

# I fossili e il processo di fossilizzazione

- Chiara Sorbini
- Museo di Storia Naturale dell'Università di Pisa
- Giovanni Bianucci
- Dipartimento di Scienze della Terra - Unipi



Dal CORSO DI  
**PALEONTOLOGIA**

per Scienze Naturali  
del

Prof. Giovanni Bianucci

**Lezione 1**

Introduzione alla Paleontologia e  
ai contenuti del corso

**Lezione 2**

Tafonomia  
(prima parte)

**Lezione 4**

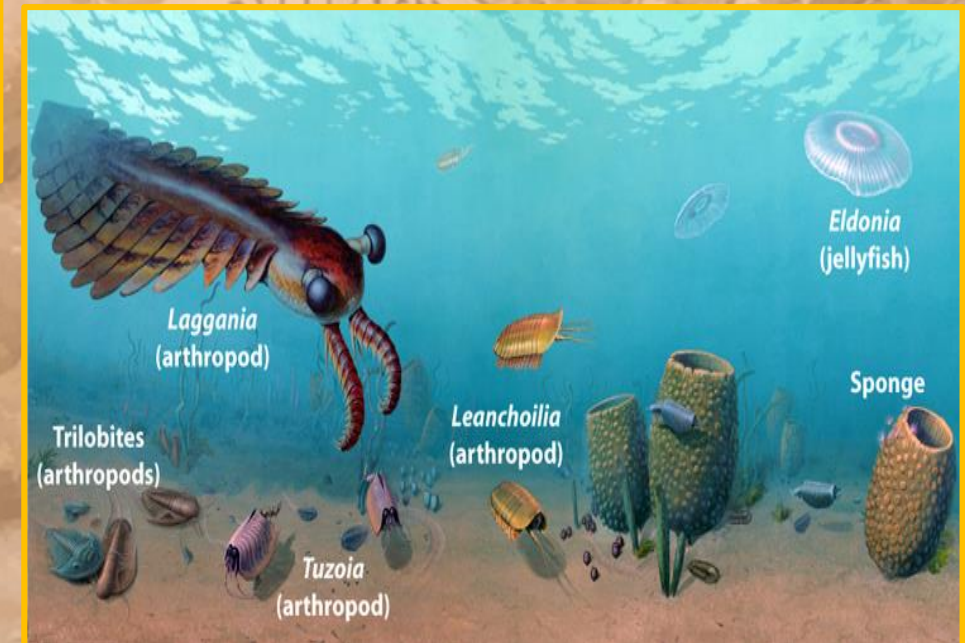
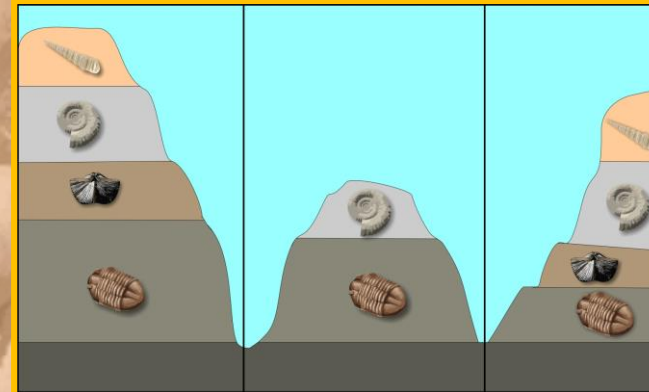
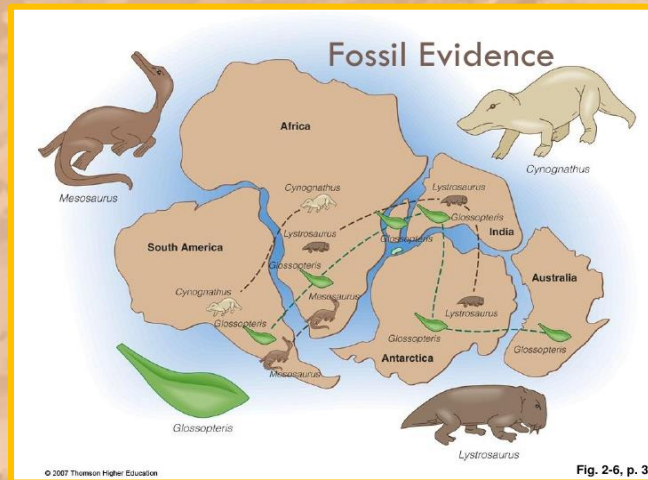
Tafonomia  
(seconda parte)

**Lezione 5**

Tafonomia  
(terza parte)

**Lezione 6**

Tafonomia  
(quarta parte)





# PALEONTOLOGIA

La Paleontologia è una  
branca delle scienze che  
**attraverso lo studio dei  
fossili ricostruisce come è  
stata e come si è evoluta la  
vita nel passato**

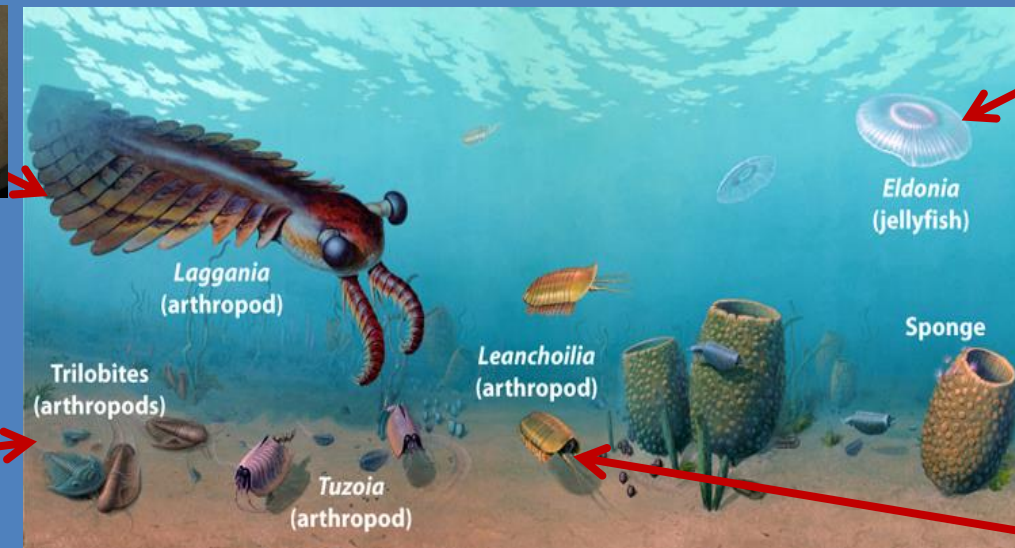
## Paleontologia

*palaiòs*  
= vecchio

*òntos*  
= essere

*lògos*  
= studio

studio degli organismi antichi



ESEMPIO

Fauna di Burgess Shale Cambriano (500 milioni di anni fa)

**A COSA SERVONO  
praticamente  
I FOSSILI?**

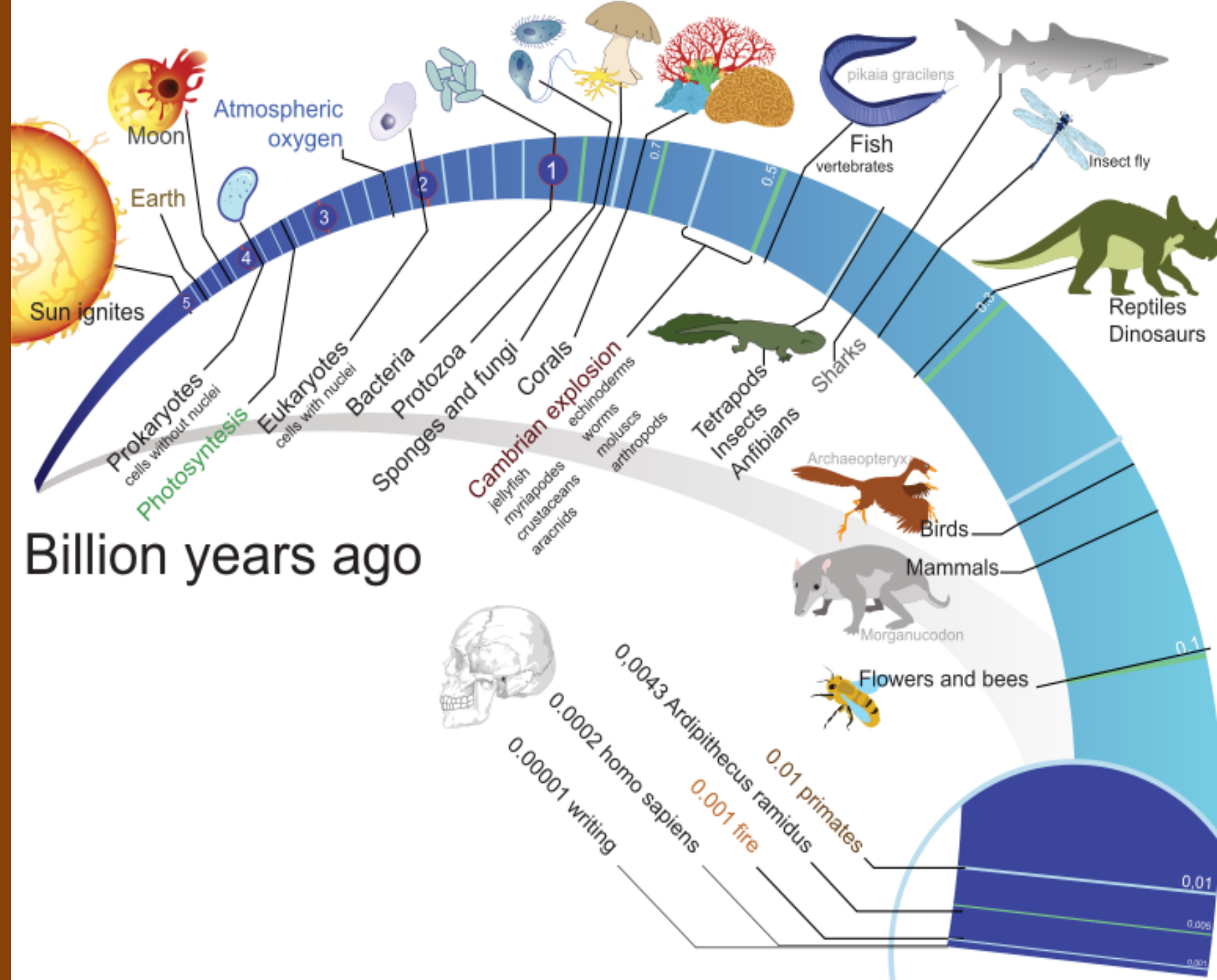
e quindi

**DI COSA SI OCCUPA  
di preciso  
LA PALEONTOLOGIA?**



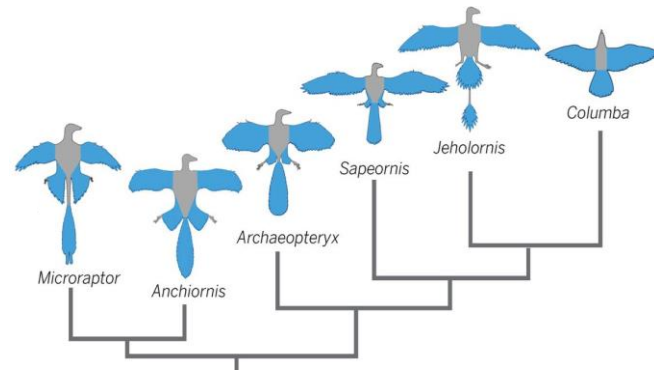


La Paleontologia  
ricostruisce attraverso  
i fossili la **storia della  
vita nel passato**  
iniziata oltre 3 miliardi  
di anni fa con i primi  
organismi unicellulari





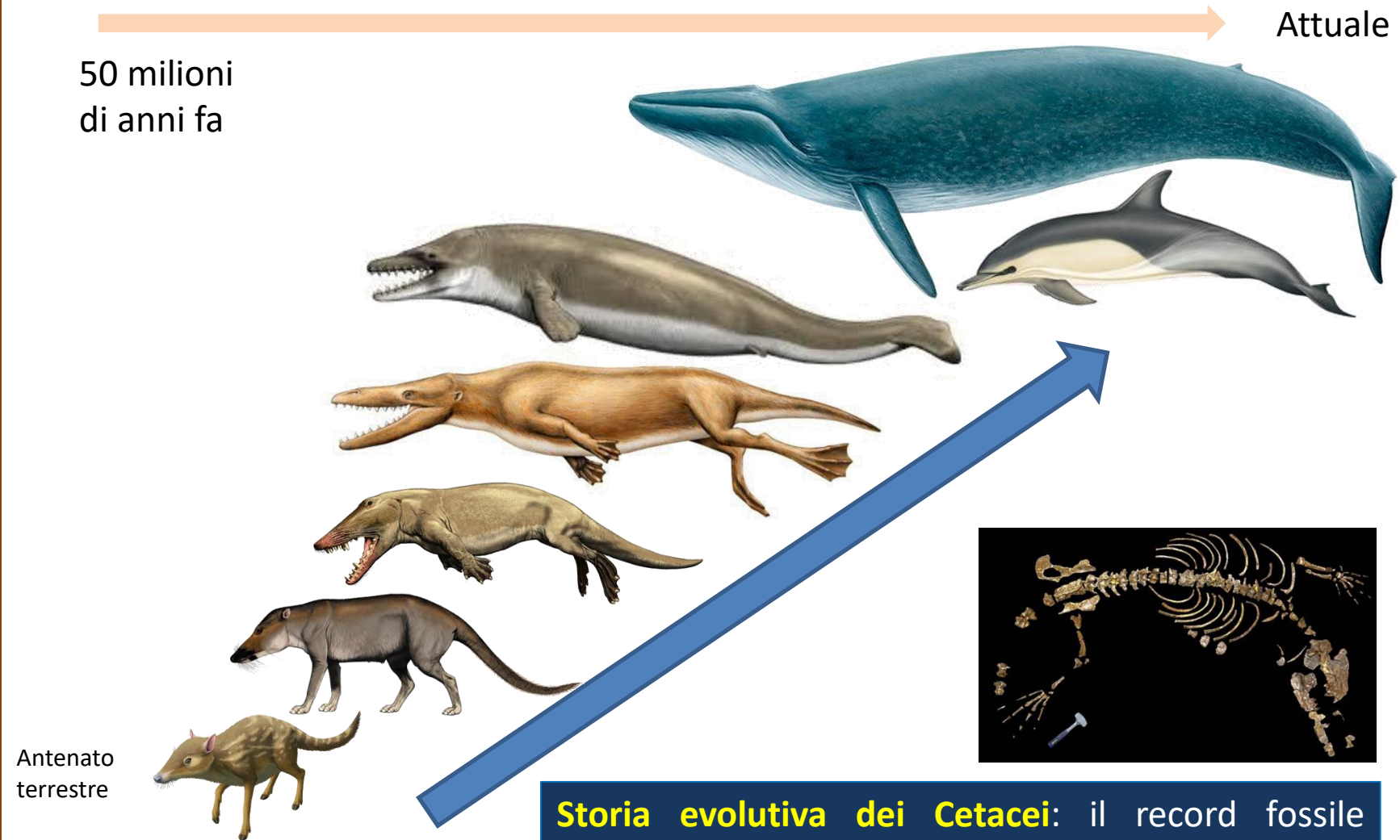
La Paleontologia ha  
anche un ruolo  
importante nel  
**ricostruire le  
relazioni evolutive  
tra gli organismi e  
fornire prove  
dell'evoluzione**





I fossili documentano in dettaglio i **passaggi evolutivi** che hanno permesso ad organismi attuali di trasformarsi ed adattarsi a condizioni ambientali molto diverse rispetto ai loro antichi progenitori.

I fossili ci permettono pertanto di **colmare le apparenti distanze morfologiche-ecologiche tra alcuni organismi attuali e i loro più stretti parenti attuali.**



**Storia evolutiva dei Cetacei:** il record fossile permette di ricostruire in dettaglio tutte le fasi che a partire da 50 milioni di anni fa hanno portato dei mammiferi terrestri a trasformarsi in balene, delfini e ci permette di capire come mai i Cetacei sono parenti stretti degli Artiodattili

La Paleontologia  
ricostruisce le  
**geografie del  
passato** attraverso la  
distribuzione spaziale  
dei fossili





La Paleontologia  
ricostruisce con i fossili  
il **modo di vita e**  
**l'ecologia degli**  
**organismi del passato**  
e, in associazione con i  
dati della  
sedimentologia, gli  
**ambienti del passato**

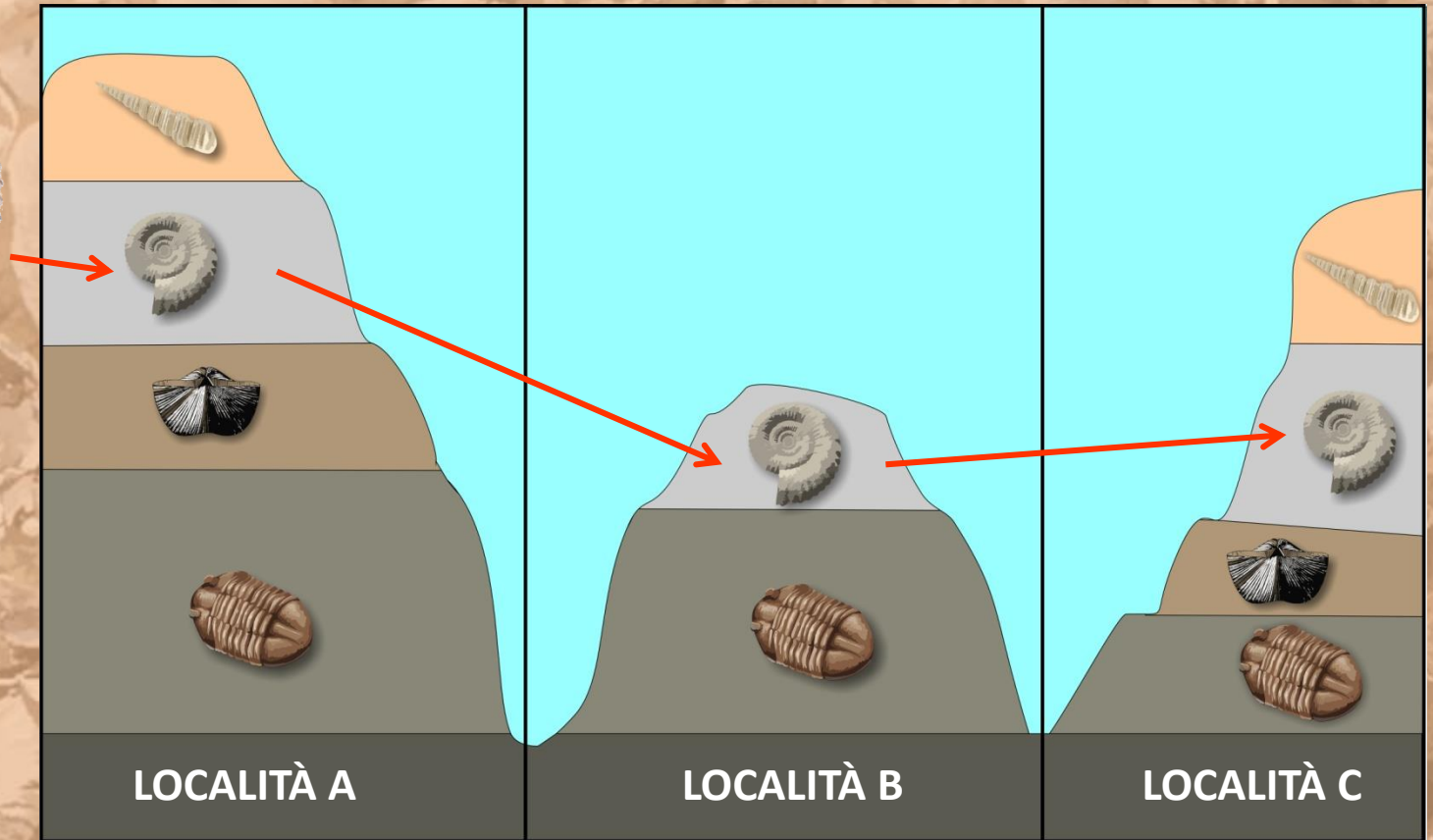


**Orme fossili** di  
tetrapodi trovate nei  
**Monti Pisani** ci danno  
informazione sull  
postura dei rettili  
triassici e del **passaggi**  
**da quadrupedi a bipedi**  
(con le prime forme  
dinosauriane).  
Inoltre queste orme  
fossili stanno ad  
indicare **un ambiente**  
**costiero di delta.**

