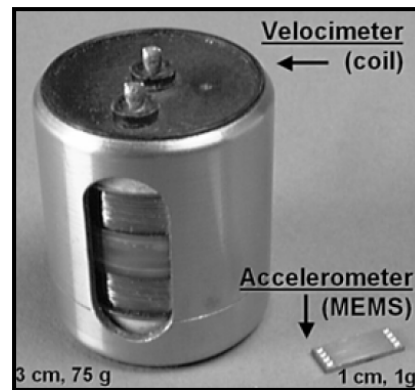
vibroseis



Airgun/idrofoni



geofono



MEMS  
(Mougenot, SEG 1999)

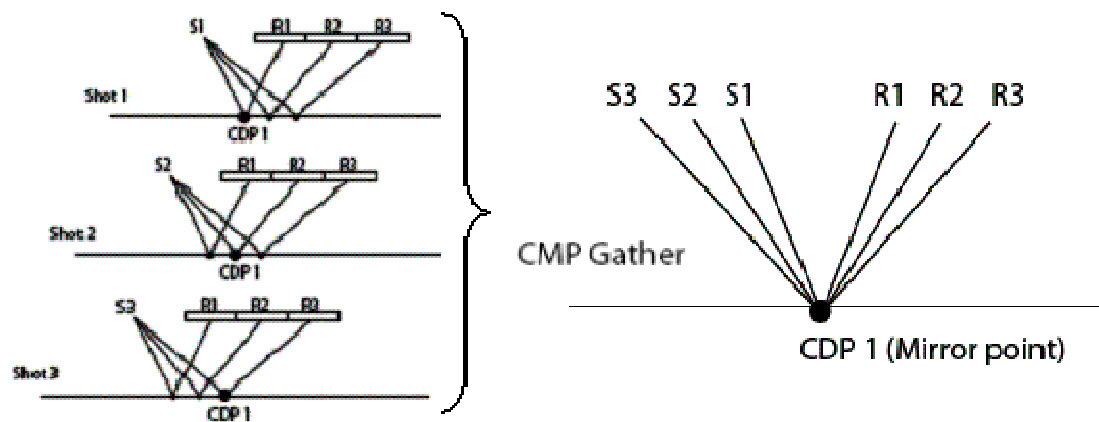
Sistemi usati per l'acquisizione dei dati sismici.

Si noti che lo sviluppo dell'airgun e delle tecnologie MEMS è avvenuto grazie anche al significativo contributo dei fisici.

# Metodo sismico: l'acquisizione

L'acquisizione dei dati sismici in 3D produce un volume di dati 5D: tempo, coordinate sorgente e ricevitore. Questo volume viene elaborato in modo da ottenere come prodotto finale una immagine spaziale tridimensionale.

Per farlo dobbiamo conoscere la velocità di propagazione delle onde sismiche, che è ignota. Per trovarla si utilizza il fatto che lo stesso punto del sottosuolo viene illuminato da coppie differenti di sorgente-ricevitore.



$$T(x) = \sqrt{\tau^2 + (x/v)^2}$$

Equazione di Normal Move Out (NMO)

(Stali , Riboulot: Multichannel seismic processing, 2005)



eni

# Metodo sismico: le velocità

Supponendo la terra a strati piani e paralleli e un modello di propagazione basato sull'iconale, l'analisi di velocità e l'imaging sono relativamente semplici.

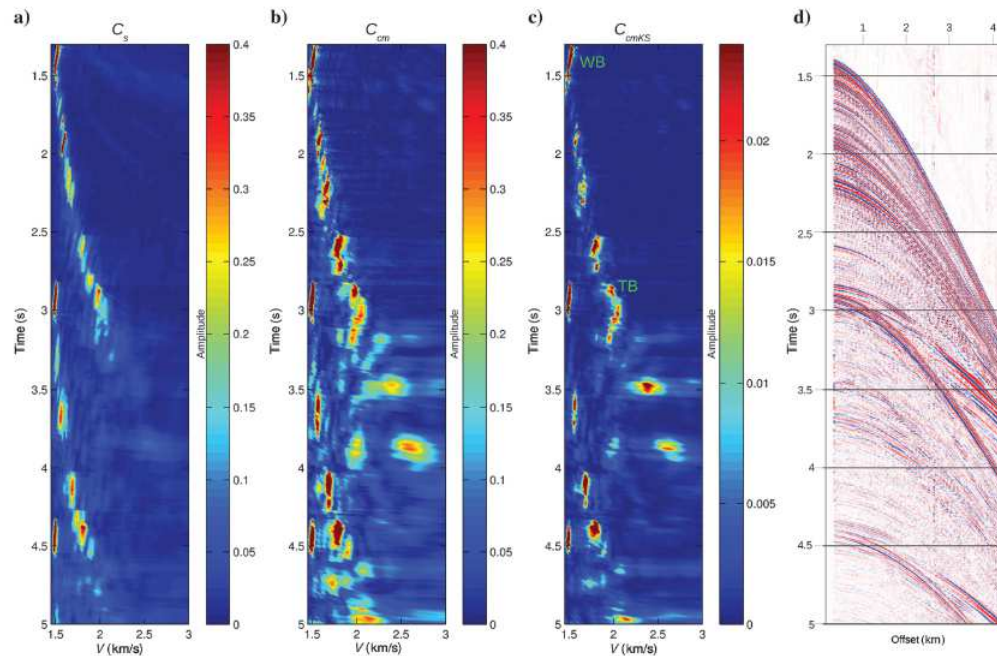


Figure 10. Velocity spectra computed with (a) semblance ( $C_s$ ), (b) complex matched coherency ( $C_{cm}$ ), and (c) complex matched plus Key and Smithson ( $C_{cmKS}$ ) functionals. (d) The CMP gather (CMP 3 in the stack section of Figure 7) input to the velocity analyses. Note the particularly well-resolved peak at 3.9 s and 2.6 km/s, likely due to a subbasalt primary, on the  $C_{cmKS}$  panel.

