

Le Fer dans l'univers

Thierry Auger

&

Olivier Hardouin Duparc

CNRS, ENSAM & X-Palaiseau

A.MI.S. UPMC 10 novembre 2018

Le Fer dans l'univers

Sa présence dans la Galaxie, le Système Solaire

Son origine : dans les explosions d'étoiles

Nucléosynthèses stellaires

Sa présence dans le Système Solaire, les météorites

Sa présence sur et dans la Terre

dans les mots, dans la mythologie

dans notre sang, les lentilles, l'eau...

Le fer dans l'univers d'aujourd'hui

Le **fer** : le *sixième* élément en masse, le *neuvième* en nombre d'atomes
(*bien après la sombre matière noire invisible...*)

En masse : H, He, O, C, Ne, **Fe**, N, Si, Mg, S, (0.117%, Fe56)

En nombre : H, He, O, C, Ne, N, Si, Mg, **Fe**, S, He3, (0.0027%)

Abondances élémentaires dans notre Galaxie

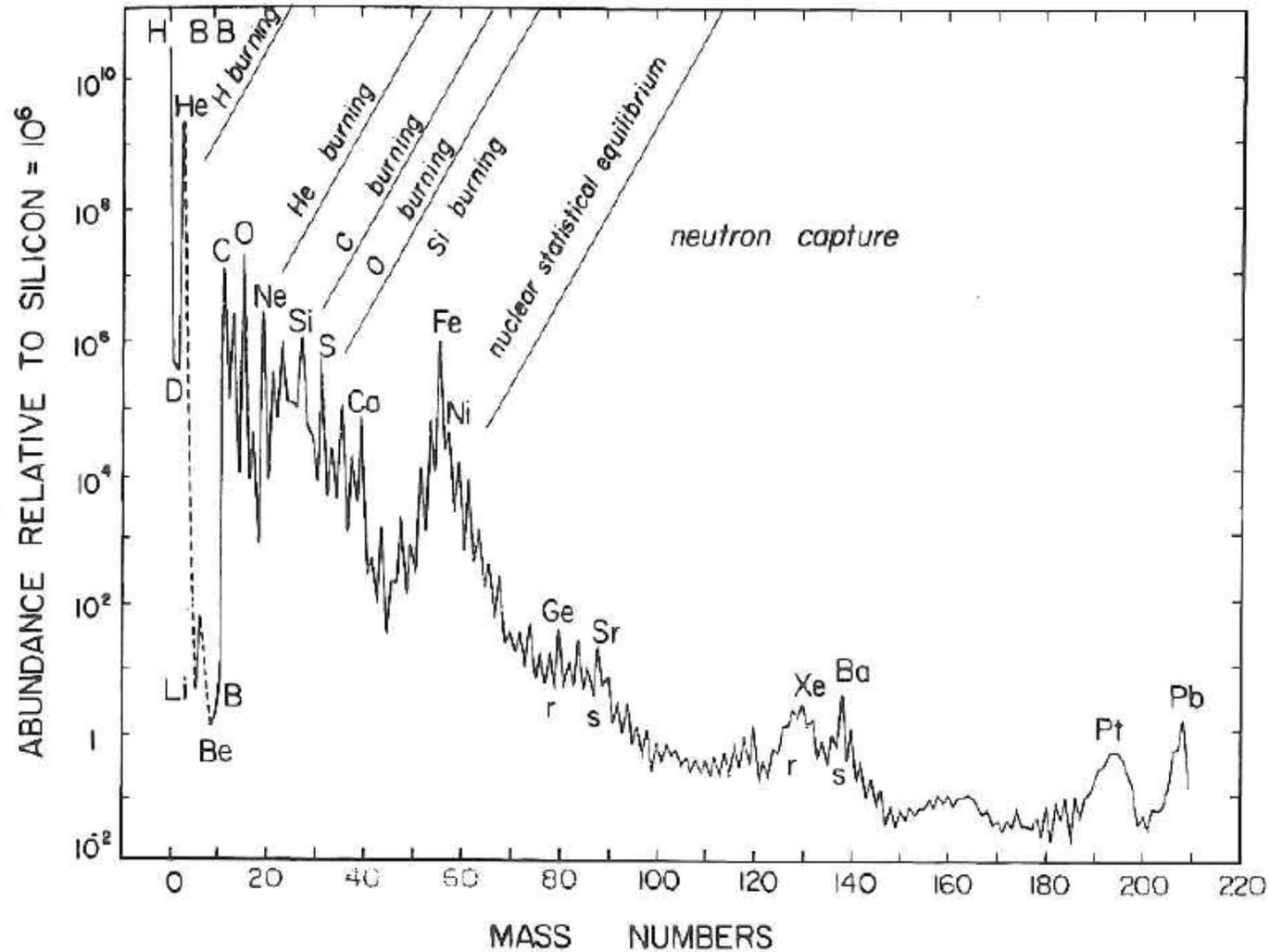


Fig. 1.4. The 'local Galactic' abundance distribution of nuclear species, normalized to 10^6 ^{28}Si atoms, adapted from Cameron (1982).

Abondances élémentaires dans la Galaxie et le Système Solaire

Z	Symbole	A	Processus source	Fraction dans la Voie Lactée	Fraction dans le Système Solaire	Volatile
1	H	1	Big Bang	74%	70%	*
2	He	4	Big Bang, CNO, pp	24%	27,5%	*
8	O	16	Fusion hélium	1%	0,95%	*
6	C	12	Fusion hélium	0,5%	0,3%	*
10	Ne	20, 22		0,1%	0,175%	*
26	Fe	56, 54	e-process (équilibre)	0,1%	0,124%	
7	N	14	Cycle CNO		0,1%	*
14	Si	28, 29, 30	Cycle oxygène	0,07%	0,07%	
12	Mg	24,25	Cycle carbone	0,06%	0,058%	
16	S	32			0,04%	*
18	Ar	36			0,007%	*
20	Ca	40			0,006%	
13	Al	27			0,0058%	
28	Ni	58			0,005%	

Le fer dans l'univers d'aujourd'hui

Le *fer* : le *sixième* élément en masse, le *neuvième* en nombre d'atomes

En masse : H, He, O, C, Ne, *Fe*, N, Si, Mg, S, (0.117%, Fe56)

En nombre : H, He, O, C, Ne, N, Si, Mg, *Fe*, S, He3, (0.0027%)

Pourtant le fer est *vingt-sixième* dans le tableau périodique...

Alors ??

