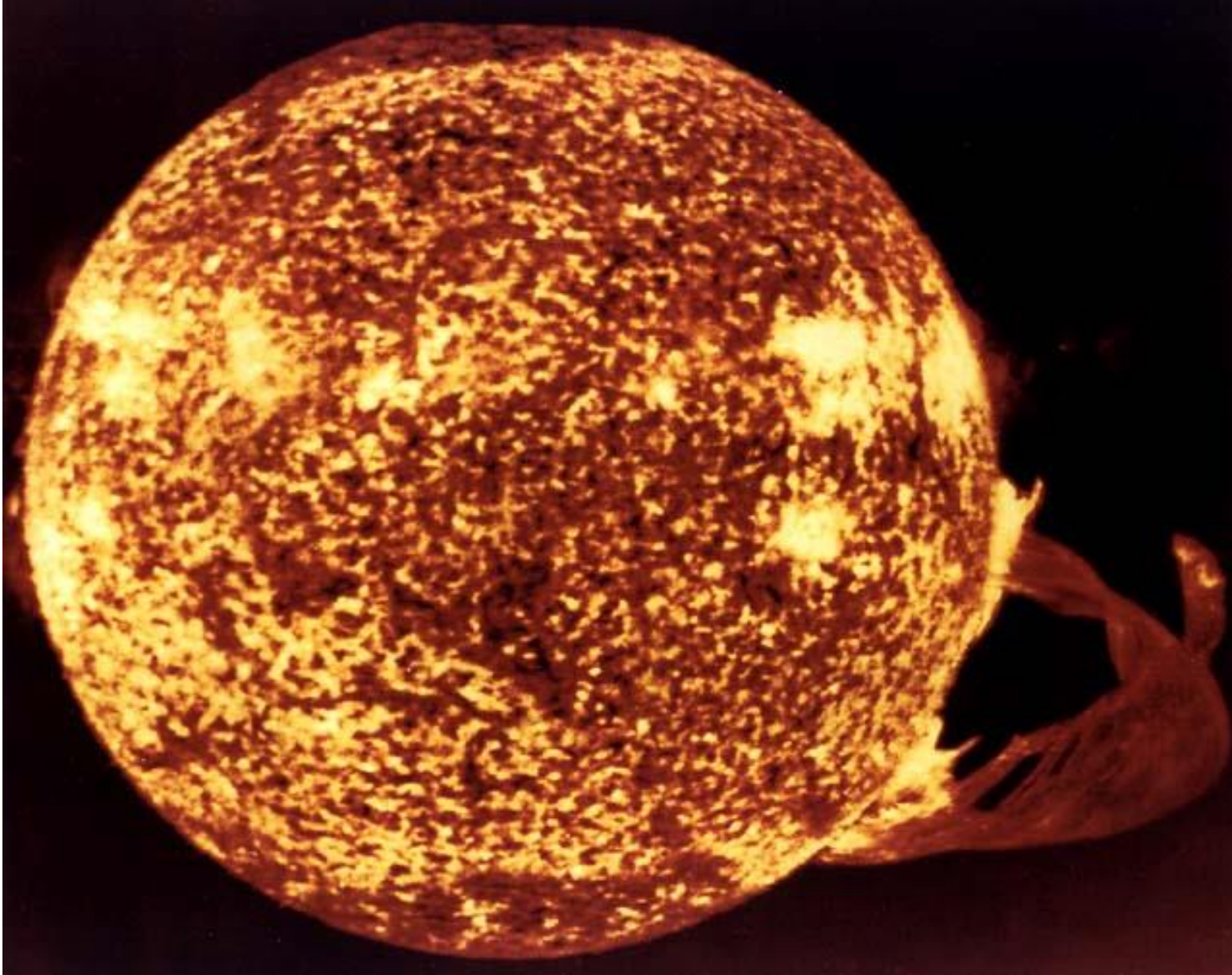


Le Soleil et les étoiles

Le Soleil



Etoile la plus proche de la Terre

Le Soleil



Diamètre : 1.390.000 km
108 x le diamètre de la Terre

Le Soleil

Densité
1,41

~ la densité de Jupiter

Densité proche
de celle de l'eau

Le Soleil

Volume

1.260.000 x le volume
de la Terre

Masse

332.830 x la masse de la Terre

Le Soleil

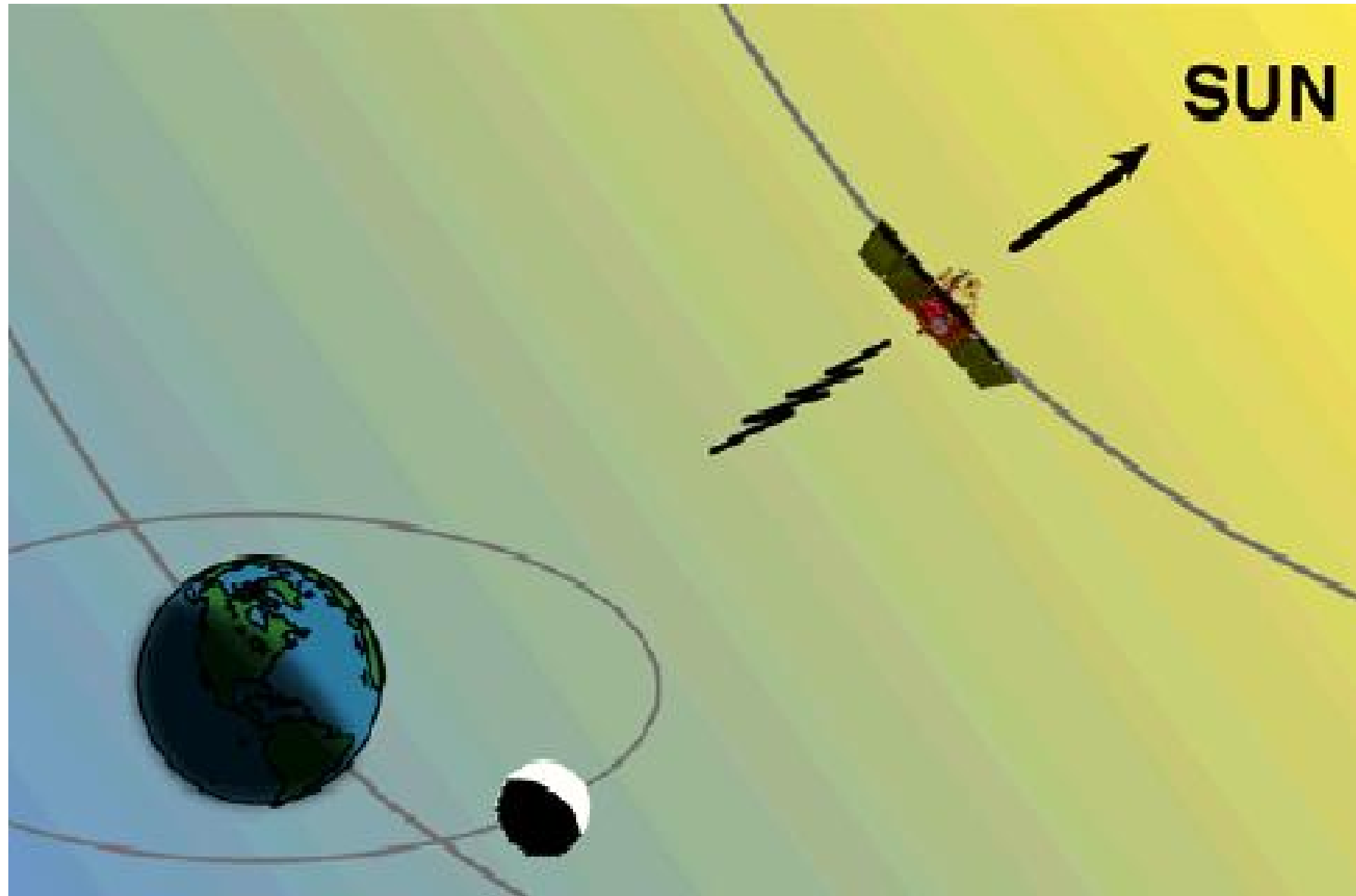
Si la Terre avait le poids d'un petit
poids
~ 3 grammes

