

Applicazione dei sistemi isotopici radioattivi in Geologia

$^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$

$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$

$^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$

$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$

$^{232}\text{Th}/^{208}\text{Pb}$

$^{176}\text{Lu}/^{176}\text{Hf}$

$^{187}\text{Re}/^{187}\text{Os}$

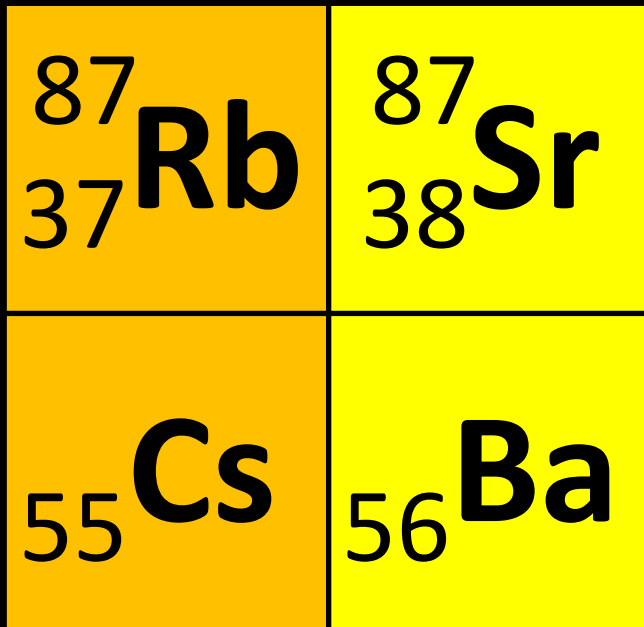
$^3\text{He}/^4\text{He}$

$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$

Sistematica isotopica Rb-Sr

Rb è un metallo alcalino con due isotopi naturali, ^{85}Rb e ^{87}Rb .

^{87}Rb è radioattivo e decade nell'isotopo stabile ^{87}Sr tramite quale meccanismo?



Periodic table showing the positions of Rb (Rubidium, atomic number 37) and Sr (Strontium, atomic number 38). The elements are highlighted in a yellow box. The table includes various categories such as Solidi, Liquidi, Gas, and Sconosciuto, and is color-coded by groups.

^{87}Rb ha 50 neutroni e 37 protoni
 ^{87}Sr ha 49 neutroni e 38 protoni.

Emissione di particelle β^- (elettroni).

Sistematica isotopica Rb-Sr

In un assemblaggio classico di rocce di mantello (olivina + clinopirosseno + ortopirosseno + spinello/granato) sia il Rb che lo Sr sono incompatibili, ma il **Rb è più incompatibile dello Sr.**

Assumiamo che un mantello ipotetico con un rapporto Rb/Sr ratio = 1 cominci a fondere in modo parziale.

Quale sarà il rapporto Rb/Sr nella sorgente residuale?

<1

Quale sarà il rapporto Rb/Sr nel fuso?

>1

Sistematica isotopica Rb-Sr

Il mantello residuale ha un rapporto Rb/Sr più basso della sorgente iniziale.

Il fuso parziale (roccia ignea) ha un rapporto Rb/Sr più alto della sorgente iniziale.

Una sorgente **residuale** con Rb/Sr più basso avrà quindi poco ^{87}Rb (e ^{85}Rb) perché durante i processi di fusione parziale gli isotopi non frazionano.

Questo vuol dire che ci sarà un numero ridotto di nuclidi radioattivi che potranno decadere in ^{87}Sr .

Una sorgente **arricchita** (ossia la roccia ignea) con Rb/Sr più alto avrà quindi più ^{87}Rb (e ^{85}Rb) e, quindi un maggior numero di isotopi ^{87}Sr generati nel tempo.

Sistematica isotopica Rb-Sr

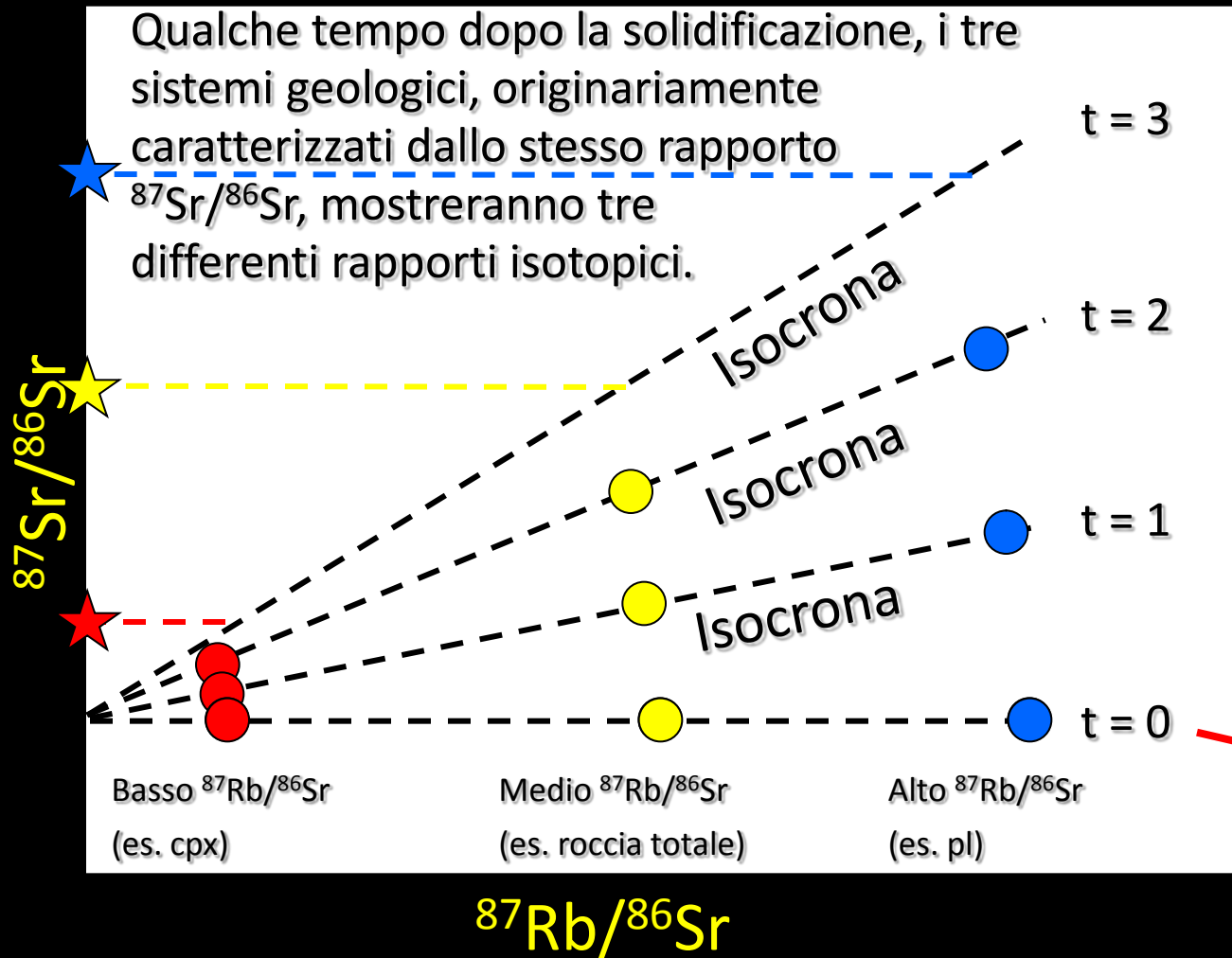
In ogni tipo di sorgente solida l'isotopo ^{87}Rb diminuisce continuamente e ^{87}Sr aumenta continuamente.

Dopo un certo intervallo di tempo, la sorgente residua avrà un contenuto in ^{87}Rb e ^{87}Sr più basso della roccia derivata dalla solidificazione del fuso parziale di quella sorgente.

In geochimica è uso comparare il contenuto in ^{87}Sr con l'isotopo stabile dello stronzio (^{86}Sr).

L'isotopo ^{86}Sr è stabile (ossia la sua concentrazione in un sistema isolato non cambia nel tempo).