La Paleontologia  
utilizza i fossili per  
fornire **datazioni**  
**relative** delle  
successioni  
sedimentarie



AMMONITE





# Carta Cronostratigrafica Internazionale

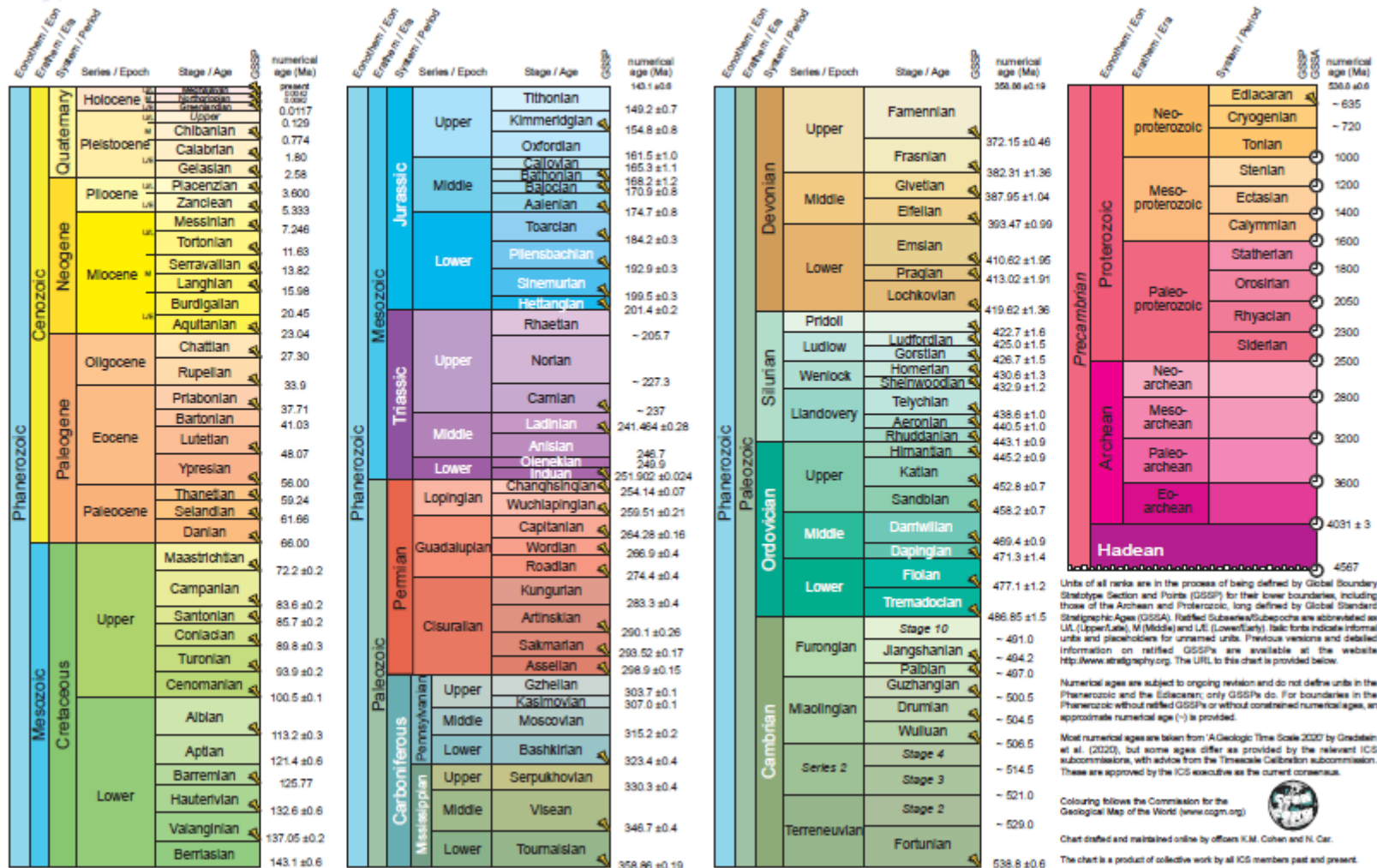


## INTERNATIONAL CHRONOSTRATIGRAPHIC CHART

www.stratigraphy.org

International Commission on Stratigraphy

v 2024/12



Eratema	Serie	Epoca	Ma
CENOZOICO	Olocene		0,012
	Pleistocene		2,6
	Pliocene		5,3
	Miocene		23
	Oligocene		34
	Eocene		56
MESOZOICO	Paleocene		66
	Cretaceo		145
	Giurassico		201
	Triassico		252
	Permiano		299
	Carbonifero		359
PALEOZOICO	Devoniano		419
	Siluriano		444
	Ordoviciano		485
	Cambriano		541

La Paleontologia studia  
attraverso i fossili  
**l'evoluzione della vita  
sulla Terra nel corso  
del tempo geologico**

Era	Period	Epoch	Stage	AGE (Ma)
Cenozoic	Neogene	Pliocene	Pliocene	2.6
		Pliocene	Pliocene	5.3
		Miocene	Tortonian	
		Miocene	Sarmatian	
		Miocene	Burdigalian	
	Paleogene	Oligocene	Aquitanian	23
		Oligocene	Chattian	
		Eocene	Rupelian	34
		Eocene	Barthonian	
		Eocene	Lutetian	
Mesozoic	Cretaceous	Late	Ypresian	56
			Therapsid	
			Scandinavian	
			Danian	66
			Maastrichtian	
	Jurassic	Late	Campanian	
			Santonian	
			Comanchian	
			Turonian	100
			Cenomanian	
		Early	Albian	
			Aptian	
			Barremian	
			Hauterivian	
			Valanginian	146
	Triassic	Late	Berriasian	
			Tithonian	
			Kimmeridgian	161
			Oxfordian	
			Callovian	176
Paleozoic	Permian	Late	Bajocian	
			Aalenian	
			Toarcian	
			Pliensbachian	
			Sinemurian	200
	Carboniferous	Late	Rhaetian	
			Norian	
			Carnian	228
			Ladinian	
			Anisian	245
	Devonian	Early	Olenekian	251
			Changhsingian	
			Wuchiapingian	260
			Capitanian	
			Wordian/Roadian	271
Paleozoic	Permian	Late	Kungurian	
			Artinskian	
			Sakmarian	
			Asselian	299
			Gzhelian	
	Carboniferous	Late	Kasimovian	
			Moscovian	
			Bashkirian	318
			Serpukhovian	
			Visean	
Paleozoic	Carboniferous	Early	Tournaisian	359
			Famennian	
			Frasnian	
			Givetian	385
			Eifelian	
	Devonian	Early	Emasian	396
			Pragian	
			Lochkovian	
			Ludlow	416
			Fridoll	419
Paleozoic	Silurian	Late	Homerian/Sheinwoodian	423
			Telychian	428
			Aeronian/Rhuddanian	
			Hirnantian	444
			Katian	
	Ordovician	Late	Sandbian	461
			Dartmian	
			Dapingian	472
			Floian	
			Tremadocian	
Paleozoic	Cambrian	Late	Stage 10	488
			Stage 9	
			Paibian	501
			Drumian	
			Stage 5	
	Silurian	Series 3	Stage 4	510
			Stage 3	
			Stage 2	521
			Fortunian	
			Terreneuvian	542

Paleogeographic Maps



Early Neogene



Late Cretaceous



Early Cretaceous



Late Triassic



Middle Permian



Middle Mississippian



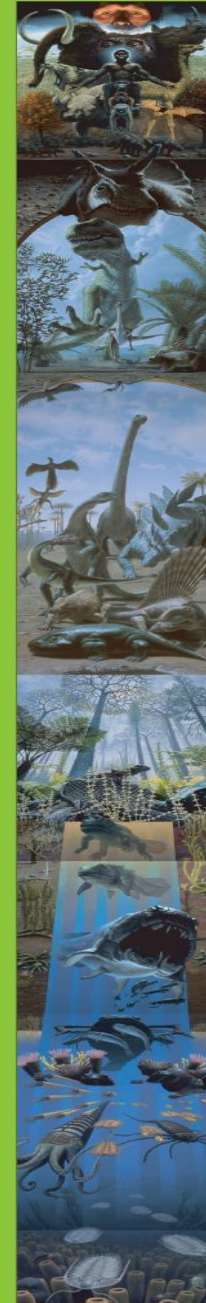
Early Middle Devonian



Middle Ordovician



Earth History



I cambiamenti nella  
fauna e nella flora  
nel corso del  
tempo geologico  
sono fortemente  
legati all'evoluzione  
geodinamica e  
climatica della  
Terra.



I fossili sono importanti  
anche perché **sono  
beni culturali**: Musei,  
Geositi, ecc.



Museo di Storia Naturale  
Berlino



Polledrara di Cecanibbio  
Roma





I fossili sono importanti anche perché **molti materiali lapidei (come i calcari e di conseguenza i marmi) sono di origine organica** (nelle foto la dolomite di Zandobbio BG è il risultato dell'accumulo di scheletri carbonatici di scogliere coralline del Giurassico (200 Ma circa)





I fossili possono rappresentare importanti **fonti energetiche non rinnovabili**: petrolio, carbone, ligniti, torbe sono chiamati **combustibili fossili**





**La Paleontologia  
studia i fossili**



AMMONITE



MUSEO



La Paleontologia interagisce fortemente con la **Biologia** (zoologia, botanica, genetica, ecologia, ecc.), in quanto studia resti di **ex vivi**.

Il confronto con gli organismi attuali è fondamentale per riconoscere gli organismi del passato, per ricostruirne la forma e il loro modo di vita.

**fossile**



AMMONITE



Ricostruzione  
di AMMONITE

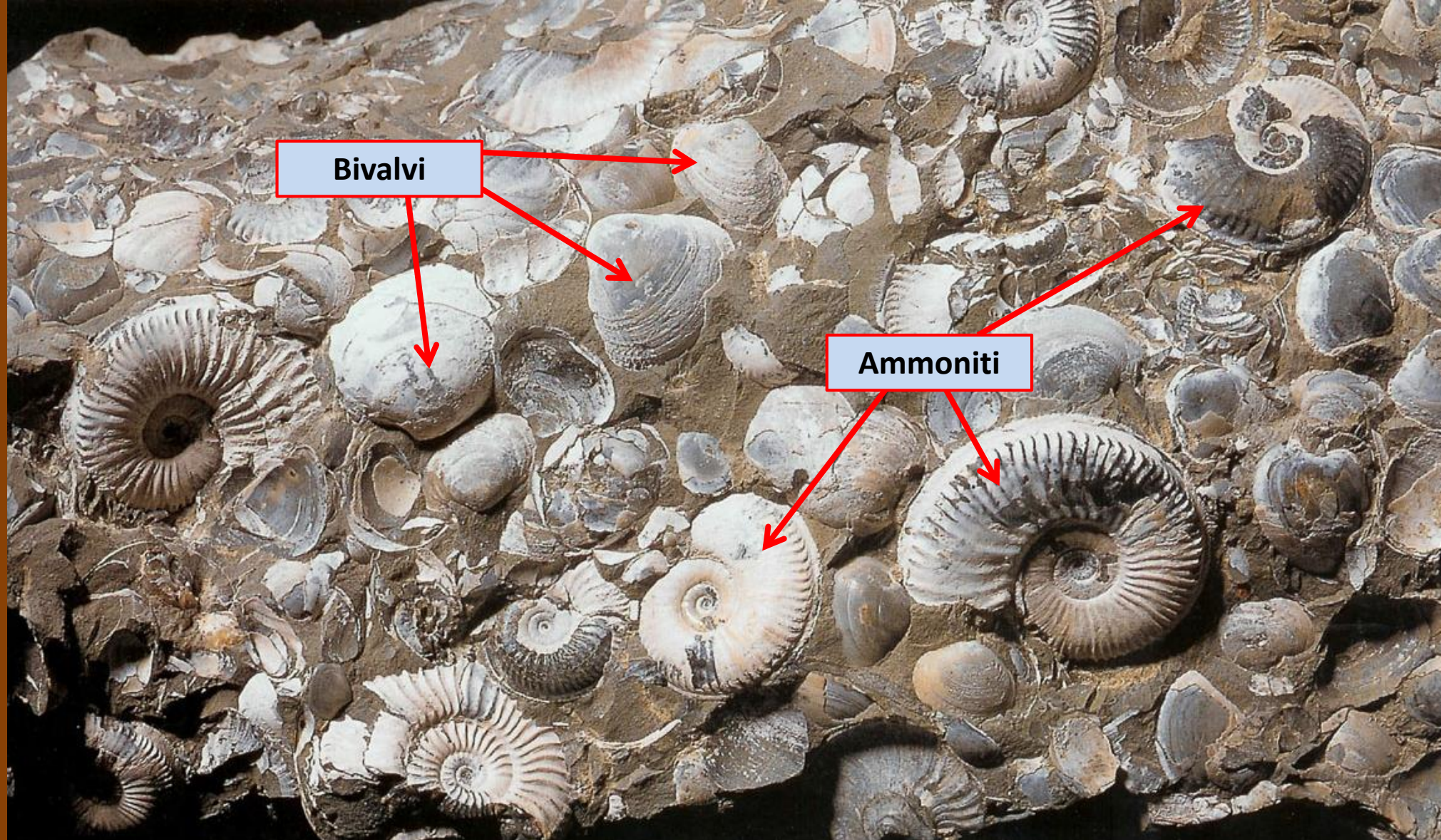


NAUTILO



# FOSSILI E ROCCE

I fossili si trovano all'interno delle rocce sedimentarie: la Paleontologia è quindi anche una **disciplina delle Scienze Geologiche**



**Roccia sedimentaria con ammoniti e bivalvi**



# TAFONOMIA

La Tafonomia comprende tutti i processi che si susseguono dalla **morte** di un organismo fino alla sua completa **fossilizzazione**, ovvero il suo passaggio dalla **biosfera** alla **litosfera**.

TEMPO

ANALISI PALEOECOLOGICA

RITROVAMENTO DEI FOSSILI

LITOSFERA

TAFONOMIA

PROCESSI di FOSSILIZZAZIONE

SEPPELLIMENTO

PROCESSI BIOSTRATINOMICI

MORTE

ORGANISMI (Biosfera)

**La Tafonomia si  
suddivide in 4 fasi**

#### **IV- FOSSILIZZAZIONE**

Processi di trasformazione diagenetica  
all'interno del corpo sedimentario



#### **III- SEPPELLIMENTO**

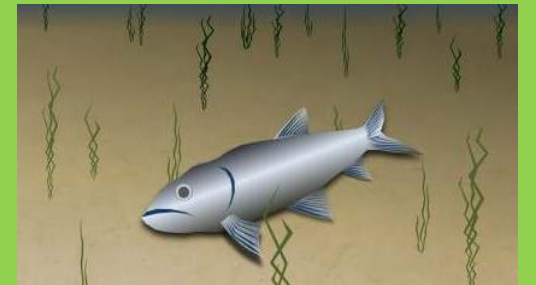


#### **II- BIOSTRATINOMIA**

Dalla morte o distacco di parti a prima del  
seppellimento definitivo



**I- MORTE DEGLI ORGANISMI  
O DISTACCO DI LORO PARTI**  
(distacco parti, es: una foglia da un albero)





**Le 4 fasi della  
Tafonomia si  
possono dividere  
in 2 gruppi.**

#### **IV- FOSSILIZZAZIONE**

Processi di trasformazione diagenetica  
all'interno del corpo sedimentario

#### **III- SEPPELLIMENTO**

**2 - Dal seppellimento  
alla definitiva  
formazione del fossile**

#### **II- BIOSTRATINOMIA**

Dalla morte o distacco di parti a prima del  
seppellimento definitivo

#### **I- MORTE DEGLI ORGANISMI O DISTACCO DI LORO PARTI**

(distacco parti, es: una foglia da un albero)

**1- Dalla  
morte a prima del  
seppellimento  
definitivo**

**Le 4 fasi della  
Tafonomia si  
possono dividere  
in 2 gruppi.**  
Nelle prime due  
fasi prevalgono i  
**processi di  
decomposizione** e  
nelle seconde 2 fasi  
i **processi di  
fossilizzazione**

#### **IV- FOSSILIZZAZIONE**

Processi di trasformazione diagenetica  
all'interno del corpo sedimentario

#### **III- SEPPELLIMENTO**

In queste 2 fasi  
prevalgono i  
**processi di  
fossilizzazione**

#### **II- BIOSTRATINOMIA**

Dalla morte o distacco di parti a prima del  
seppellimento definitivo

#### **I- MORTE DEGLI ORGANISMI O DISTACCO DI LORO PARTI**

(distacco parti, es: una foglia da un albero)

In queste 2 fasi  
prevalgono i **processi  
di decomposizione**



**Le 4 fasi della  
Tafonomia si  
possono dividere  
in 2 gruppi.**

Le prime due fasi si  
sviluppano in **tempi  
storici** e le  
seconde 2 fasi in  
**tempi geologici**