Le Soleil pèserait le poids d'une
voiture
~ 1 tonne

Sonde SOHO

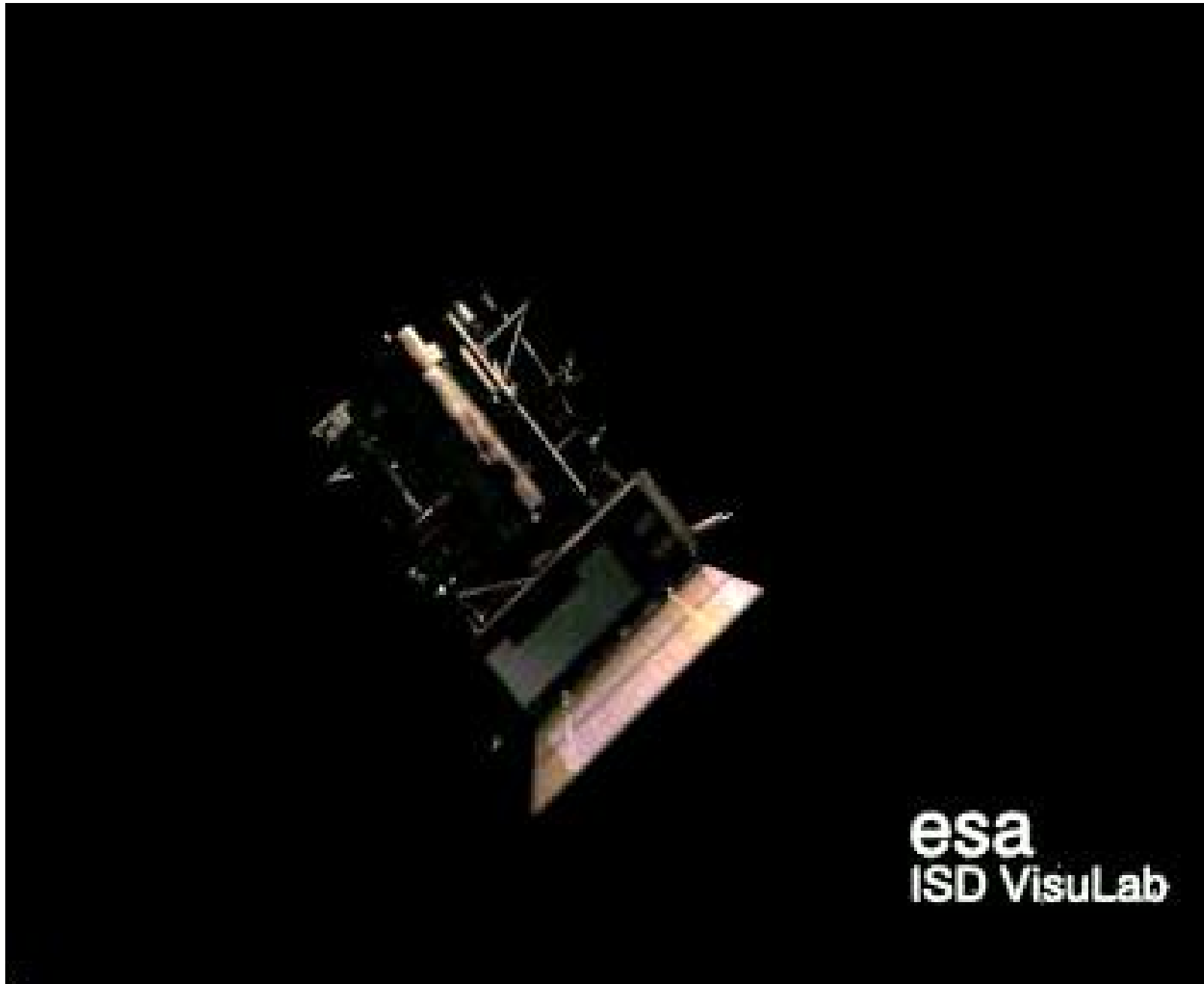


Sonde SOHO



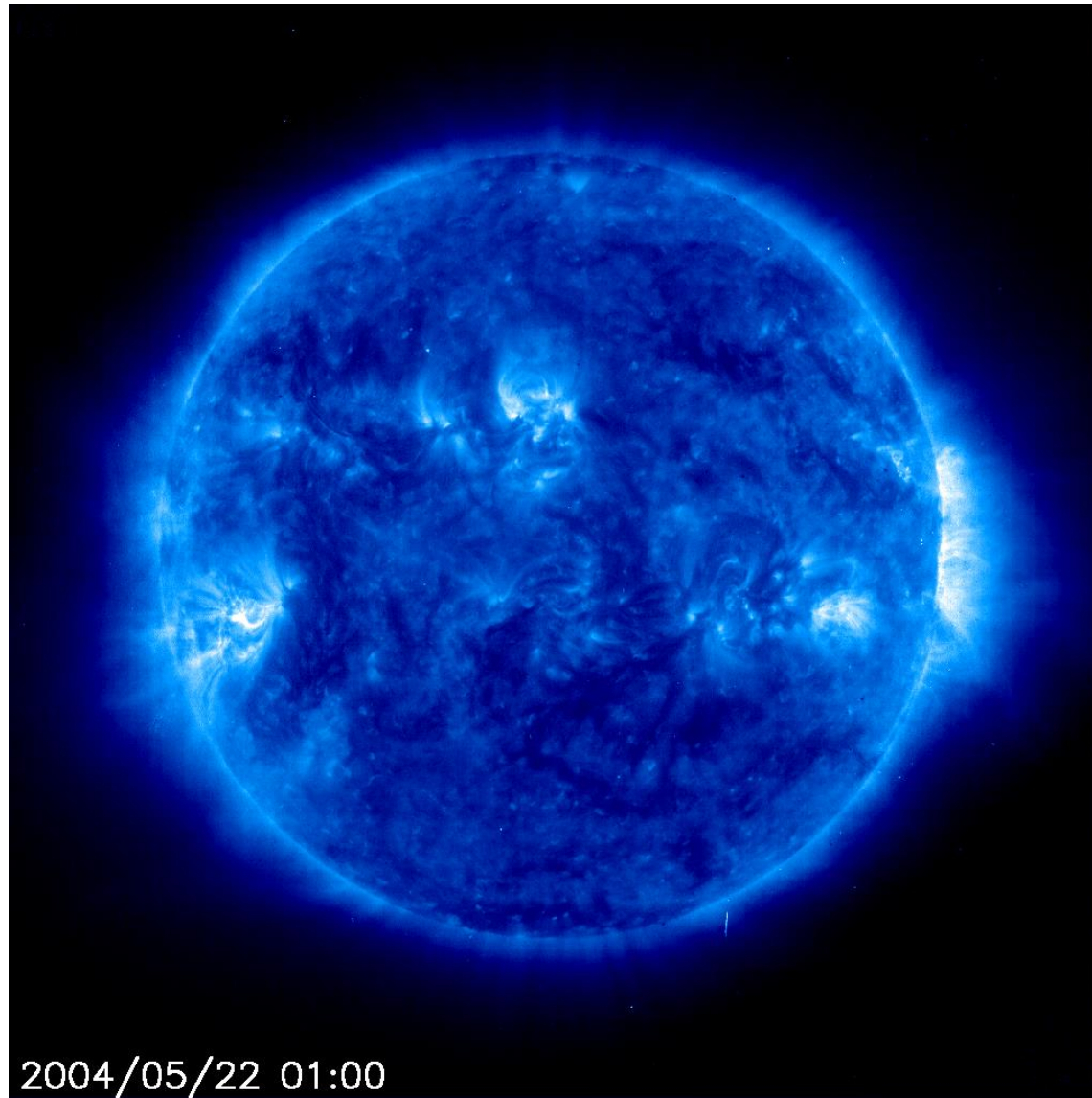
Placée au point de Lagrange L1

Sonde SOHO



Sonde SOHO

Sonde SOHO



Images en temps réel du Soleil
sohowww.nascom.nasa.gov

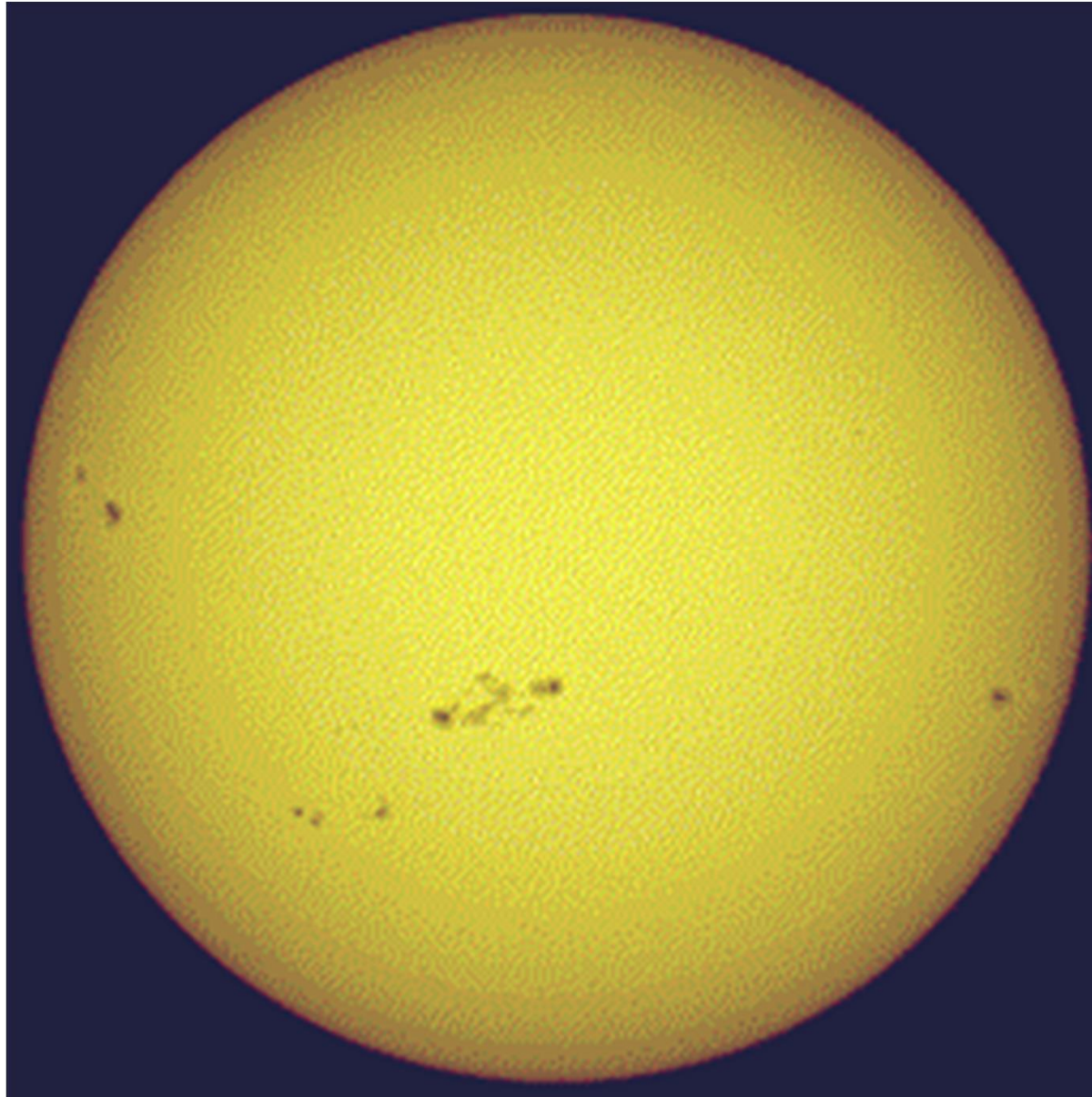
Le Soleil