Tognarelli, Stucchi, Ravasio, Mazzotti: High-resolution coherency functionals for velocity analysis...Geophysics 78(2013)53-63



## Metodo sismico: la tomografia

---

La realtà del sottosuolo è però molto più complicata, e occorre ricorrere a tecnologie più sofisticate:

**Tomografia dei primi arrivi:** vengono misurati i tempi di arrivo dei segnali, e il modello di velocità viene calcolato risolvendo un problema del tipo:

$$\underline{\mathbf{A}}\mathbf{s} = \underline{\mathbf{t}}$$

Dove:

$t_i$  è il tempo di arrivo misurato per un evento definito da sorgente e ricevitore prefissati.

$A_{ij}s_j$  è il tempo impiegato da un raggio a percorrere il modello e  $1/s_j$  sono le velocità del modello.

Gli elementi della matrice  $\mathbf{A}$  vengono calcolati tracciando i raggi che uniscono sorgenti e ricevitori nel modello descritto da  $\mathbf{s}$ . Poiché  $\mathbf{A}$  a sua volta dipende da  $\mathbf{s}$ , occorre cercare una soluzione iterativa partendo da un modello iniziale.



# Metodo sismico: la migrazione

«Migrazione» del segnale sismico: con modelli complessi la posizione del punto di riflessione è spostata rispetto al caso a strati paralleli. Occorre pertanto ricollocare tutti gli eventi, e il processo è denominato «migrazione». Un metodo comunemente utilizzato è basato sull'integrale di Kirchhoff:

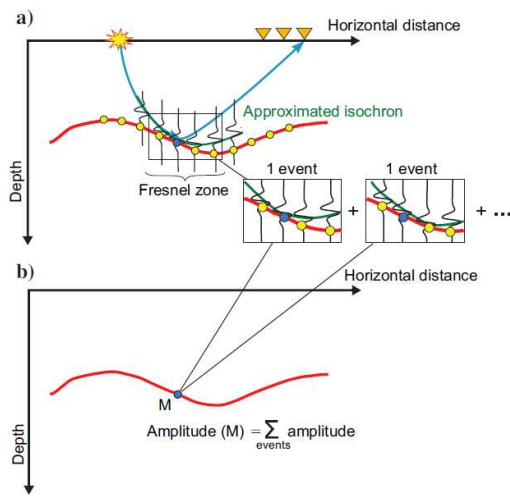
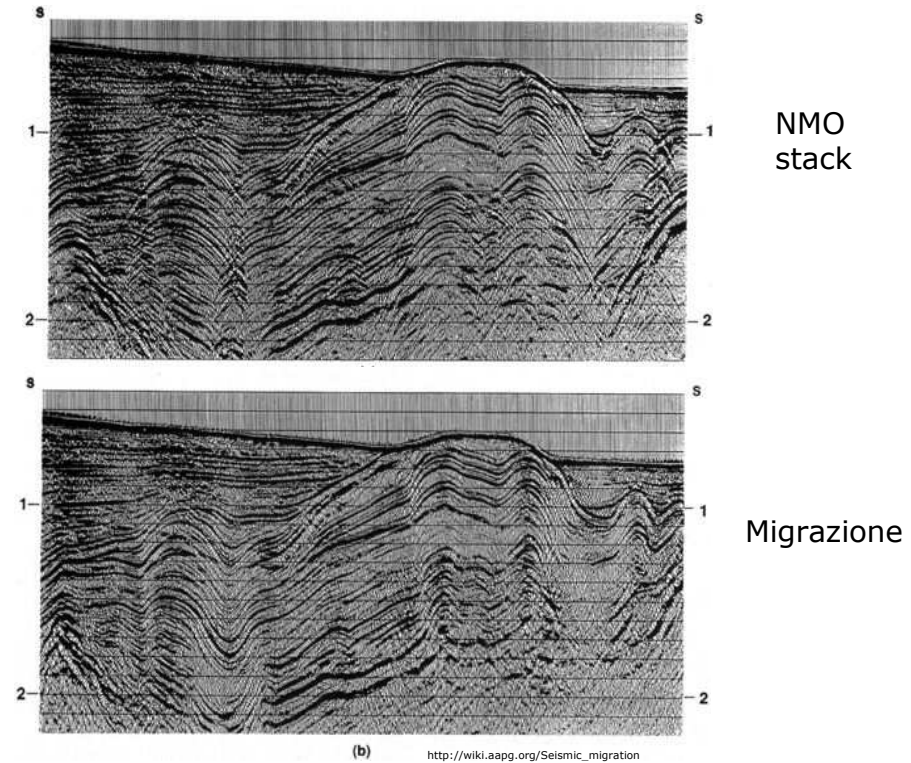