**IV- FOSSILIZZAZIONE**

Processi di trasformazione diagenetica  
all'interno del corpo sedimentario

**III- SEPPELLIMENTO**

Si sviluppano in **tempi  
geologici** (migliaia o  
milioni di anni).  
I resti subiscono  
profonde  
trasformazioni  
chimiche

**II- BIOSTRATINOMIA**

Dalla morte o distacco di parti a prima del  
seppellimento definitivo

**I- MORTE DEGLI ORGANISMI  
O DISTACCO DI LORO PARTI**

(distacco parti, es: una foglia da un albero)

Si sviluppano in **tempi  
storici** (anni, decine o  
massimo centinaia di  
anni) e determinano  
una **drastica riduzione  
numerica** dei resti  
degli organismi

## Morte degli organismi

### Morte individuale

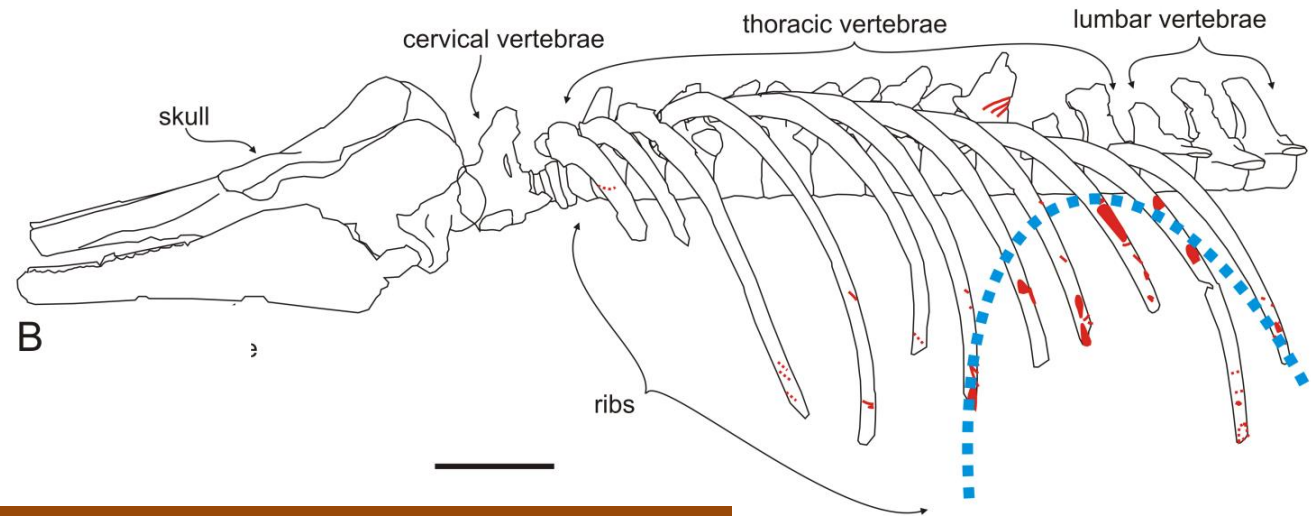
Fori circolari su conchiglie di molluschi (gasterpodi e bivalvi). Sono stati lasciati da **gasteropodi predatori** del genere *Natica* che perforano il guscio utilizzando la radula (apparato boccale masticatorio) e acido secreto.





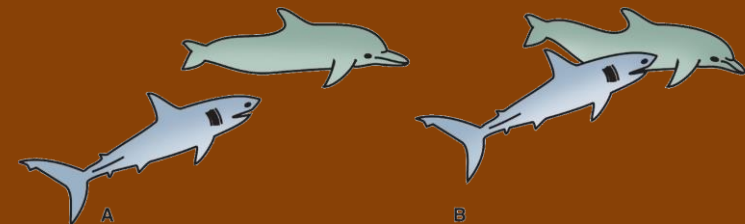
Rimontando lo scheletro ci si è accorti che molte tracce corrispondono ad un **unico morso sferrato dallo squalo nel ventre del delfino**.

La posizione del morso è compatibile con la strategia di attacco dei grossi squali attuali: in genere attaccano la preda da dietro procedendo dal basso verso l'alto



Perché lo squalo non ha completamente divorato il delfino?

- 1) Non ha morso per fame
- 2) Il delfino era già morto (scavenging)





## Morte degli organismi

### Morte individuale

#### Inglobamento in resina vegetale.

La resina prodotta da alcune piante può invischiare insetti vari ed inglobarli mentre cola sul tronco.

Alcune di queste resine si sono conservate fossili sotto forma di **ambra** in alcuni casi con all'interno l'insetto morto per inglobamento.





# Morte degli organismi

## Morti collettive

### Eutrofizzazione

Il ritrovamento di forti concentrazioni di fossili (es. pesci) su **superfici di strato** può essere ricondotta ad una **moria di massa** dovuta a condizioni di **eutrofizzazione** (es. bloom fitoplanctonico) delle acque





## La degradazione dell'ordine

Tutti gli organismi alla loro morte in condizioni “normali” vengono **decomposti** in:

acqua



biossido di carbonio



minerali



Pertanto tutta la materia (organica ed inorganica) degli organismi dovrebbe essere restituita all'ambiente sotto forma di semplici composti inorganici



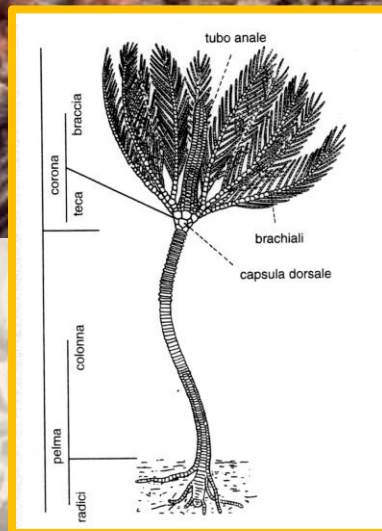
La catena di decomposizione può interrompersi per cause diverse, tra cui:

1- **Rapido seppellimento**, dovuto ad inondazioni, frane, correnti di torbida, ecc.

2- **Deposizione in ambienti privi o con poco ossigeno**, es. ambiente di torbiera, bacini marini e/o lacustri stagnanti, ecc. La carenza in ossigeno inibisce la decomposizione da parte dei microrganismi, come pure la mancanza di umidità o le bassissime temperature.

*Pertanto la condizione primaria per la formazione dei fossili è la **rapida sottrazione agli agenti meccanico-fisici e biologici che tendono a distruggere gli organismi.***

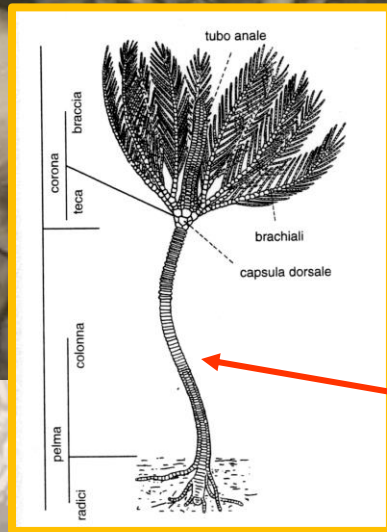
**La disarticolazione** può essere favorita da **agenti fisici** (correnti, moto ondoso, vento) e **biologici** (organismi necrofagi). Pertanto il **rapido seppellimento** e, ad esempio, la **mancanza di organismi sul fondale marino**, favoriscono la **conservazione di organismi completamente articolati**.



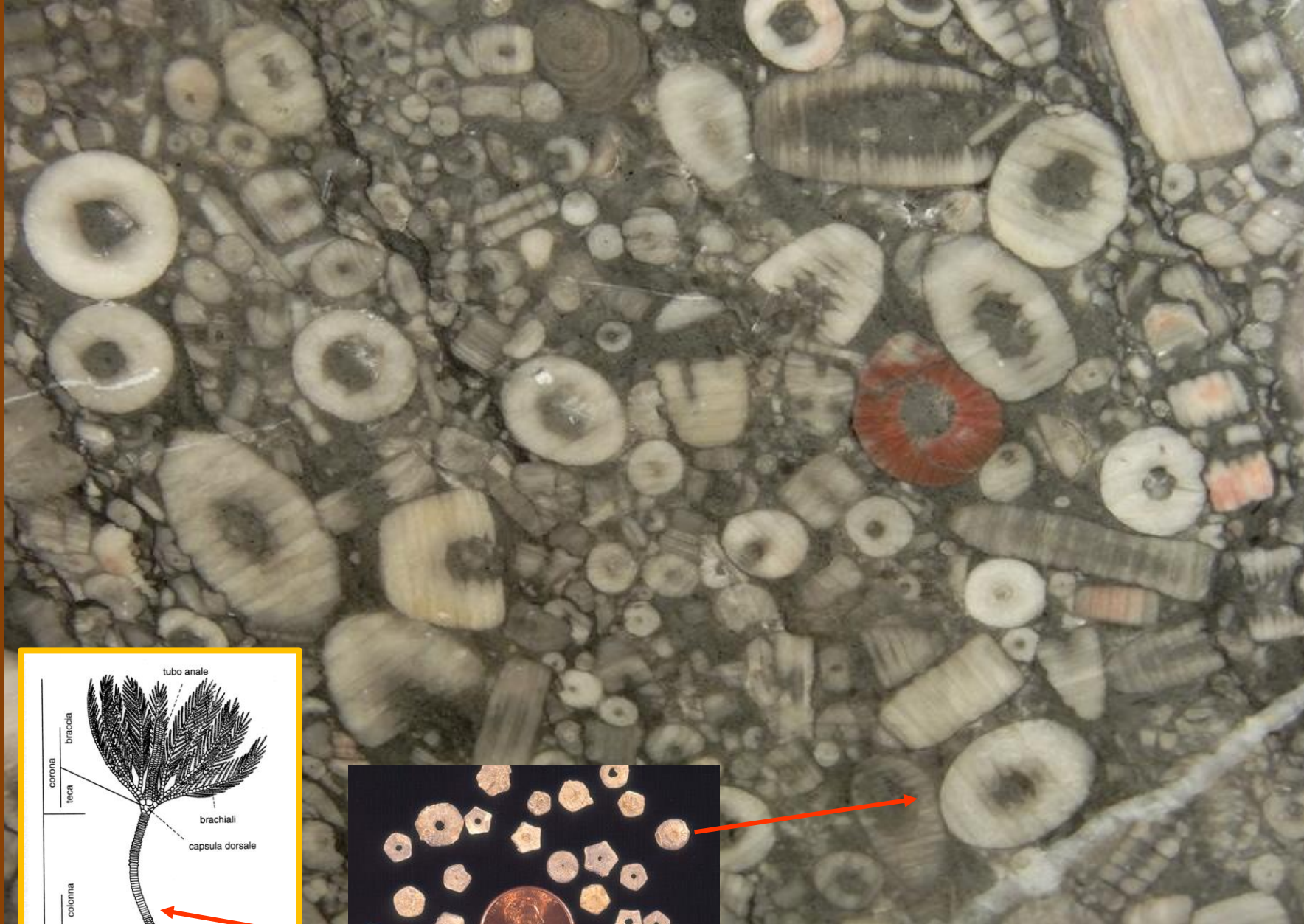
**Crinoidi articolati**



Se invece lo scheletro rimane per un **lungo tempo esposto** prima di essere ricoperto dal sedimento in genere va incontro alla **disarticolazione**, processo accelerato da **agenti fisici** (es. correnti sul fondale marino) e **biologici** (azione di organismi necrofagi).

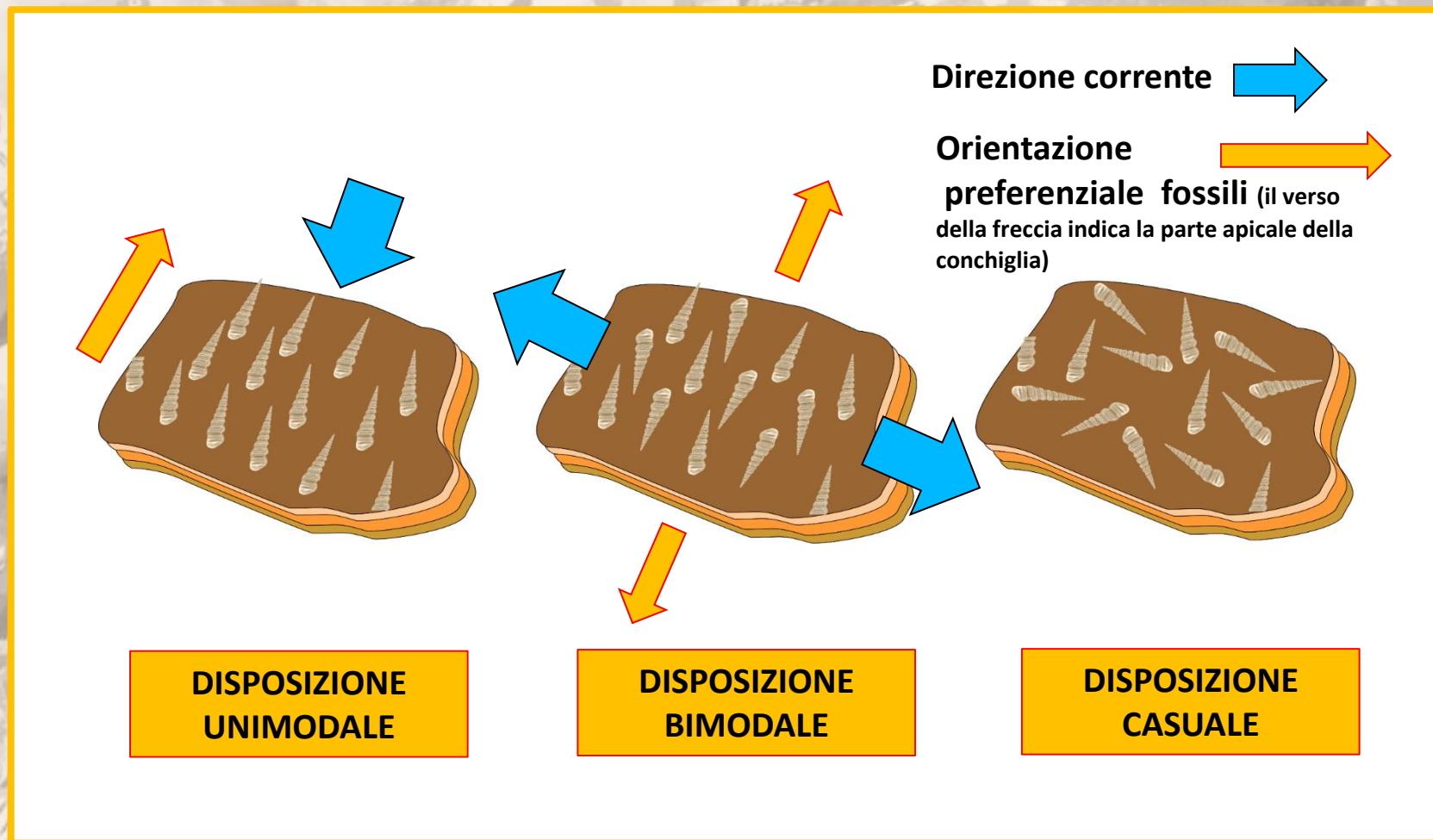


**Crinoidi disarticolati**



## I fossili sulla superficie di uno strato possono avere:

Dall'analisi della **disposizione geometrica dei fossili sulla superficie di strato e dentro il sedimento** possiamo ricavare informazioni importanti sul **trasporto**, sulle **correnti** e su altri **fattori fisici** che hanno agito sul fondale marino

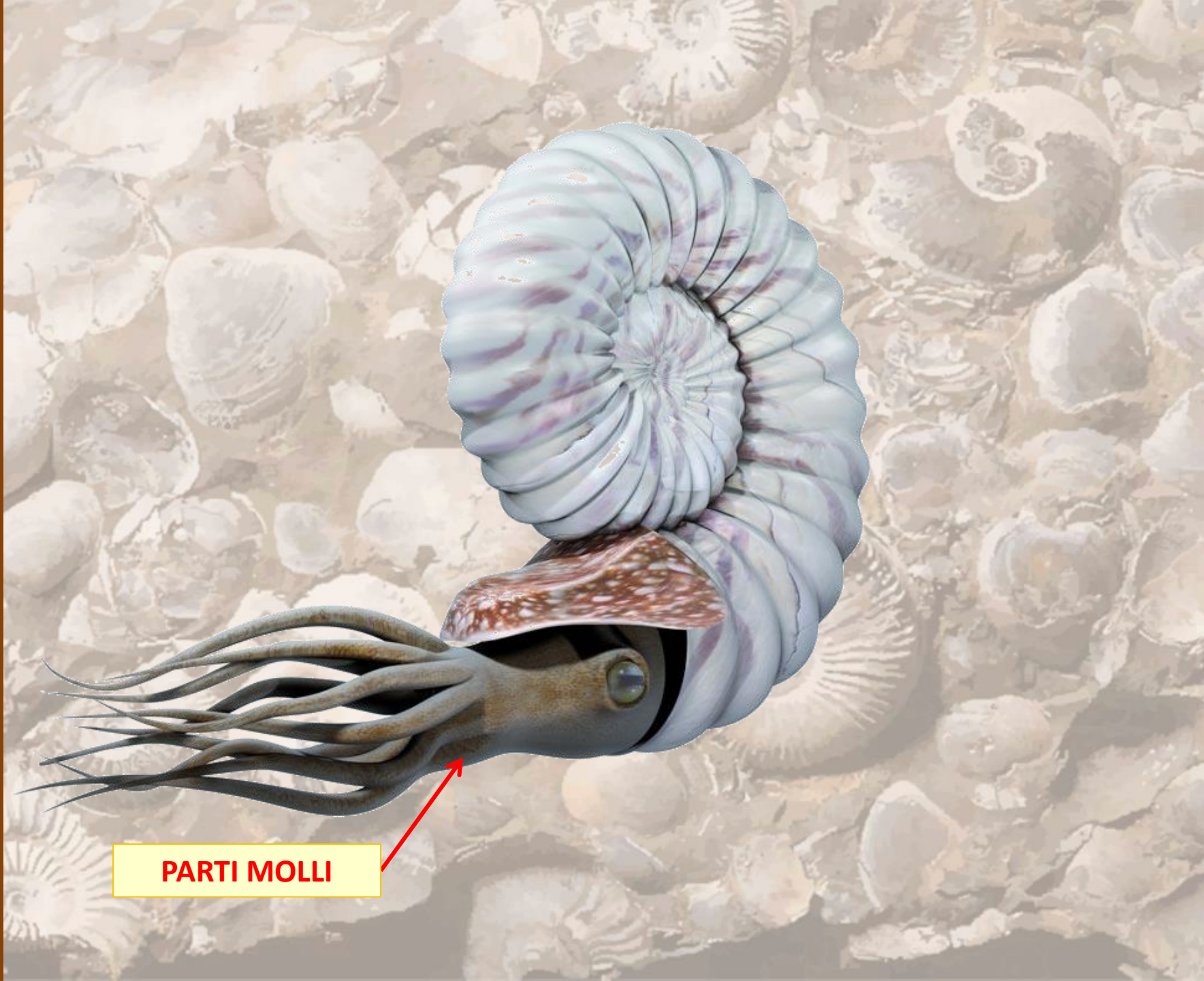




## PARTI MOLLI

Carboidrati, proteine, grassi, acqua (carbonio, ossigeno idrogeno, azoto, solfo).