Période de rotation sidérale

25 jours à l'équateur

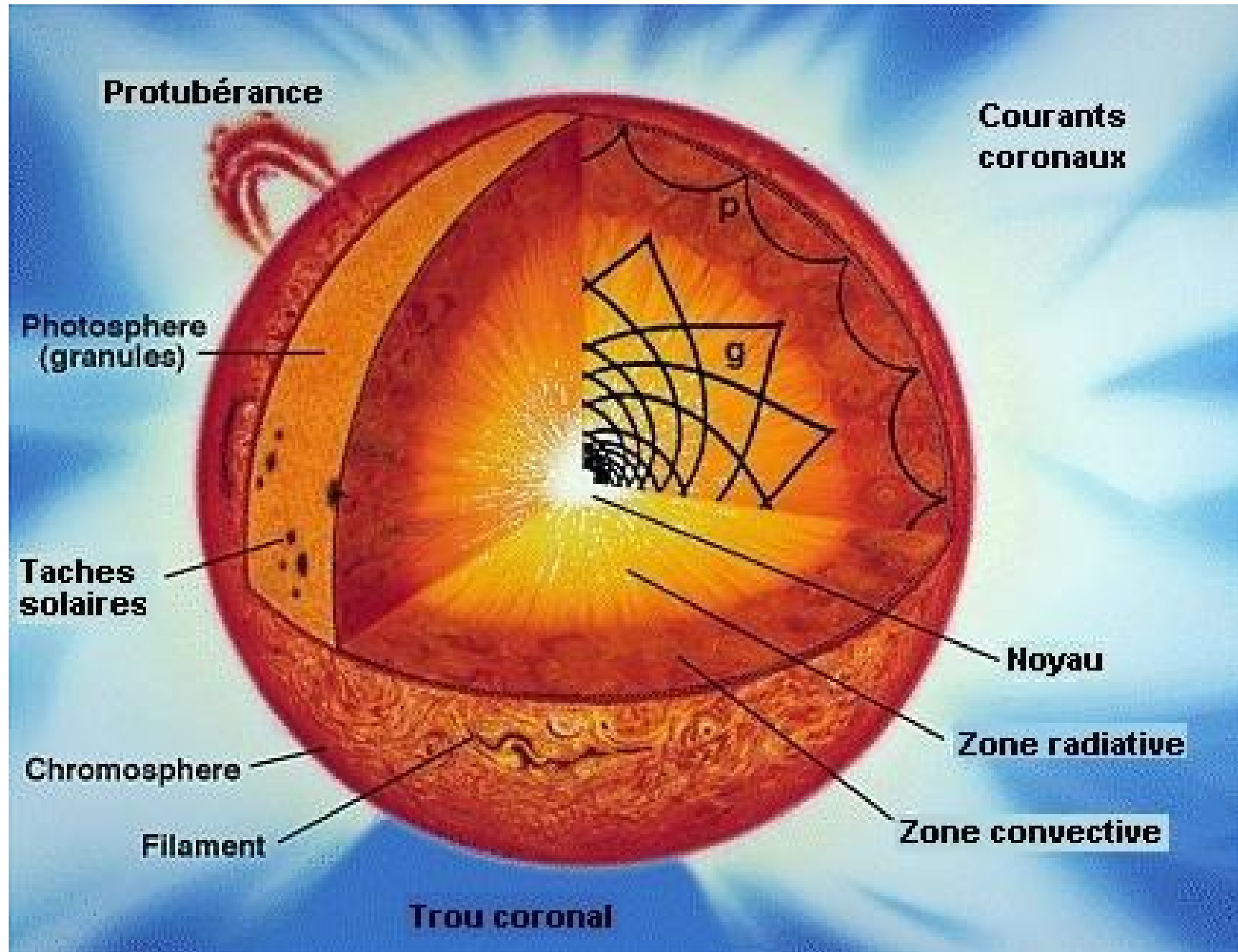
36 jours près des pôles

Le Soleil

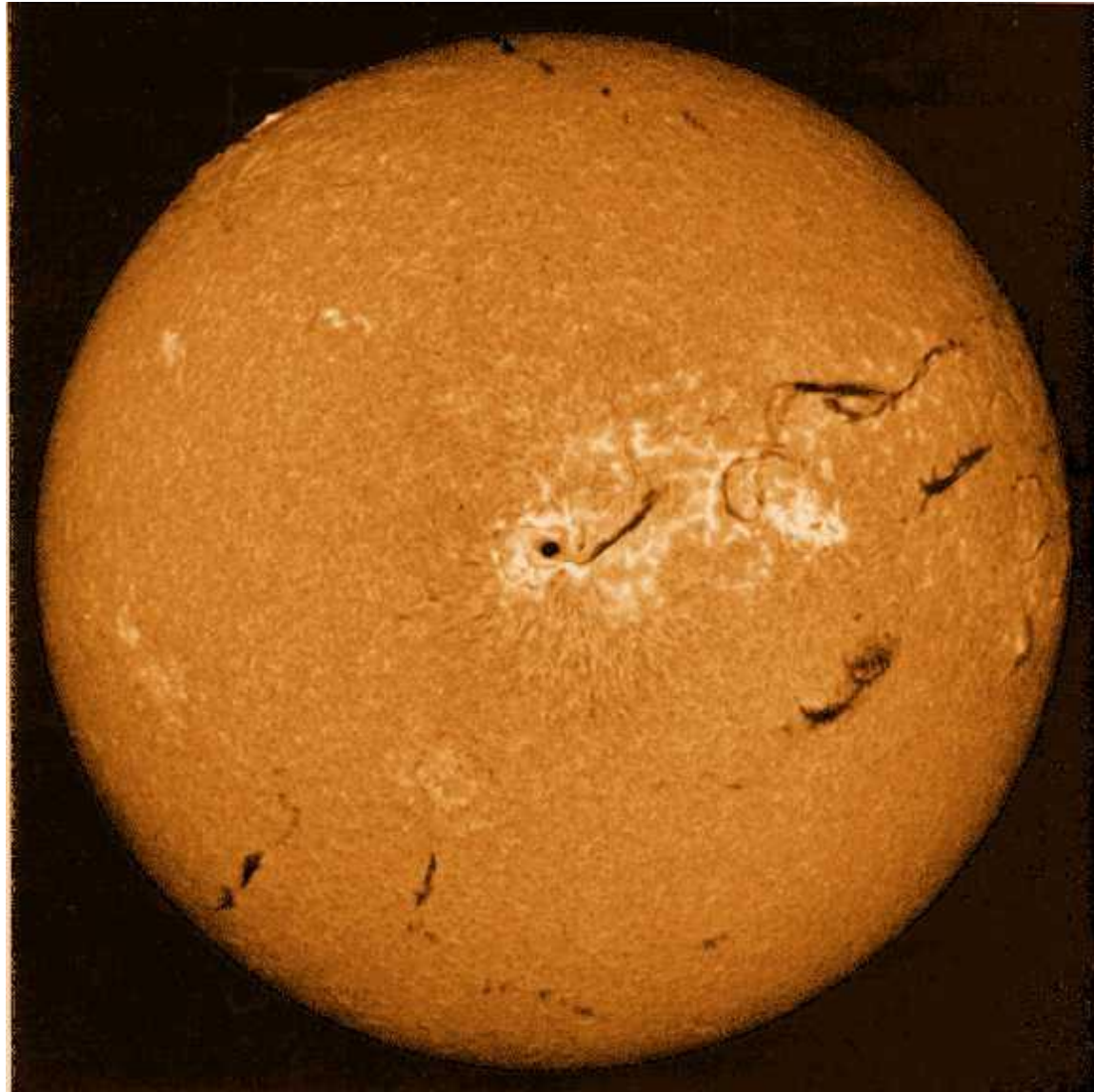


Rotation du Soleil

Le Soleil

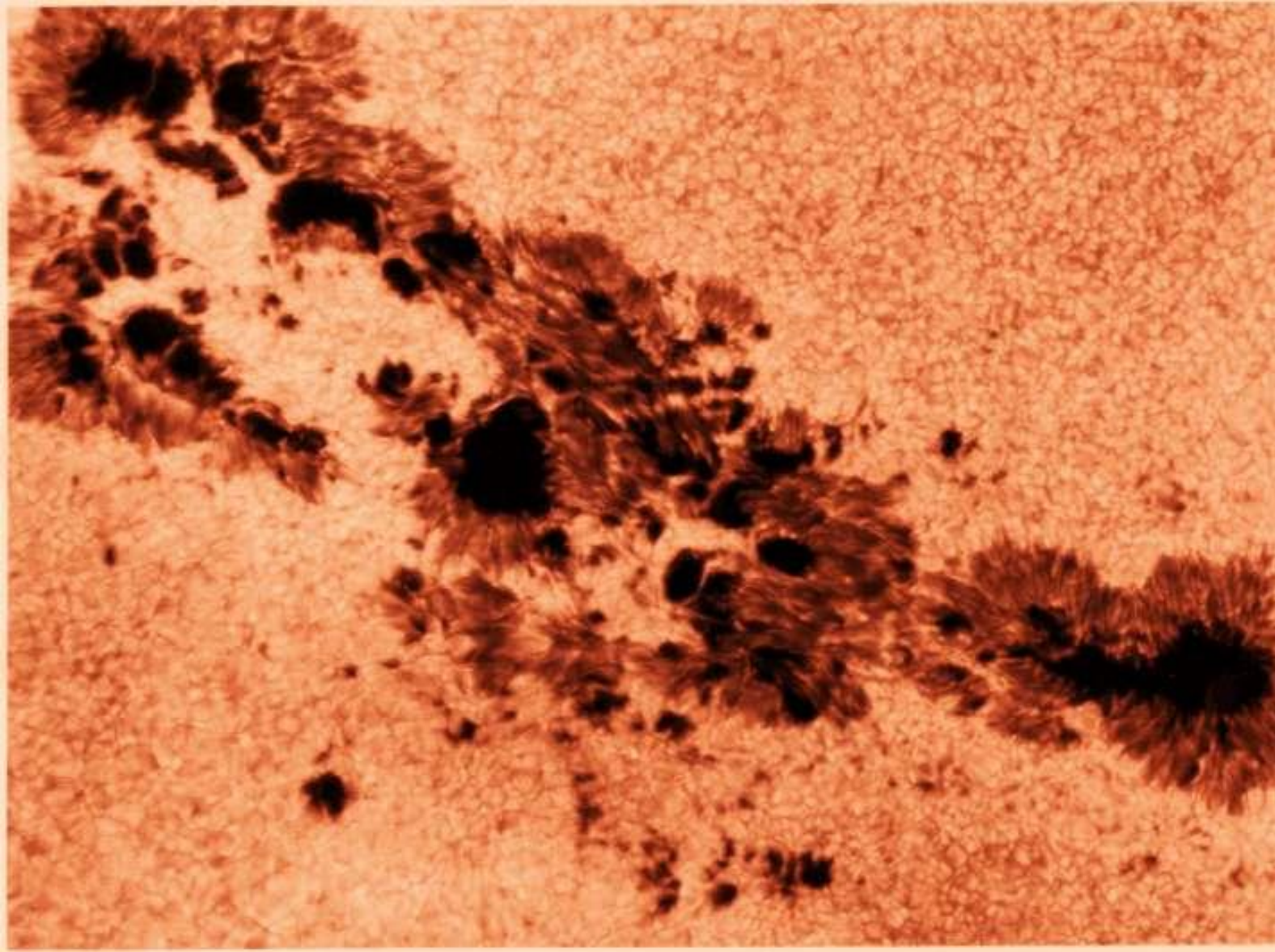


Le Soleil



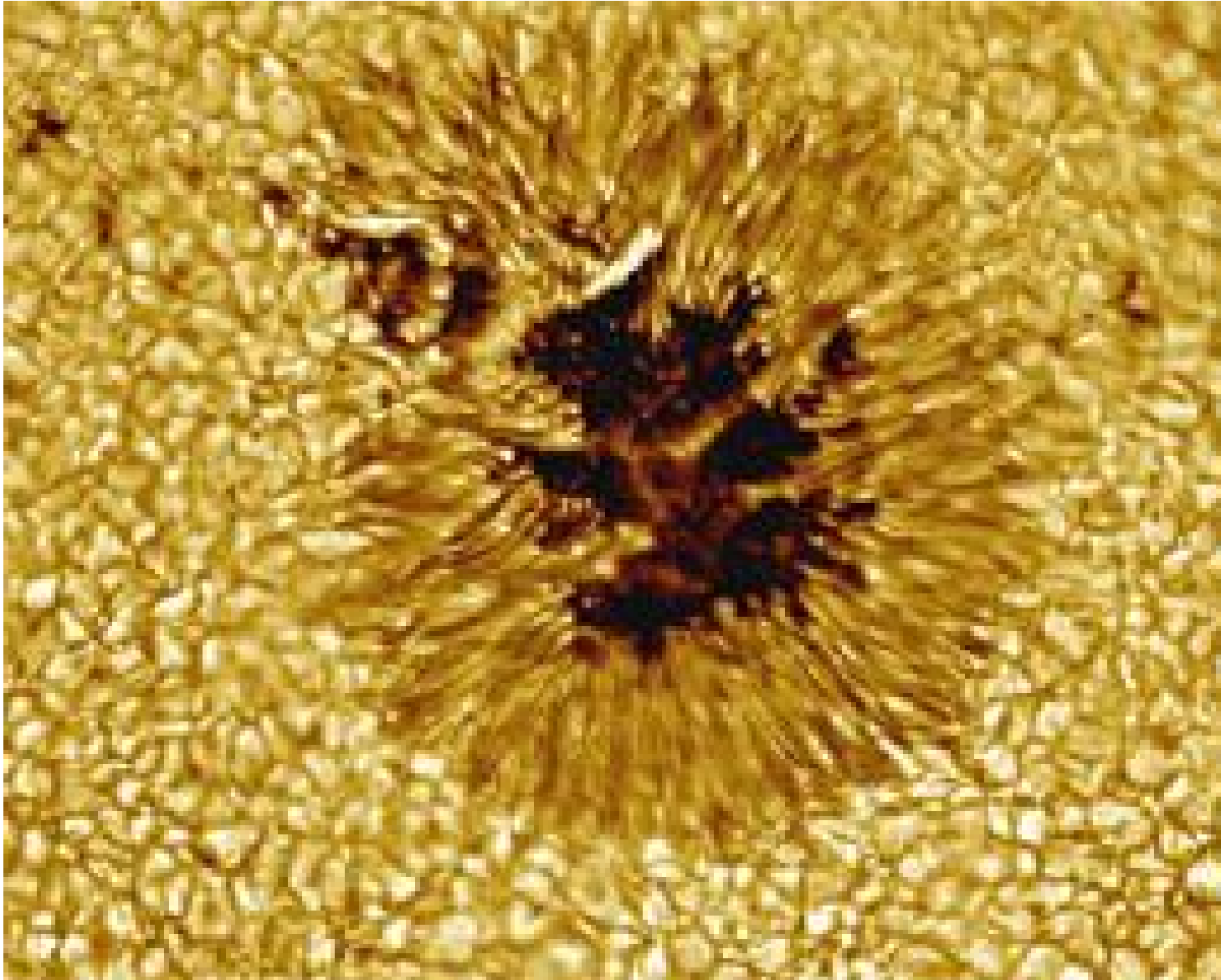
Photosphère du Soleil

Le Soleil