Le fer dans l'univers d'aujourd'hui

Le *fer* : le *sixième* élément en masse, le *neuvième* en nombre d'atomes

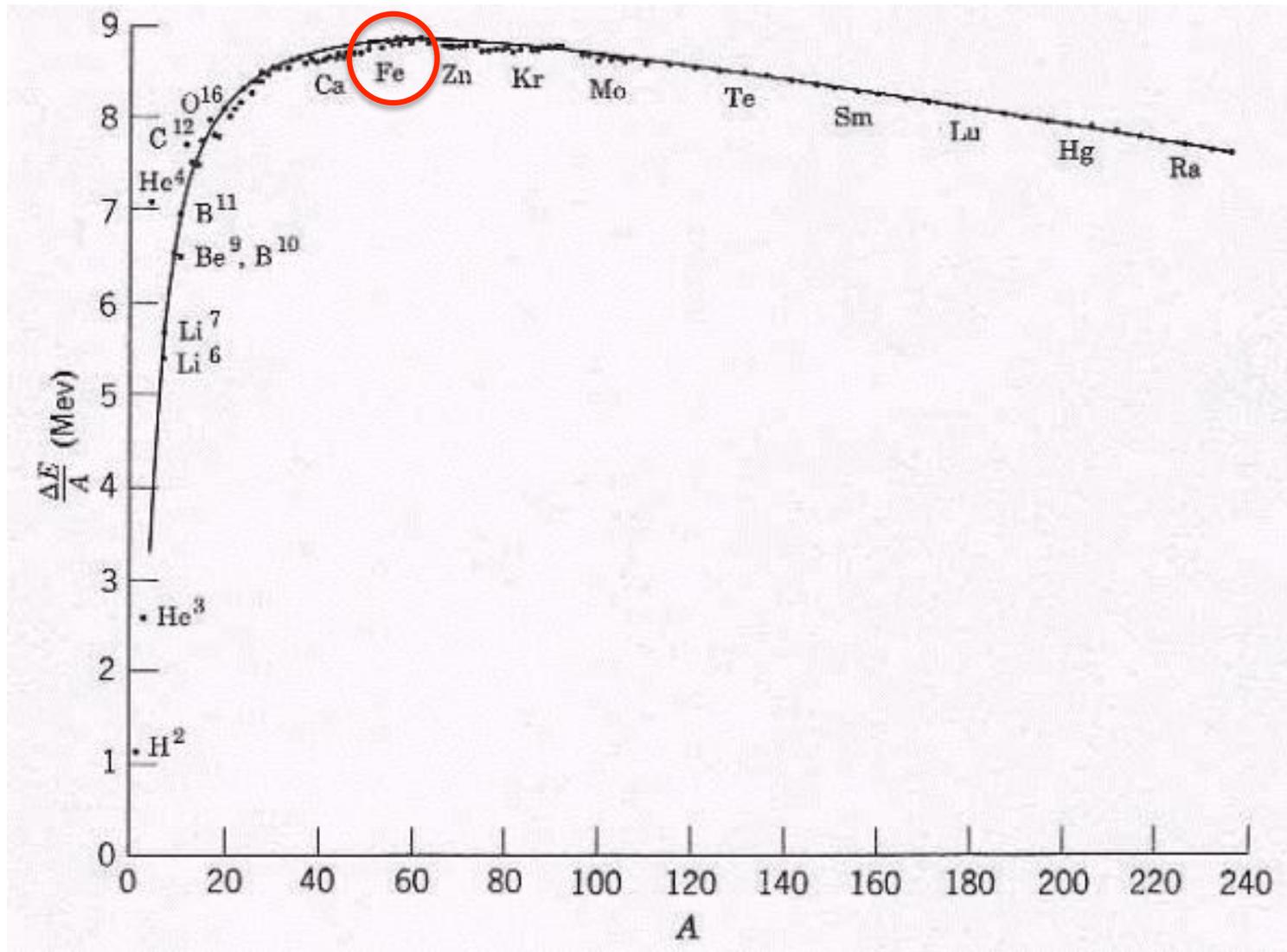
En masse : H, He, O, C, Ne, *Fe*, N, Si, Mg, S, (0.117%, Fe56)

En nombre : H, He, O, C, Ne, N, Si, Mg, *Fe*, S, He3, (0.0027%)

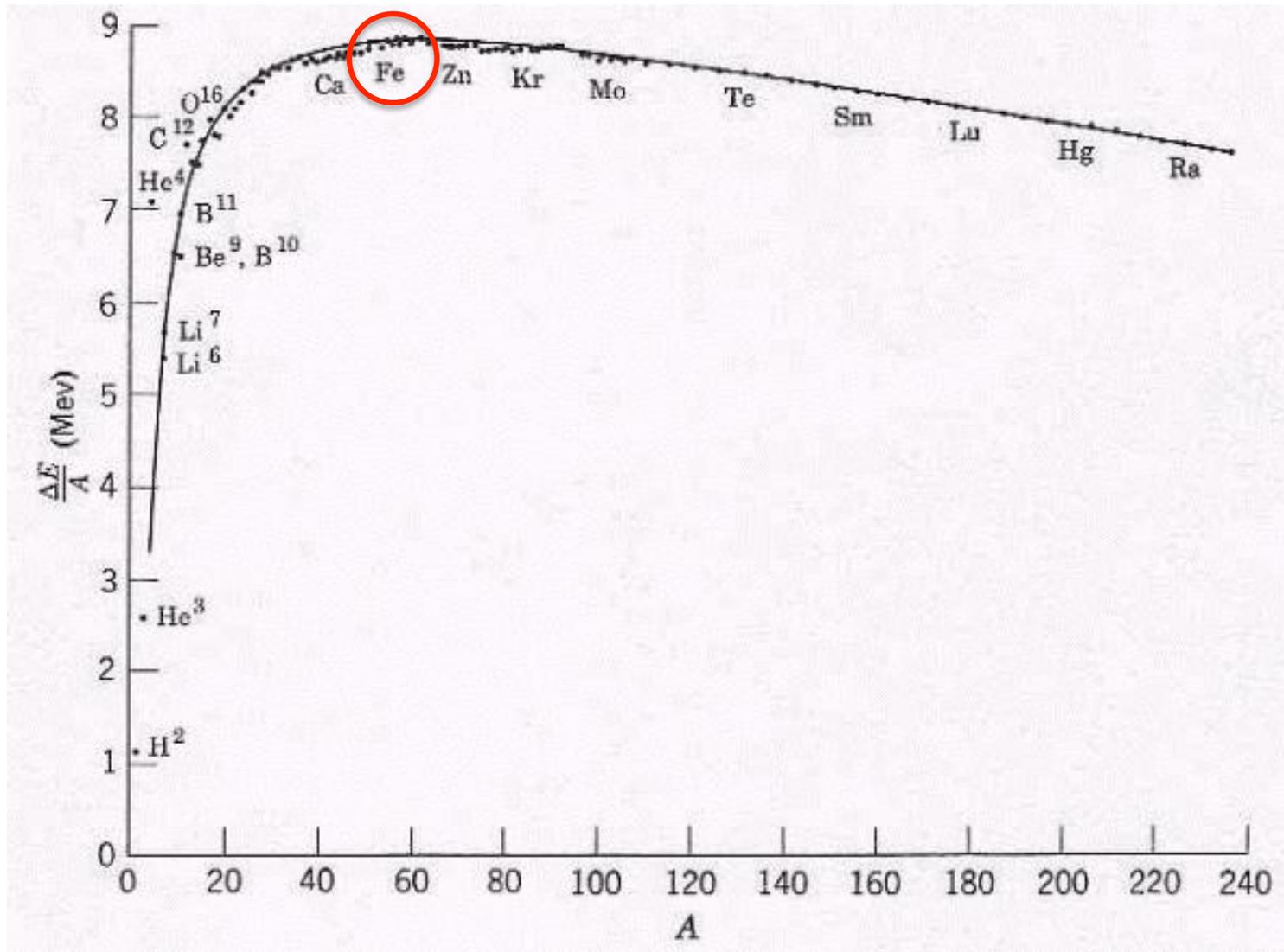
Pourtant le fer est *vingt-sixième* dans le tableau périodique...

Alors ?? **Le noyau de fer Fe(26,56) est très stable ($E_f/\text{nucléon}$)**

Énergie de liaison des noyaux (stables, en MeV/nucléon)



Énergie de liaison des noyaux (stables, en MeV/nucléon)



Attention : c'est pour les noyaux stables

Diagrammes de phases : à l'équilibre. Mais la **cinétique du hors équilibre**...?

Un pionnier de la nucléosynthèse stellaire en quasi-équilibre :

Donald Clayton astrophysicien américain né en 1935



Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis 1968 (+ 1983)

Handbook of Isotopes in the Cosmos 2003 (Les 31 premiers éléments)

Un pionnier de la nucléosynthèse stellaire en quasi-équilibre :

Donald Clayton astrophysicien américain né en 1935



Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis 1968 (+ 1983)

Handbook of Isotopes in the Cosmos 2003 (Les 31 premiers éléments)

Donald D. Clayton n'est pas **Robert N. Clayton**, cosmochimiste décédé le 30/12/2017

Anomalie isotopique de l'oxygène dans le système solaire primitif

Le fer dans l'univers d'aujourd'hui

Le *fer* : le *sixième* élément en masse, le *neuvième* en nombre d'atomes

En masse : H, He, O, C, Ne, *Fe*, N, Si, Mg, S, (0.117%, Fe56)

En nombre : H, He, O, C, Ne, N, Si, Mg, *Fe*, S, He3, (0.0027%)

Pourtant le fer est *vingt-sixième* dans le tableau périodique...

Alors ?? Le noyau de fer Fe(26,56) est très stable ($E_b/\text{nucléon}$)

Mais le noyau de Ni(28,62) est *encore plus stable* !

Alors ???

Le fer dans l'univers d'aujourd'hui

Le *fer* : le *sixième* élément en masse, le *neuvième* en nombre d'atomes

En masse : H, He, O, C, Ne, **Fe**, N, Si, Mg, S, (0.117%, Fe56)

En nombre : H, He, O, C, Ne, N, Si, Mg, **Fe**, S, He3, (0.0027%)

Pourtant le fer est *vingt-sixième* dans le tableau périodique...

Alors ?? Le noyau de fer Fe(26,56) est très stable ($E_f/\text{nucléon}$)

Mais le noyau de Ni(28,62) est *encore plus stable* !