In genere sono soggette a **rapida decomposizione** dopo la morte dell'organismo e solo in casi molto rari fossilizzano.

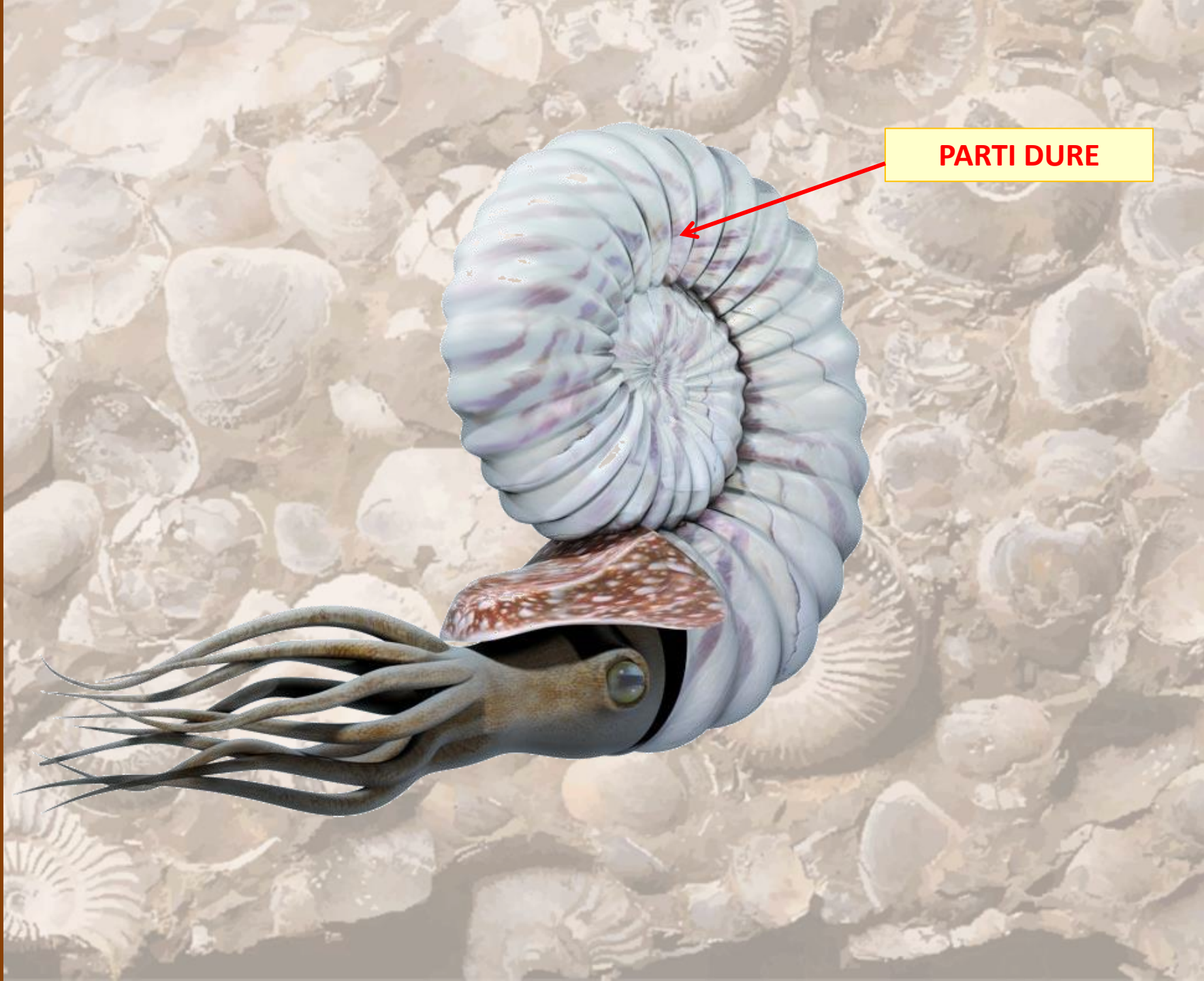


PARTI MOLLI



## PARTI DURE

Parti più resistenti che in genere costituiscono le strutture scheletriche degli organismi. Non si decompongono facilmente e **hanno maggiori probabilità di fossilizzarsi**





## LA FOSSILIZZAZIONE E' UN PROCESSO SELETTIVO

In genere di un organismo si conservano fossili solo le “**parti dure**” sia mineralizzate (ossa, gusci), sia non mineralizzate (chitina, lignina, ecc.).

Le “**parti molli**” (carboidrati, proteine, acqua) subito dopo la morte sono soggette a rapida decomposizione e raramente fossilizzano)

**Conservazione di parti dure:** quanto si può conservare dipende dal tipo di organismo. Alcuni organismi solo eccezionalmente fossilizzano perché non hanno parti dure



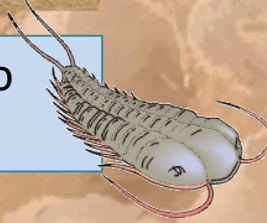
Scheletro di  
vertebrato  
(stegosauro)



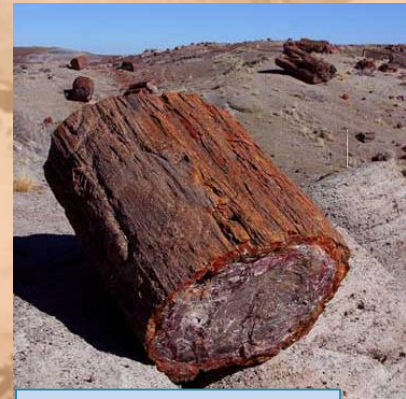
Dente di squalo  
(megalodon)



Esoscheletro  
(trilobite)



Conchiglia  
(ammonite)



Legno (tronchi  
silicizzati)



Medusa: **no parti  
dure, solo  
eccezionalmente se  
ne conserva  
l'impronta**





## PARTI DURE

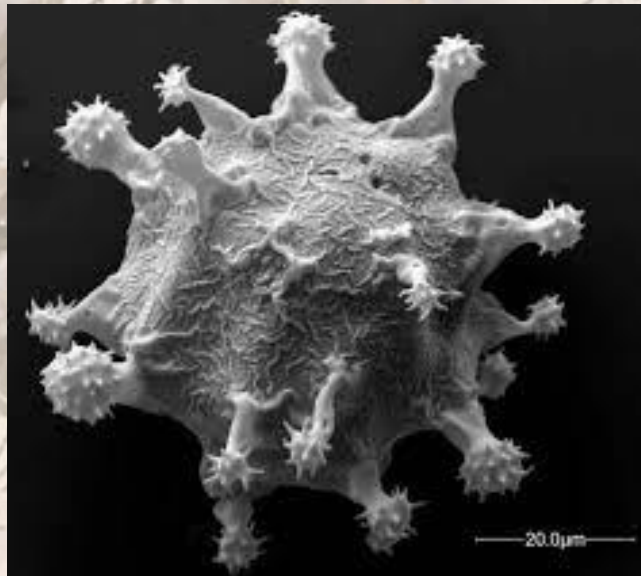
Le parti dure possono essere rappresentate da sostanze organiche **non mineralizzate** o da parti già in origine **mineralizzate**





## PARTI DURE NON MINERALIZZATE

Chitina  
Cellulosa  
Collagene  
Cheratina  
Conchiolina





# Chitina

$(C_8H_{13}NO_5)_n$

E' un **polisaccaride azotato** presente in vari gruppi di organismi animali.

Può trovarsi associata a **Calcite** o a **Fosfato di calcio**.

E' uno dei principali componenti dell'esoscheletro di molti **Artropodi** (**Crostacei**, **Insetti**); tra questi probabilmente anche gli estinti **Trilobiti** avevano scheletro parzialmente chitinoso.



**Insetti**



**Crostacei**



**Brachiopode *Lingula***



**Trilobiti**

E' presente insieme al fosfato di calcio nei **Brachiopodi** chitinofosfatici (**Lingulata**). Si trova anche negli Anellidi, Briozoi, Cinidaria e Foraminiferi.



# Cellulosa

$$(C_6H_{10}O_5)_n$$

E' un **polisaccaride** formato da un **numero elevato di molecole di glucosio**.

E' largamente diffusa nei **vegetali**.

Si trova anche in alcuni gruppi di Monere (Procarioti), **Acritarchi** (microfossili a parete organica) e **Dinoflagellati**

(alghe protiste acquatiche). E' molto rara negli organismi animali.



Piante



Acritarco



Dinoflagellato



# Collagene

E' una **proteina fibrosa** ed è il principale componente del **tessuto connettivo degli animali**.

E' il principale componenti dei **Chitinozoi** e dei **Graptoliti** (Emicordati) ed è diffuso nei **Cordati** e negli **Anellidi**.

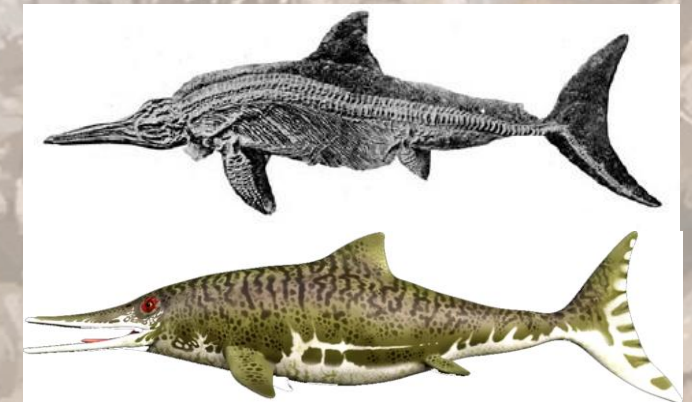
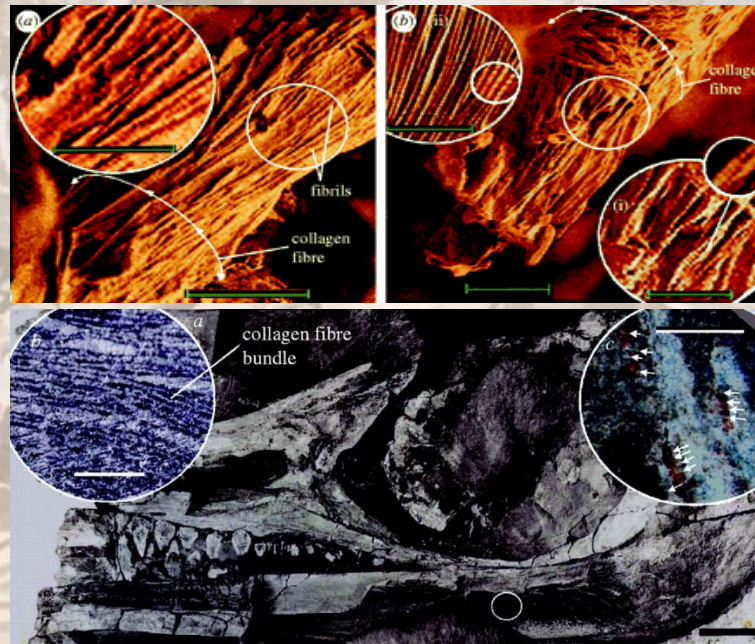
Assente nel mondo vegetale.



Chitinozoo



Graptoliti



Conservazione di collagene in un Ittiosauro



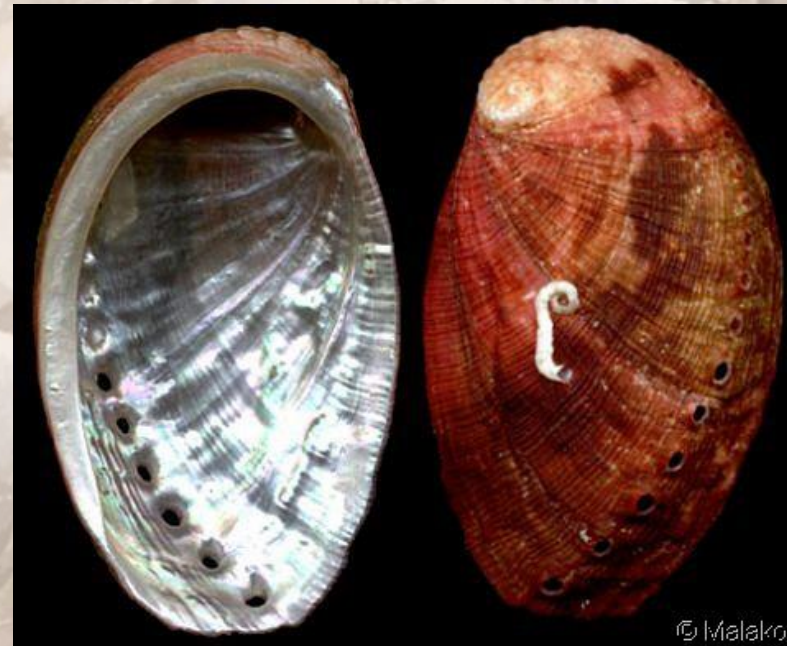
## Conchiolina

**Proteine complesse** secrete dai **Molluschi**, è presente nei gusci insieme al carbonato di calcio.

## Cheratina

**Proteina filamentosa** ricca di **zolfo** secreta dai **Vertebrati**.

Principale componente dello **strato corneo** della pelle, unghie, pelo, corna e piume.



Conchiglia di *Haliotis* (Gasteropode) con strato madreperlaceo di conchiolina sulla parete interna



Uccello fossile con piume



## Fossilizzazione della materia organica

I principali processi che portano alla conservazione della materia organica sono la **mummificazione**, la **carbonificazione** e la **permineralizzazione**. Le più comuni permineralizzazioni sono in **carbonati**, in **silice**, in **pirite** e in **ghiaccio**.

- Mummificazione
- Carbonificazione
- Permineralizzazione
  - ✓ *Carbonati*
  - ✓ *Silice*
  - ✓ *Pirite*
  - ✓ *Ghiaccio*



## Fossilizzazione della materia organica

### Mummificazione

La mummificazione è un processo in cui un organismo morto subisce una **massiccia e repentina disidratazione**. Processo conservativo valido per **alcune migliaia di anni**, poi l'ossidazione procede e distrugge ogni tipo di mummia.

- **Mummificazione**
- Carbonificazione
- Permineralizzazione
  - ✓ *Carbonati*
  - ✓ *Silice*
  - ✓ *Pirite*
  - ✓ *Ghiaccio*



## Fossilizzazione della materia organica

### Mummificazione

In natura le mummie si formano:

- 1- **in ambienti aridi** sia caldi che freddi
- 2- meglio se **ventilati** (ventilazione favorisce la disidratazione)
- 3- **bui** (assenza di luce tiene lontani organismi necrofagi)



**Deserti** facile formazione di mummie ma conservazione nel tempo problematica. La sabbia è molto porosa e pertanto, da una parte assorbe i liquidi della carcassa, dall'altra permette una maggiore penetrazione dell'ossigeno che può ossidare la sostanza organica. Negli **ambienti freddi** viene impedita la putrefazione.

## Fossilizzazione della materia organica

### Mummificazione

Varie mummie sono note  
allo stato fossile, ma  
spesso ad una  
**mummificazione iniziale**  
si aggiunge un processo di  
**carbonificazione** o  
**permineralizzazione** che  
ne garantisce la  
conservazione.



### ***Brachylophosaurus canadensis***

Dinosauro ornitopode.  
Cretaceo Superiore, Nord America





## Fossilizzazione della materia organica Carbonificazione

La carbonificazione si forma in **ambienti anaerobici** dove la **fermentazione batterica** porta alla **eliminazione per distillazione nella sostanza organica di idrogeno, ossigeno, azoto** producendo così una **progressiva concentrazione del carbonio**.

- Mummificazione
- **Carbonificazione**
- Permineralizzazione
  - ✓ *Carbonati*
  - ✓ *Silice*
  - ✓ *Pirite*
  - ✓ *Ghiaccio*

Dai **carboidrati** deriva il **carbone fossile (carbonificazione)**.

Dalle **proteine** e dai **grassi** derivano gli **idrocarburi** liquidi e gassosi (**bitumizzazione**).

## Fossilizzazione della materia organica

### Carbonificazione

La carbonificazione è un processo comune nelle **piante** che porta a una **progressiva concentrazione del carbonio**:

- Legno **5%**
- Torba **54%**
- Lignite **60-78%**
- Carbone **80%**
- Antracite **93%**
- Grafite **100%**



Foresta pietrificata in lignite. Ungheria



## Fossilizzazione della materia organica

### Carbonificazione

Con la progressiva perdita  
del volume si origina  
pertanto una sottile  
pellicola carboniosa detta

#### **ANTRACOLEIMMA**

**antraco** = carbone

**leimma** = resto

in inglese: **carbonaceous film**

Negli antracoleimmi **non si  
conserva la struttura  
tridimensionale** originaria.





## Fossilizzazione della materia organica

## Carbonificazione

La carbonificazione può riguardare anche i **vertebrati**. Le parti molli, conservate sotto forma di antracoleimmi, possono essere le uniche parti che si ritrovano fossili o si possono trovare associate allo scheletro mineralizzato.



### *Stenopterygius quadriscissus*

Ittosauro del Giurassico di Holzmaden, Germania.

Oltre allo scheletro intero e articolato è conservato per carbonificazione il profilo del corpo e in particolare la pinna dorsale e quella caudale

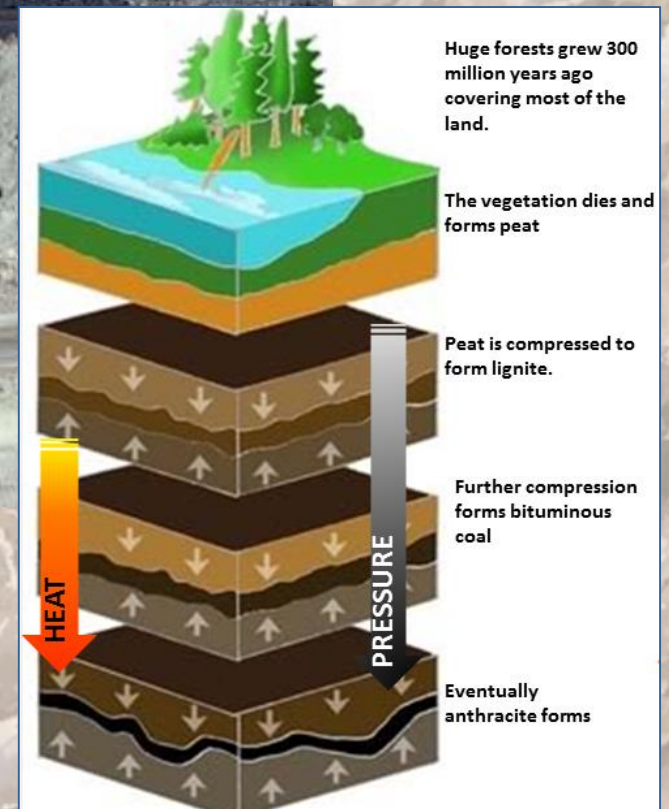
### *Tridentinosaurus antiquus*

rettile lacertiforme del Permiano del Trentino con l'antracoleimma della pelle ben conservato





I grandi **giacimenti di carbone fossile** dell'Europa settentrionale (Germania, Inghilterra, Belgio, ecc.), sono il risultato del **seppellimento di intere foreste** ivi esistenti durante il **Carbonifero** che in seguito **alle fortissime pressioni**, e conseguente calore, generatosi durante le fasi di metamorfismo regionale hanno prodotto, in assenza d'ossigeno, queste ingenti masse di combustibile fossile.