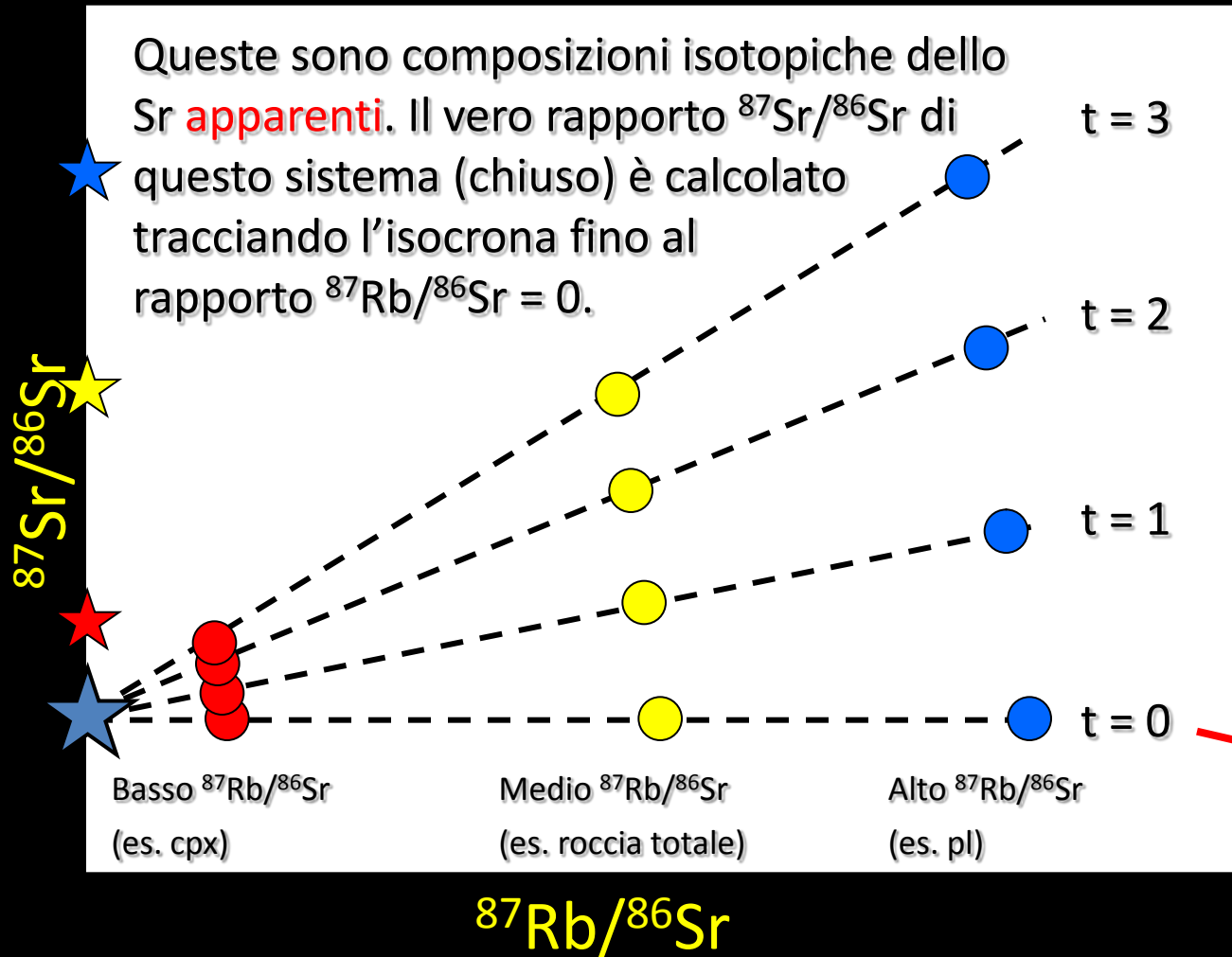
Sistematica isotopica Rb-Sr



Assumiamo di avere tre parti di un sistema geologico chiuso (es. due minerali e la composizione della roccia totale) con differenti rapporti isotopici $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$.

Momento della solidificazione (es. eruzione).

Sistematica isotopica Rb-Sr



Assumiamo di avere tre parti di un sistema geologico chiuso (es. due minerali e la composizione della roccia totale) con differenti rapporti isotopici $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$.

Momento della solidificazione (es. eruzione).

Sistematica isotopica Rb-Sr

L'isotopo ^{87}Rb decade in ^{87}Sr con un tempo di dimezzamento di 48.8 Ga

(costante di decadimento $\lambda = 1.42^{-11}$ per anno)

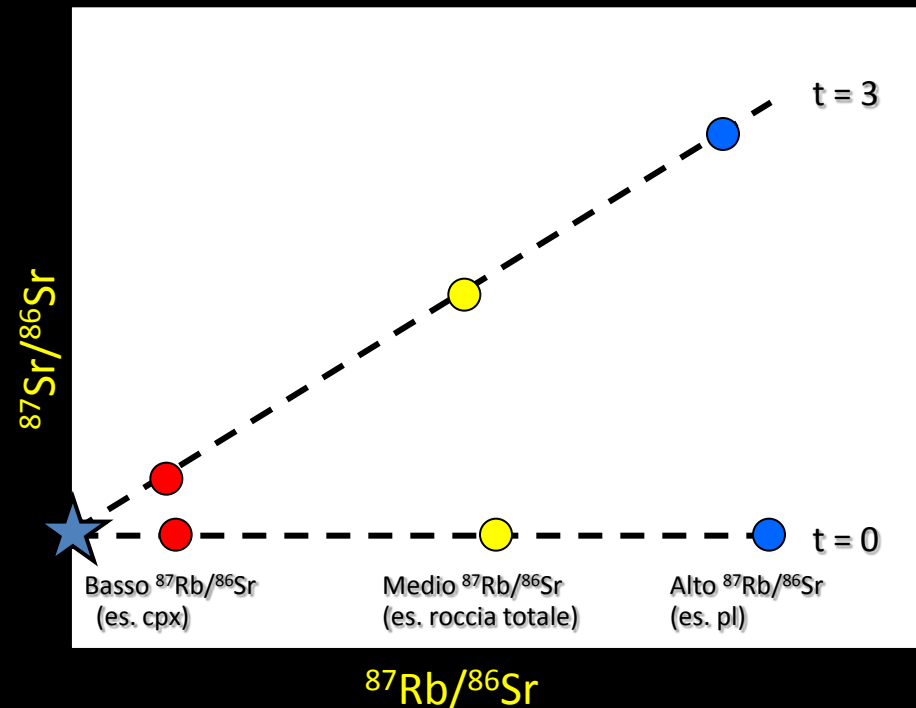
$$(^{87}\text{Sr})_{\text{ora}} = (^{87}\text{Sr})_{\text{iniziale}} + (^{87}\text{Rb})_{\text{ora}} * (e^{\lambda t} - 1)$$

Se si divide per un isotopo non radiogenico come ^{86}Sr :

$$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{ora}} = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{iniziale}} + (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_{\text{ora}} * (e^{\lambda t} - 1)$$

Sistematica isotopica Rb-Sr

@ T_3 (es. ora) noi misuriamo diversi valori di $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nelle tre porzioni del sistema geologico.

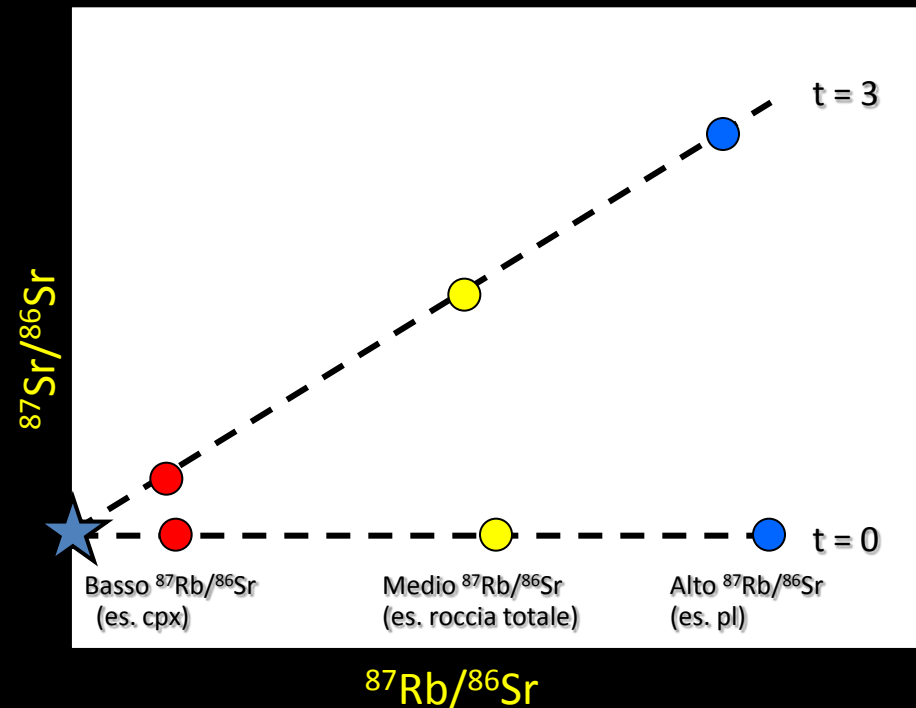


Quale di questi tre differenti valori rappresenta il rapporto $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ originale del sistema @ T_0 ?

Nessuno

Sistematica isotopica Rb-Sr

Se noi conosciamo il valore di T_3 (ossia l'età della roccia) e il valore del rapporto $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ delle tre parti del sistema (che può essere facilmente misurato) è possibile calcolare...



Il valore del rapporto $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ originale del sistema @ T_0

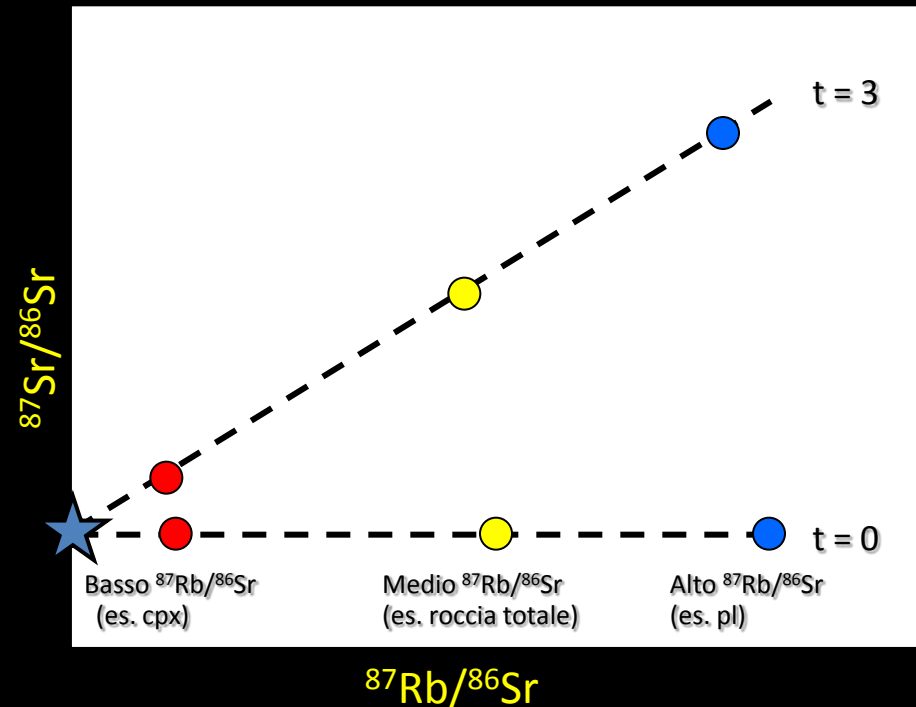
Come?