Alors ??? La voie alpha ne fabrique pas le Ni(28,62) mais le Ni(28,56)
qui, instable, donne, par décroissance bêta⁺, le Co(27,56)
qui donne le Fe(26,56) ! Q.E.D.

 ($p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \text{neutrino}$, oscillant)

Le fer dans l'univers d'aujourd'hui

Le **fer** : le *sixième* élément en masse, le *neuvième* en nombre d'atomes

En masse : H, He, O, C, Ne, **Fe**, N, Si, Mg, S, (0.117%, Fe56)

En nombre : H, He, O, C, Ne, N, Si, Mg, **Fe**, S, He3, (0.0027%)

Pourtant le fer est *vingt-sixième* dans le tableau périodique...

Alors ?? Le noyau de fer Fe(26,56) est très stable ($E_f/\text{nucléon}$)

Mais le noyau de Ni(28,62) est *encore plus stable* !

Alors ??? La voie alpha ne fabrique pas le Ni(28,62) mais le Ni(28,56)
qui, instable, donne, par décroissance bêta⁺, le Co(27,56)
qui donne le Fe(26,56) ! Q.E.D.  ($p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \text{neutrino}$, oscillant)

La thermodynamique nucléaire est contrecarrée par la dynamique
(alphaïque) de la nucléosynthèse dans les supernovae.

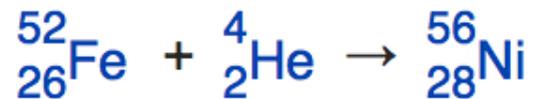
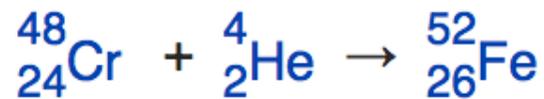
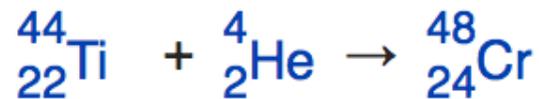
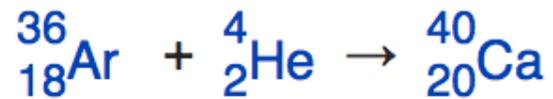
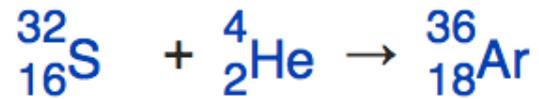
(depuis plus de 13 milliards d'années !)

Nucléosynthèse du fer dans les supernovae

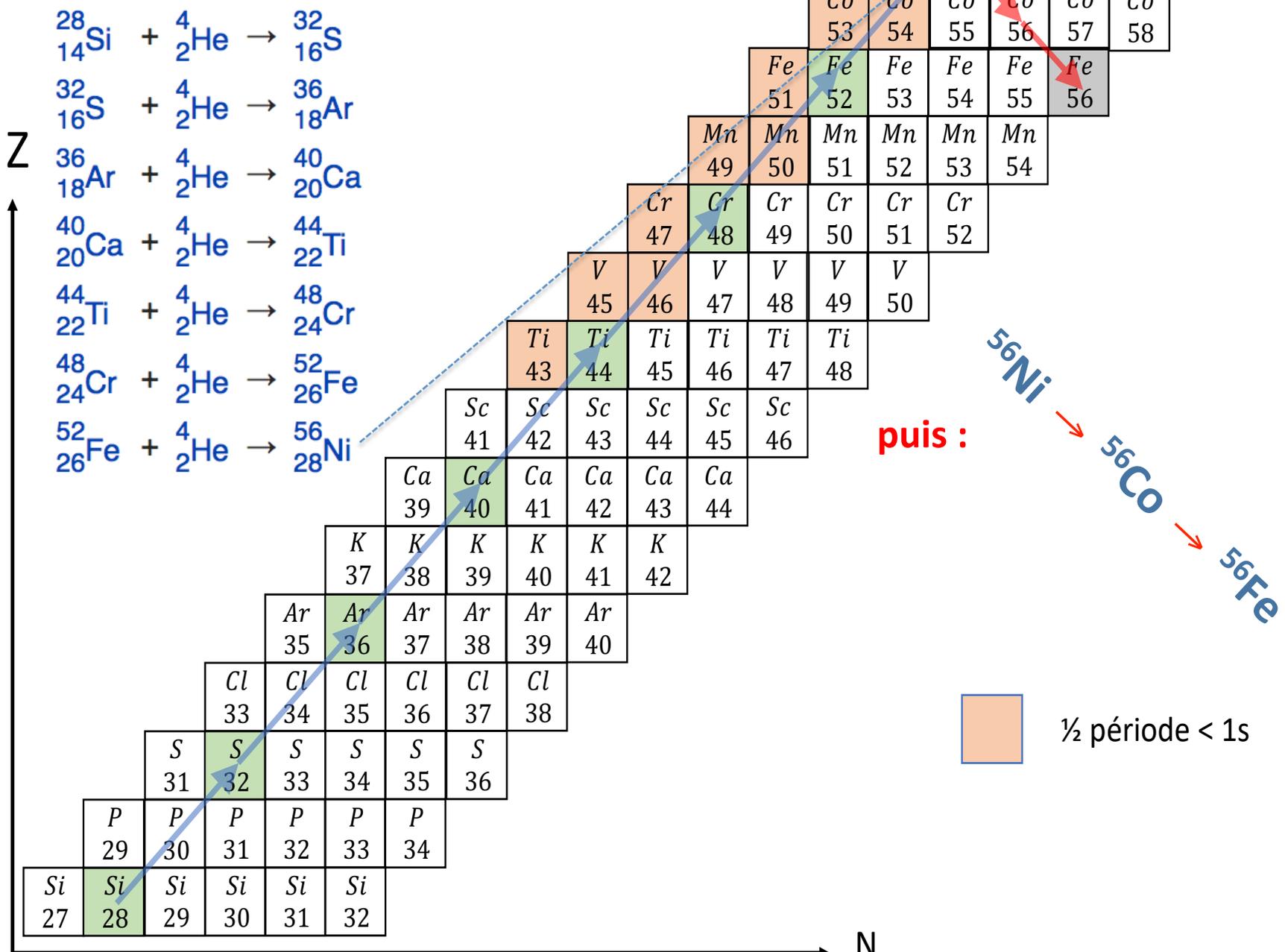
La voie alpha : par addition de noyaux alpha He(2,4) sur ^{28}Si :

Nucléosynthèse du fer dans les supernovae

La voie alpha : par addition de noyaux alpha He(2,4) sur ^{28}Si :

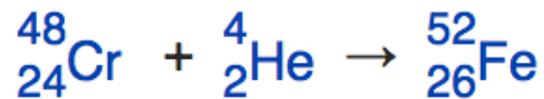
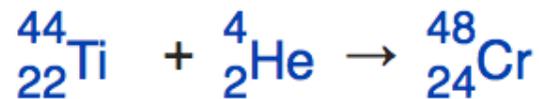
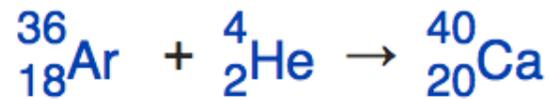
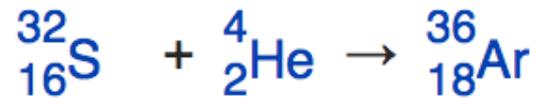