Fossilizzazione della  
materia organica

**Permineralizzazione**

Permeazione cellulare

Il processo avviene per  
**permeazione** cioè per  
deposizione di **sali minerali**  
(es. carbonato di calcio,  
silice) nelle **cellule dei**  
**tessuti degli organismi.**

- Mummificazione
- Carbonificazione
- **Permineralizzazione**
  - ✓ *Carbonati*
  - ✓ *Silice*
  - ✓ *Pirite*
  - ✓ *Ghiaccio*



**Fossilizzazione della  
materia organica**

**Permineralizzazione**  
**Permeazione cellulare**

**Condizioni necessarie per la  
permineralizzazione** sono  
che i resti degli organismi  
contenenti materia organica  
vengano sepolti in  
sedimenti con **acque  
interstiziali ricche in sali  
minerali** e che questi **sali si  
depositino rapidamente**  
nelle prime fasi della  
fermentazione anaerobica

I resti organici degli organismi sepolti all'interno dei sedimenti vengono a contatto con le **acque interstiziali, spesso ricche in sali minerali** e in casi eccezionali questi minerali si depositano all'interno dei tessuti organici stessi.

Se questi processi avvengono nelle **prime fasi di fermentazione anaerobica**, si evita lo schiacciamento delle strutture (effetto caratteristico nei processi di carbonificazione) grazie alla precipitazione di sali minerali che determinano un irrigidimento delle parti.

**Fossilizzazione della  
materia organica**

**Permineralizzazione  
in carbonati**

Con questo processo si ha la precipitazione di carbonati nel tessuto organico degli organismi.

- Mummificazione
- Carbonificazione
- **Permineralizzazione**
  - ✓ ***Carbonati***
  - ✓ *Silice*
  - ✓ *Pirite*
  - ✓ *Ghiaccio*



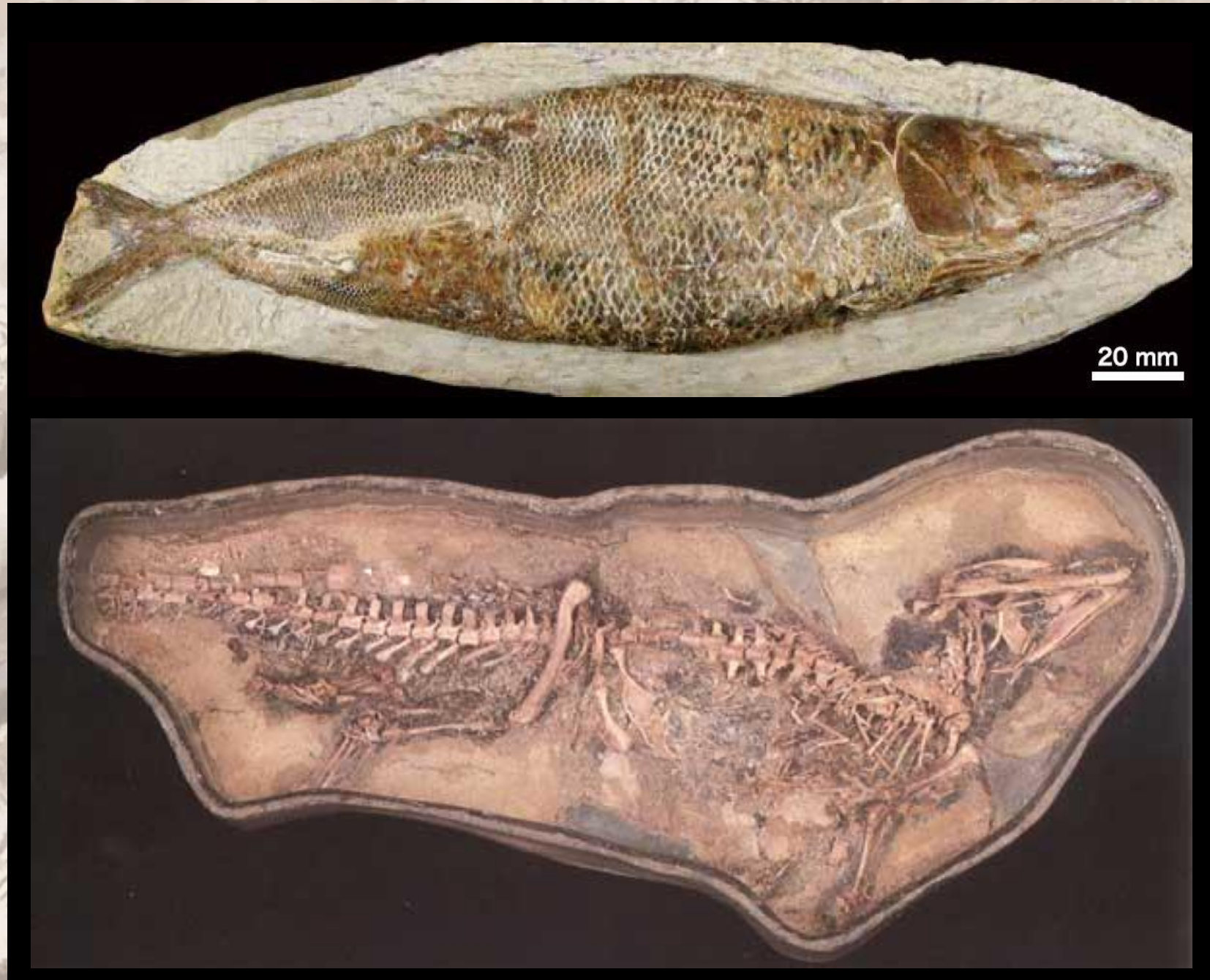
## Fossilizzazione della materia organica

### Permineralizzazione in carbonati

La permineralizzazione in carbonati determina spesso la formazione di **noduli**.

I fossili contenuti all'interno di queste concrezioni **mantengono la loro forma tridimensionale originaria**.

La formazione dei noduli porta ad una precoce mineralizzazione e pertanto favorisce la **conservazione di materia organica**

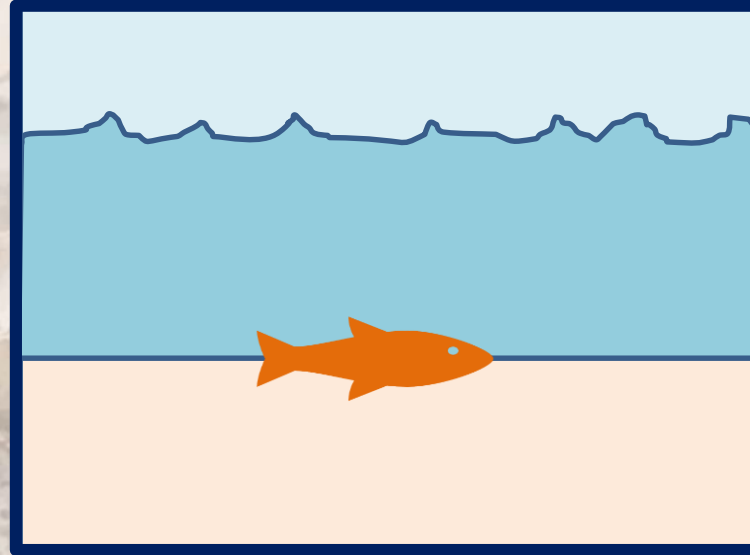


Fossilizzazione della  
materia organica

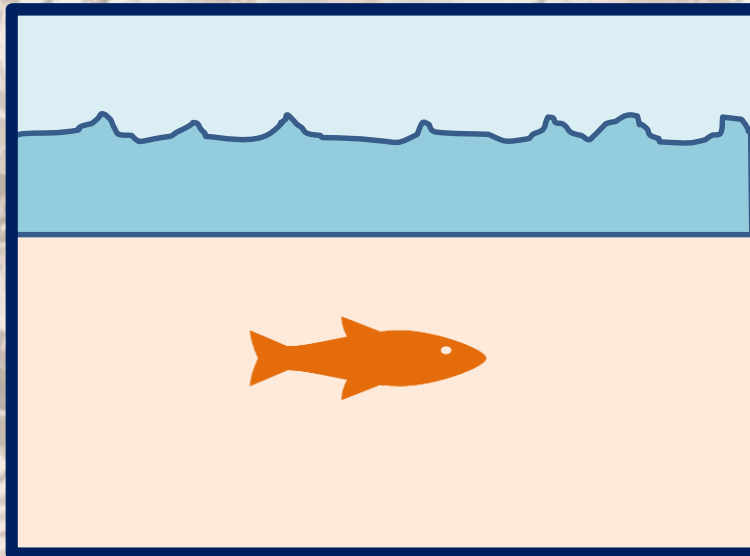
Permineralizzazione  
in carbonati

## Genesi dei noduli

La prima condizione per la formazione di un fossile dentro un nodulo carbonatico è che l'organismo morto sia sepolto rapidamente dal sedimento.



1) Organismo muore e  
cade sul fondo



2) **Rapido  
seppellimento**  
organismo in  
ambiente acquatico

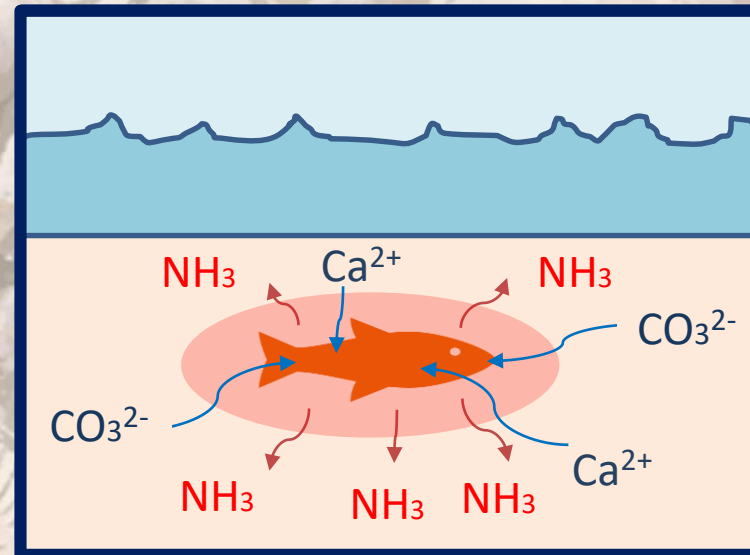
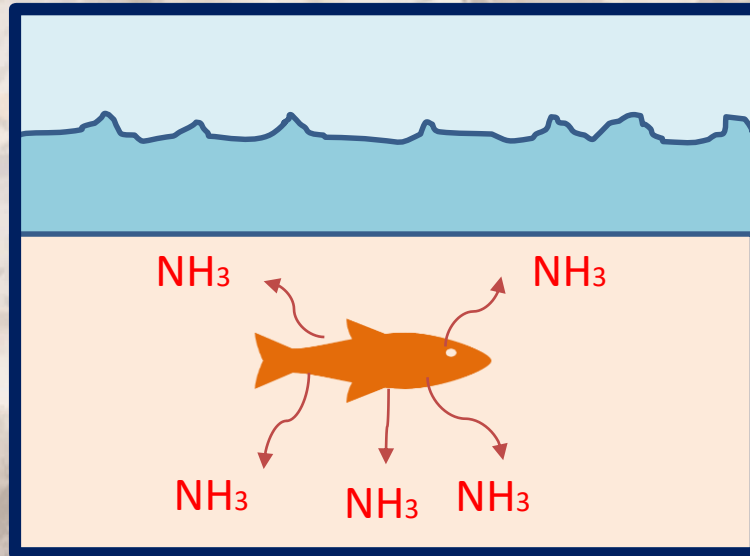


Fossilizzazione della  
materia organica

Permineralizzazione  
in carbonati

## Genesi dei noduli

Con la decomposizione del resto dell'organismo si genera una forte **differenza di Ph** tra il corpo (fortemente basico) e l'ambiente circostante. Se l'acqua percolante nel sedimento contiene carbonato di calcio, questo viene attratto verso il corpo e precipita nei tessuti organici.



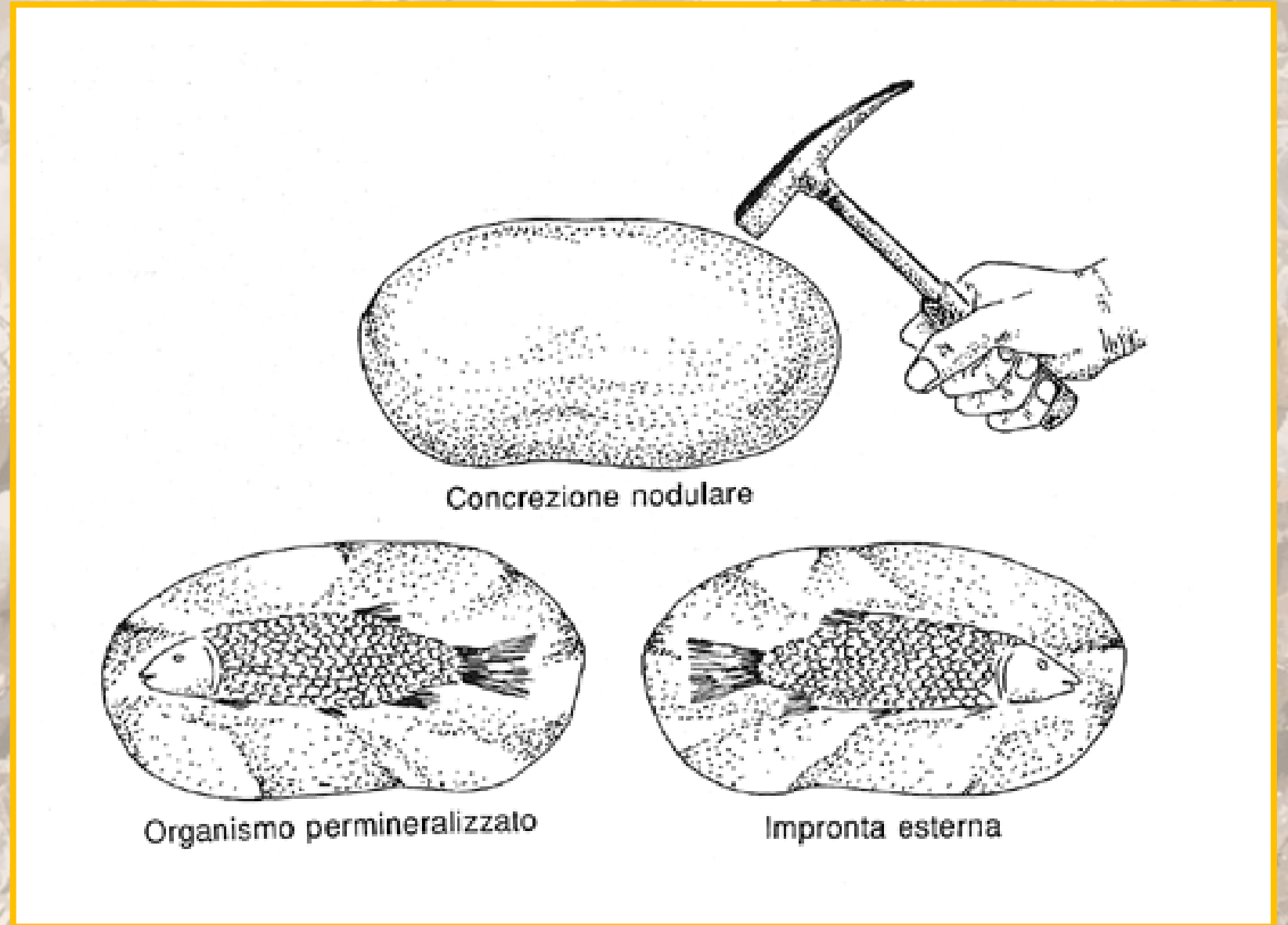
3) **decomposizione di proteine e ammine** libera **ammoniaca** che rende l'ambiente fortemente **alcalino (ph 8-8,5)**.

4) Si genera in questo modo una **differenza di Ph tra il corpo dell'organismo e l'ambiente circostante** e questo determina un **flusso di sali verso il fossile**. Se le acque che percolano all'interno dei sedimenti intorno al fossile contengono **carbonato di calcio**, questo venendosi a trovare in un ambiente basico, precipita. Precipitando il carbonato di calcio va a permeare i tessuti organici del fossile.

Fossilizzazione della  
materia organica  
**Permineralizzazione  
in carbonati**

## Genesi dei noduli

La deposizione di carbonato di calcio rende il nodulo più resistente del sedimento circostante e **impedisce la compressione litostatica** e la deformazione del fossile contenuto al suo interno





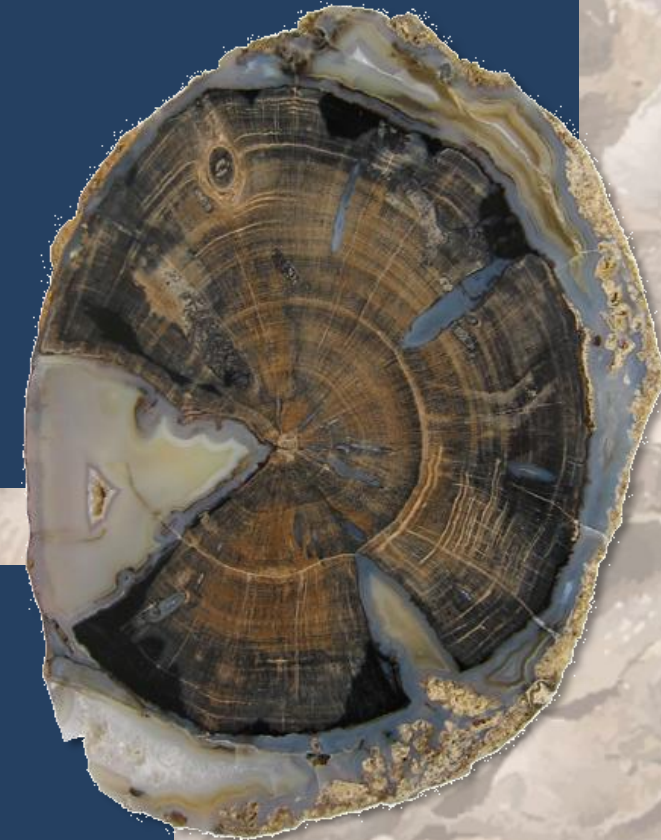
## Fossilizzazione della materia organica

### Permineralizzazione in silice

Questo processo interessa generalmente il **legno** dalla cui decomposizione si formano degli **acidi organici** che rendono acidule le acque percolanti nei sedimenti. Se queste acque contengono **silice**, l'ambiente acido ne favorisce la precipitazione sotto forma di gel (**opale**) all'interno dei canali legnosi.