Sistematica isotopica Rb-Sr

$$\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_{\text{ora}} = \left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_{\text{iniziale}} + \left(\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}\right)_{\text{ora}} * (e^{\lambda t} - 1)$$

$$\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_{\text{iniziale}} = \left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_{\text{ora}} - \left(\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}\right)_{\text{ora}} * (e^{\lambda t} - 1)$$

Rapporti facilmente analizzabili



$$\lambda = 1.42 * 10^{-11}$$

t = anni

Deve essere conosciuto

$$e = 2.718$$

In alternativa può essere calcolato...

Sistematica isotopica Rb-Sr

L'equazione dell'isocrona T3 è di questo tipo:

$$y = b + mx$$

Dove:

$Y = {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$ misurato

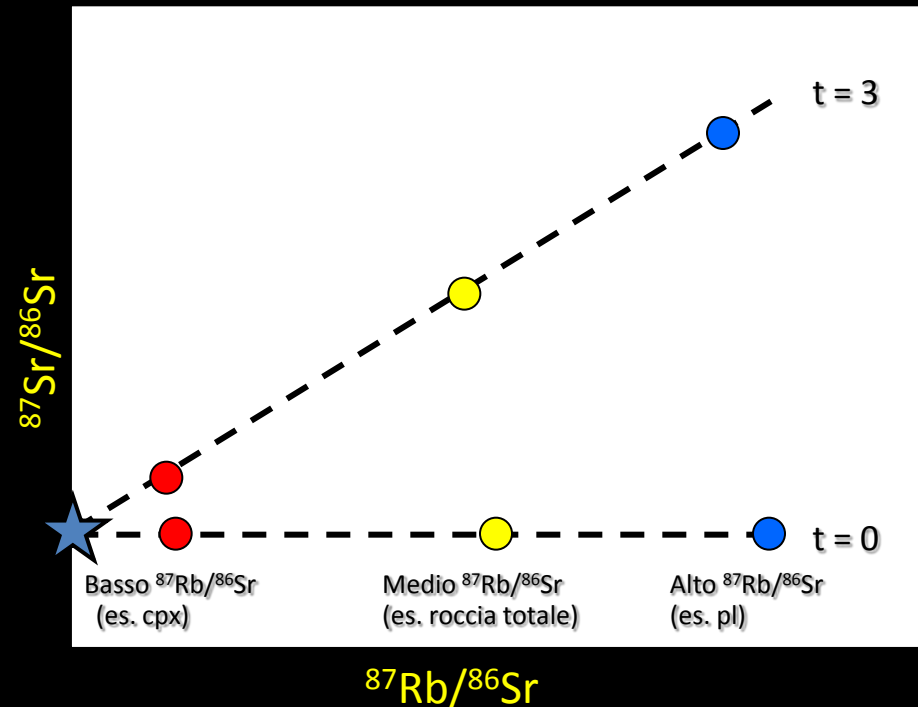
$b = {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}_{(\text{iniziale})}$

$m = e^{\lambda t} - 1$

$x = {}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr}$

In questo caso l'unica incognita è t .

Questo vuol dire che questo sistema può essere utilizzato per datare le rocce.



Sistematica isotopica Rb-Sr

Il principio di base della geochimica isotopica è che **due isotopi** di uno stesso elemento **non vengono frazionati** durante un processo geologico.

Una roccia ha un rapporto $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 1,0000$

Domanda:

Quale sarà il rapporto $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nella roccia residua e nel fuso parziale solidificato, immediatamente dopo il processo di fusione parziale (es. dopo 1 anno)?

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Roccia residua

1.0000

Quindi?

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Fuso parziale

1.0000

Sistematica isotopica Rb-Sr

In termini assoluti (numero di atomi) e in termini relativi (percentuale in massa o ppm) la concentrazione elementare della roccia residua ha meno Sr (e meno Rb) sia della roccia di partenza che del fuso generato da quella roccia.


Un'importante differenza sta nel fatto che la roccia residua ha un rapporto Rb/Sr più basso sia della roccia iniziale che del fuso generato.

Questo vuol dire che, rispetto alla roccia iniziale, la roccia residua ha un contenuto più basso in ^{87}Rb , mentre il fuso parziale ha un più alto contenuto in ^{87}Rb .

Sistematica isotopica Rb-Sr

In termini assoluti (*numero di atomi*) e in termini relativi (*percentuale in massa o ppm*) la roccia residua ha meno Sr (e meno Rb) sia della roccia di partenza che del fuso generato da quella roccia.

Un'importante differenza sta nel fatto che la roccia residua ha un rapporto Rb/Sr più basso sia della roccia iniziale che del fuso generato.

	Roccia residua	Roccia di partenza	Fuso parziale
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	1,0000	1,0000	1,0000
Sr (ppm)	10	20	40
Rb (ppm)	3	10	25
Rb/Sr	3,33	2,00	1,60
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0,84	1,41	1,76
			
27,83% 9,86%			

www.ptable.com

Sistematica isotopica Rb-Sr

Una sorgente con tanto ^{87}Rb produrrà tanto ^{87}Sr nel tempo, mentre una sorgente con poco ^{87}Rb produrrà poco ^{87}Sr .

Il quantitativo di ^{87}Sr prodotto per il decadimento di ^{87}Rb dipende dalla velocità di decadimento (tempo di dimezzamento)

Il tempo di dimezzamento di ^{87}Rb
è molto lungo:
 $4,8 * 10^{10}$ anni.

Sistematica isotopica Rb-Sr

Torniamo alla roccia di partenza con $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 1,000$

Dopo un periodo geologicamente lungo (es. 1-10-100 Ma) la roccia residua e il fuso parziale (solidificato) avranno rapporti $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ molto diversi.

Domanda:

Dopo 10-100 Ma, il fuso parziale solidificato avrà $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ più alto o più basso della roccia di partenza (1,000)?

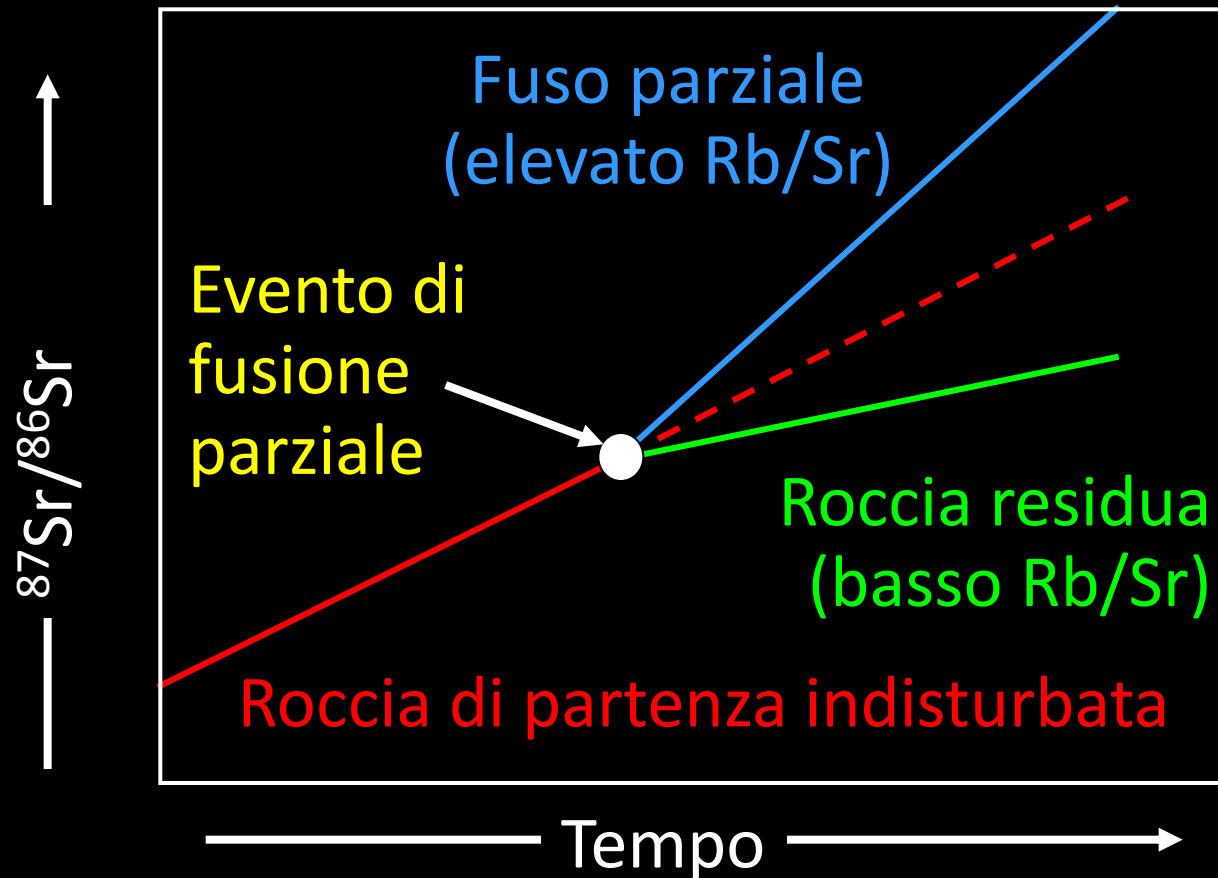
Più alto

E la roccia residuale?