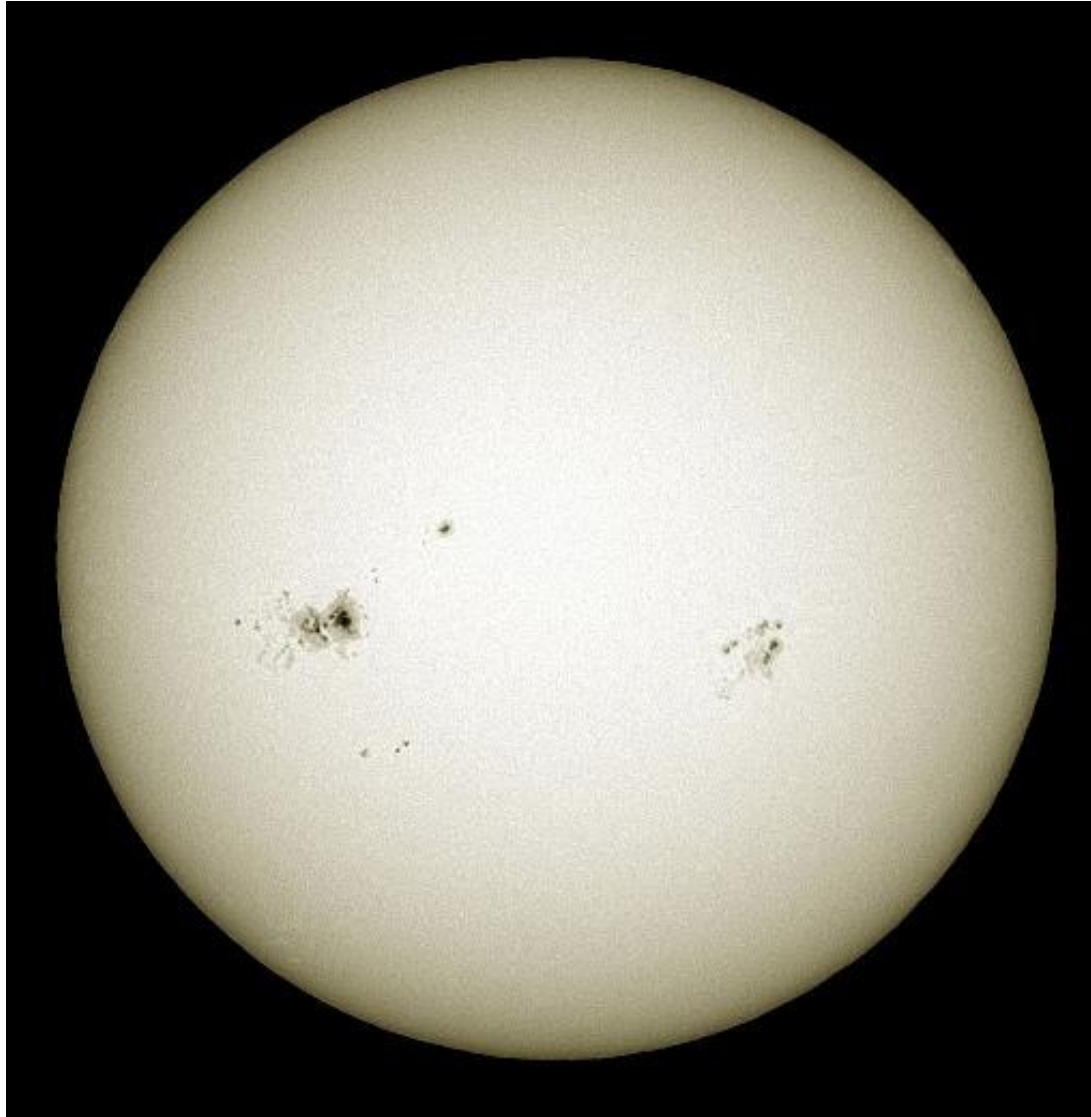
Taches solaires

Le Soleil



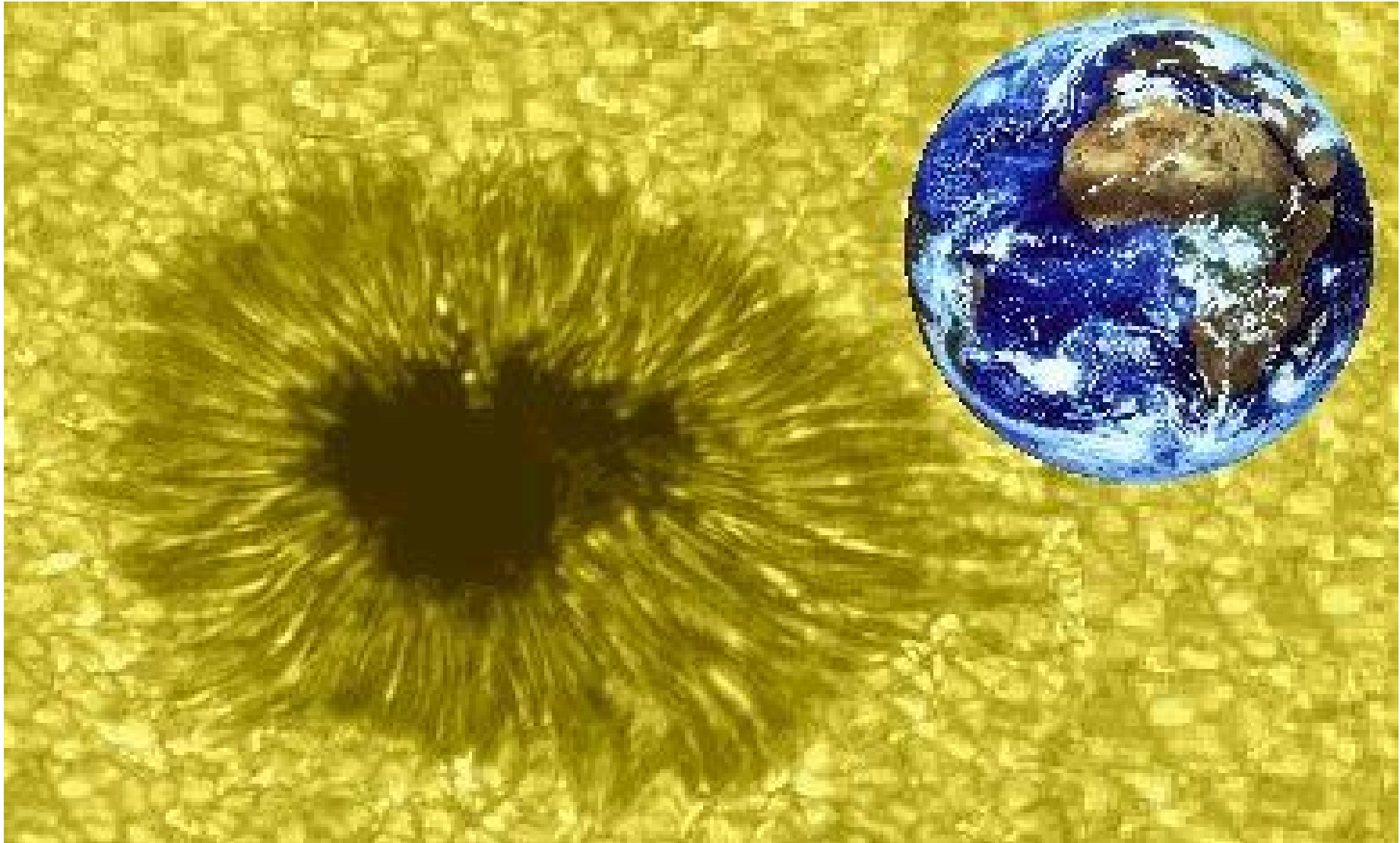
Taches solaires

Le Soleil



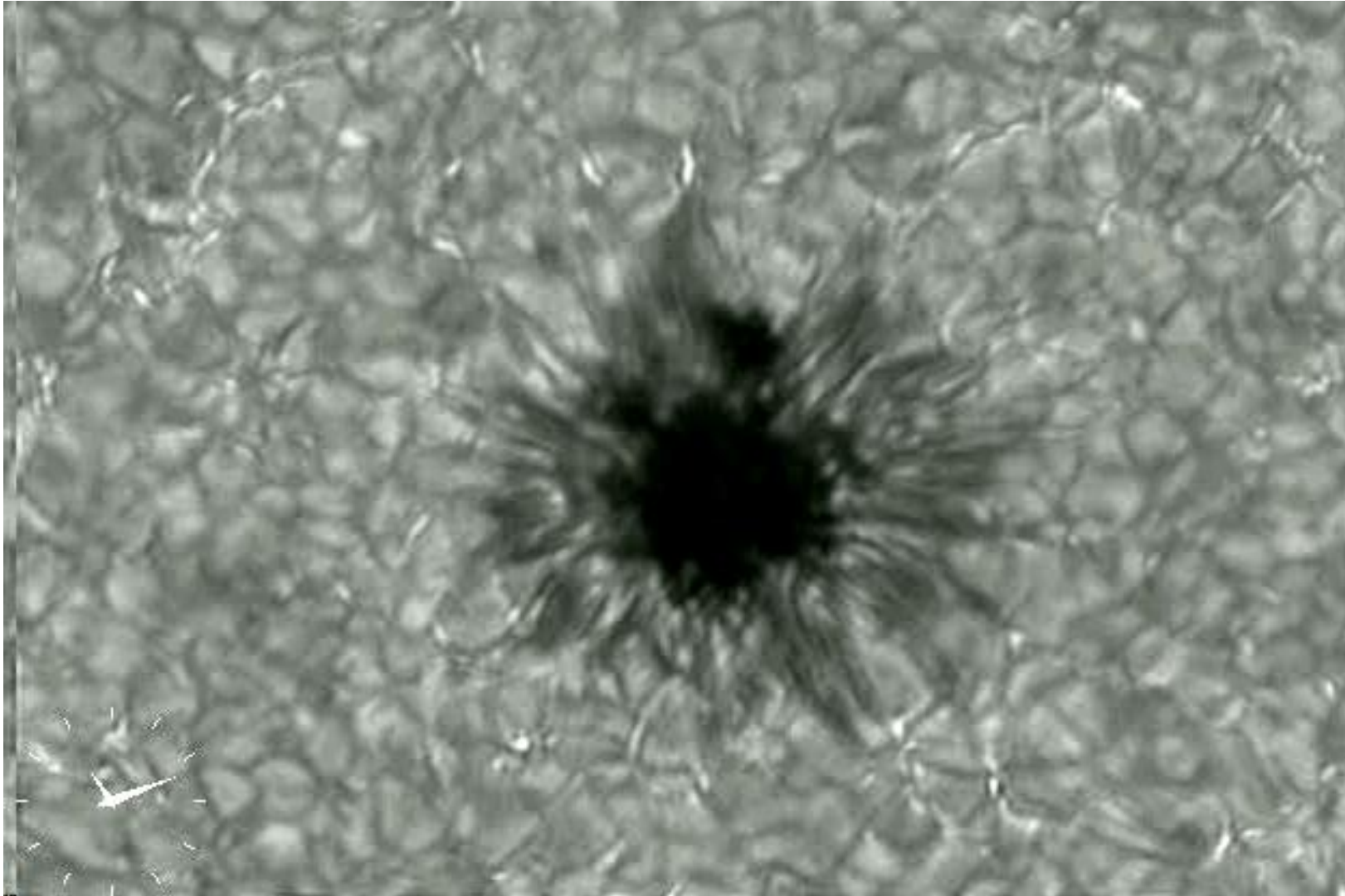
Taille des taches solaires
10.000 à 300.000 km

Le Soleil



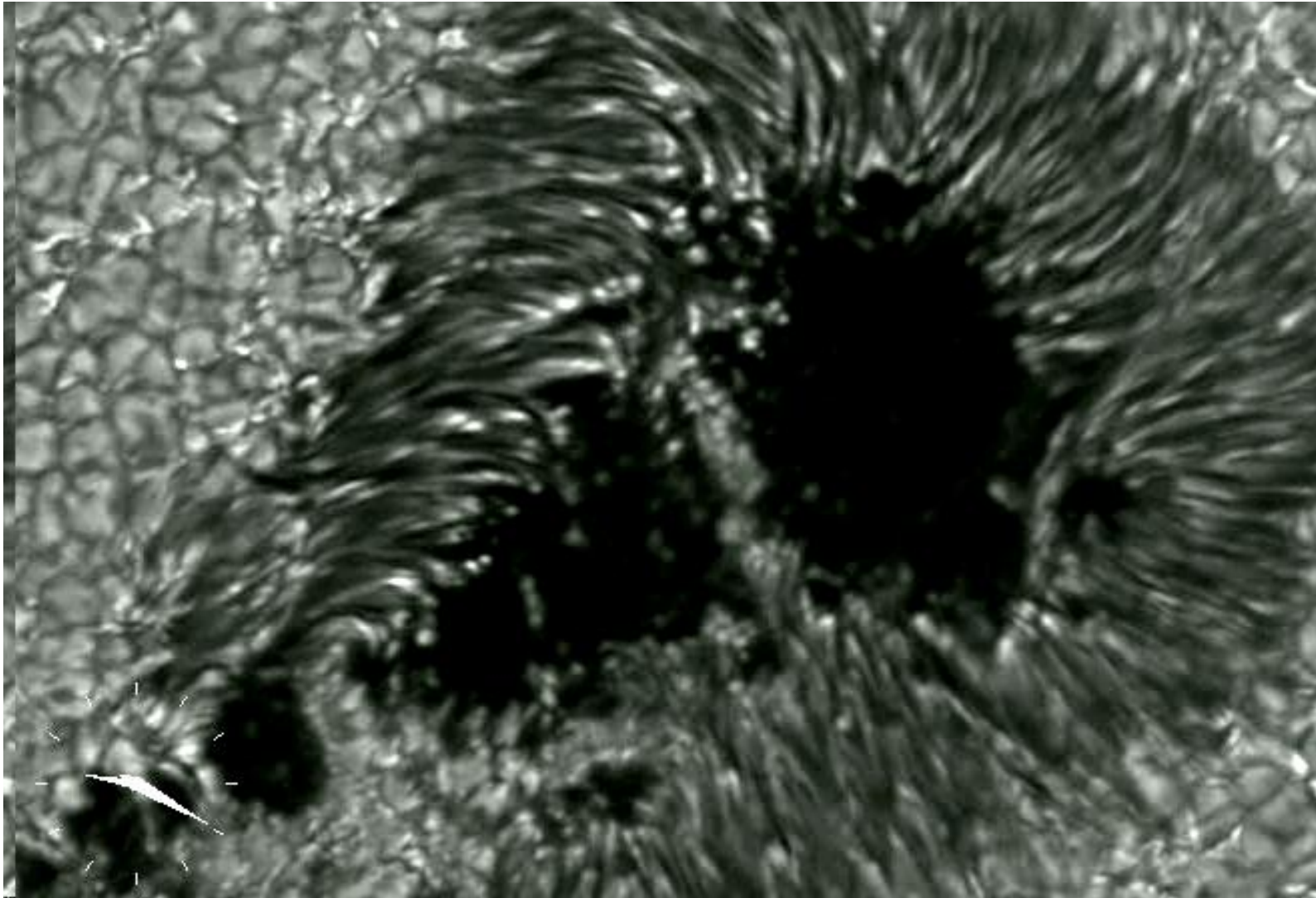
Taille des taches solaires
10.000 à 300.000 km