Nucléosynthèse du fer dans les supernovae



Nucléosynthèse du fer dans les supernovae

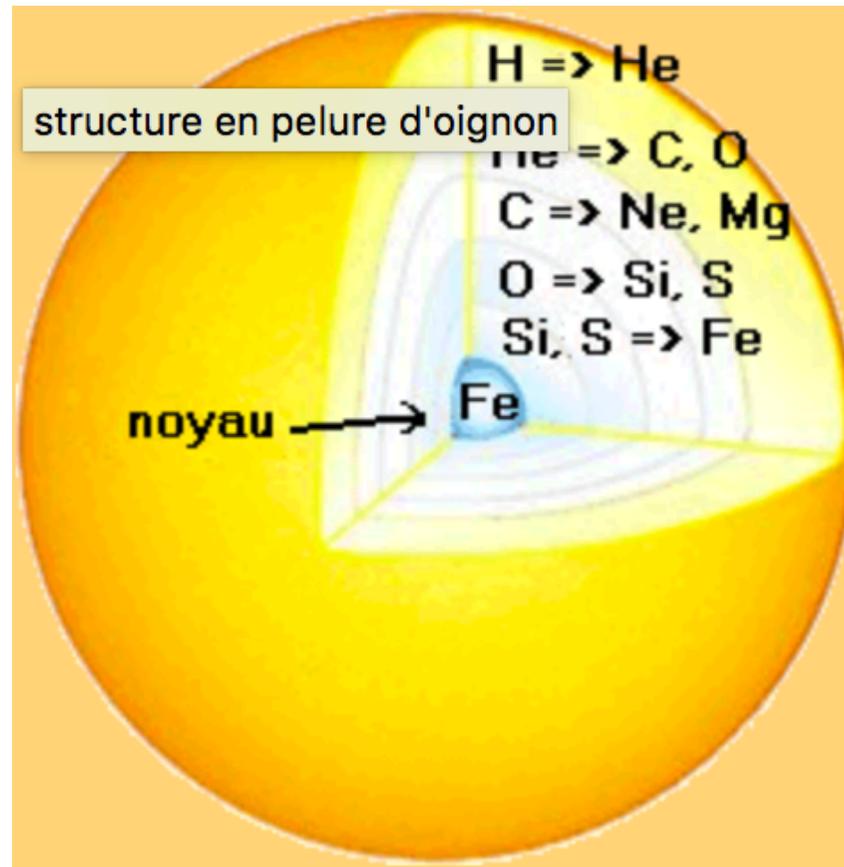
La voie alpha : par addition de noyaux alpha He(2,4) sur ^{28}Si :



Donc : « $^{28}\text{Si} + \alpha + p + n$ » → les éléments du pic du fer

à $T \approx$ un petit 2-3 milliards de Kelvins

Attention : cela n'est qu'un schéma trop simple !!!!



Structure en couches (en pelure d'oignon) d'une étoile massive avant son explosion

MAIS tout va être photo-désintégré lors de l'explosion

PUIS il y aura refabrication, par synthèse de quasi-équilibre

Nucléosynthèse du fer par les supernovae

Il s'agit de nucléosynthèse « explosive », à T très élevée ($\geq 3 \cdot 10^9$ K)

Ce qui s'effondre de la massive étoile se transmute en neutrons

Ce qui explose est « désintégré » par les rayons gamma
puis se reconstruit, en quelques secondes.

Les *processus de capture* sont en compétition avec la *photodésintégration* (par les γ)



On a de multiples chaînes de réactions équilibrés d'après B²FH (1957)

en quasi équilibre d'après Don Clayton (1967)

(chimie nucléaire !)

Traitement par la ***théorie des états de transition de réactions chimiques de dissociation***,
en « quasi-équilibre », et cela dépend beaucoup de T

Nucléosynthèse du fer par les supernovae

Il s'agit de nucléosynthèse « explosive », à T très élevée ($\geq 3 \cdot 10^9$ K)

Ce qui s'effondre de la massive étoile se transmute en neutrons

Ce qui explose est « désintégré » par les rayons gamma
puis se reconstruit, en quelques secondes.

Les *processus de capture* sont en compétition avec la *photodésintégration* (par les γ)



On a de multiples chaînes de réactions équilibrés d'après B²FH (1957)

en quasi équilibre d'après **Don Clayton** (1967)

(chimie nucléaire !)

Traitement par la ***théorie des états de transition de réactions chimiques de dissociation***,
en « quasi-équilibre », et cela dépend beaucoup de T

Donald Clayton astrophysicien américain né en 1935



Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis 1968 (+ 1983)

Handbook of Isotopes in the Cosmos 2003 (Les 31 premiers éléments)

Donald D. Clayton n'est pas **Robert N. Clayton**, cosmochimiste décédé le 30/12/2017

Anomalie isotopique de l'oxygène dans le système solaire primitif

Nucléosynthèse du fer par les supernovae

Il s'agit de nucléosynthèse « explosive », à T très élevée ($\geq 3 \cdot 10^9$ K)

Ce qui s'effondre de la massive étoile se transmute en neutrons

Ce qui explose est « désintégré » par les rayons gamma
puis se reconstruit, en quelques secondes.

Les *processus de capture* sont en compétition avec la *photodésintégration* (par les γ)



On a de multiples chaînes de réactions équilibrés d'après B²FH (1957)

en quasi équilibre d'après Don Clayton (1967)

(chimie nucléaire !)

Traitement par la ***théorie des états de transition de réactions chimiques de dissociation,***
en « quasi-équilibre », et cela dépend beaucoup de T

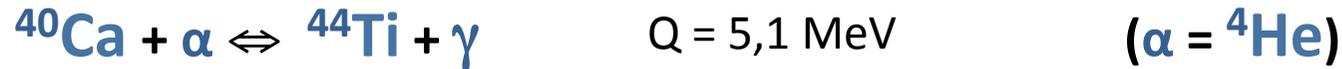
Mais on ne connaît pas les rendements de toutes les réactions possibles

Or, des équations sans valeurs numériques, c'est insatisfaisant (disait le futur Baron)

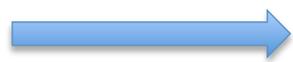
Il existe des gros codes, qui évoluent... (SMOCK, NON-SMOCK)!

Nucléosynthèse : Histoire de Q

Le QCalc du *NNDC* nous donne (le 3 octobre 2018)



$$Q: e^{-Q/kT}$$



c'est le ${}^{56}\text{Ni}$ qui est produit en majorité,



La conclusion est la même, mais elle est mieux justifiée
(plus satisfaisante)

Nucléosynthèse du fer par les supernovae

Résumé en messages ± simples :

Le noyau Ni(28,62) est le noyau le plus stable, *mais* ...

La voie alpha ne fabrique pas le Ni(28,62) mais le Ni(28,56) qui, instable, donne, par décroissance bêta⁺, le Co(27,56) qui donne le Fe(26,56) qui est très stable !

La thermodynamique nucléaire est contrecarrée par la dynamique (alphaïque) de la nucléosynthèse explosive 'supernovae'.

Les réactions nucléaires lors de l'explosion sont nombreuses et complexes et rapides, à T très élevée, avec γ , en quasi equil.

On obtient beaucoup de Fe(26,56) mais aussi bien d'autres éléments...

Conséquences pour les générations suivantes

(générations d'étoiles, petites ou grosses)

**La nucléosynthèse du fer, du nickel etc.
dans ces étoiles en implosion explosive a donné
des poussières qui se sont agrégées en**

La nucléosynthèse du **fer**, du nickel etc.
dans ces étoiles en implosion explosive a donné
des poussières qui se sont agrégées en

*météorites **fer** / nickel* (et d'autres éléments)

: les *Sidérites*

La nucléosynthèse du **fer**, du nickel etc.
dans ces étoiles en implosion explosive a donné
des poussières qui se sont agrégées en

*météorites **fer** / nickel* (et d'autres éléments)

: les *Sidérites*

- + Les *Pallasites* : Fe/Ni + Olivine
- Les *Chondrites* E, C, H, K, ...
- Les *Achondrites*, ...

La nucléosynthèse du **fer**, du nickel etc.
dans ces étoiles en implosion explosive a donné
des poussières qui se sont agrégées en

*météorites **fer** / nickel* (et d'autres éléments)

: les *Sidérites*

+ Les *Pallasites* : Fe/Ni + Olivine

Les *Chondrites* E, C, H, K, ...

Les *Achondrites*, ...

Nota bene : Les *Chondrites* ont peu de métal (<35%) et des *chondres*, petits grains de silicates très petits (< 1 mm), donc quasi hypocondriaques.

Chondres = petits grains, ou cartilages, les *hypocondres* étaient impalpables.