Più alto

Sistematica isotopica Rb-Sr

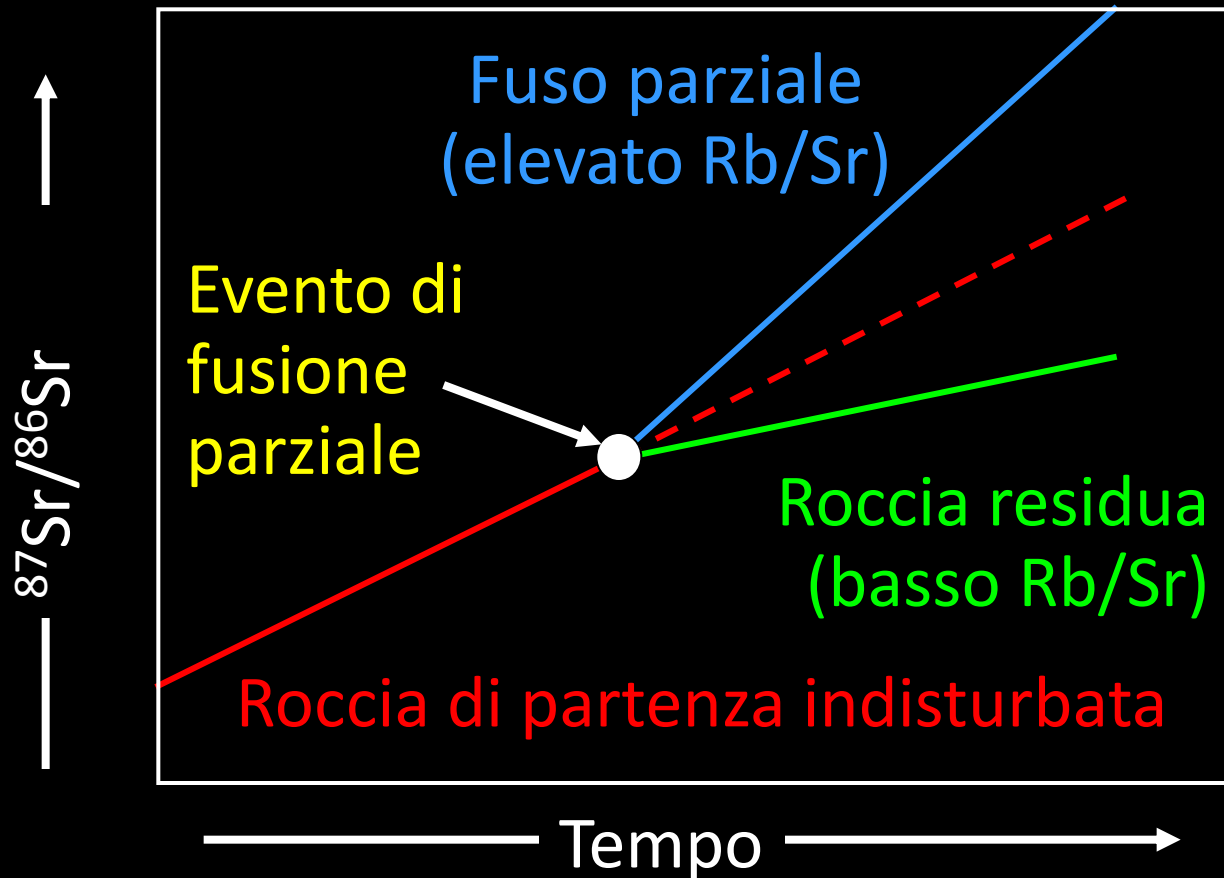
La differenza è che la il fuso parziale solidificato evolverà verso rapporti $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ molto più elevati rispetto alla roccia residuale e alla roccia di partenza.



Sistematica isotopica Rb-Sr

Domanda:

Un fuso parziale prodotto da una sorgente di mantello impoverita avrà $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ basso o alto?



Sistematica isotopica Rb-Sr

Il valore attuale totale della Terra (porzione silicatica; *Bulk Silicate Earth*; **BSE**) è:

$$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70445$$

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ più alti di BSE in rocce ignee indicano derivazione da **Sorgenti Arricchite**. Valori più bassi indicano derivazione da **Sorgenti Impoverite**.

Valore medio di $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ della Crosta Continentale superiore? **>0,7200**

La crosta superiore è una sorgente arricchita? **SI**

Ma arricchita in cosa?...

Sistematica isotopica Rb-Sr

Il valore attuale totale della Terra (porzione silicatica; *Bulk Silicate Earth*; **BSE**) è:

$$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70445$$

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ più alti di BSE in rocce ignee indicano derivazione da **Sorgenti Arricchite**. Valori più bassi indicano derivazione da **Sorgenti Impoverite**.

Valore medio di $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dei basalti di dorsale oceanica? **<0,7035**

I MORB sono generati da sorgenti impoverite? **SI**

Ma impoverita in cosa?...

Sistematica isotopica Rb-Sr

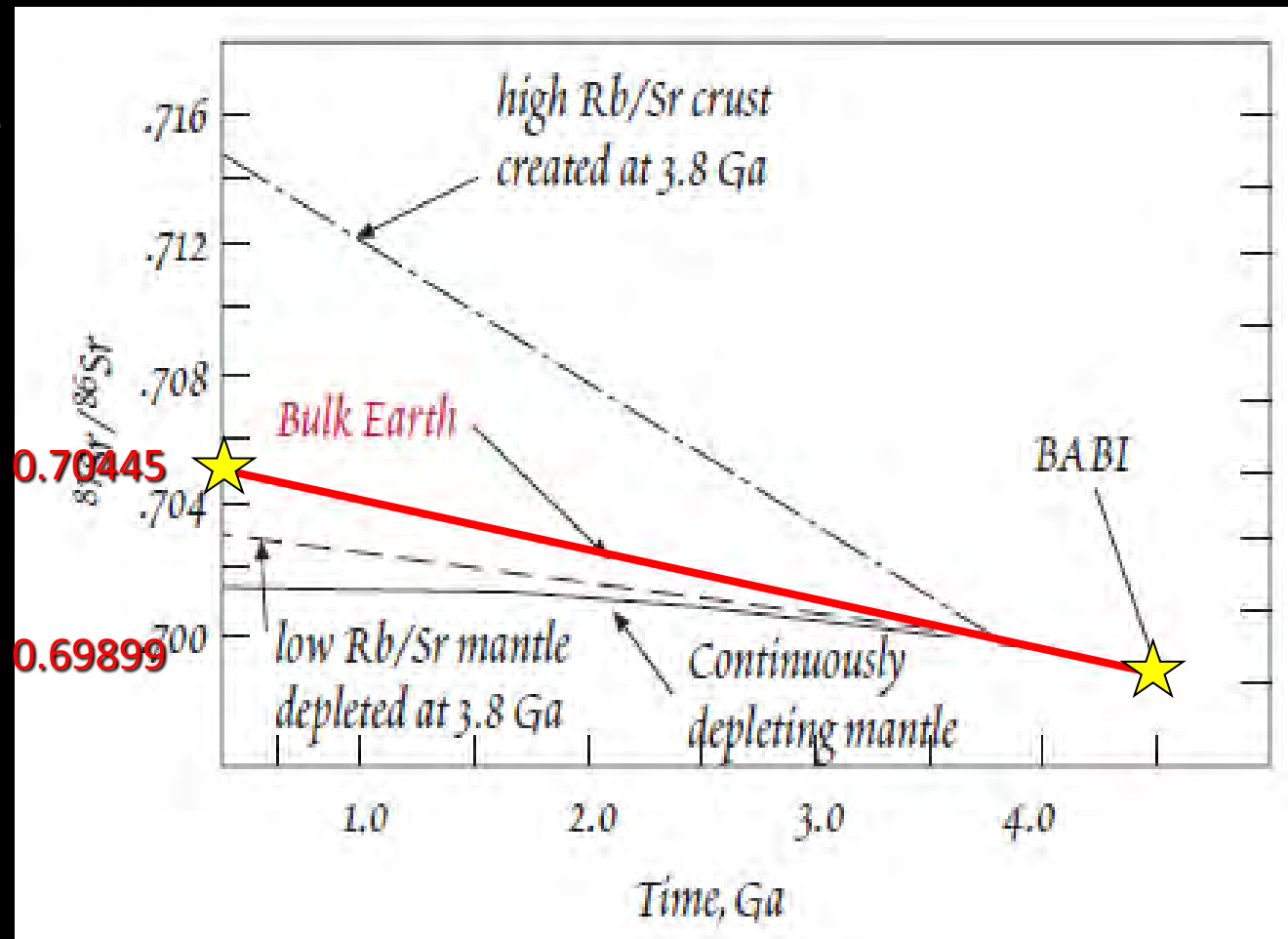
Lo $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ della Terra è continuamente aumentato dalla sua formazione.