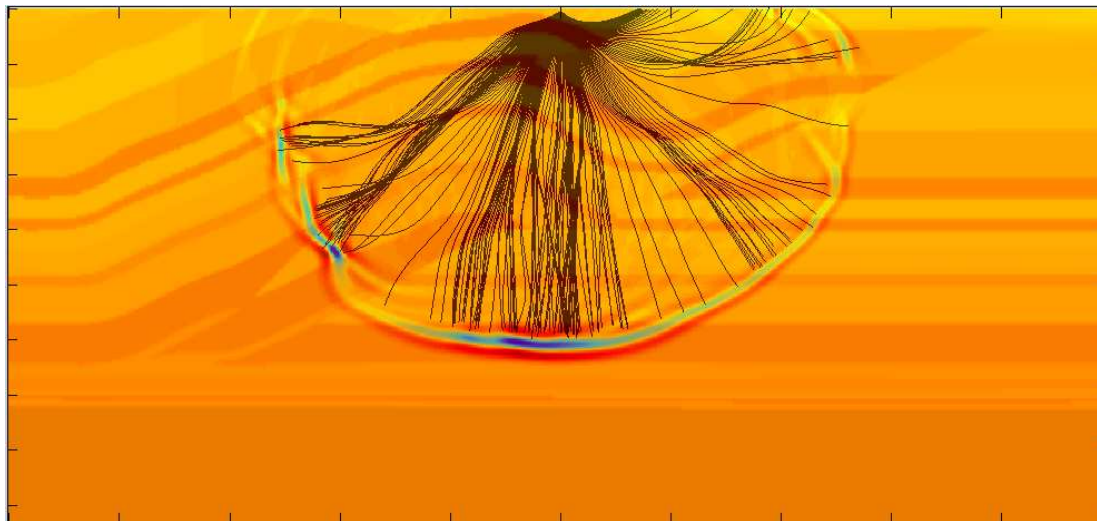
Figure 2. Concept of simulated migration amplitudes. (a) As an initial step, forward modeling by ray tracing is performed in a 3D model for a specific survey and a given target reflector. The forward modeling yields a number of events that are used for computing synthetic trace data. For each event, the synthetic trace is smeared on an approximated isochron with lateral extension defined according to the Fresnel zone. (b) The amplitude at a point M on the target reflector is obtained by summing contributing amplitudes of individual events.



eni

## Metodo sismico: la migrazione

**Imaging con l'equazione d'onda:** il modello di propagazione a raggi va in crisi se nel modello si formano caustiche, ovvero quando l'hamiltoniana  $H$  ha un comportamento catastrofico.



$$\begin{aligned}\frac{d\vec{q}(\xi)}{d\xi} &= \nabla_{\vec{p}}\mathcal{H} \\ \frac{d\vec{p}(\xi)}{d\xi} &= -\nabla_{\vec{q}}\mathcal{H} \\ \frac{dT}{d\xi} &= \vec{p} \cdot \nabla_{\vec{p}}\mathcal{H}\end{aligned}$$

$$\mathcal{H}(\vec{q}, \vec{p}) = \frac{1}{2}(p^2 - \frac{1}{c^2(\vec{q})})$$

La soluzione è cambiare modello di propagazione, e usare l'equazione d'onda completa. Si calcolano quindi i fronti d'onda con le differenze finite e si applica una condizione di imaging.