Composition de météorites contenant du fer/nickel et autres



Pallasite

- Fe-Ni
- Olivine $(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$

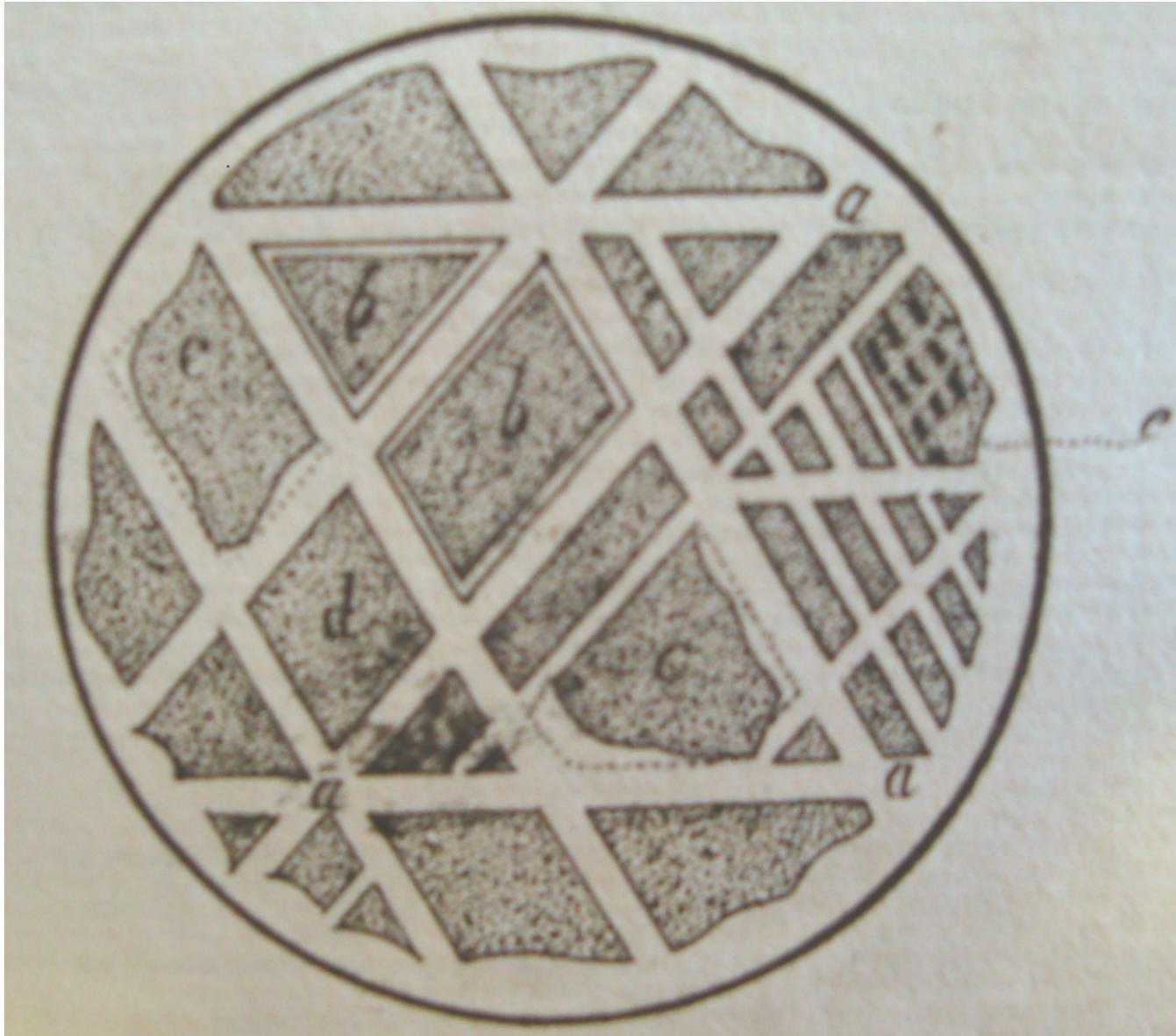
(Fayalite : Fe_2SiO_4 , Forsterite : Mg_2SiO_4)



Sidérite

Fe-Ni

Fe-Ni → Structure dite de Widmanstätten

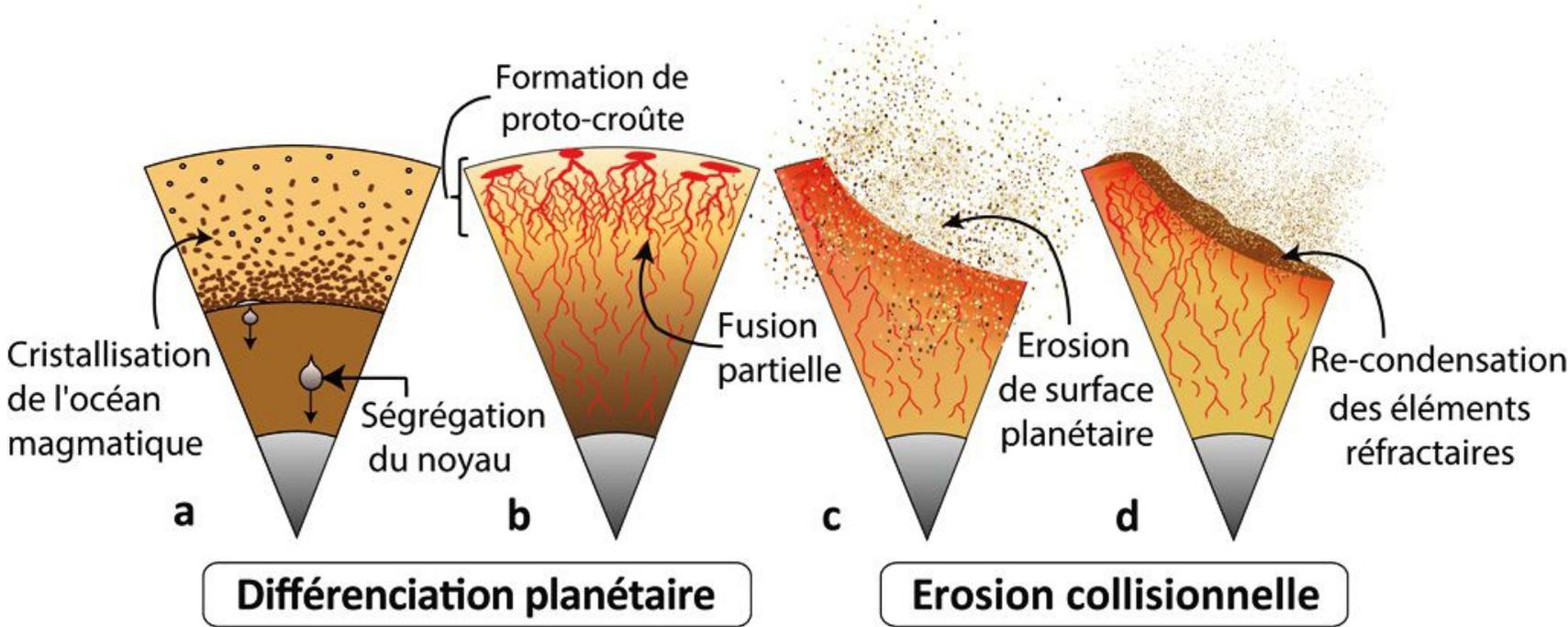


Structure, dite de Widmanstätten grâce à Carl von Schreiber

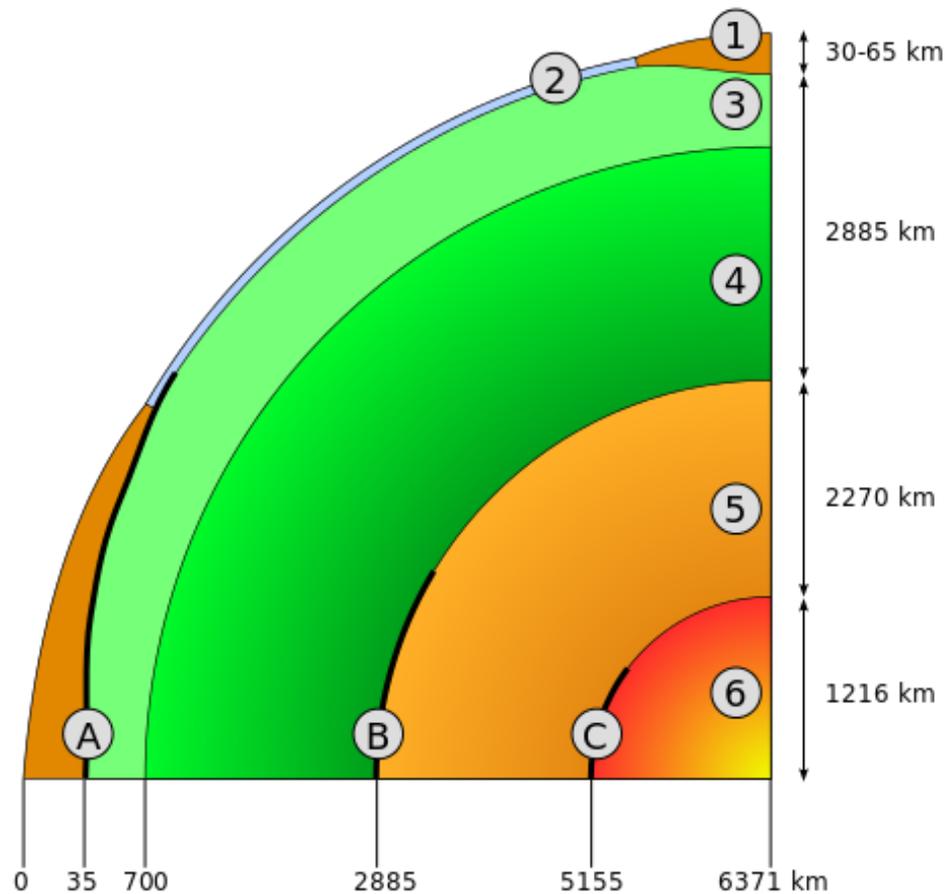
Météorites ferreuses alliages fer-nickel, kamacite (faible teneur Ni), taenite, plessite