Qual era il valore originale di $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ della Terra?

La risposta viene dal valore **BABI**.

Basaltic
Achondrite
Best
Initial

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,69899$



Sistematica isotopica Rb-Sr

Cosa c'è da ricordare:

- Una parte di Rb si trasforma in Sr.
- In particolare, il ^{87}Rb decade molto lentamente in ^{87}Sr .
- Durante la fusione parziale del mantello sia il Rb che lo Sr si comportano da elementi incompatibili, ma il Rb è più incompatibile dello Sr.
- Un mantello restitico (impoverito) è caratterizzato da minor Rb, minor Sr e minor Rb/Sr della sorgente iniziale e del fuso parziale generato.

Sistematica isotopica Rb-Sr

Cosa c'è da ricordare:

- Dopo un periodo geologicamente rilevante, la regione sorgente (con poco ^{87}Rb) avrà poco ^{87}Sr .
- Il contenuto in ^{87}Sr viene rapportato (normalizzato) all'isotopo stabile ^{86}Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$).
- Una qualsiasi roccia ignea ha un certo $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Il numeratore è funzione di 1) il valore di $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ della sorgente; 2) il quantitativo di ^{87}Rb nella roccia e 3) l'età della roccia. Il denominatore non cambia e resta stabile.

Sistematica isotopica Rb-Sr

Cosa c'è da ricordare:

- Una sorgente antica (con basso $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$) è caratterizzata da basso $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.
- Un fuso parziale solidificato antico (con elevato $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$) è caratterizzato da elevato $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.
- Più vecchie sono le rocce (restite e fuso solidificato) maggiori sono le differenze in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.
- I prodotti recenti di un processo di fusione (restite e fuso parziale solidificato) hanno praticamente lo stesso $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Questo perché il ^{87}Rb non ha avuto tempo di trasformarsi in ^{87}Sr .

Sistematica isotopica Rb-Sr

Cosa c'è da ricordare:

- Il valore medio totale di $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ della Terra (*Bulk Silicate Earth*; BSE) è **0,70445**.
- All'inizio della sua formazione il BSE della Terra era molto più basso: **0,69899**.
- Valori più elevati di BSE possono indicare derivazione da sorgenti con elevato $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ (= Sorgenti Arricchite).
- Valori più bassi di BSE indicano derivazione da sorgenti con basso $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ (= Sorgenti impoverite).

Sistematica isotopica Sm-Nd

Samario e Neodimio appartengono al gruppo delle Terre Rare (*Rare Earth Elements*; REE).

La, Ce, Pr, Nd, (Pm), Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu

In questo caso il ^{147}Sm decade in ^{143}Nd con un tempo di dimezzamento di $1,06 * 10^{11}$ anni.

Anche in questo caso l'isotopo radiogenico (^{143}Nd) è rapportato a un isotopo stabile (^{144}Nd) =

$$\left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right).$$

Sistematica isotopica Sm-Nd

Come visto per la sistematica Rb-Sr, anche Sm e Nd sono molto incompatibili in un tipico assemblaggio di mantello.

Nel sistema Rb-Sr l'isotopo radioattivo (Rb) è più incompatibile dell'isotopo radiogenico (Sr).

Nel sistema Sm-Nd l'isotopo radioattivo (Sm) è meno incompatibile dell'isotopo radiogenico (Nd).

L'ordine di incompatibilità delle REE durante i processi di fusione parziale di una peridotite (roccia di mantello):

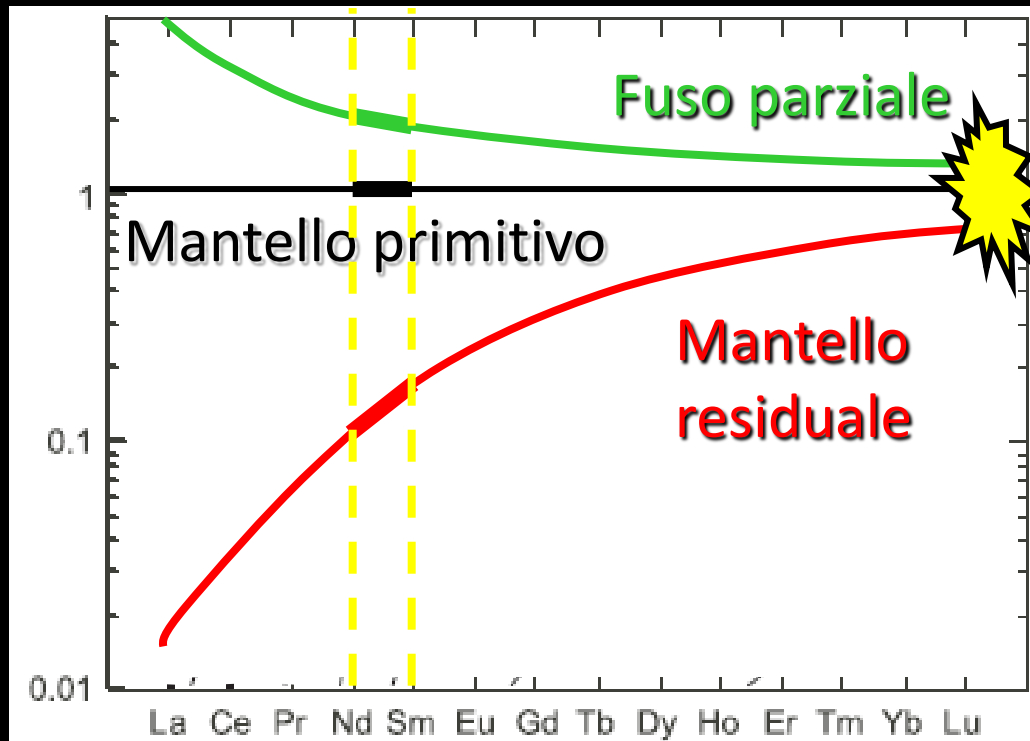
La>Ce>Pr>Nd>Sm>Eu>Gd>Tb>Dy>Ho>Er>Tm>Yb>Lu.

*** Il Sm è meno incompatibile del Nd ***

Sistematica isotopica Sm-Nd

Domanda:

Un fuso generato da un mantello avrà maggiore o minore Sm/Nd della porzione residuale?



Evento di fusione parziale

Più basso

* Il Sm è meno incompatibile del Nd *

Sistematica isotopica Sm-Nd

Cosa vuol dire questo?

Un mantello residuale ha maggiore Sm/Nd (e quindi anche maggiore $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$) rispetto al mantello iniziale e al fuso generato da quella sorgente.

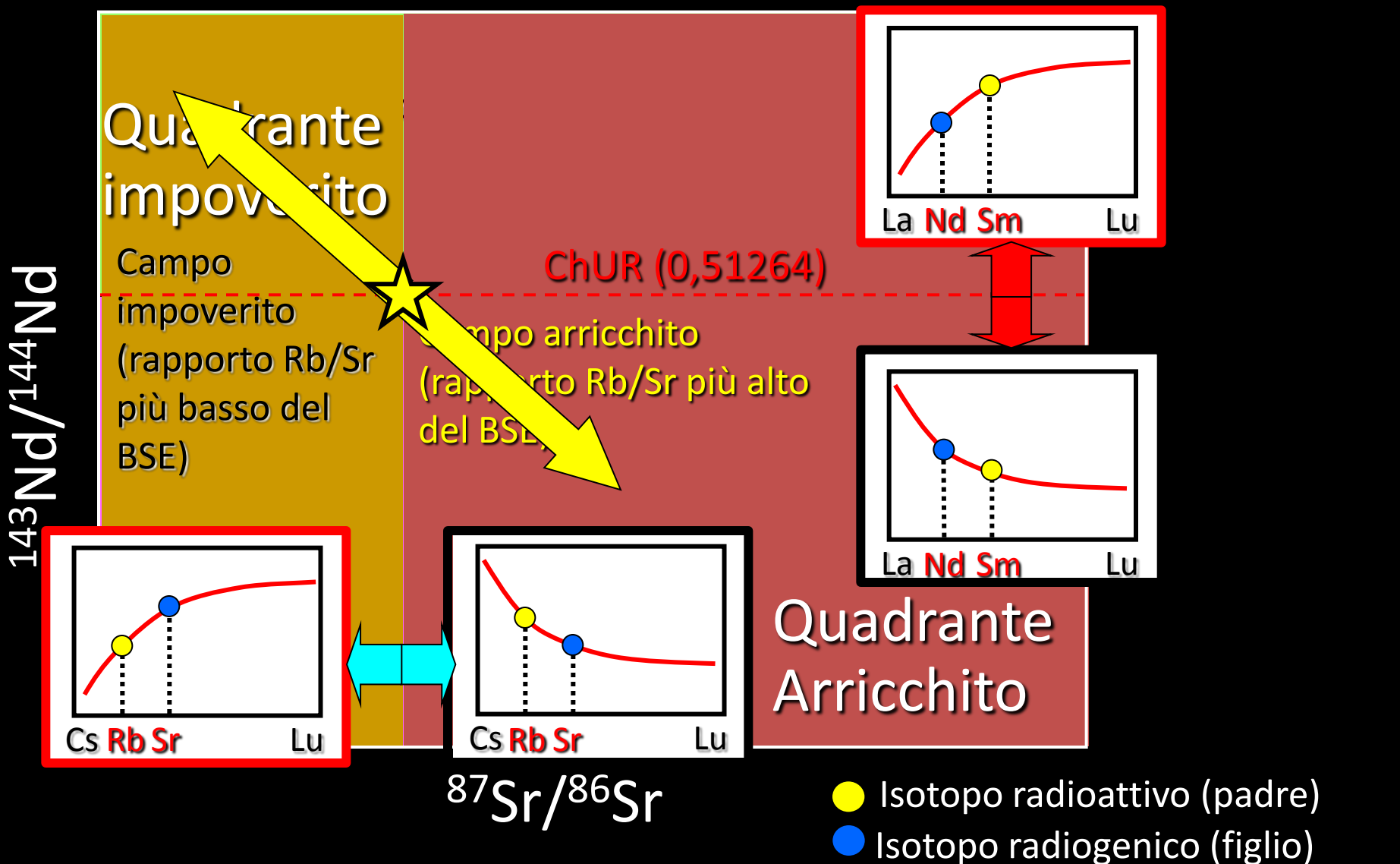
Dopo un periodo geologicamente rilevante il mantello residuale avrà $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ più elevato delle altre due rocce.