eni

# Metodo sismico: la migrazione

---

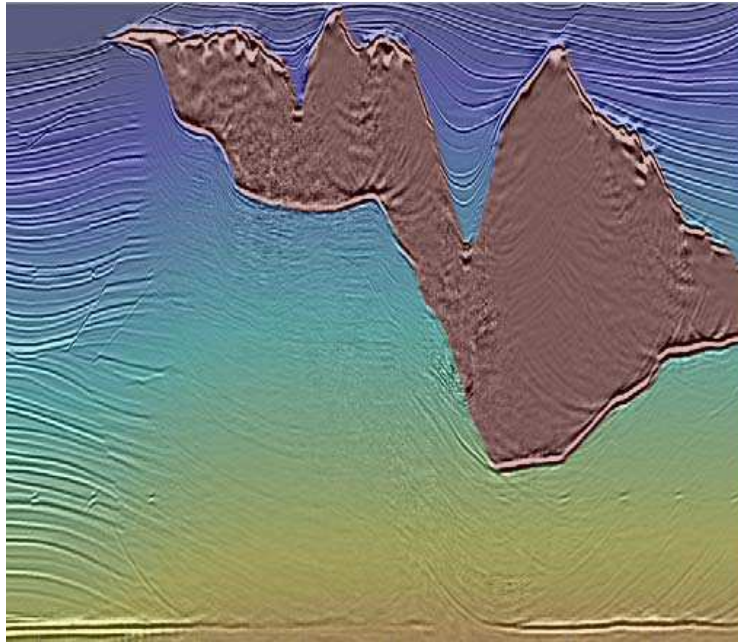


Immagine da ray tracing

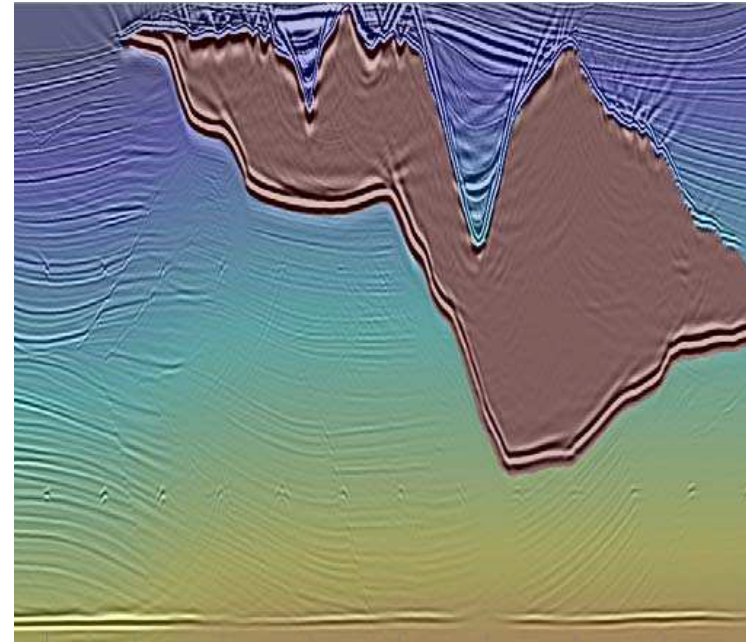


Immagine da full-wave equation

Esempi calcolati con le tecnologie di imaging sviluppate da eni



# Well logging & core analysis

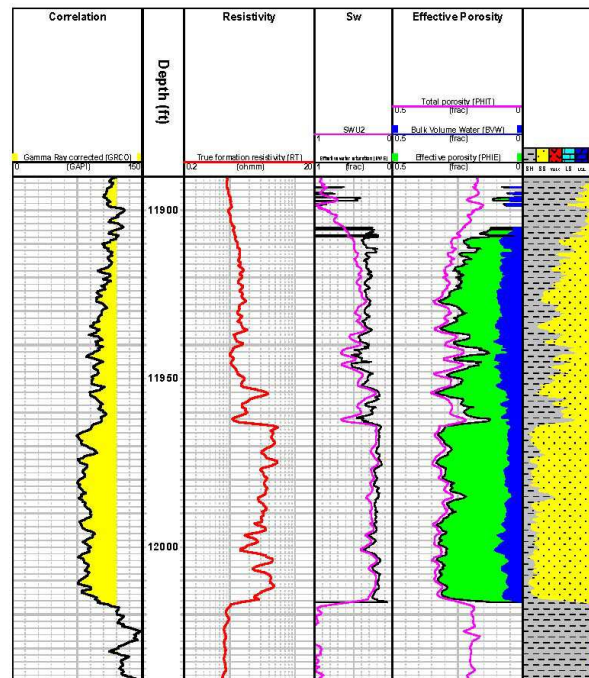
La perforazione di un pozzo è l'unica possibilità di poter «toccare» cosa c'è nel sottosuolo. Perforare un pozzo costa molto ( $\approx 1-100$  M€), è quindi fondamentale raccogliere il maggior numero di informazioni sulle caratteristiche delle rocce incontrate nel minor tempo possibile.



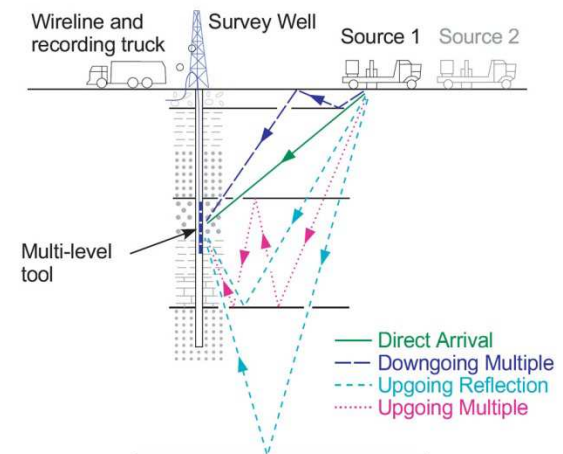
cuttings



core samples



Wireline log



Vertical seismic profile (VSP)

Stewart, VSP: An in-depth seismic understanding - CSEG Recorder Sep. 2001



eni

# Well logging & core analysis

Sono molti i metodi di indagine fisica utilizzati per l'analisi delle rocce campionate durante la perforazione di un pozzo. L'esempio più celebre per noi fisici è probabilmente questo:

Patented May 23, 1950

2,508,772

## UNITED STATES PATENT OFFICE

2,508,772

### METHOD OF GEOPHYSICAL PROSPECTING

Bruno Pontecorvo, Montreal, Quebec, Canada, assignor to Well Surveys, Incorporated, Tulsa, Okla., a corporation of Delaware

Original application October 31, 1942, Serial No. 464,049. Divided and this application September 12, 1945, Serial No. 615,844

2 Claims. (Cl. 250-83.6)

**1**  
This invention relates to geophysical prospecting and more particularly to well logging by the use of radioactive radiations.