Formation de la Terre

Accrétion de météorites primitives + différenciation



La Terre aujourd'hui



Manteau : 84% du volume total

- SiO (45%)
- MgO (38%)
- FeO (8%)
- Al₂O₃ (3%)
- CaO (3%)

≈ Fe₈₀₋₈₅S₅Ni₅₋₁₀, densité 10

≈ Fe₉₅₋₈₀Ni₅₋₂₀, densité 13

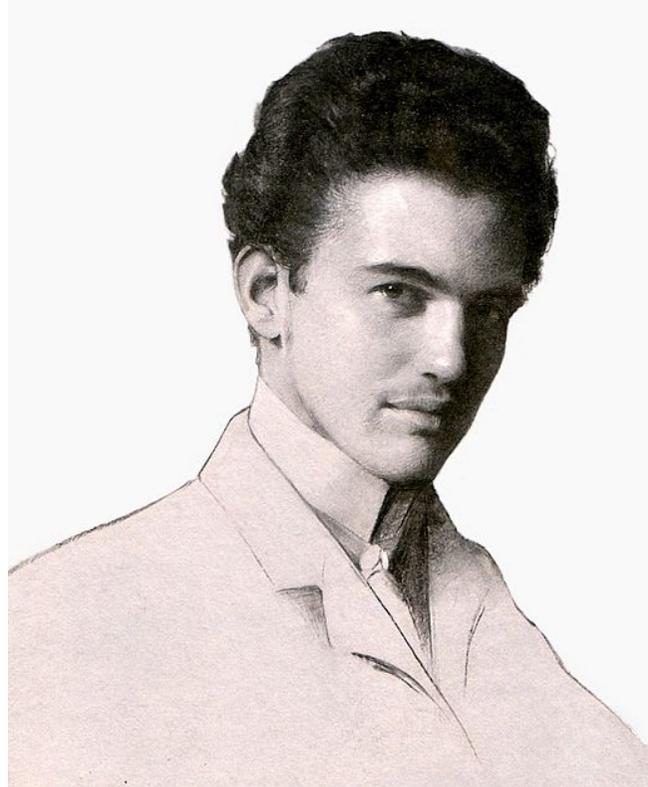
Structure interne de la Terre :

1. Croûte continentale
2. Croûte océanique
3. Manteau supérieur (ou [Asthénosphère](#))
4. Manteau inférieur (ou [Mésosphère](#))
5. [Noyau externe](#)
6. [Noyau interne \(ou graine\)](#)

Le fer au centre de la Terre

Selon Victor Goldschmidt (1888-1947), le fer serait descendu au centre de la Terre comme dans un haut fourneau, après s'être désoxydé et en entraînant avec lui les éléments sidérophiles.

Victor Goldschmidt géochimiste suisse 1888-1947

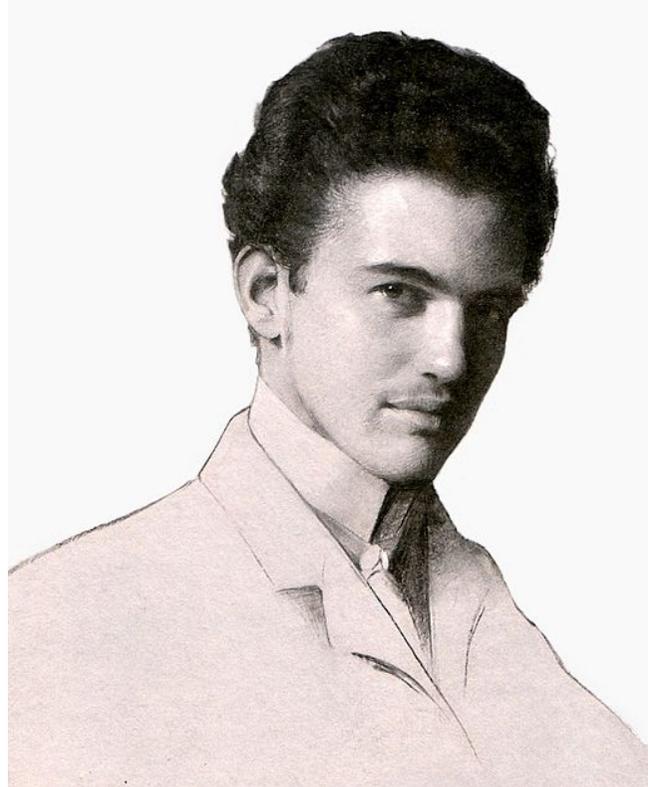


Géochimie et Cristallochimie

La classification de Goldschmidt (sidérophiles, ...)

Victor M. Goldschmidt n'est pas **Victor M. Goldschmidt**

Victor Goldschmidt géochimiste suisse 1888-1947



Géochimie et Cristallochimie

La classification de Goldschmidt (sidérophiles, ...)

Victor M. Goldschmidt n'est pas **Victor M. Goldschmidt** 1853-1933

(Moritz)

(Mordechai) minéralogiste, collectionneur

Il dessina presque 900 formes de calcite !

Le fer au centre de la Terre

Selon Victor Goldschmidt (1888-1947), le fer serait descendu au centre de la Terre comme dans un haut fourneau, après s'être désoxydé et en entraînant avec lui les éléments sidérophiles. (G. Tammann, V. Goldschmidt)

Les silicates restants formèrent un laitier léger surnageant au-dessus du bain fondu : la croûte terrestre (et le manteau).

Le fer au centre de la Terre

Selon Victor Goldschmidt (1888-1947), le fer serait descendu au centre de la Terre comme dans un haut fourneau, après s'être désoxydé et en entraînant avec lui les éléments sidérophiles. (G. Tammann, V. Goldschmidt)

Les silicates restants formèrent un laitier léger surnageant au-dessus du bain fondu : la croûte terrestre. (il y a aussi le manteau)

En "tombant", le fer a gagné de l'énergie potentielle gravitationnelle, d'où un gain d'énergie cinétique thermique pour la Terre.

Aujourd'hui, en cristallisant, le fer gagne de l'énergie potentielle, d'où un gain d'énergie thermique pour la Terre.

Si des mots ont des sens ?

Sidérite, sidérolithe,

Sidérophiles,

Sidérurgie,

Fer

Étymologies ?

Étymologies sidérantes à tout faire du fer, ironiques ou glaçantes

Étymologies sidérantes à tout faire du fer, ironiques ou glaçantes

Sider dans sidérurgie, sidérite, sidérophile, ... : *Sideros* = fer en grec

Étymologies sidérantes à tout faire du fer, ironiques ou glaçantes

Sider dans sidérurgie, sidérite, sidérophile, ... : *Sideros* = fer en grec

Origine exo-grecque, inconnue.

Sans rapport avec le latin *sidus, sideris* : étoile (\neq *astre* en grec)

Étymologies sidérantes à tout faire du fer, ironiques ou glaçantes

Sider dans sidérurgie, sidérite, sidérophile, ... : *Sideros* = fer en grec

Origine exo-grecque, inconnue.

Sans rapport avec le latin *sidus, sideris* : étoile (\neq *astre* en grec)

En égyptien (de l'Égypte ancienne), *baa n pet* : métal, fer, du ciel. Aucune survivance.

Étymologies sidérantes à tout faire du fer, ironiques ou glaçantes

Sider dans sidérurgie, sidérite, sidérophile, ... : *Sideros* = fer en grec

Origine exo-grecque, inconnue.

Sans rapport avec le latin *sidus*, *sideris* : étoile (\neq *astre* en grec)

En égyptien (de l'Égypte ancienne), *baa n pet* : métal, fer, du ciel. Aucune survivance.