Il valore medio della Terra silicatica in termini di $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ è dato dal ChUR (*Chondritic Uniform Reservoir*) = 0.51264.

Valori di una roccia superiori al ChUR indicano derivazione da sorgenti impoverite (ossia che hanno sperimentato estrazione di fuso basaltico nel loro passato).

*** Il Sm è meno incompatibile del Nd ***

Sistematica isotopica Rb-Sr e Sm-Nd



Sistematica isotopica U-Th-Pb

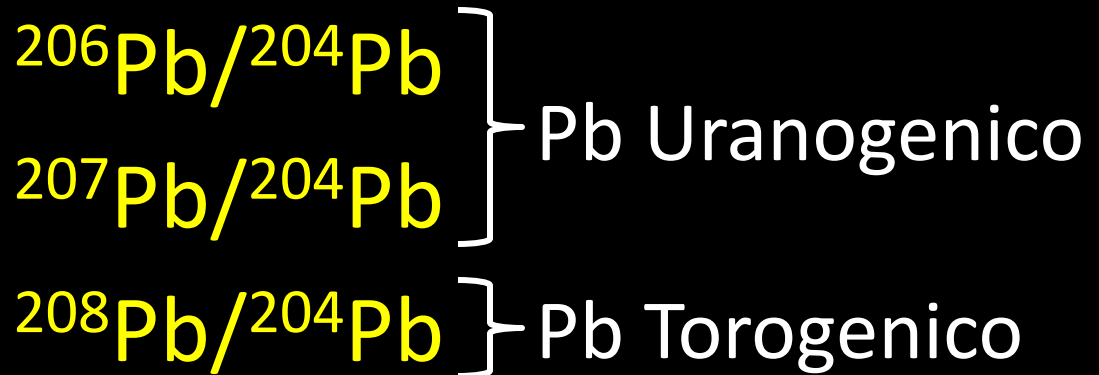
Il sistema U-Th-Pb è speciale perchè abbiamo tre schemi di decadimento di due elementi che si trasformano in tre isotopi diversi del Pb.

^{238}U decade in ^{206}Pb

^{235}U decade in ^{207}Pb

^{232}Th decade in ^{208}Pb

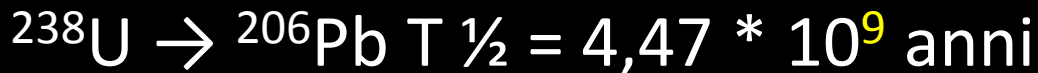
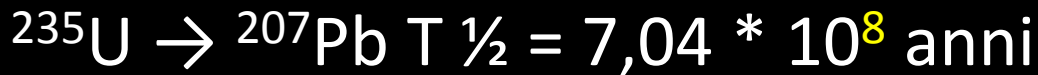
Anche in questo caso gli isotopi radiogenici sono rapportati a un isotopo stabile:



Sistematica isotopica U-Th-Pb

Le abbondanze dei due piombi uranogenici (^{206}Pb e ^{207}Pb) dipendono dal quantitativo di ^{238}U e ^{235}U e dal tempo.

Il tempo di dimezzamento dell' ^{235}U è molto più breve di quello dell' ^{238}U :

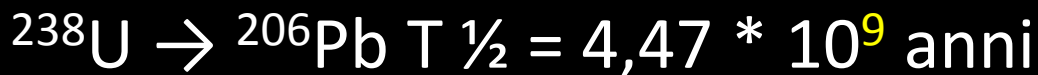
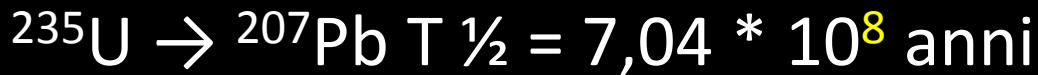


Questo vuol dire che l' ^{235}U decade (si trasforma in Pb) più velocemente dell' ^{238}U . Come risultato, in un diagramma $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, l'evoluzione isotopica del Pb segue andamenti curvilinei. L'esatto andamento dipende dal rapporto U/Pb.

Sistematica isotopica U-Th-Pb

Le abbondanze dei due piombi uranogenici (^{206}Pb e ^{207}Pb) dipendono dal quantitativo di ^{238}U e ^{235}U e dal tempo.

Il tempo di dimezzamento dell' ^{235}U è molto più breve di quello dell' ^{238}U :



Domanda:

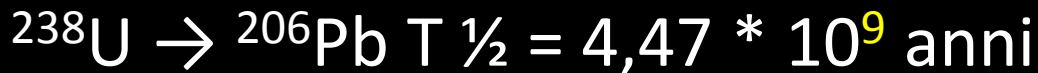
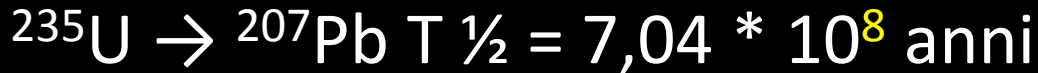
Durante la sua evoluzione, il rapporto $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ della Terra è aumentato o diminuito?

In altre parole: il rapporto attuale $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ della Terra è più alto o più basso di $\sim 4,56 \text{ Ga}$?

Sistematica isotopica U-Th-Pb

Le abbondanze dei due piombi uranogenici (^{206}Pb e ^{207}Pb) dipendono dal quantitativo di ^{238}U e ^{235}U e dal tempo.

Il tempo di dimezzamento dell' ^{235}U è molto più breve di quello dell' ^{238}U :



Domanda:

4,56 Ga il rapporto $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ della Terra (del Sistema Solare) era **0,33**.

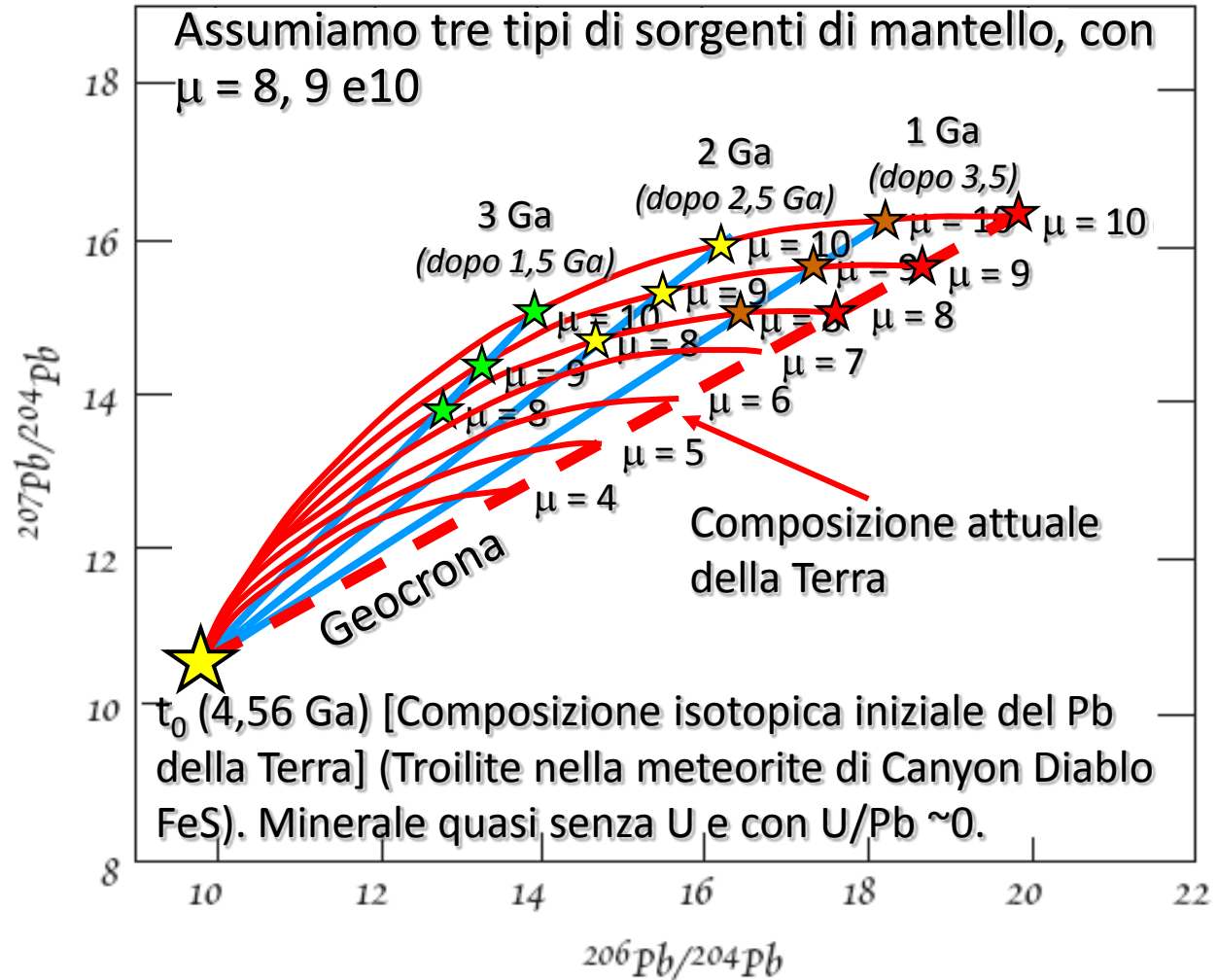
Il rapporto attuale $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ della Terra è **0,0072**.