- Mummificazione
- Carbonificazione
- **Permineralizzazione**
  - ✓ *Carbonati*
  - ✓ **Silice**
  - ✓ *Pirite*
  - ✓ *Ghiaccio*

Con la diagenesi l'opale si trasforma in **quarzo** e forma i cosiddetti "**Legni silicizzati**"



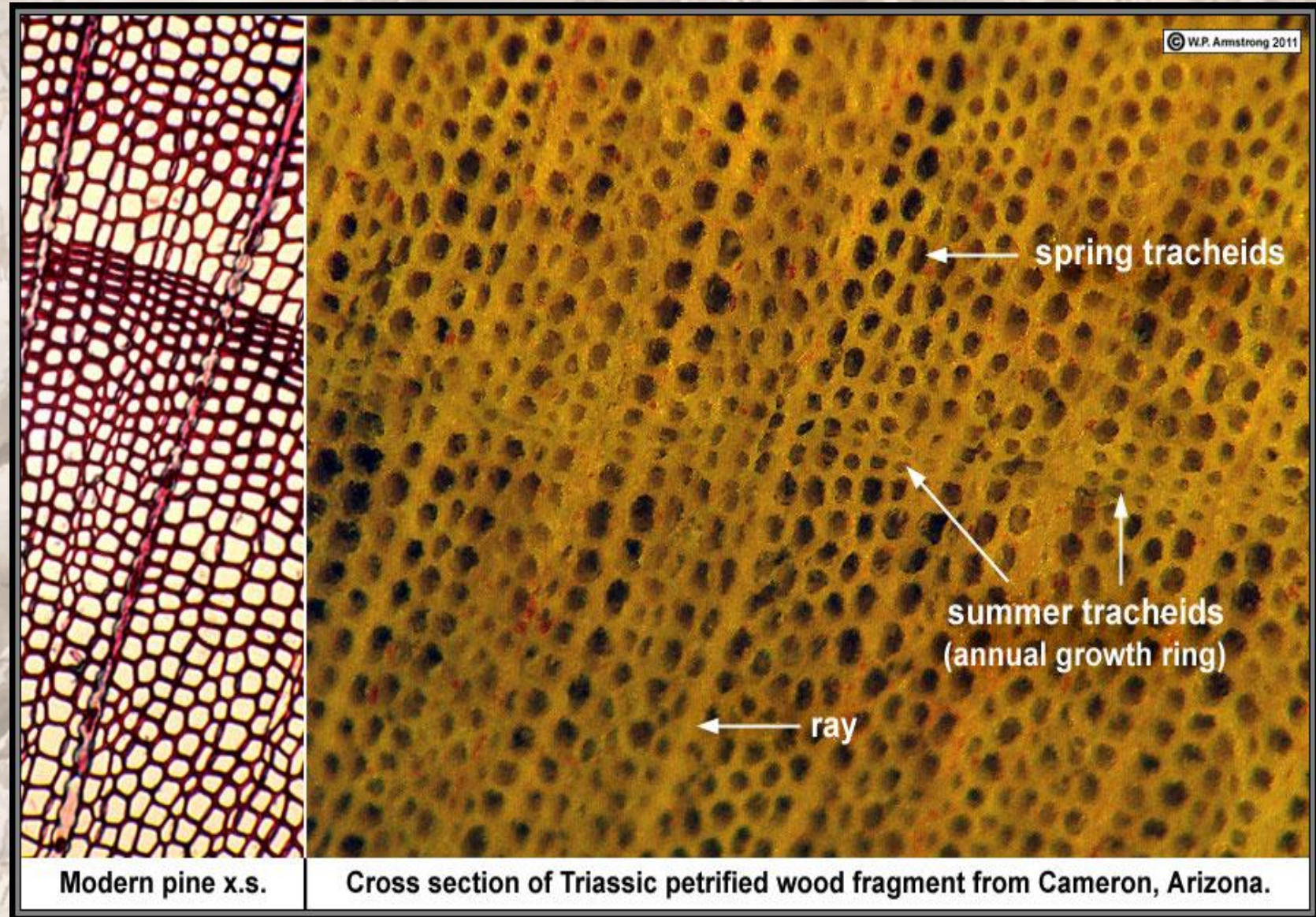
Legno silicizzato



## Fossilizzazione della materia organica

### Permineralizzazione in silice

Questo tipo di fossilizzazione conserva la forma dei tessuti vegetali ed è pertanto possibile studiare al microscopio la struttura di questi tessuti come per le piante attuali.





## Fossilizzazione della materia organica

### Permineralizzazione in Pirite

Processo che si forma in **ambienti anossici** per attività di batteri anaerobici che producono **acido solfidrico ( $\text{H}_2\text{S}$ )** per fermentazione della materia organica. L'  $\text{H}_2\text{S}$  si combina con i sali di ferro presenti nelle acque percolanti formando **pirite ( $\text{FeS}_2$ )** che si deposita all'interno dei tessuti organici.

- Mummificazione
- Carbonificazione
- **Permineralizzazione**
  - ✓ *Carbonati*
  - ✓ *Silice*
  - ✓ ***Pirite***
  - ✓ *Ghiaccio*

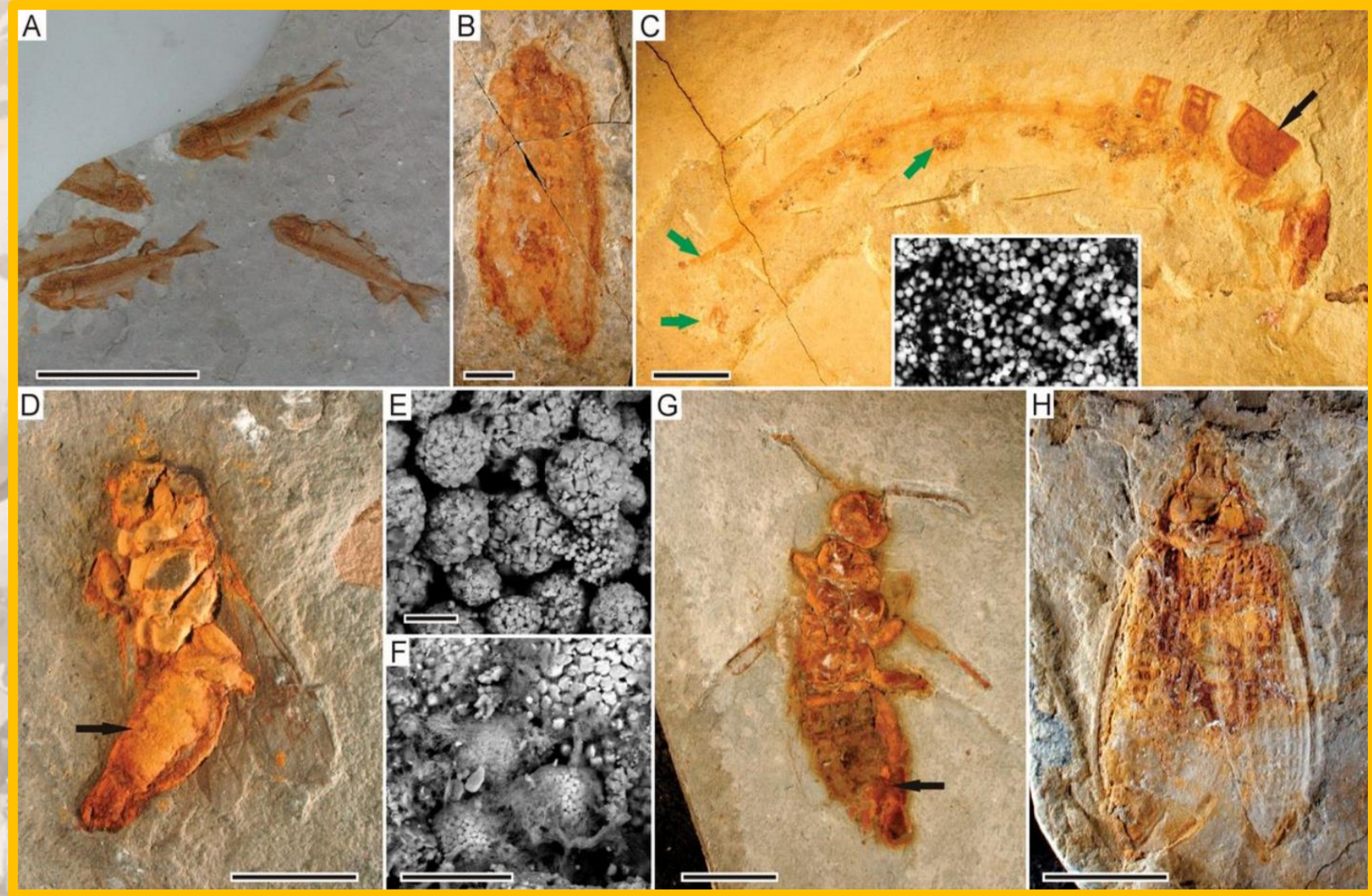


## Fossilizzazione della materia organica

### Permineralizzazione in Pirite

La pirite può produrre  
parziali permineralizzazioni  
di tessuti organici e si trova  
spesso associata ad  
**antracoleimmi**.

Molto spesso i fossili in  
pirite vengono poi a trovarsi  
in ambienti ossidanti che  
portano all'alterazione della  
pirite a **ossidi di ferro**, un  
processo che in genere  
porta alla distruzione del  
fossile.





## Fossilizzazione della materia organica

### Ghiaccio

#### Crioconservazione

In questo caso è il **ghiaccio** (**H<sub>2</sub>O**) a depositarsi all'interno dei tessuti organici. Reperti conservati in questo modo si ritrovano nei depositi alluvionali congelati risalenti all'ultima glaciazione.

- Mummificazione
- Carbonificazione
- **Permineralizzazione**
  - ✓ *Carbonati*
  - ✓ *Silice*
  - ✓ *Pirite*
  - ✓ **Ghiaccio**

## Fossilizzazione della materia organica

### Ghiaccio Crioconservazione

I fossili più famosi conservati in questo modo sono i **Mammut** (elefanti lanosi) rinvenuti nei ghiacci siberiani. La modalità di seppellimento è particolare in quanto dovuta al fatto che gli animali ***rimanevano intrappolati in alluvioni fini e venivano conservati prima dall'acqua gelida e poi dal ghiaccio***



**Mammut** (*Mammuthus primigenius*)  
Visse tra 200.000 a 5.000 anni fa

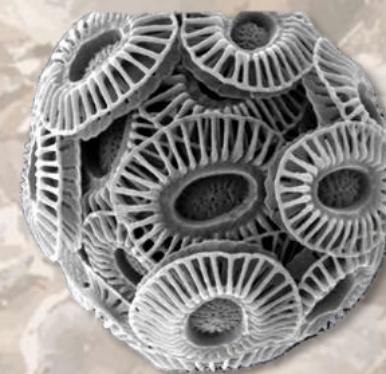
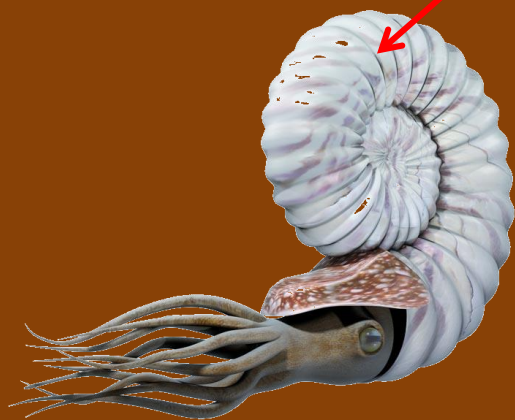
Si stima l'esistenza di **molte migliaia di mammut**, pari ad oltre **mezzo milione di tonnellate di zanne d'avorio**.



# **PARTI DURE MINERALIZZATE**

**Carbonato di calcio**  
**Fosfato di calcio**  
**Silice**

**PARTI  
DURE**





# Carbonato di calcio

## $\text{CaCO}_3$

E' il minerale più frequente negli scheletri degli organismi ed è presente con tre diverse forme mineralogiche (**Calcite, Aragonite, Vaterite**).  
Lo si ritrova molto frequente nei **Protisti** (**Coccolitoforidi, Foraminiferi**), nei **Vegetali** e soprattutto nella maggior parte dei phyla **Animali** (es. **Molluschi, Echinodermi, Cnidari, Brachiopodi**).



Coccolitoforidi



Foraminiferi



Bivalvi



Gasteropodi



Cefalopodi



Echinodermi



Cnidari



Brachiopodi



# Fosfato di calcio



Si presenta nelle parti mineralizzate degli organismi principalmente sotto forma di **idrossiapatite** (minerale del gruppo delle apatiti che contiene un gruppo **OH**).

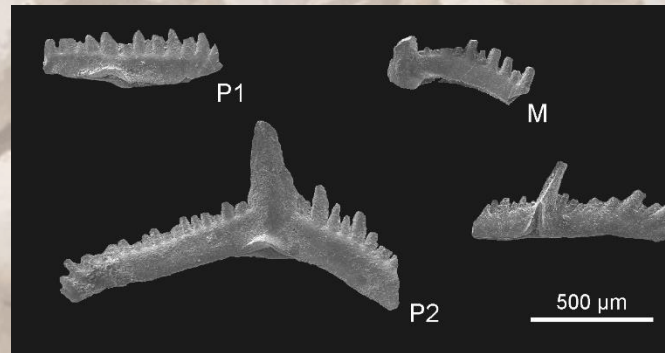
Costituisce le parti mineralizzate delle ossa e dei denti dei **Vertebrati** e dei **Conodonti**



Scheletro vertebrato (stegosauo)



Dente vertebrato (squalo)



Conodonti



Brachiopode *Lingula*



Trilobite

Raro negli invertebrati attuali, risulta presente in alcuni gruppi fossili associato a **chitina**, come i **Lingulata** (**Brachiopodi**) e forse i **Trilobiti** (Artropodi). Assente nelle Piante e molto raro tra i Protisti.



# Silice

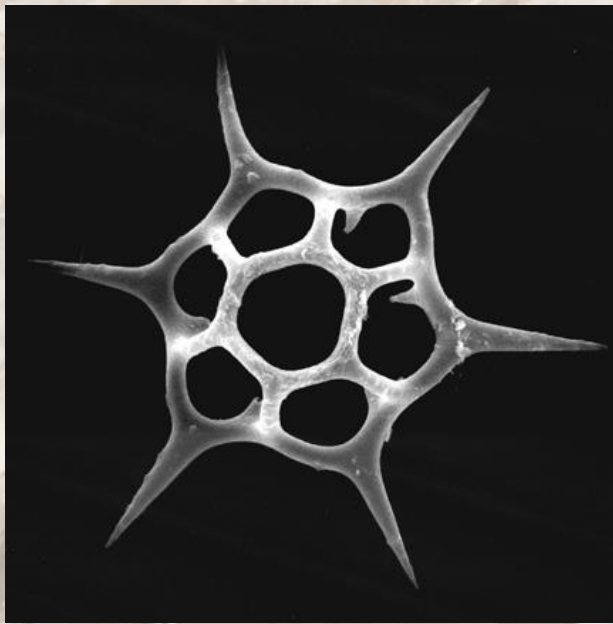
## $\text{SiO}_2$

Il **biossido di silicio**, è frequente in natura in diverse forme cristalline (**quarzo**) e in forma amorfa (**opale**).

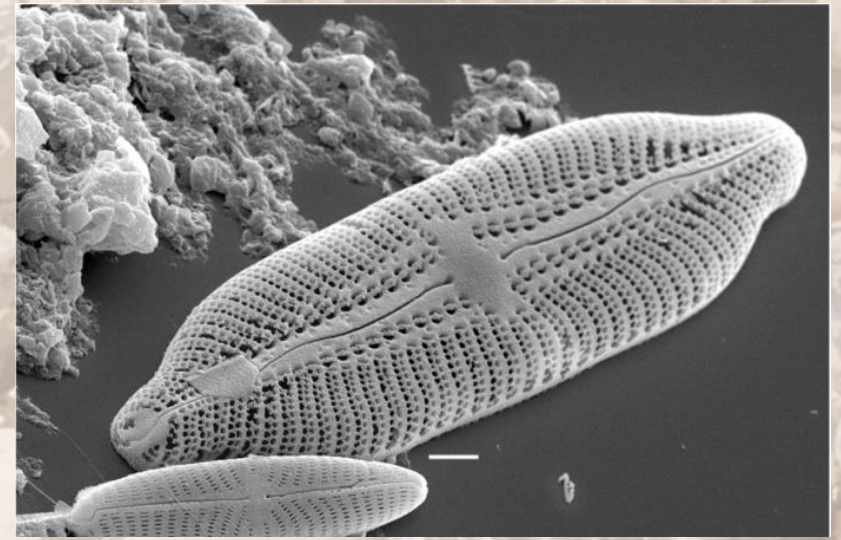
Relativamente raro negli organismi, forma scheletri in genere sottili.

Presente nei gusci di alcuni **Protisti** (es. **Silicoflagellati**, **Diatomee**, **Radiolari**).

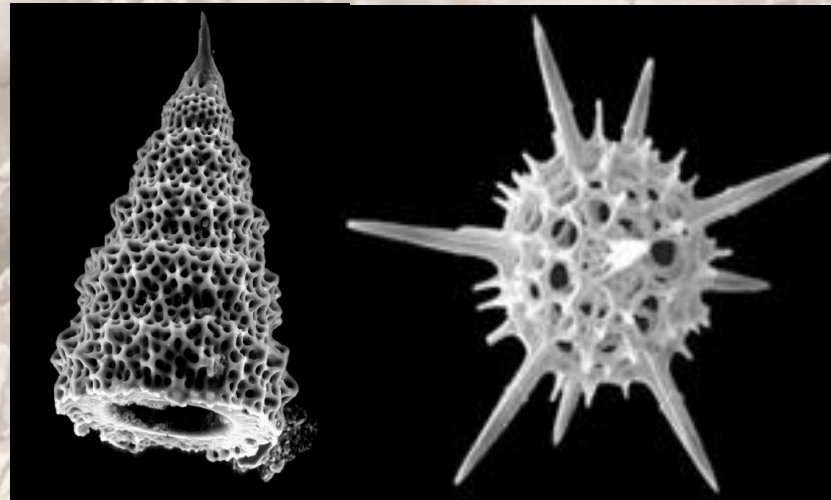
Poco frequente tra i Vegetali mentre tra gli Animali è importante solo nei **Poriferi** (Spugne).