Fer : du latin *ferrum*, d'origine inconnue ! (ou peut-être de *herrum* de Harès = Arès ??)

(sens associé : métal dur, métal-arme)

Étymologies sidérantes à tout faire du fer, ironiques ou glaçantes

Sider dans sidérurgie, sidérite, sidérophile, ... : *Sideros* = fer en grec

Origine exo-grecque, inconnue.

Sans rapport avec le latin *sidus, sideris* : étoile (\neq *astre* en grec)

En égyptien (de l'Égypte ancienne), *baa n pet* : métal, fer, du ciel. Aucune survivance.

Fer : du latin *ferrum*, d'origine inconnue ! (ou peut-être de *herrum* de Harès = Arès ??)

(sens associé : métal dur, métal-arme)

Iron : origine inconnue ! (métal dur, métal-arme) Encore une ironie.

Étymologies sidérantes à tout faire du fer, ironiques ou glaçantes

Sider dans sidérurgie, sidérite, sidérophile, ... : *Sideros* = fer en grec

Origine exo-grecque, inconnue.

Sans rapport avec le latin *sidus, sideris* : étoile (\neq *astre* en grec)

En égyptien (de l'Égypte ancienne), *baa n pet* : métal, fer, du ciel. Aucune survivance.

Fer : du latin *ferrum*, d'origine inconnue ! (ou peut-être de *herrum* de Harès = Arès ??)

(sens associé : métal dur, métal-arme)

Iron : origine inconnue ! (métal dur, métal-arme) Encore une ironie.

Eisen : origine inconnue. Aucun rapport avec la glace (*Eis, Eisbahn* = patinoire).

Étymologies sidérantes à tout faire du fer, ironiques ou glaçantes

Sider dans sidérurgie, sidérite, sidérophile, ... : *Sideros* = fer en grec

Origine exo-grecque, inconnue.

Sans rapport avec le latin *sidus, sideris* : étoile (\neq *astre* en grec)

En égyptien (de l'Égypte ancienne), *baa n pet* : métal, fer, du ciel. Aucune survivance.

Fer : du latin *ferrum*, d'origine inconnue ! (ou peut-être de *herrum* de Harès = Arès ??)

(sens associé : métal dur, métal-arme)

Iron : origine inconnue ! (métal dur, métal-arme) Encore une ironie.

Eisen : origine inconnue. Aucun rapport avec la glace (*Eis, Eisbahn* = patinoire).

L'homme de fer : Iron man ; Staline : l'homme d'acier (*Stahl, steel*)

(Joseph Djougachvili, dit Staline : l'homme d'acier)

Le ciel, Ouranos, et la nature de la vraie faux de Cronos

Une faucille en silex ou en fer ?

Une faucille en silex ou en fer ?

Hésiode, Théogonie, 161 :

« Intantamment elle [Gaïa] créa le genre χ et fabriqua une faucille »

χ : **Poliou adamantos** [πολιου αδαμαντος]

: **“Le gris adamantin” (gris ou luisant) : ?**

Une faucille en silex ou en fer ?

Hésiode, Théogonie, 161 :

« Intantamment elle [Gaïa] créa le genre χ et fabriqua une faucille »

χ : **Poliou adamantos** [πολιου αδαμαντος]

: **“Le gris adamantin” (gris ou luisant)** : ?

= du silex? ou plutôt du *fer*?

Une faucille en silex ou en fer ?

Hésiode, Théogonie, 161 :

« Intantamment elle [Gaïa] créa le genre χ et fabriqua une faucille »

χ : **Poliou adamantos** [πολιου αδαμαντος]

: **“Le gris adamantin” (gris ou luisant)** : ?

= du silex? ou plutôt du *fer*?

Impossible de trancher...

Mais Aphrodite en résulta, sur l'île au *cuivre* (Chypre)

La faucille de Cronos n'a jamais été retrouvée
Aucun peintre ne représenta le geste

**La faucille de Cronos n'a jamais été retrouvée
Aucun peintre ne représenta le geste
Mais la Vénus qui en résulta, oui :**



La faucille de Cronos n'a jamais été retrouvée
Aucun peintre ne représenta le geste
Mais la Vénus qui en résulta, oui :



Vénus, associée au cuivre, retrouvera le **fer**,
élément associé à Mars, une de ses conquêtes.

À l'époque d'Homère, le **fer**, i.e. **les objets en fer**, n'étaient pas assez résistants aux chocs violents pour servir d'armes (épés).

Le **fer** était utilisé pour les animaux et l'agriculture :

Achille déclare : Celui qui [gagnera] ce disque [de fer] aura du fer pour cinq années [pour] ses bergers et ses laboureurs [même si il a des champs fertiles qui s'étendent au loin].

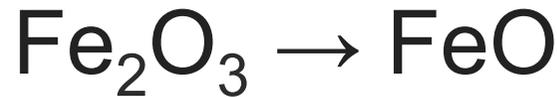
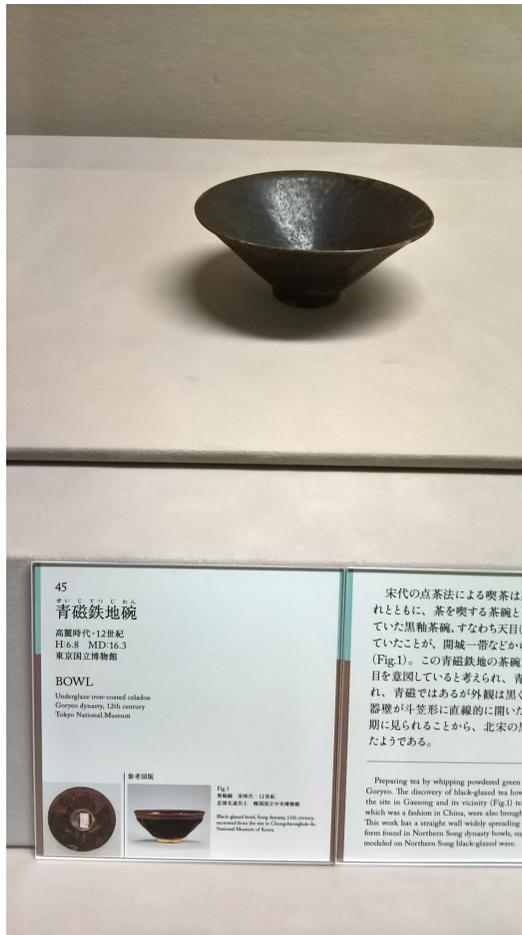
(Dans *l'Iliade*, lors des cérémonies organisées pour les funérailles de Patrocle)

Utilisé pour socs de charrue, aiguillons, couteaux, ...

Les Hittites utilisèrent le **fer**, pour fabriquer des chars.

Le **Fer** utilisé comme élément décoratif → le **céladon**, basé sur la réduction oxydante du Fe. Le vert s'obtient à haute température dans une atmosphère appauvrie en oxygène.

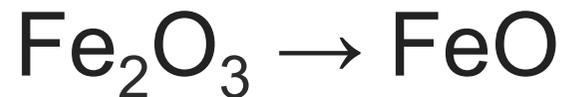
Poterie coréenne de la période Goryeo :
(11-13ème siècle)



Le **Fer** dans les pigments :

→ le **céladon**, basé sur la réduction oxydante du Fe. Le vert s'obtient à haute température dans une atmosphère appauvrie en oxygène.

→ les **ocres**, à partir de la goethite (rouille), couleurs selon la granulométrie de la poudre, l'hydrométrie, la présence de manganèse, ... Ocres jaunes, rouges, terres brunes (de Sienne, d'Ombre)



Le fer sur Terre

Le **fer** : le *premier* élément en masse pour la Terre !