By radioactive radiations is meant those radiations which result from the reactions of nuclear physics, particularly gamma radiation, and fast and slow neutron radiation. It is appreciated that

**2**  
In any event, the amount of radiation that comes from the formation and can be detected and measured, varies as the distance between the primary source of radiation and point at which said radiations are detected is varied. It has now been discovered that this variation in the intensity of returning radiations is not merely

May 23, 1950

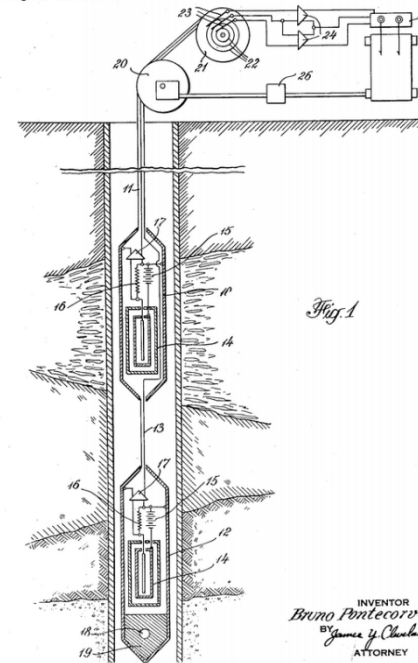
B. PONTECORVO

2,508,772

METHOD OF GEOPHYSICAL PROSPECTING

Original Filed Oct. 31, 1942

4 Sheets-Sheet 1




eni

## Well logging & core analysis

---

...e questo è un esempio meno celebre, che incontrai durante il mio lavoro di tesi nel 1986.

 [Sedimentary rock analysis by charged particle bombardment](#) Original Research Article

Pages 37-48

Robert F. Sippel, Everett D. Glover

 [Close abstract](#) |  [Purchase PDF](#)

### Abstract

[Citing articles \(9\)](#)

Rapid analytic techniques are urgently needed in geochemical investigations where hundreds of analyses are often required. Methods based on nuclear reactions in the light elements are described for the analysis of Li, Be, B, C, O, F, Na, Mg, Al, and P. The reactions are induced by proton, deuteron, and alpha particle beams from a 2-MeV Van de Graaff machine. The methods are evaluated for sensitivity and accuracy by analysis of synthetic specimens of known composition and of National Bureau of Standards analyzed rocks samples. Errors arising from stopping power variations are shown to be small, in general not more than  $\pm 2\%$ . These methods exactly compliment the X-ray fluorescence technique, filling in the region inaccessible to the X-ray method. Used together, the methods can provide rapid instrumental analysis for virtually all elements in the periodic table to moderate sensitivity. Although sedimentary rocks receive the major emphasis in this paper, the methods are applicable (with due consideration for stopping power) to many other types of materials.

Eni ha tecnologie proprietarie di analisi dei dati da pozzo, come ad esempio il «PUC» (Pulsed Ultrasound on Cuttings) EP 0717272 A1, il «Seisbit» US5895437, ecc.

Probabilmente altri metodi di indagine fisica troveranno posto in futuro nell'industria petrolifera, e ciò potrebbe offrire interessanti sviluppi per la nostra professione.



# Well logging & core analysis

## Alcune idee su cui riflettere...

40th Lunar and Planetary Science Conference (2009)

236

**The Alpha-Particle-X-ray-Spectrometer (APXS) for the Mars Science Laboratory (MSL) Rover Mission.**  
R.Gellert<sup>1</sup>, J.L.Campbell<sup>1</sup>, P.L.King<sup>2</sup>, L.A.Leshin<sup>3</sup>, G.W.Lugmair<sup>4</sup>, J.G.Spray<sup>5</sup>, S.W.Squyres<sup>6</sup>, A.S.Yen<sup>7</sup>,  
<sup>1</sup>University of Guelph, (Guelph, On, N1G2W1, Canada, rgellert@uoguelph.ca), <sup>2</sup>Institute of Meteoritics, University of New Mexico, Albuquerque, NM and University of Western Ontario, London, On, <sup>3</sup>NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, <sup>4</sup>Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, CA, <sup>5</sup>Planetary and Space Science Centre, University of New Brunswick, <sup>6</sup>Cornell University, Ithaca, NY, <sup>7</sup>Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA

**Introduction:** The MSL APXS was selected by NASA as a Canadian contribution for the Mars Science Laboratory, now scheduled for launch in 2011. It follows the Pathfinder and Mars Exploration Rover APXS instruments [1] and was significantly improved in many ways. The APXS in-situ method of determining the chemistry with x-ray spectroscopy proved to be very significant and reliable over the 5 year MER mission. The APXS on both MER rovers documented the

peratures improved from ~155eV to ~140eV at MSL. A major improvement of an overall factor of 3 in sensitivity (signal per second) was achieved by a closer proximity of sample and detector. MER used ~30mm distance, mainly due to the alpha detectors for RBS mode, whereas MSL uses ~19mm. The MSL instrument abandoned the alpha detectors due to the experienced limited sensitivity on light elements in the 10 mBar Martian CO<sub>2</sub> atmosphere. MSL uses 30 mCi

Journal of  
Synchrotron  
Radiation  
ISSN 0909-0495

Received 27 April 2012  
Accepted 25 October 2012

### A comparative study of X-ray tomographic microscopy on shales at different synchrotron facilities: ALS, APS and SLS

Waruntorn Kanitpanyacharoen,<sup>a</sup> Dilworth Y. Parkinson,<sup>b</sup> Francesco De Carlo,<sup>c</sup> Federica Marone,<sup>d</sup> Marco Stampanoni,<sup>d,e</sup> Rajmund Mokso,<sup>d</sup> Alastair MacDowell<sup>b</sup> and Hans-Rudolf Wenk<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Earth and Planetary Science, University of California, Berkeley, CA 94720, USA, <sup>b</sup>Advanced Light Source, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA, <sup>c</sup>Advanced Photon Source, Argonne National Laboratory, IL 60439, USA, <sup>d</sup>Swiss Light Source, Paul Scherrer Institute, CH-5232 Villigen, Switzerland, and <sup>e</sup>Institute for Biomedical Engineering, University and ETH Zürich, CH-8092 Zürich, Switzerland. E-mail: wenk@berkeley.edu

Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy (SRXTM) was used to characterize the three-dimensional microstructure, geometry and distribution of different phases in two shale samples obtained from the North Sea (sample N1) and the Upper Barnett Formation in Texas (sample B1). Shale is a challenging material because of its multiphase composition, small grain size, low but significant amount of porosity, as well as strong shape- and lattice-preferred orientation. The goals of this round-robin project were to (i) characterize

## Using LIBS for classification of carbonate minerals on Mars

### Introduction

LIBS is a powerful technique for determining the elemental composition of samples. A laser is focused onto a sample (solid, liquid or gas) to create a plasma. Emissions from the plasma are then collected and analyzed spectroscopically and the atomic spectral lines are used to determine elemental composition. Multivariate analysis is applied to the LIBS data to classify samples based on their compositional differences.

This work is being done to enable measurement by LIBS of samples of materials on the surface of Mars to determine if water is or has been present on Mars.

## Search for Hidden Chambers in the Pyramids

The structure of the Second Pyramid of Giza is determined by cosmic-ray absorption.

Luis W. Alvarez, Jared A. Anderson, F. El Bedwei, James Burkhard, Ahmed Fakhry, Adib Girgis, Amr Goneid, Fikhry Hassan, Dennis Iverson, Gerald Lynch, Zenab Miligy, Ali Hilmy Moussa, Mohammed-Sharkawi, Lauren Yazolino

The three pyramids of Giza are situated a few miles southwest of Cairo, Egypt. The two largest pyramids stand within a few hundred meters of each other. They were originally of almost exactly the same height (145 meters),

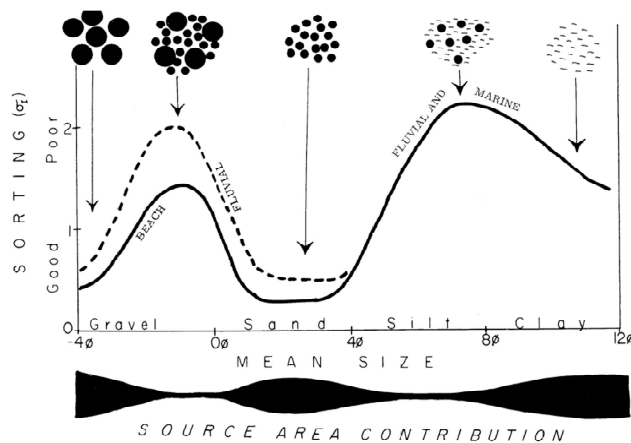
mun in the 9th century A.D., almost 3400 years after its construction. Of our group only Ahmed Fakhry (author of *The Pyramids*, professor emeritus of archeology, University of Cairo, and member of the Supreme Council of



# Rock physics

Come «funziona» una roccia ?!? Come sono legate le sue proprietà fisiche (densità, moduli, conducibilità termica ed elettrica, attenuazione, ...) alle proprietà e concentrazioni dei suoi componenti, e al modo in cui sono organizzati? Cosa succede se perturbiamo la composizione della roccia ?

A queste domande cerca di rispondere la «rock physics», usando la teoria dei mezzi compositi.



Folk, 1980

| Diameter (mm) | Diameter (phi) | Wentworth Size Class |
|---------------|----------------|----------------------|
| 4096          | -12            | Boulder              |
| 256           | -8             |                      |
| 64            | -6             |                      |
| 4             | -2             | Gravel               |
| 2             | -1             |                      |
| 1             | 0              | Very Coarse Sand     |
| 0.5           | 1              |                      |
| 0.25          | 2              | Sand                 |
| 0.125         | 3              |                      |
| 0.0625        | 4              |                      |
| 0.0313        | 5              | Coarse Silt          |
| 0.0156        | 6              |                      |
| 0.0078        | 7              |                      |
| 0.0039        | 8              | Silt                 |
| 0.0006        | 14             |                      |
|               |                | Mud                  |
|               |                |                      |



eni

# Rock physics

Le proprietà di una roccia dipendono da:

- Proprietà dei minerali:
  - misure di laboratorio
  - metodi *ab initio*
- Proprietà dei fluidi (Batzle & Wang)
- Interconnessione dei grani:

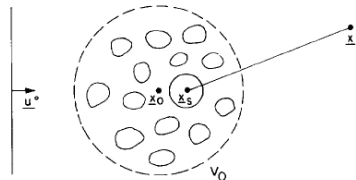
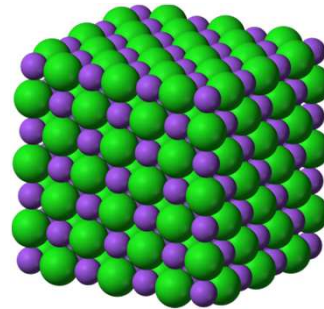
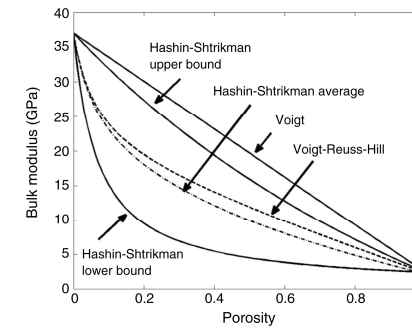
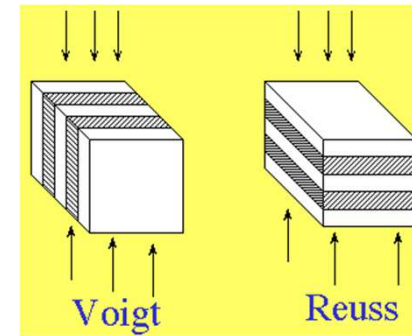


FIG. 1. Schematic diagram illustrating the scattering of a plane wave ( $u^i$ ) by a representative sphere  $V_0$  (dashed circle) of the effective medium. Individual inclusions are outlined by solid lines. The scattered fields are evaluated at point  $x$ .