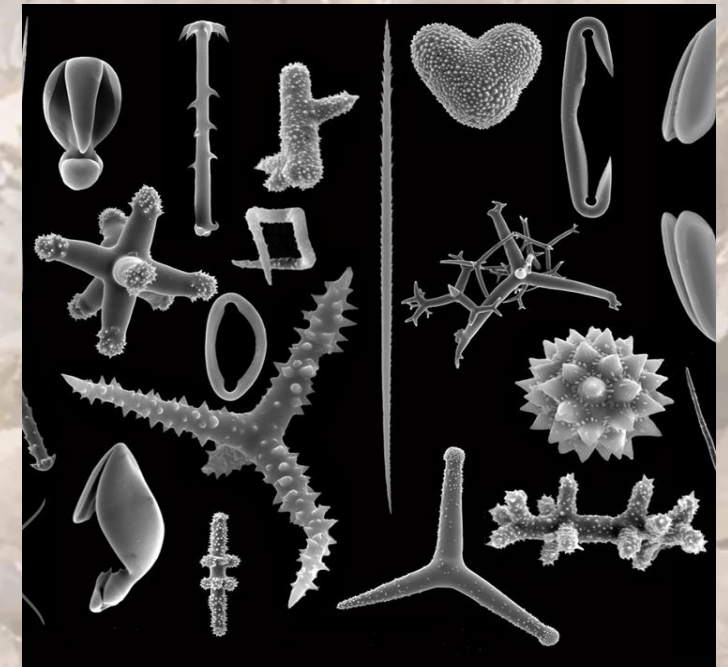
Silicoflagellati



Diatomee



Radiolari



Poriferi



## Fossilizzazione delle parti mineralizzate

La conservazione delle parti degli organismi già mineralizzate in origine può avvenire: 1) per riempimento delle microcavità dello scheletro da parte di minerali di neoformazione; 2) quando i minerali dello scheletro vengono sostituiti da altri o ricristallizzano; 3) nel caso di totale dissoluzione, se lo scheletro o la sua cavità viene riempito da sedimento e si conserva come modello o impronta.

- Mineralizzazione
  - ✓ *Impregnazione*
  - ✓ *Sostituzione*
    - Calcitizzazione
    - Dolomitizzazione
    - Silicizzazione
    - Piritizzazione
    - Fosfatizzazione
- Neoformismo e ricristallizzazione
- Dolomitizzazione
- Modello interno e impronta interna
- Pseudoguscio
- Modello composito
- Riempimento a drusa

Fossilizzazione delle  
parti mineralizzate

## Mineralizzazione

E' il **principale processo di fossilizzazione**.

Le modalità con cui si attua tale processo (diversificate a seconda dei vari ambienti diagenetici) sono:

***Impregnazione***

***Sostituzione***

### ■ Mineralizzazione

✓ ***Impregnazione***

✓ ***Sostituzione***

- Calcitizzazione
- Dolomitizzazione
- Silicizzazione
- Piritizzazione
- Fosfatizzazione

- Neoformismo e ricristallizzazione
- Dolomitizzazione
- Modello interno e impronta interna
- Pseudoguscio
- Modello composito
- Riempimento a drusa

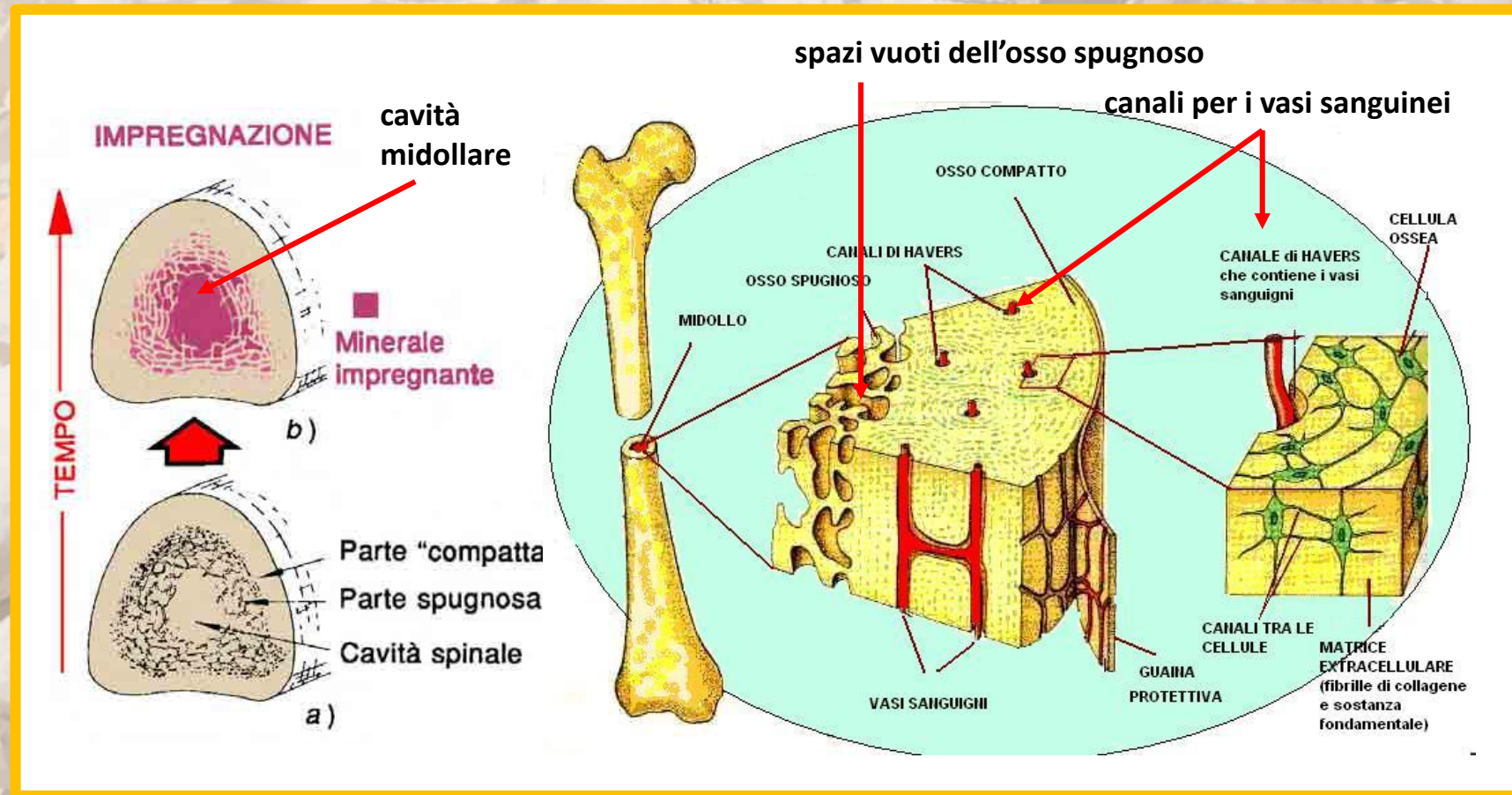


## Fossilizzazione delle parti mineralizzate

### Mineralizzazione Impregnazione nelle ossa

Il minerale impregnante, spesso diverso da quello delle ossa, riempie le cavità all'interno delle ossa:

- **gli spazi vuoti dell'osso spugnoso**
- **i canali per i vasi sanguigni** (canali di Havers) dell'osso compatto
- l'ampia **cavità midollare** delle ossa lunghe (in questo caso si potrebbe parlare di riempimento più che di impregnazione)



L'impregnazione rende le ossa **più resistenti e più pesanti**.



## Fossilizzazione delle parti mineralizzate

### Mineralizzazione Impregnazione

I fossili per impregnazione sono **più resistenti, pesanti e compatti** rispetto ai resti originali mineralizzati degli organismi (es. ossa, conchiglie, ecc.).

L'impregnazione impedisce la circolazione di fluidi all'interno dello scheletro e pertanto **limita la dissoluzione diagenetica**.

Il tipo di minerale che si depone **dipende dai sali contenuti nelle acque percolanti e può essere diverso da quello delle parti dure dell'organismo**



Osso attuale in sezione: le cavità sono vuote



Osso fossile in sezione: le cavità sono riempite da minerali



**Fossilizzazione delle  
parti mineralizzate**

**Mineralizzazione  
Sostituzione  
Piritizzazione**

Avviene in condizioni **anaerobiche** (prive di ossigeno) e quindi ambienti riducenti dove la fermentazione delle parti molli determina la liberazione di **acido solfidrico ( $H_2S$ )** che si combina con i sali di ferro presenti nelle acque percolanti formando la **pirite ( $FeS_2$ )**.



In genere interessa solo lo **strato superficiale** (è un processo a limite con l'incrostazione), mentre il resto dello scheletro si presenta con una diversa mineralizzazione che dipende dalla sua natura originaria. Raramente avviene la sostituzione completa dello scheletro con la pirite.

Ambienti adatti al processo di piritizzazione, sono i **sedimenti pelitici ricchi di materia organica, anossici, con sviluppo di idrogeno solforato e abbondanza di solfuri**.

## Fossilizzazione delle parti mineralizzate

Mineralizzazione  
Sostituzione  
Silicizzazione

Si verifica in ambienti **acidi**,  
in acque **soprasature**  
**rispetto al quarzo** in cui la  
silice può precipitare lungo i  
sottili film di dissoluzione  
della calcite o di altri  
minerali.

La silice può derivare da  
dissoluzione di scheletri di  
**radiolari** o **diatomee** o di  
**spicule di spugne**.



Rostro di Belemnite in opale  
(silice idrata)

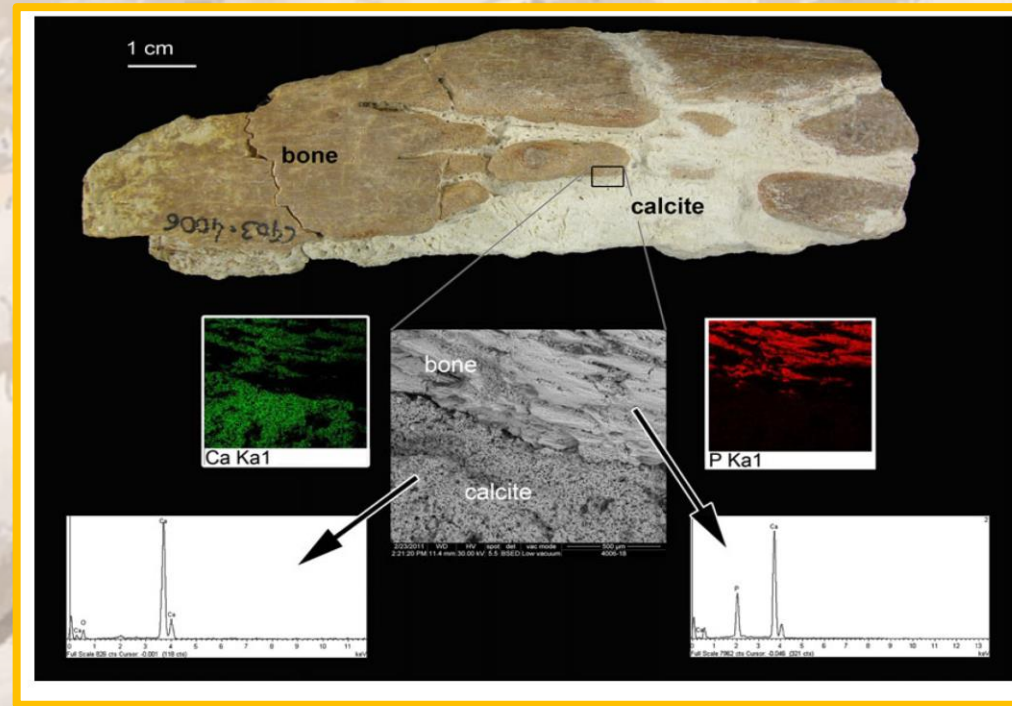
The Arkenstone, [www.iRocks.com](http://www.iRocks.com)



## Fossilizzazione delle parti mineralizzate

### Mineralizzazione Sostituzione Calcitizzazione

La calcitizzazione si osserva quando **fossilizzano in calcite parti scheletriche originariamente formate da altri minerali** come ad esempio in silice (spicole di spugne) o in rari casi in fosfato di calcio (ossa vertebrali).



Osso fossile con parziale sostituzione del fosfato di calcio in carbonato di calcio

Pesquero, M.D. & Fernandez-Jalvo Y.  
2014  
DOI: 10.1111/let.12079.

Molti scheletri di organismi (molluschi, echinodermi, ecc.) sono **originariamente già formati da carbonato di calcio**. Se, fossilizzando, mantengono la stessa composizione, non si può parlare di sostituzione in calcite. In questi casi si possono invece verificare processi di impregnazione (con riempimento di altra calcite nelle microcavità), di neoformismo (da aragonite a calcite), o di ricristallizzazione.

## Fossilizzazione delle parti mineralizzate

### Mineralizzazione Sostituzione Fosfatizzazione

E' un processo relativamente frequente nei depositi bioclastici fosforitici caratterizzati da **forti concentrazioni di ossa di vertebrati** (bone beds) .  
In questi depositi si trovano conservati in **fosfato di calcio**  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , oltre alle ossa di vertebrati (in questo caso non si può parlare di sostituzione), anche **conchiglie di invertebrati** che in origine erano formate da altri minerali (es. carbonato di calcio).



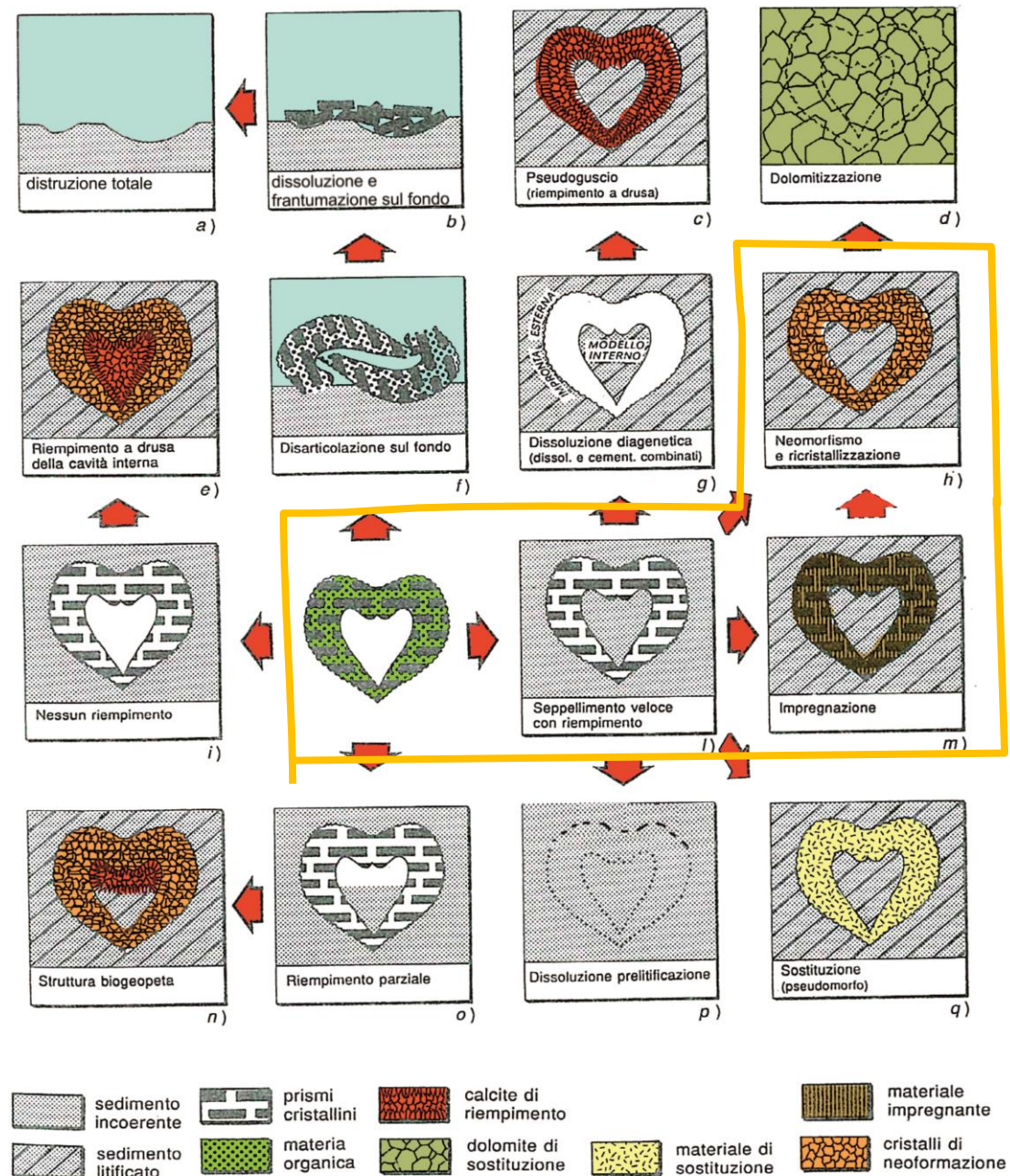
Spesso, come in questo caso, della conchiglia si conserva solo in riempimento (modello interno) fosfatizzato



# Fossilizzazione delle parti mineralizzate

## Neomorfismo e ricristallizzazione

Le trasformazioni neomorfiche avvengono quando i minerali originari che formano lo scheletro **si trasformano in loro polimorfi** (stessa composizione chimica ma diversa struttura cristallina). Se avvengono in **condizioni normali di temperatura e pressione** la struttura dello scheletro viene preservata (**neomorfismo**).



Se, con l'aumento di temperatura e pressione vi è un consistente aumento o, più raramente, diminuzione delle dimensioni dei cristalli (**ricristallizzazione**), la microstruttura dello scheletro viene completamente distrutta.