Le Soleil



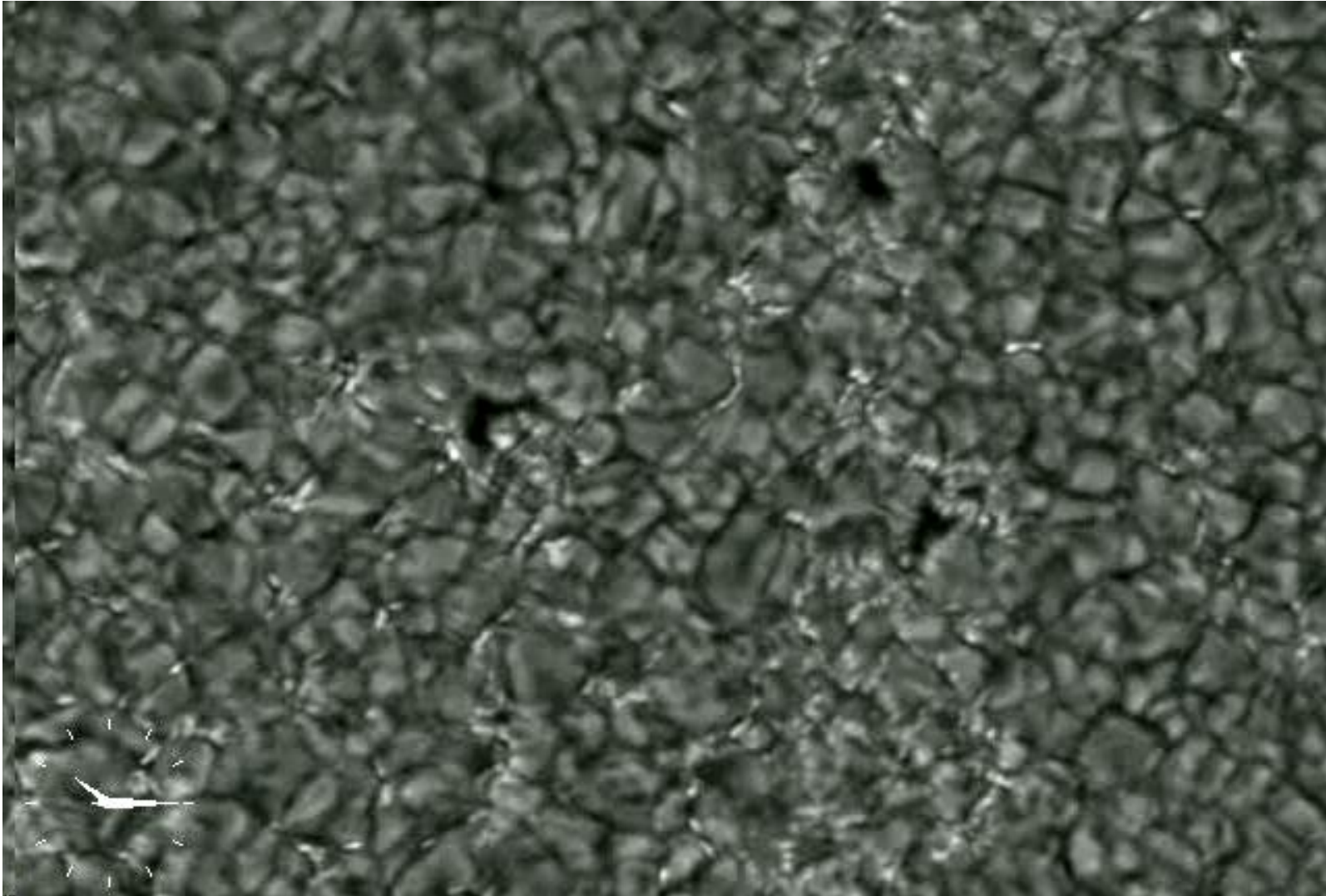
Tache solaire
Zone de convection

Le Soleil



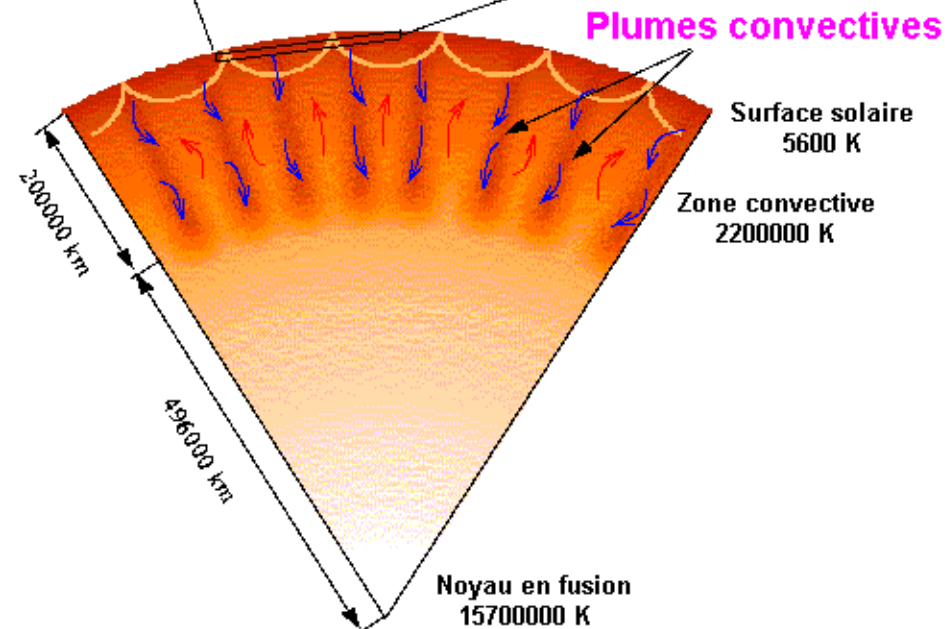
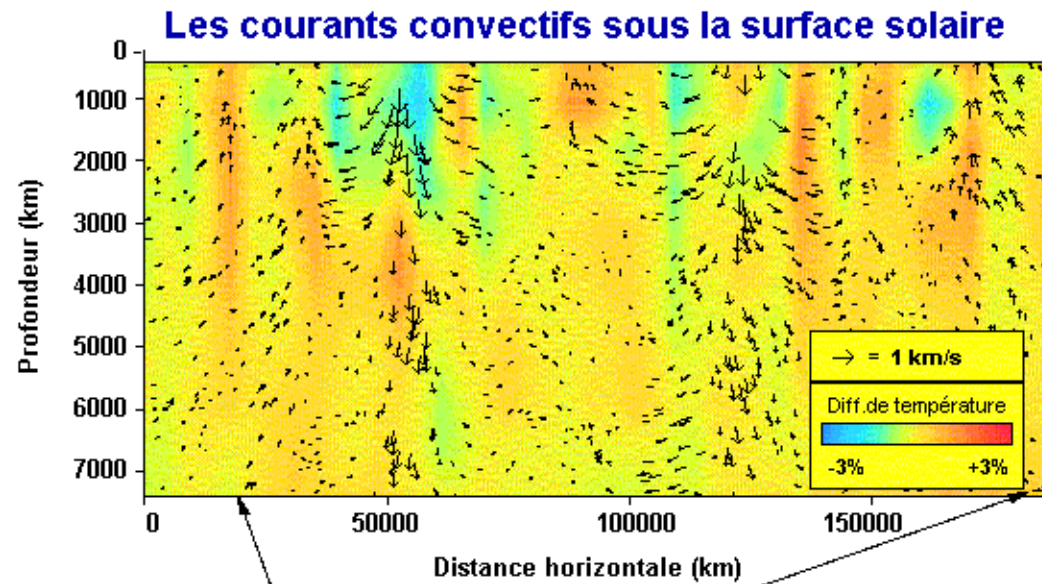
Tache solaire
Zone de convection