Modelli a inclusione  
(Eshelby, Kuster & Toksoz, T-Matrix, ...)



Modelli a sfere  
(Hertz-Mindlin, Walton, Digby, ecc.)

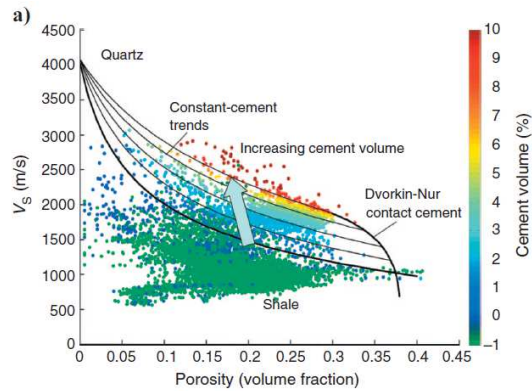


Limiti fisici per i compositi

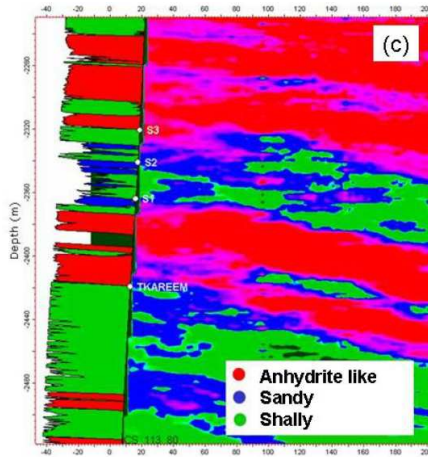


# Rock physics

- Alcune applicazioni della rock physics:



«Template» di interpretazione (Avseth, 2010)



Ricostruzione di dati mancanti (D'Agosto, 2008)

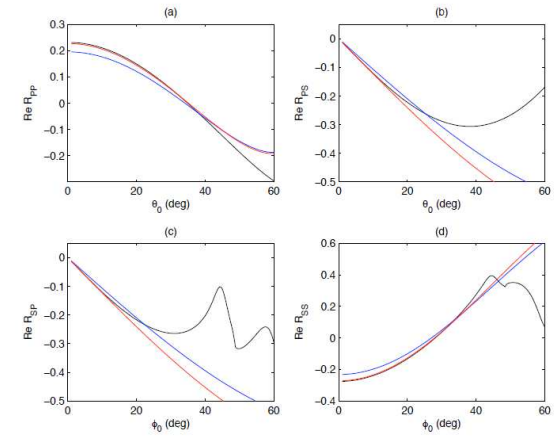
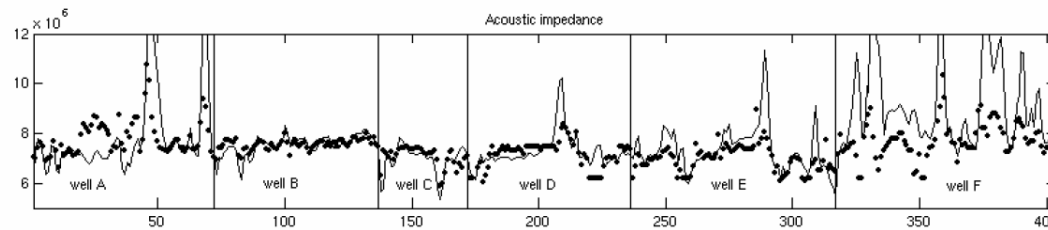


Figure 3: Exact (black), first order (blue) and second order (red) AVO curves for incidence medium  $V_{P0} = 2000\text{m/s}$ ,  $V_{S0} = 1500\text{m/s}$ , and  $\rho_0 = 2.0\text{gm/cc}$ , and target medium  $V_{P1} = 2200\text{m/s}$ ,  $V_{S1} = 1800\text{m/s}$ ,  $\rho_1 = 3.0\text{gm/cc}$ ,  $Q_{P1} = 15$ , and  $Q_{S1} = 10$ . All four reflection coefficients are plotted: (a)  $R_{pp}$ , (b)  $R_{ps}$ , (c)  $R_{sp}$ , (d)  $R_{ss}$ .

AVO (Innanen, 2012)



Log modeling (De Tomasi, 2004)



eni

# Rock physics

Un omaggio della rock physics alla città che ci ospita...