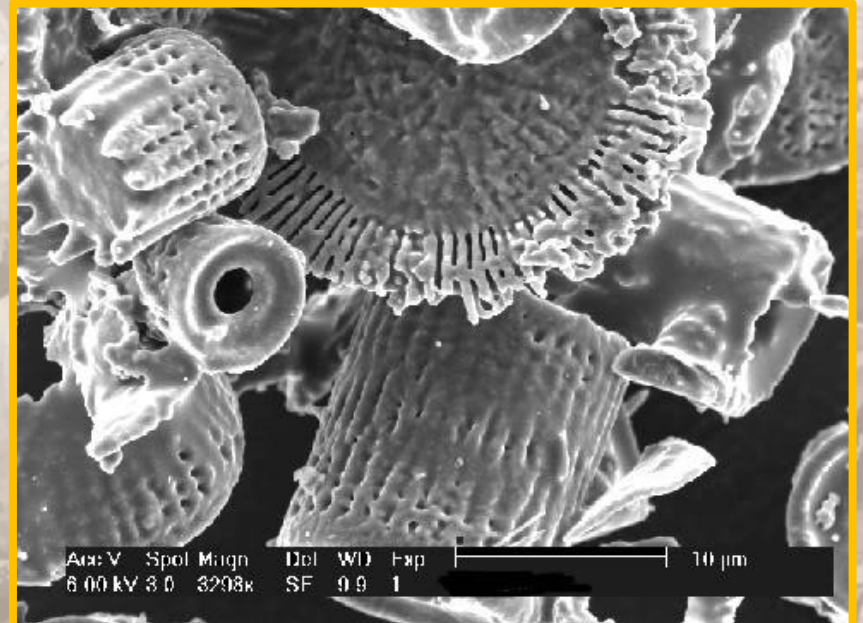
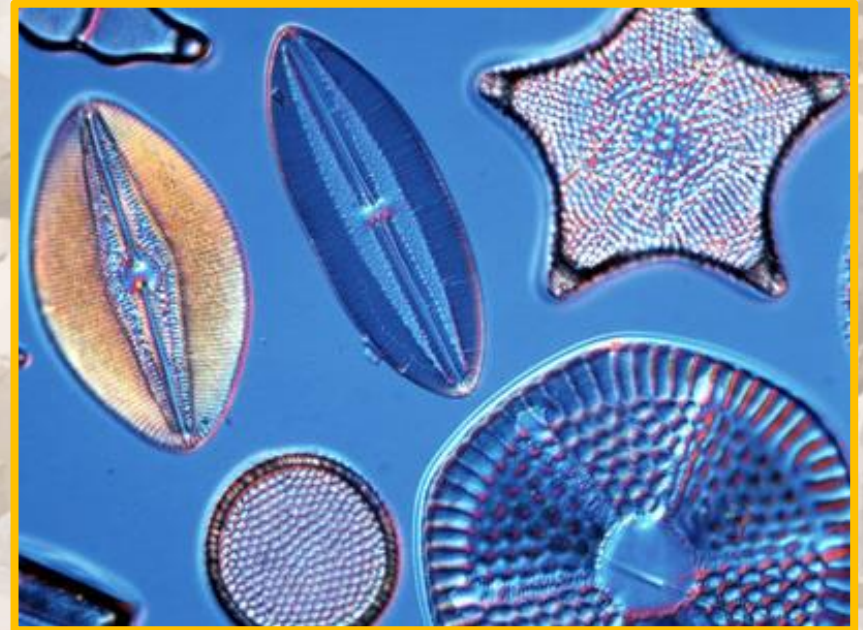
**Fossilizzazione delle  
parti mineralizzate**  
**Neomorfismo e  
ricristallizzazione**

Molti organismi presentano uno scheletro di **aragonite**, una forma metastabile di  $\text{CaCO}_3$  che in condizioni normali di temperatura e pressione si trasforma in **calcite**.

Alcuni organismi (diatomee, radiolari) presentano uno scheletro in silice amorfa (**opale**) che quando fossilizzano si trasformano in **quarzo** microcristallino

**Neomorfismo  
Aragonite-Calcite**

**Neomorfismo  
Opale-Quarzo**



**Scheletri silicei di diatomee attuali e fossili**



## Fossilizzazione delle parti mineralizzate

### Dolomitizzazione

E' un processo che si forma in condizioni di **seppellimento** (aumento di temperatura e pressione) in presenza di **fluidi ricchi in  $Mg^{2+}$** . Porta alla trasformazione della calcite in dolomite. Si tratta di un **fenomeno secondario che avviene durante la diagenesi** di solito distruttivo e, se è la mineralizzazione è molto spinta, si formano grossi cristalli che distruggono la struttura scheletrica originale



**Conchiglia dolomitizzata con ricristallizzazione di Gasteropode  
Marmi dei Monti Pisani**



## Fossilizzazione delle parti mineralizzate

### Modello interno

Molto comune negli scheletri con **cavità interna** che, dopo la decomposizione delle parti molli, viene riempita dal sedimento che poi litifica durante la diagenesi. In molti casi la conchiglia viene distrutta per fenomeni di **dissoluzione** durante la diagenesi. Rimane pertanto solo il modello interno che può essere separato dal sedimento circostante dalla cavità lasciata dalla conchiglia.

***Questa cavità può scomparire se il sedimento, non ancora del tutto litificato, ha subito un forte carico litostatico.***

Cavità formata  
dalla dissoluzione  
della conchiglia



modello interno



Modello interno di conchiglia di Bivalve

***Il modello interno fornisce informazioni più o meno importanti a seconda dei gruppi fossili.***



## Fossilizzazione delle parti mineralizzate

### Modelli interni conchiglia gasteropodi

Il modello interno della conchiglia dei gasteropodi è in genere **poco informativo dal punto di vista diagnostico**.

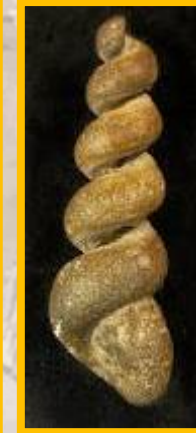
Fanno eccezione le **Nerinee** che presentano una caratteristica ornamentazione interna ben visibile con le sezioni delle conchiglie e nei modelli interni.

Modelli interni di conchiglia di *Turritella* (Gasteropode)

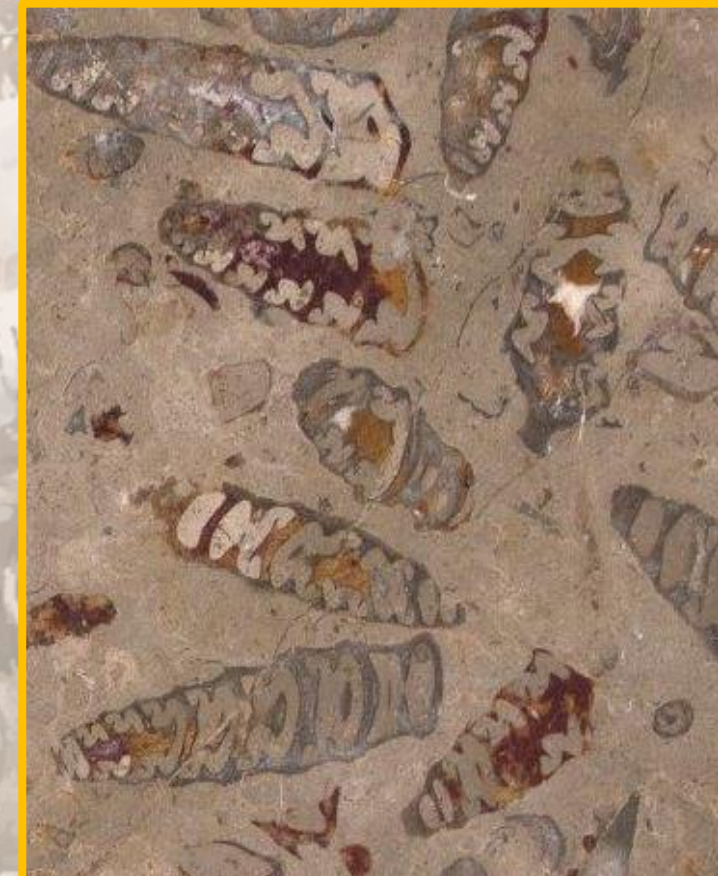


Modello interno

Cavità formata dalla dissoluzione della conchiglia



**Calcare a Nerinee** (Gasteropode del Mesozoico) con modelli interni + conchiglia. La forma delle sezioni è diagnostica per riconoscere la specie





## Fossilizzazione delle parti mineralizzate

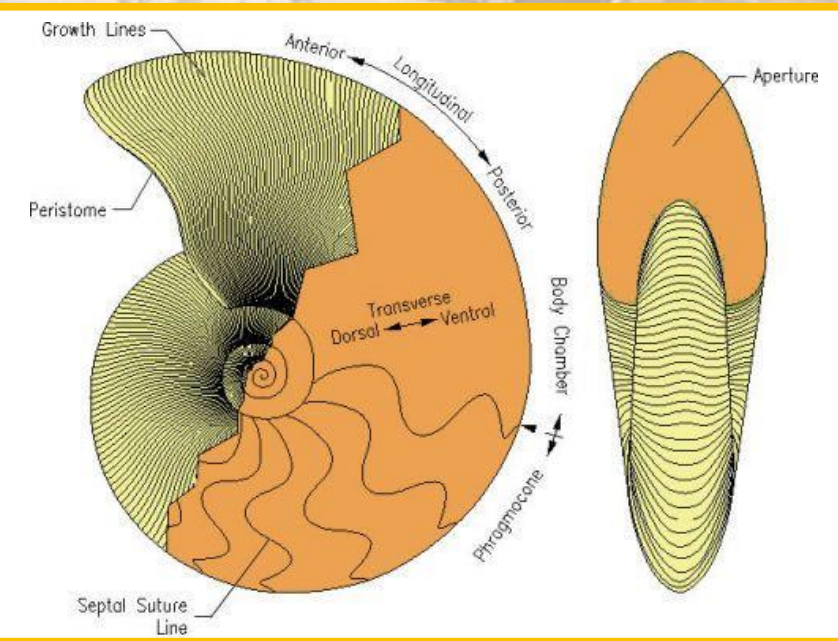
### Modelli interni conchiglie ammoniti e nautiloidi

I modelli interni delle Ammoniti e dei Nautiloidi consentono di determinare la specie.

Si conserva l'**ornamentazione** perché costituita da pieghe della sottile conchiglia e viene messa in luce la **linea di sutura** (intersezione tra i setti e la parete esterna), altamente diagnostica per questi cefalopodi



Linee di sutura



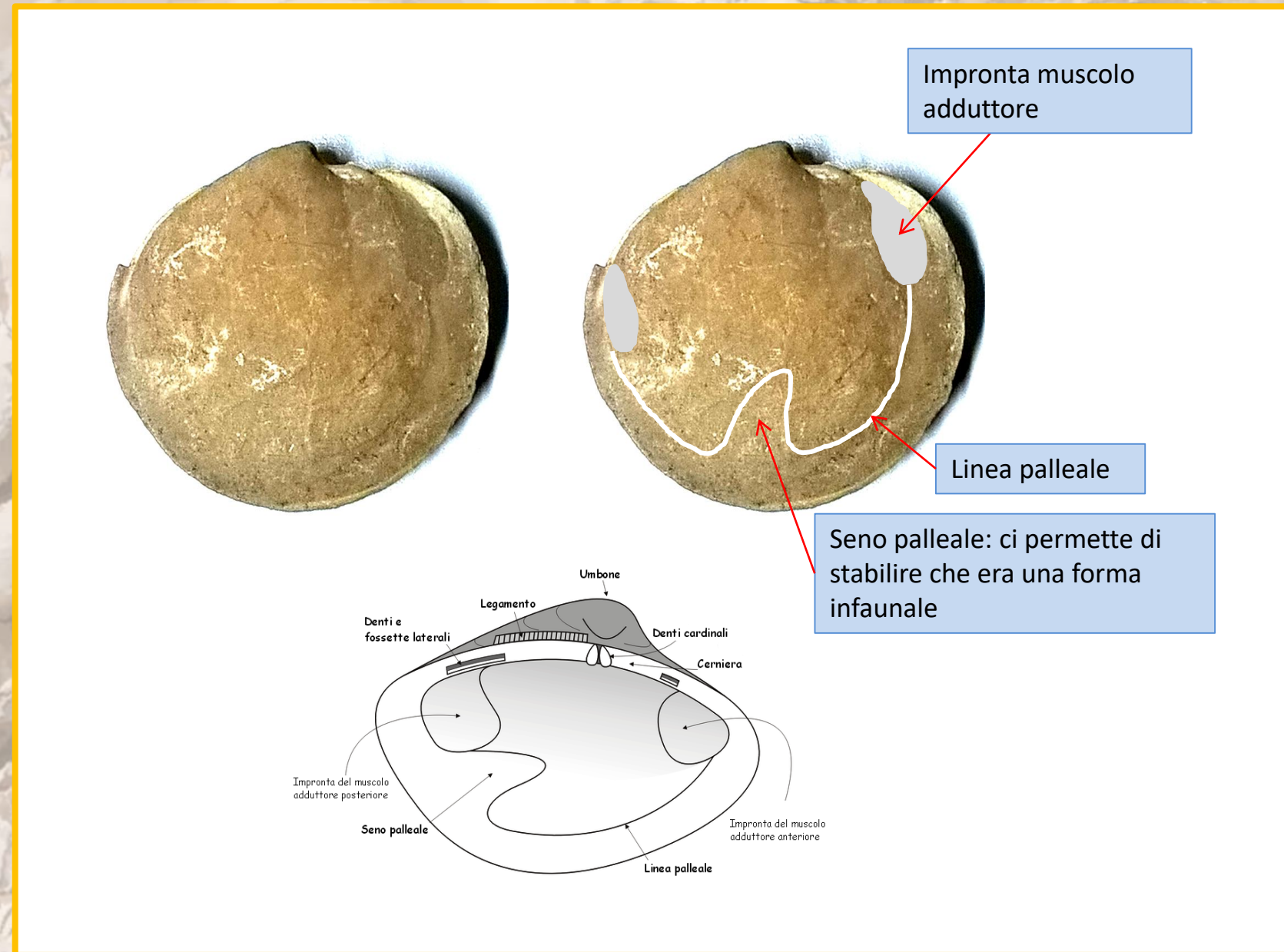
**Calcare Rosso Ammonitico: frequenti modelli interni di Ammoniti. Le conchiglie sono assenti per dissoluzione diagenetica**



## Fossilizzazione delle parti mineralizzate

### Modelli interni conchiglie bivalvi

I modelli interni dei Bivalvi consentono di norma di determinare la **famiglia** o il **genere** ma **non la specie**. Si hanno informazioni sulla **forma** generale della conchiglia e sulle **impronte lasciate dai muscoli e dal mantello** sulla parete interna, ma **non sull'ornamentazione del guscio**



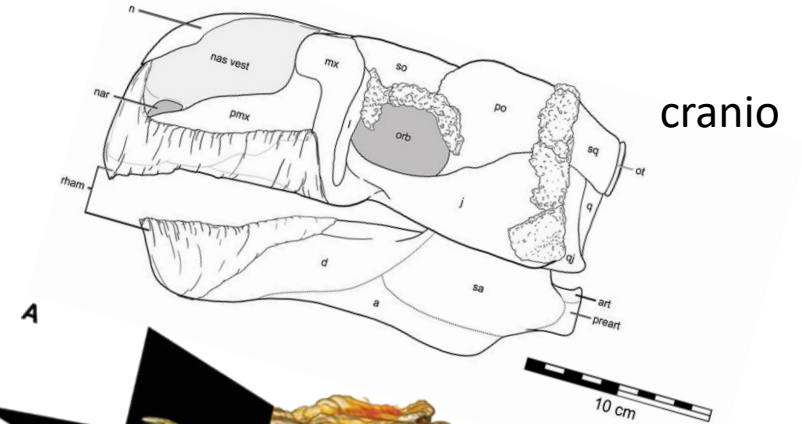
## Fossilizzazione delle parti mineralizzate

### Modelli endocranico vertebrato

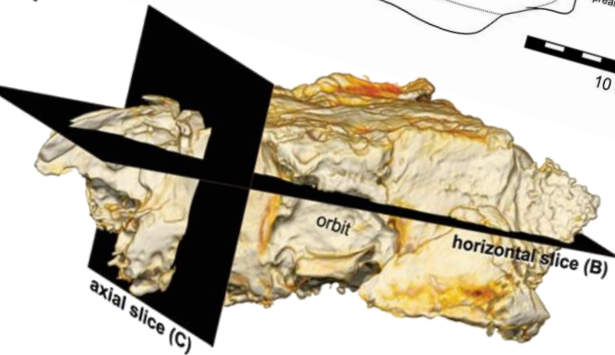
In molti casi l'endocranio (la cavità che conteneva il cervello) dei vertebrati è riempita da sedimento litificato durante la diagenesi. Tramite una **tomografia assiale (TAC)** è spesso possibile ricostruire in maniera non distruttiva la morfologia 3D e calcolare il volume in di questa cavità ed avere informazioni sulle parti molli e sulla fisiologia dell'animale.



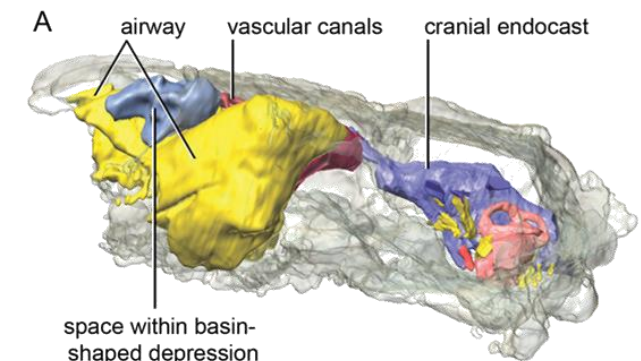
Ricostruzione endocranio di *Minmi* (Anchilosauro, Cretaceo, Australia)



cranio



Ricostruzione 3D cranio con TAC



Ricostruzione 3D cavità endocraniche con TAC



## Fossilizzazione delle parti mineralizzate

### Impronta esterna

Può essere l'unica manifestazione nel caso di organismi **privi di parti dure** o quando il **guscio si è disciolto** dopo la litificazione della roccia inglobante.

Riveste un ruolo paleontologico importante quando il sedimento è caratterizzato da **grana fine** e permette la registrazione dettagliata dei caratteri.





## Fossilizzazione delle parti mineralizzate

### Riempimento a drusa

I cristalli che si formano più frequentemente nelle cavità delle strutture scheletriche sono di **calcite** e di **silice**.

Questi cristalli possono riempire la cavità totalmente (**riempimento a drusa**) o solo parzialmente formando un **geode**.

Talvolta i cristalli non riempiono totalmente la cavità e si forma un geode



**Ammoniti in sezione con riempimento a drusa delle camere con grossi cristalli di calcite**



## Paleontologia virtuale

La Paleontologia Virtuale è lo studio dei fossili attraverso l'acquisizione, l'elaborazione e l'analisi di immagini digitali prodotte attraverso tecniche e strumentazioni informatiche avanzate, quali la scansione con **scanner laser**, la **fotogrammetria 3D** e la **tomografia assiale computerizzata**.

<https://sketchfab.com/MuseoStoriaNaturaleUnipi>



Lo scopo è quello di ottenere **modelli virtuali 3D** e/o di investigare parti del fossile non visibili o che non possono essere manipolate perché troppo fragili.