Le Soleil

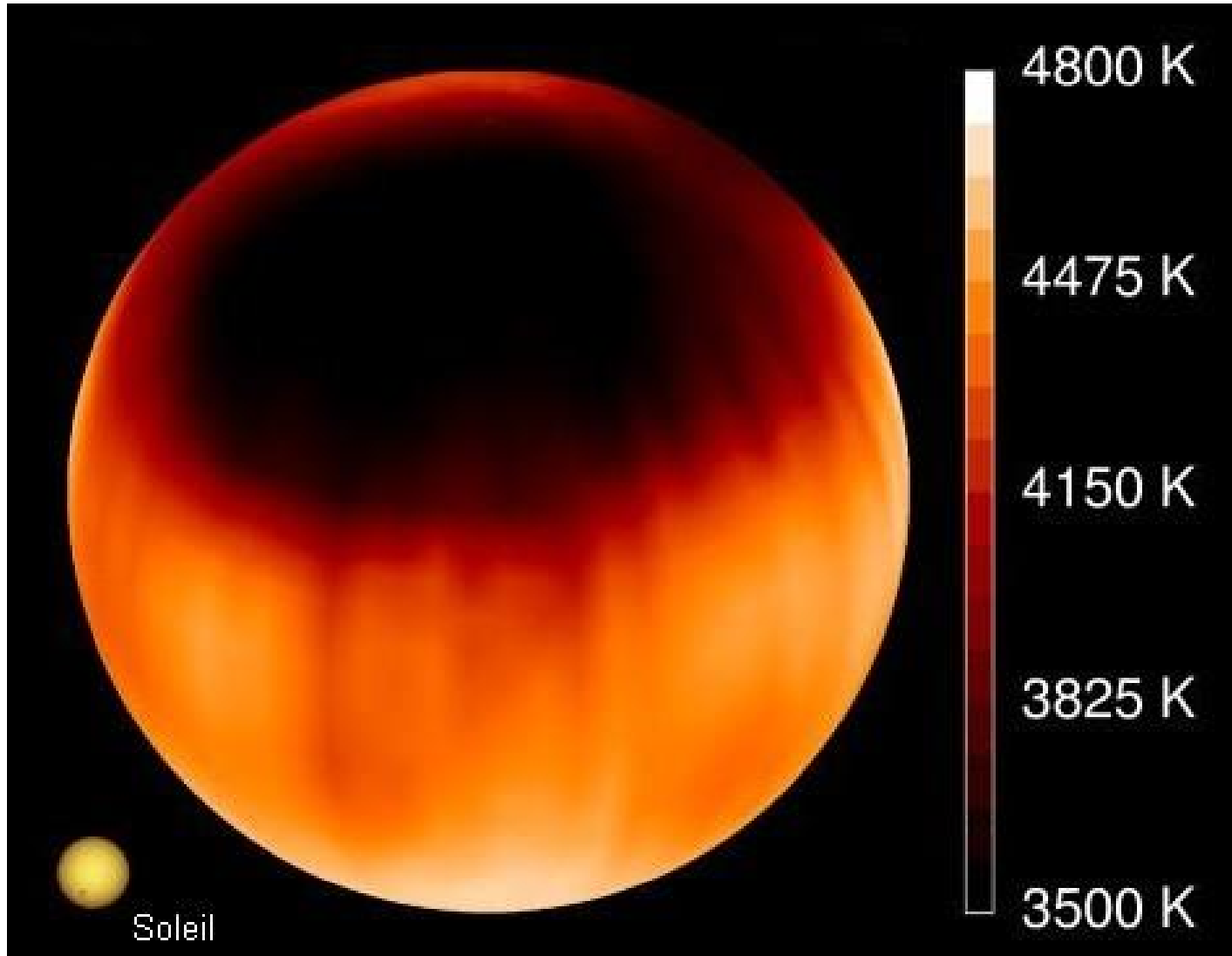


Grains de riz
Cellules de convection

Le Soleil



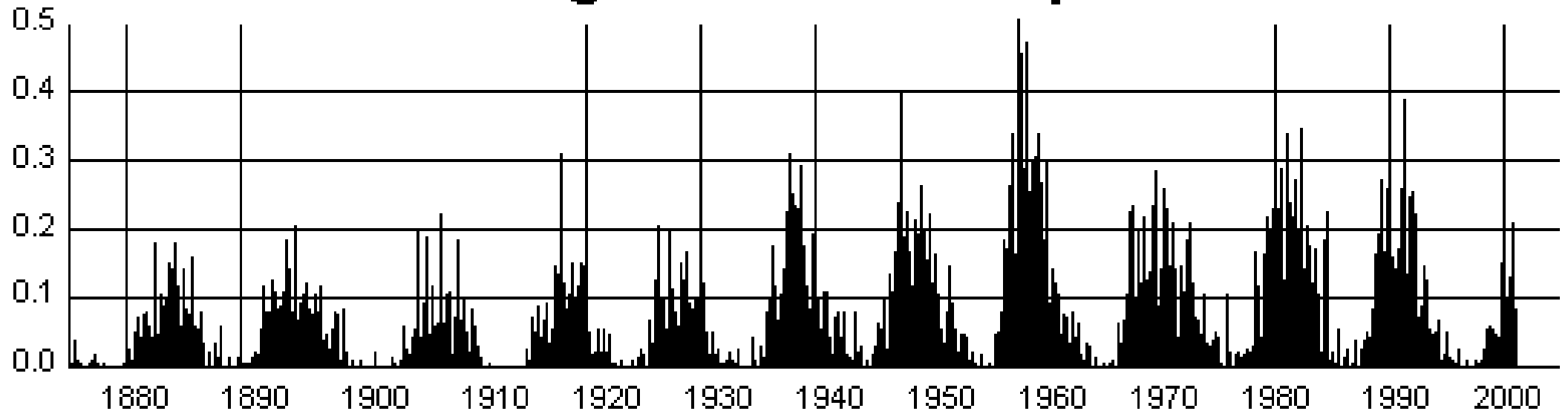
Le Soleil



Photosphère d'autres étoiles
Etoile variable RS CVn

Le Soleil

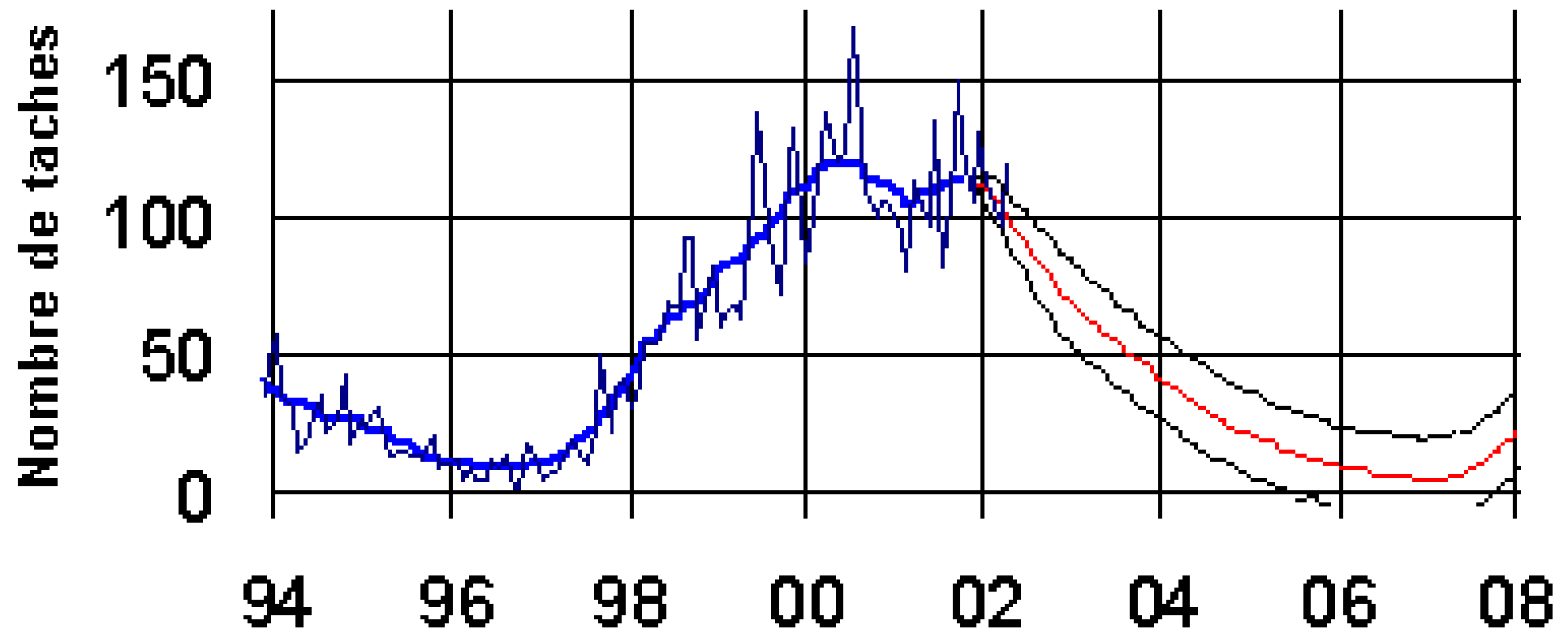
Pourcentage couvert du disque visible



Cycle solaire de 11 ans

Le Soleil

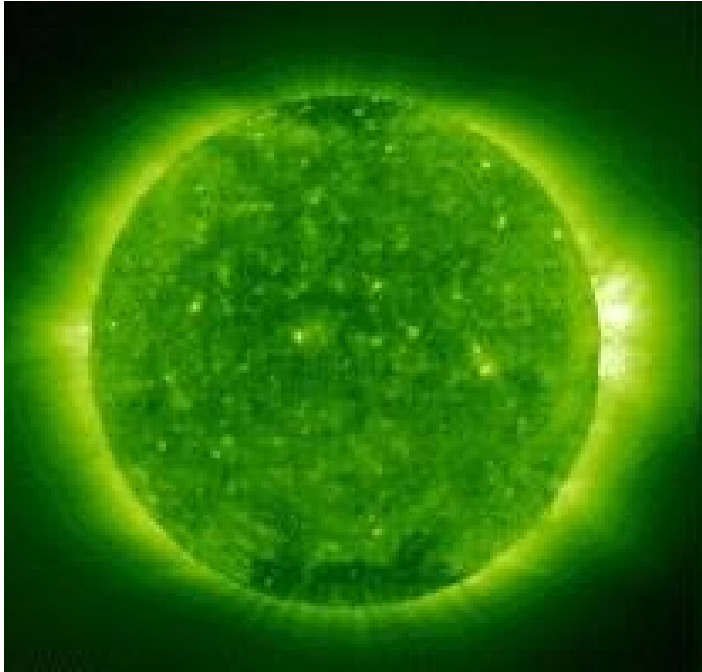
Progression du Cycle solaire 23



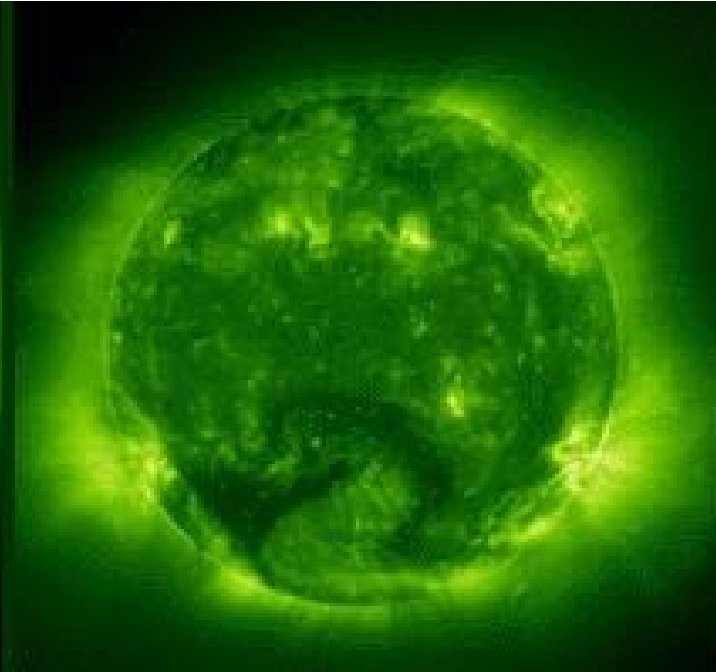
Cycle solaire de 11 ans

Le Soleil

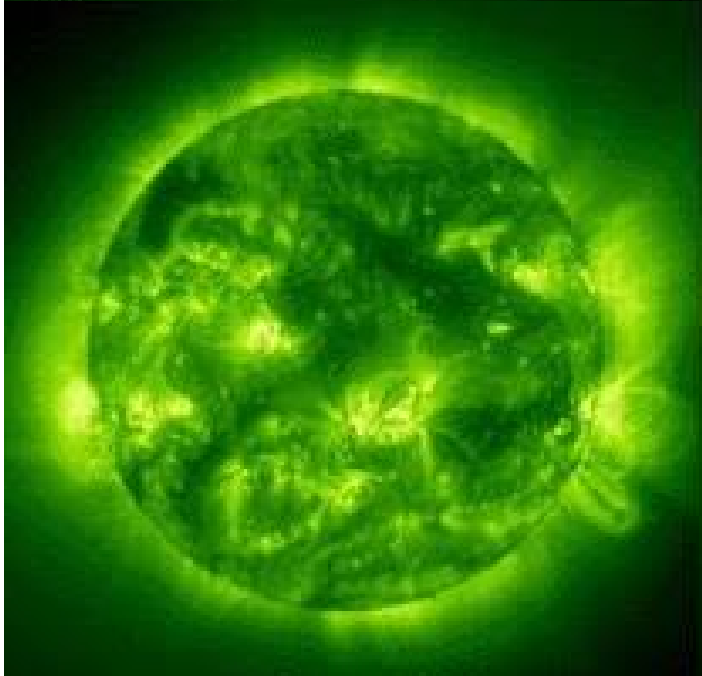
1997



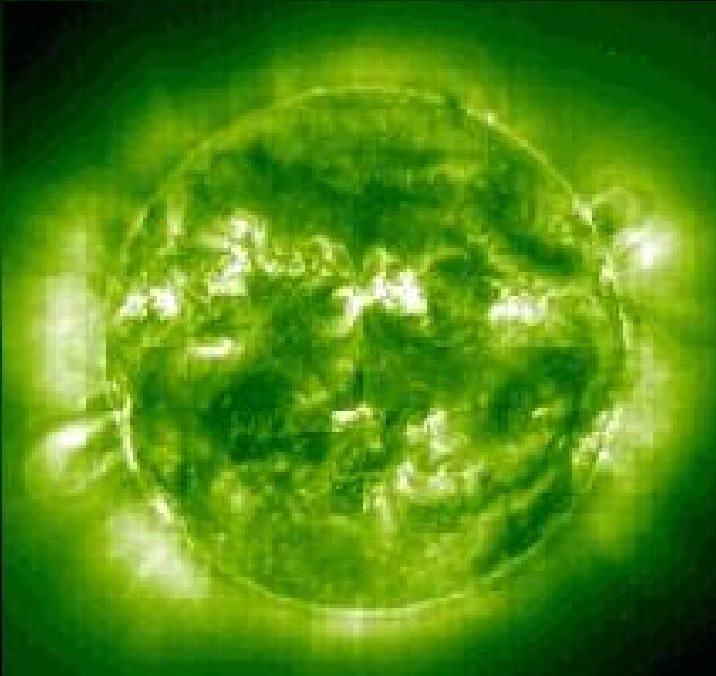
1998



1999

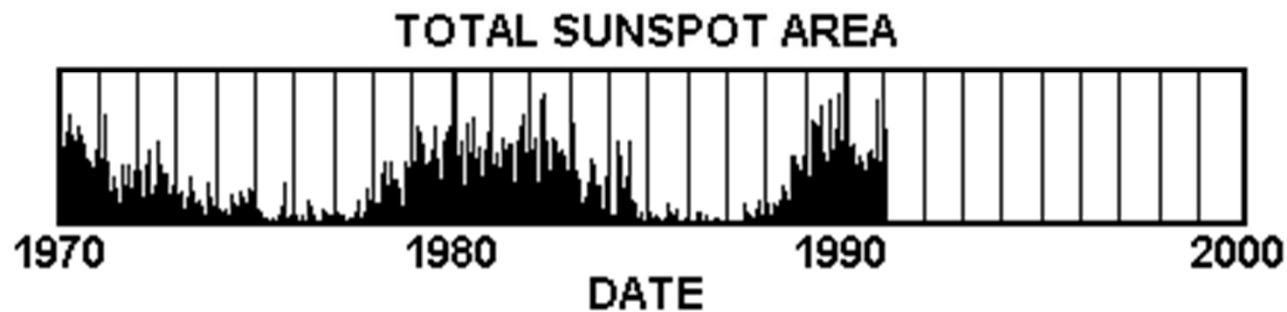
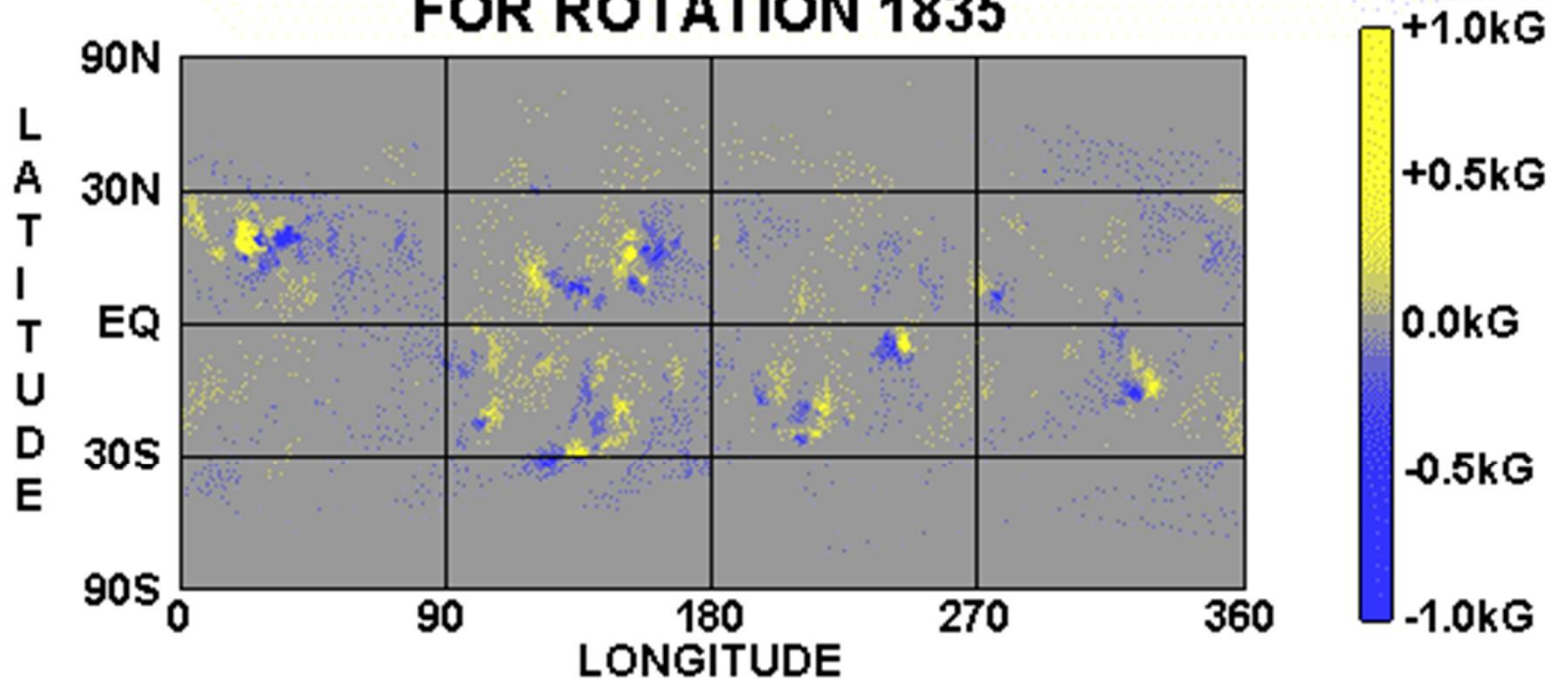