Sistematica isotopica U-Th-Pb

Vediamo qualche possibile curva di evoluzione con diversi rapporti $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ (rapporto chiamato μ ; si pronuncia "mi" o "mu").

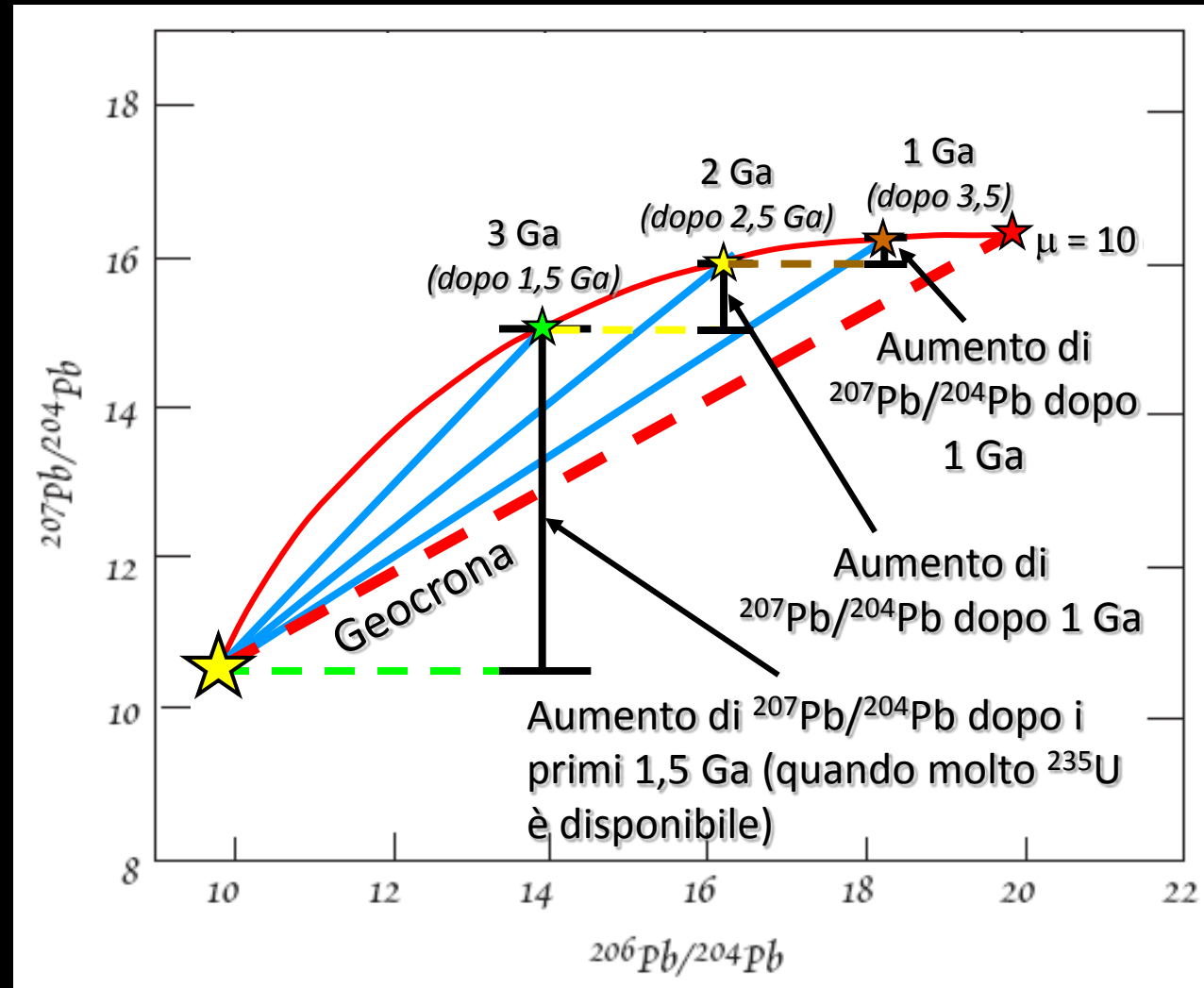
Tutti i sistemi che iniziano con una stessa composizione isotopica al tempo t_0 si posizionano lungo una linea retta dopo un certo tempo t . Questa linea è chiamata Isocrona Pb-Pb.

L'isocrona a $t = 4,56$ Ga è chiamata Geocrona.



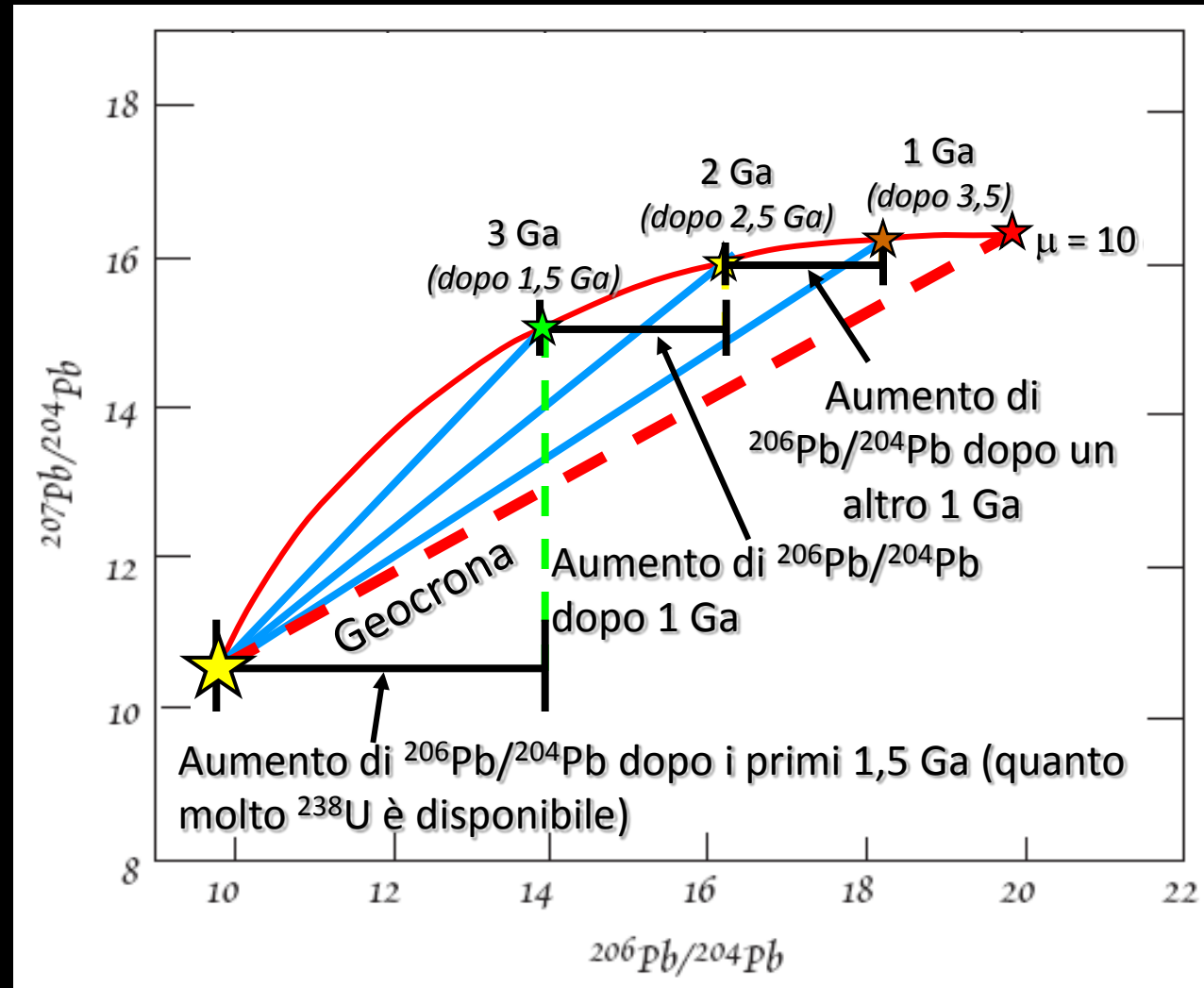
Sistematica isotopica U-Th-Pb

A cause del tempo di dimezzamento relativamente basso dell' ^{235}U , il rapporto $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ cresce molto all'inizio e molto poco nei tempi più recenti.