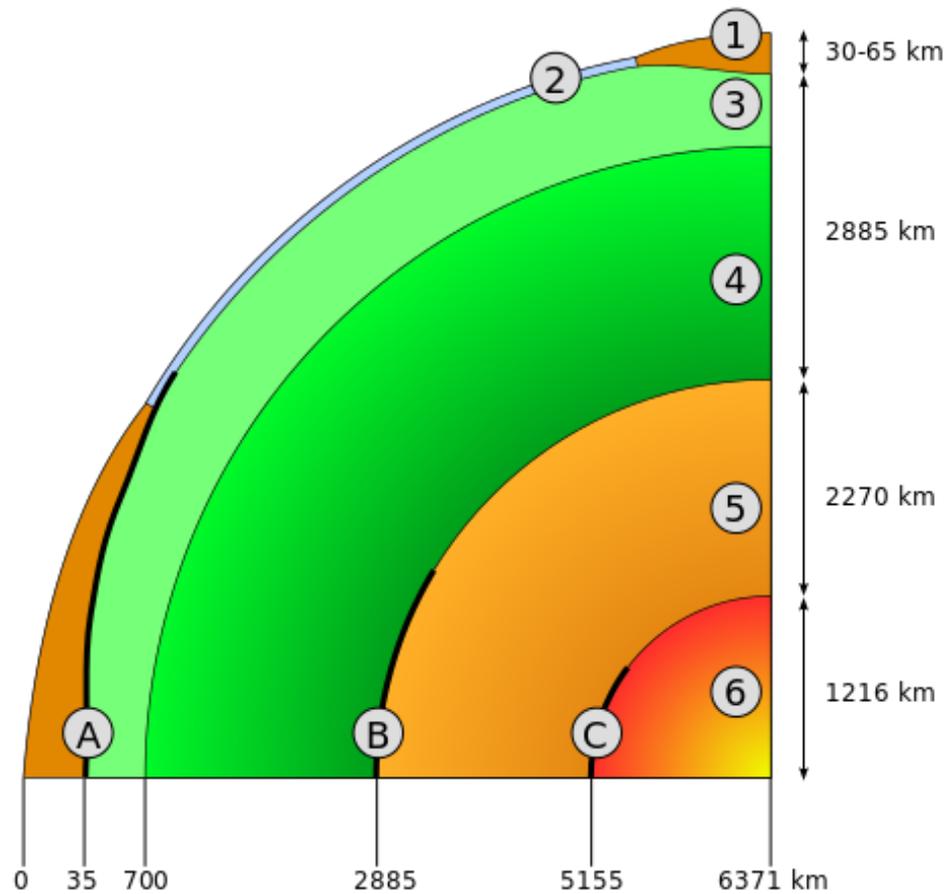
(sans doute toujours *bien après la sombre matière noire invisible...*)

En masse : **Fe**, O, Si, Mg, S, Ni, Ca, Al, **(32.1%, Fe56)**

Il est le *neuvième* dans la croûte, le *quatrième* dans le manteau,
mais le premier, de très loin, dans le cœur...

Le fer au centre de la Terre

La Terre aujourd'hui



Cœur externe liquide

Cœur interne solide

Le fer au centre de la Terre

Du fer, avec du nickel (5%, ou de 5 à 15-20%)
+ Si, C, O, S, ...

Un cœur interne solide en fer hexagonal compact ?
en Fe-Ni c.c. ?

de rayon 1220 km, polycristallin, asymétrique

Cristallisation : d'Ouest en Est → des cristaux de 10 km

Un cœur externe liquide Fe, Ni, Si, O, C, S, ...

$1220 \text{ km} < R < 3400 \text{ km}$ ($< 6370 \text{ km}$)

En mouvement → champ magnétique terrestre (Van Allen)

Effet dynamo. Vénus et Mars et la Lune : non, Mercure : oui.

En $R=1220 \text{ km}$, $P \approx 330 \text{ GPa}$ (3 M.Atm), $T \approx 6300 \pm 500 \text{ K}$ (croit-on !)

Le fer sur Terre

Le **fer** : le *premier* élément en masse pour la Terre !

(sans doute toujours *bien après la sombre matière noire invisible...*)

En masse : **Fe**, O, Si, Mg, S, Ni, Ca, Al, **(32.1%, Fe56)**

Il est le *neuvième* dans la croûte, le *quatrième* dans le manteau,
mais le premier, de très loin, dans le cœur...

Il est le *douzième* dans votre corps.

Expérience facile à faire (fer) :

Le fer sur Terre

Le **fer** : le *premier* élément en masse pour la Terre !

(sans doute toujours *bien après la sombre matière noire invisible...*)

En masse : **Fe**, O, Si, Mg, S, Ni, Ca, Al, **(32.1%, Fe56)**

Il est le *neuvième* dans la croûte, le *quatrième* dans le manteau,
mais le *premier*, de très loin, dans le cœur...

Il est le *douzième* dans votre corps.

Expérience facile à faire (fer) :

Coupez-vous le doigt, et admirez :

Le fer sur Terre

Le **fer** : le *premier* élément en masse pour la Terre !

(sans doute toujours *bien après la sombre matière noire invisible...*)

En masse : **Fe**, O, Si, Mg, S, Ni, Ca, Al, (32.1%, Fe56)

Il est le *neuvième* dans la croûte, le *quatrième* dans le manteau, *mais le premier*, de très loin, dans le cœur...

Il est le *douzième* dans votre corps.

Expérience facile à faire (fer) :

Coupez-vous le doigt, et admirez :

C'est **rouge**, grâce au fer dans l'hémoglobine, ionisé par O

(L'hématite, Fe_2O_3 , est **rouge**, comme le sang, *haima* en grec)

Le fer sur Terre

Le **fer** : le *premier* élément en masse pour la Terre !

(sans doute toujours *bien après la sombre matière noire invisible...*)

En masse : **Fe**, O, Si, Mg, S, Ni, Ca, Al, **(32.1%, Fe56)**

Il est le *neuvième* dans la croûte, le *quatrième* dans le manteau,
mais le premier, de très loin, dans le cœur...

Il est le *douzième* dans votre corps.

Expérience facile à faire (fer) :

Coupez-vous le doigt, et admirez :

C'est **rouge**, grâce au fer dans l'hémoglobine, ionisé par O

(L'hématite, Fe_2O_3 , est **rouge**, comme le sang, *haima* en grec)

Si vous êtes de sang **bleu**, c'est que vous êtes ...

Le fer sur Terre

Le **fer** : le *premier* élément en masse pour la Terre !

(sans doute toujours *bien après la sombre matière noire invisible...*)

En masse : **Fe**, O, Si, Mg, S, Ni, Ca, Al, **(32.1%, Fe56)**

Il est le *neuvième* dans la croûte, le *quatrième* dans le manteau,
mais le premier, de très loin, dans le cœur...

Il est le *douzième* dans votre corps.

Expérience facile à faire (fer) :

Coupez-vous le doigt, et admirez :

C'est **rouge**, grâce au fer dans l'hémoglobine, ionisé par O

(L'hématite, Fe_2O_3 , est **rouge**, comme le sang, *haima* en grec)

Si vous êtes de sang **bleu**, c'est que vous êtes ... un mollusque ou un arthropode.

(E.g. la limule. Hémocyanine : avec ion cuivre)

Le fer dans votre sang

Comment augmenter sa concentration de *fer* dans le sang ?

Les épinards ?

Les lentilles ?

L'alcool ?

L'eau ?

Le fer dans votre sang

Comment augmenter sa concentration de *fer* dans le sang ?

Les épinards ? Non

Les lentilles ?

L'alcool ?

L'eau ?

Le fer dans votre sang

Comment augmenter sa concentration de *fer* dans le sang ?

Les épinards ? Non

Les lentilles ? Oui

L'alcool ?

L'eau ?

Le fer dans votre sang

Comment augmenter sa concentration de *fer* dans le sang ?

Les épinards ? Non

Les lentilles ? Oui

L'alcool ? Oui

L'eau ?

Le fer dans votre sang

Comment augmenter sa concentration de *fer* dans le sang ?

Les épinards ?	Non
Les lentilles ?	Oui
L'alcool ?	Oui
L'eau ?	Non sauf...

Le fer dans votre sang

Comment augmenter sa concentration de *fer* dans le sang ?

Les épinards ? Non

Les lentilles ? Oui

L'alcool ? Oui

L'eau ? Oui si ferrugineuse...



Sources de Spa
en Wallonie

Le « ferruginous duck »



Merci de votre attention

Et si ni lentilles ni eau ferrugineuse au goûter, alors ...

mais avec modération, pour le « fer » dans la bonne humeur !

Olivier et Thierry

- Donald Clayton 1968 Principles of stellar evolution and nucleosynthesis
2003 Handbook of Isotopes (from H to Ga)
- David Arnett 1996 Supernovae and Nucleosynthesis
- Bernard Pagel 2009 Nucleosynthesis and chemical evolution of galaxies
- James Lequeux 2011 Naissance, évolution et mort des étoiles
& Michèle Leduc
- Giora Shaviv 2012 The Synthesis of the Elements
- Pauline van Lynden & Vanessa Everts **Living Iron** 2018 (déc.)

Remerciements : Les bibliothèques de nos établissements (X, CEA)
et leurs services de prêt interbibliothèques