2000



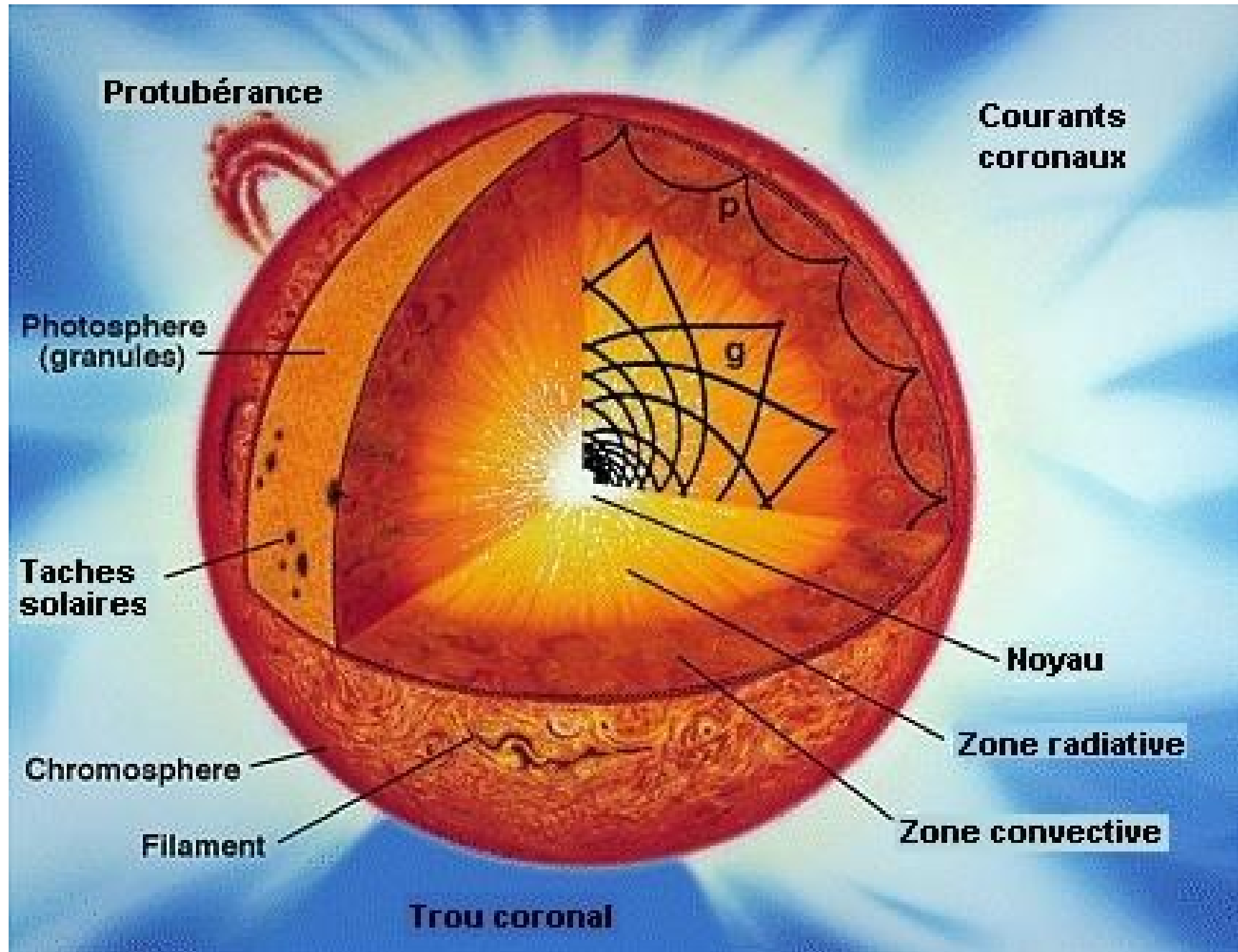
Le Soleil

SOLAR MAGNETIC FIELD MAP FOR ROTATION 1835



Vue de la Terre

Le Soleil

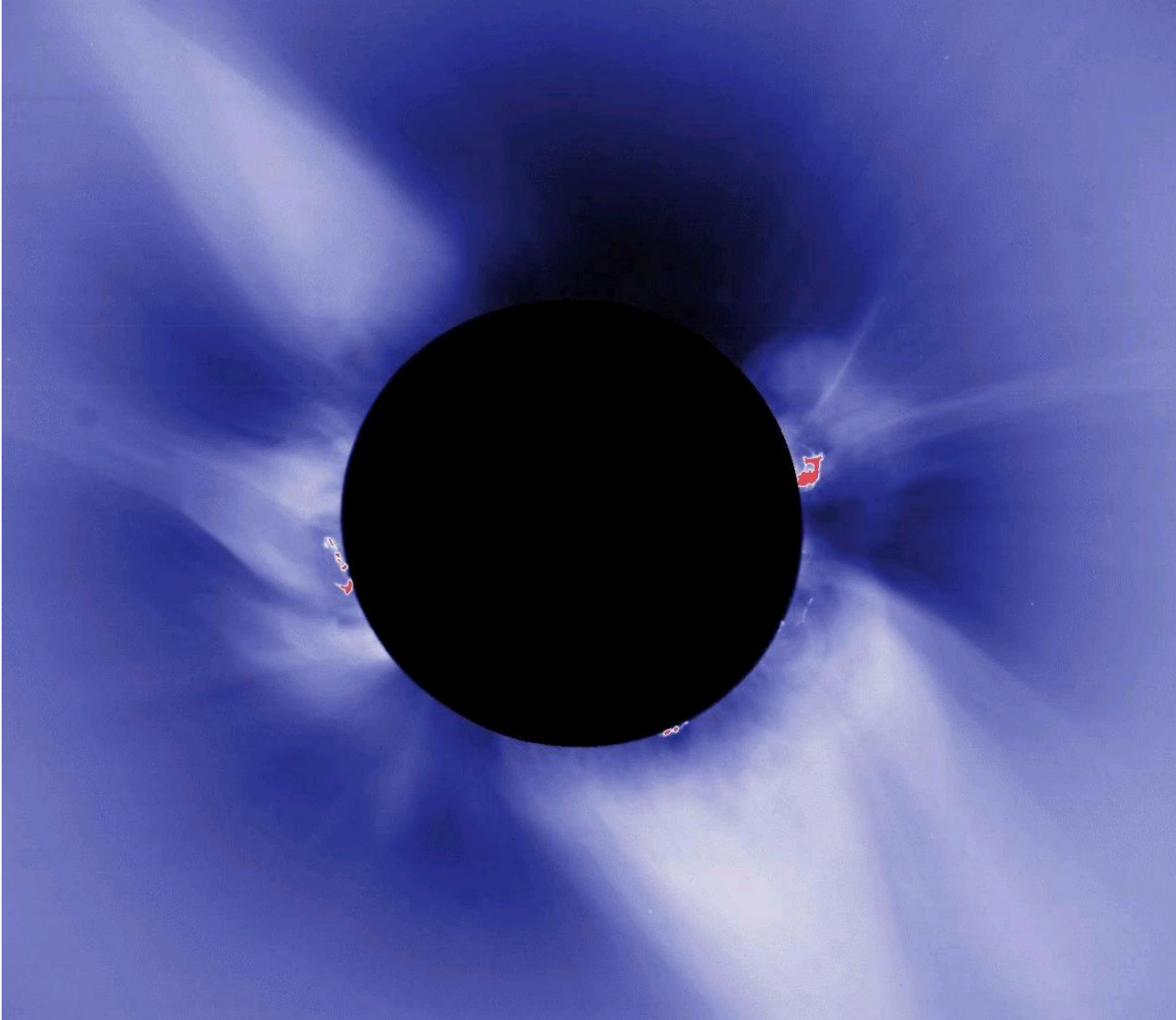


Le Soleil



La chromosphère

Le Soleil



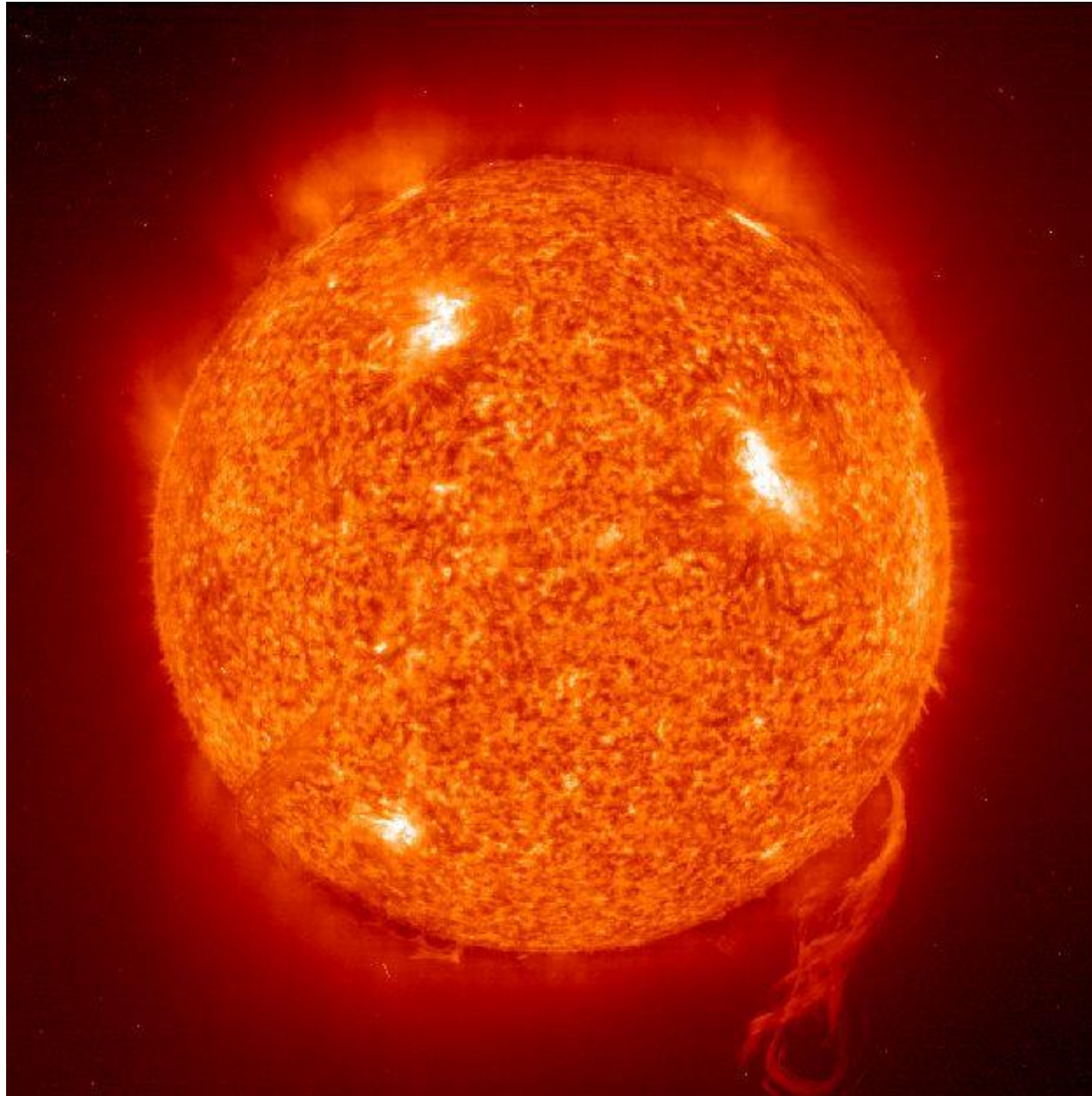
La chromosphère

Le Soleil



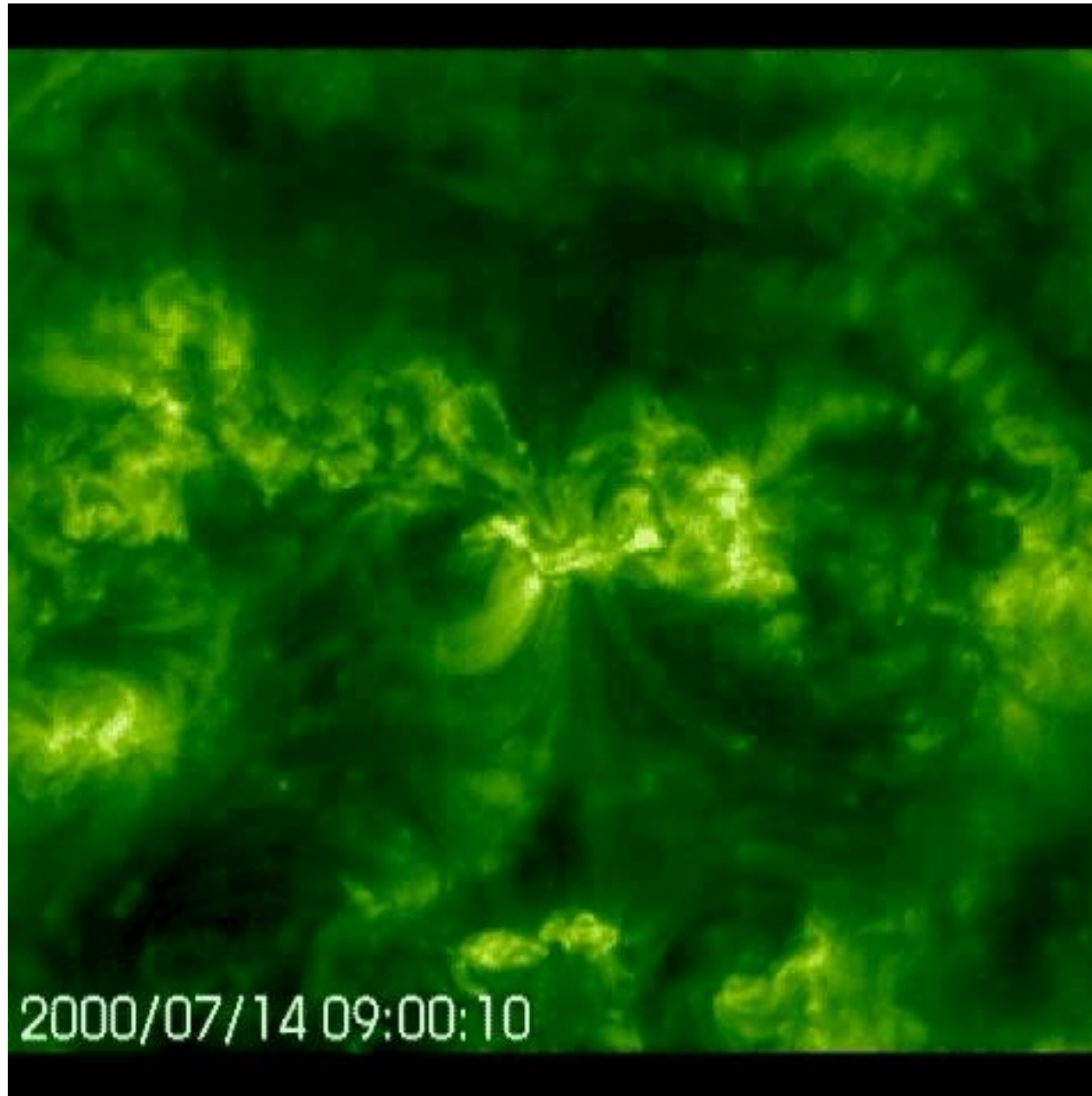
De la chromosphère, les protubérances