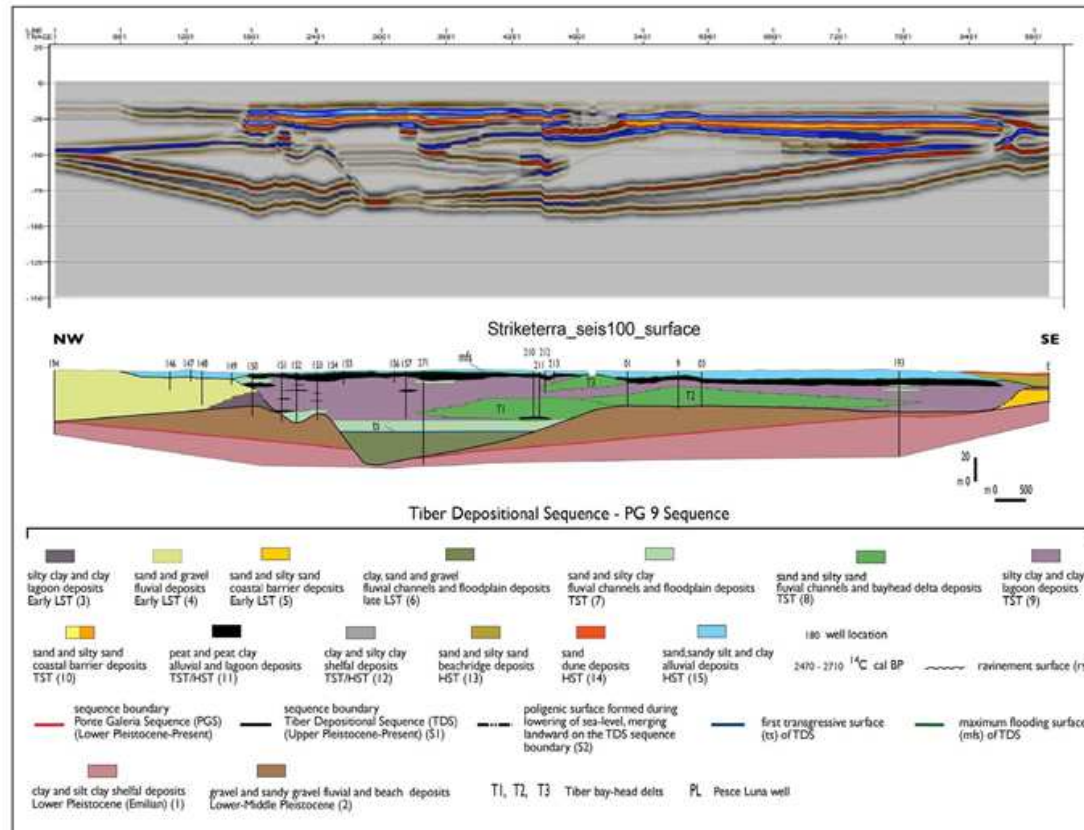


Fig. 2 – Example of seismic modeling of the Tiber sequence incised valley fill showing, from top to bottom: stratigraphic cross-section of the Tiber Depositional Sequence, strike impedance facies model, strike synthetic seismic profile at 100 Hz bandwidth.

Marini et al., Multi-scale characterization the Tiber delta deposit (Pleistocene-Holocene) as a depositional analogue for hydrocarbon reservoirs. GEOSD 2012



eni



## Altri argomenti di interesse per i fisici

---

- In questa presentazione non sono stati toccati numerose attività dove i fisici trovano spazio:
  - Calcolo tecnico/scientifico (green data center, collaborazioni con centri di calcolo nazionale, ecc.)
  - Produzione (simulazioni di giacimento, sovrappressioni, laboratori)
  - Monitoraggio microsismica e subsidenza
  - Risanamento ambientale (bonifica, monitoraggio agenti fisici, ecc.)
  - Chimica (sviluppo nuovi materiali, ecc.)
  - Ricerca di base
  - Option trading (Black-Scholes, etc.)
  - ecc.

Sul sito [www.eni.com](http://www.eni.com) è possibile avere maggiori informazioni sul gruppo, le sue attività e le attività di ricerca e innovazione di eni.



## Alcuni riferimenti utili:

---

|  |   |
|--|---|
| <a href="http://www.seg.org">www.seg.org</a><br><a href="http://www.eage.org">www.eage.org</a><br><a href="http://www.spwla.org">www.spwla.org</a><br><a href="http://www.spe.org">www.spe.org</a><br><a href="http://www.eageseg.org">www.eageseg.org</a><br><a href="http://www.speitaly.org">www.speitaly.org</a> | Principali associazioni professionali del settore oil & gas   |
| <a href="http://www.assomineraria.org">www.assomineraria.org</a>   | Associazione di categoria delle imprese italiane attive nel settore estrattivo  |
| <a href="http://www.eni.com/eni-award">www.eni.com/eni-award</a>   | Premio eni per l'energia<br>Si veda anche il premio di laurea annuale «G. Sclocchi» su <a href="http://www.speitaly.org">www.speitaly.org</a> |
| <a href="http://www.eniscuola.net">www.eniscuola.net</a>   | Sito eni dedicato all'educazione  |



## Per saperne di più...

---

Slawinski M.: Waves and Rays in Elastic continua, World Scientific Publishing co. 2010

Anderson D., Theory of the Earth, Blackwell 1989

Menke W., Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory, Associated Press 2012

Milton G., The Theory of Composites, Cambridge University Press 2002

Gilmore R., Catastrophe Theory for Scientists and Engineers, Dover 1993

Close F., Half-Life: The Divided Life of Bruno Pontecorvo, Physicist or Spy, Basic Books 2015



## Ringraziamenti

---

- Il management di Eni Upstream & Technical Services
- Numerosi colleghi (fisici e no) che hanno contribuito fornendo alcuni degli esempi illustrati