Sistematica isotopica U-Th-Pb

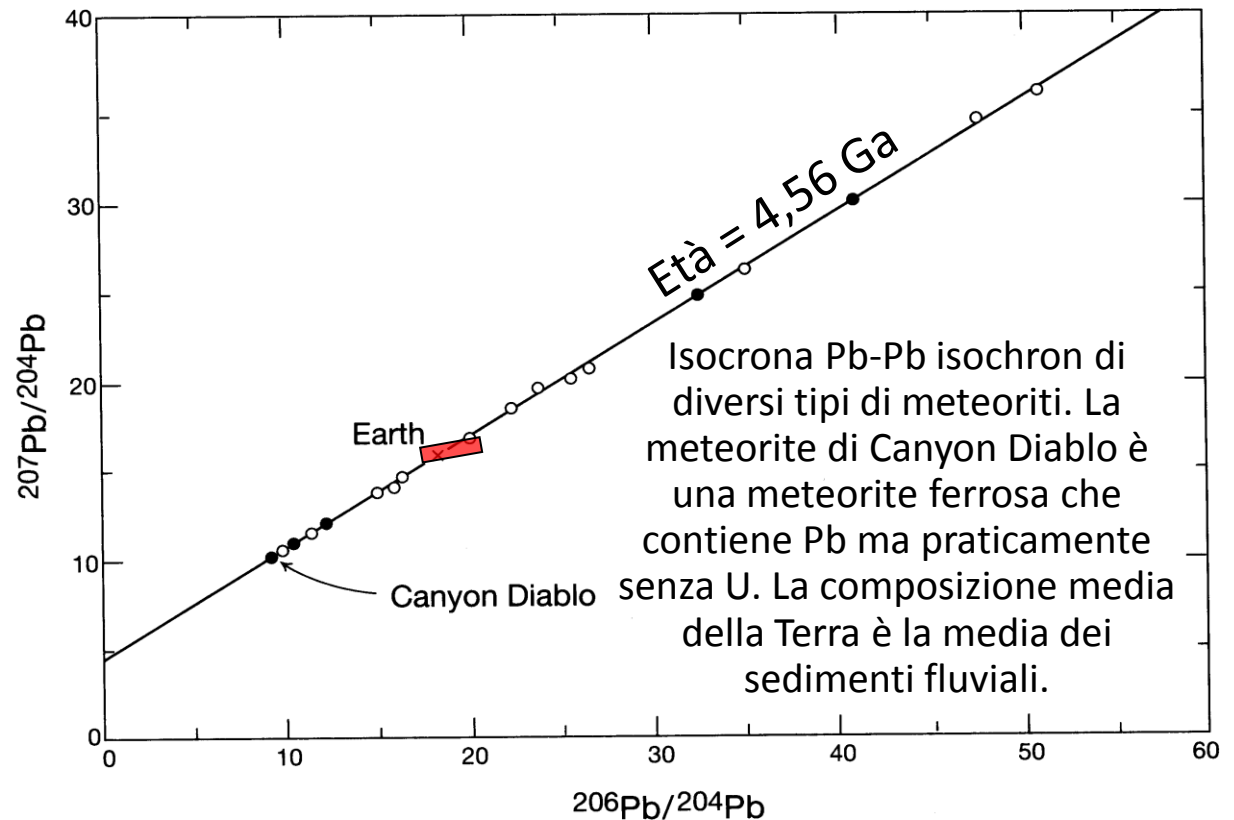
D'altro canto, a causa del lungo tempo di dimezzamento Dell' ^{238}U , Il rapporto $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ è cresciuto meno rapidamente all'inizio, ma ora cresce relativamente di più del $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$.



Sistematica isotopica U-Th-Pb

Età della Terra e del Sistema Solare

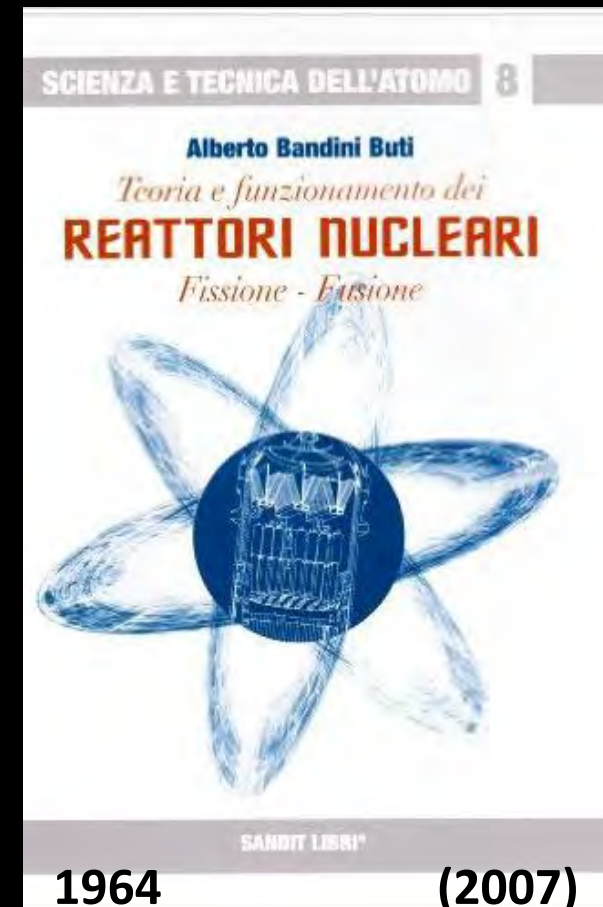
Questa è stata stimata sulla base delle relazioni isotopiche del Pb (in particolare il Pb uranogenico).



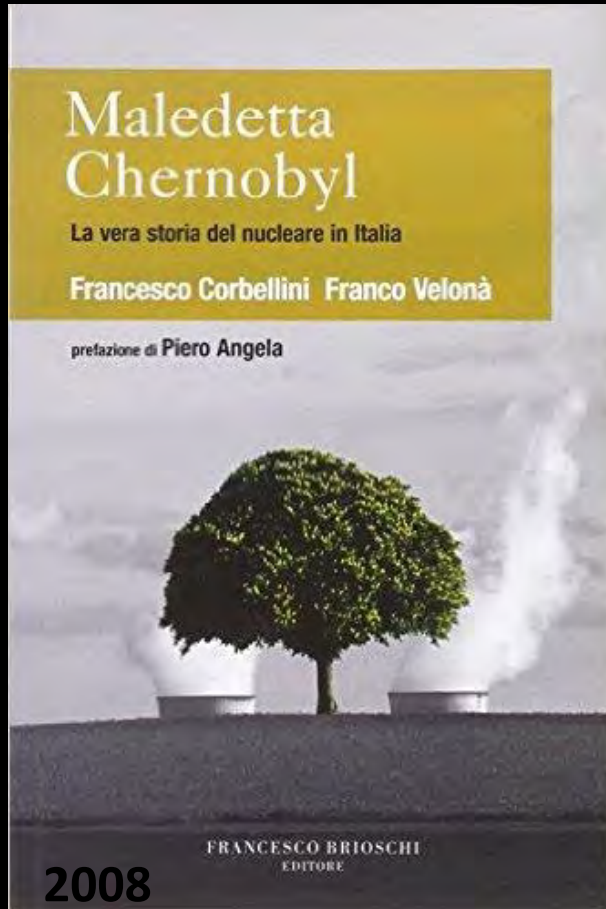
Suggerimenti per la lettura



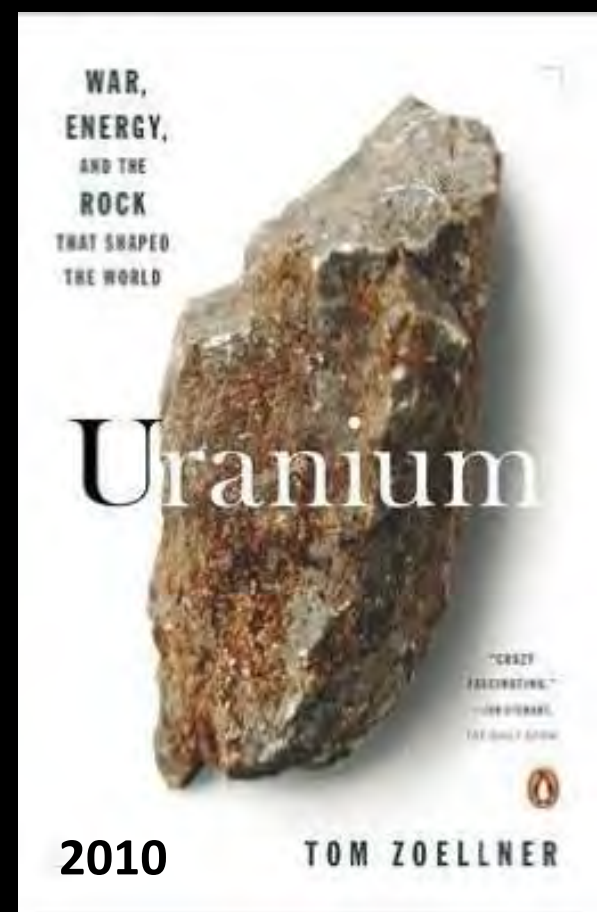
1959



Suggerimenti per la lettura



Suggerimenti per la lettura



Grazie per l'attenzione