Le Soleil



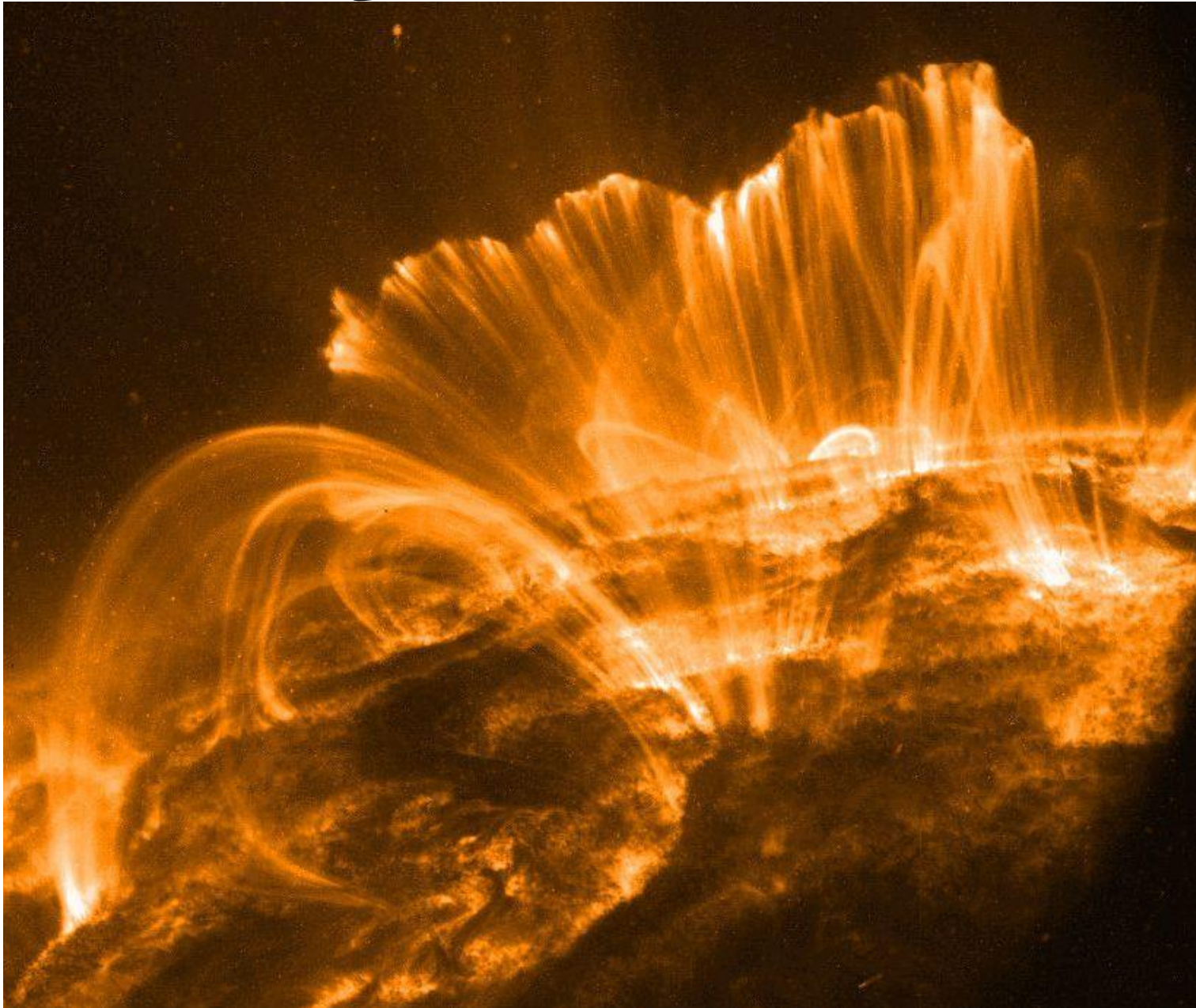
Les protubérances

Le Soleil



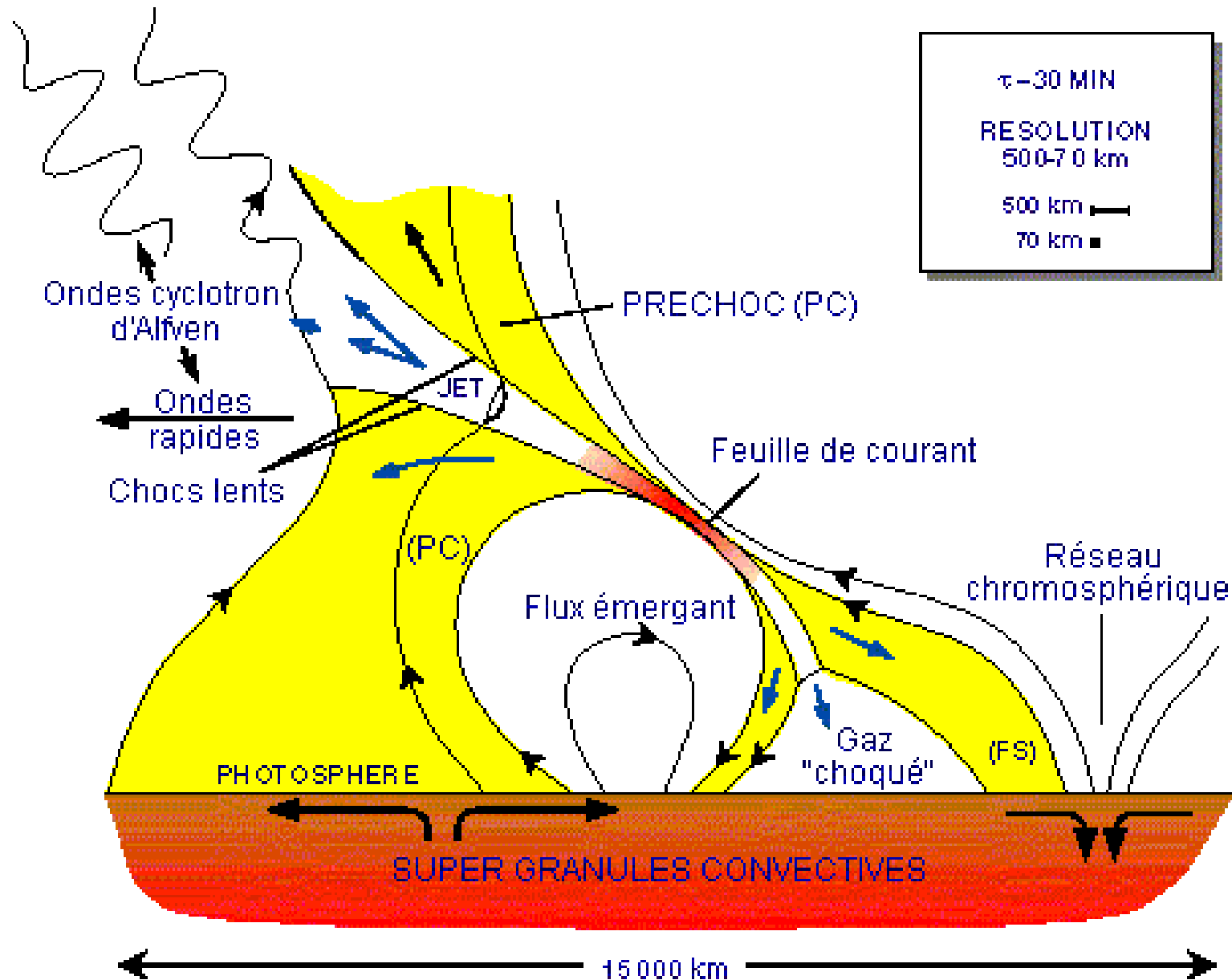
La chromosphère

Le Soleil



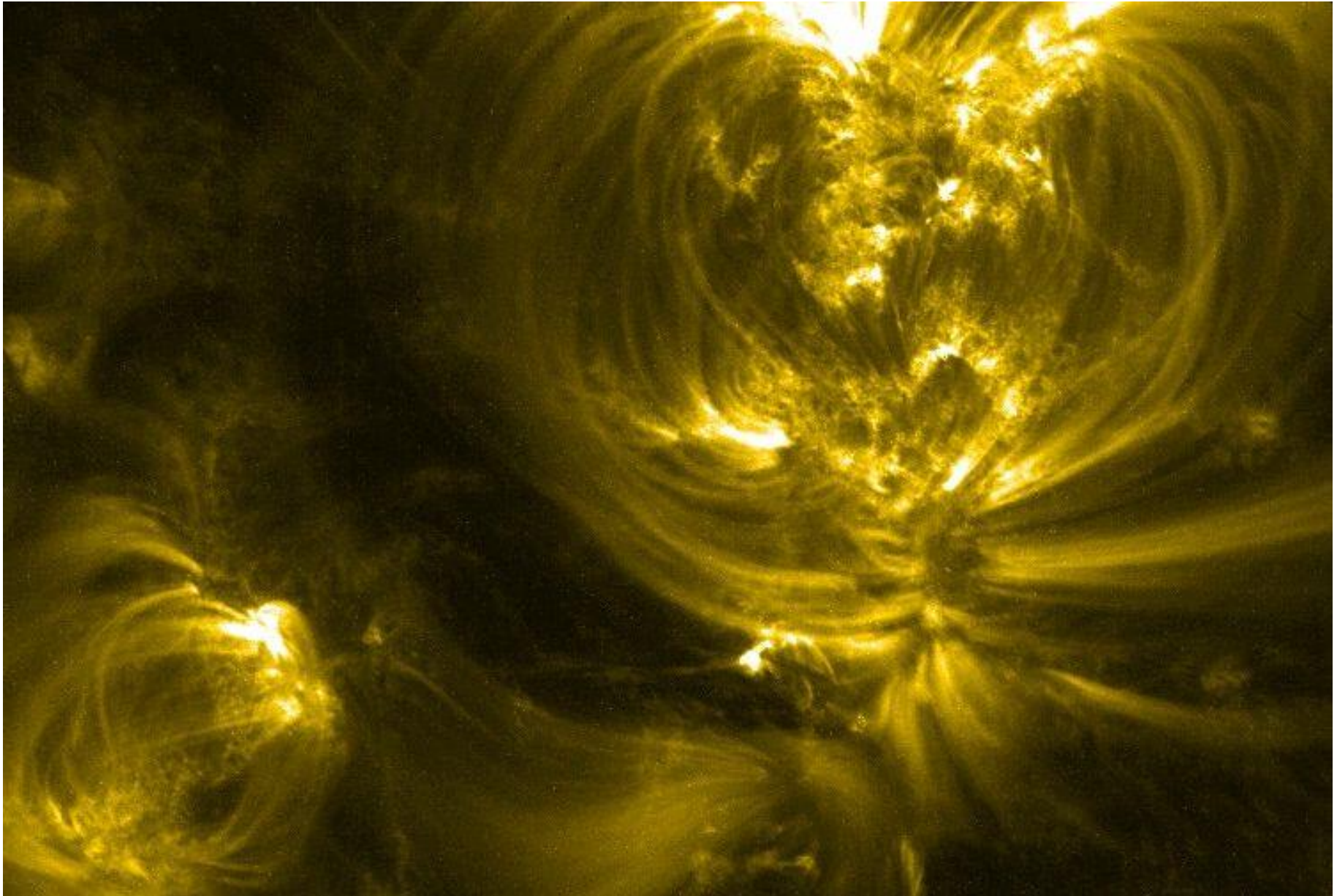
La chromosphère

Le Soleil



La chromosphère

Le Soleil



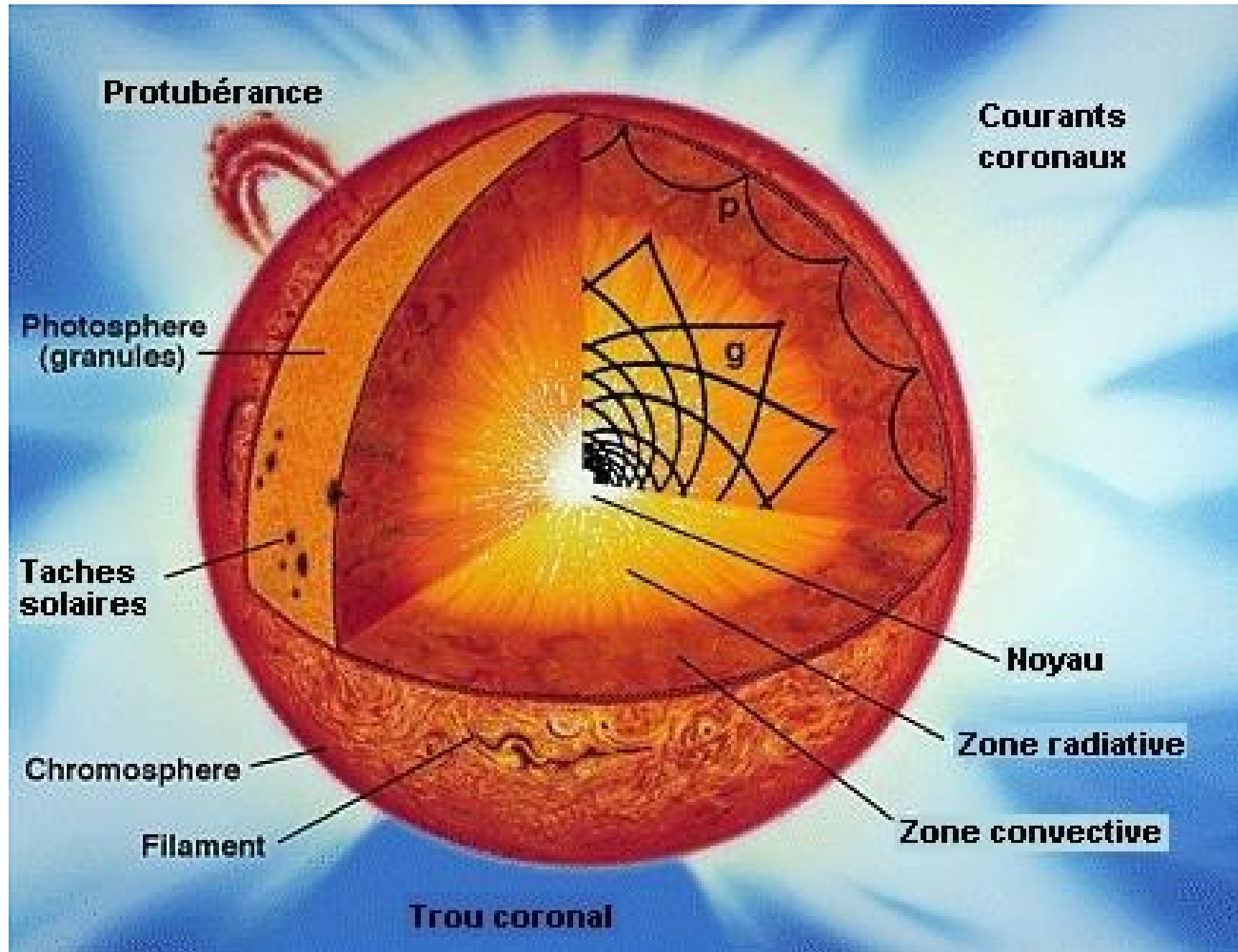
La chromosphère

Le Soleil



La chromosphère

Le Soleil

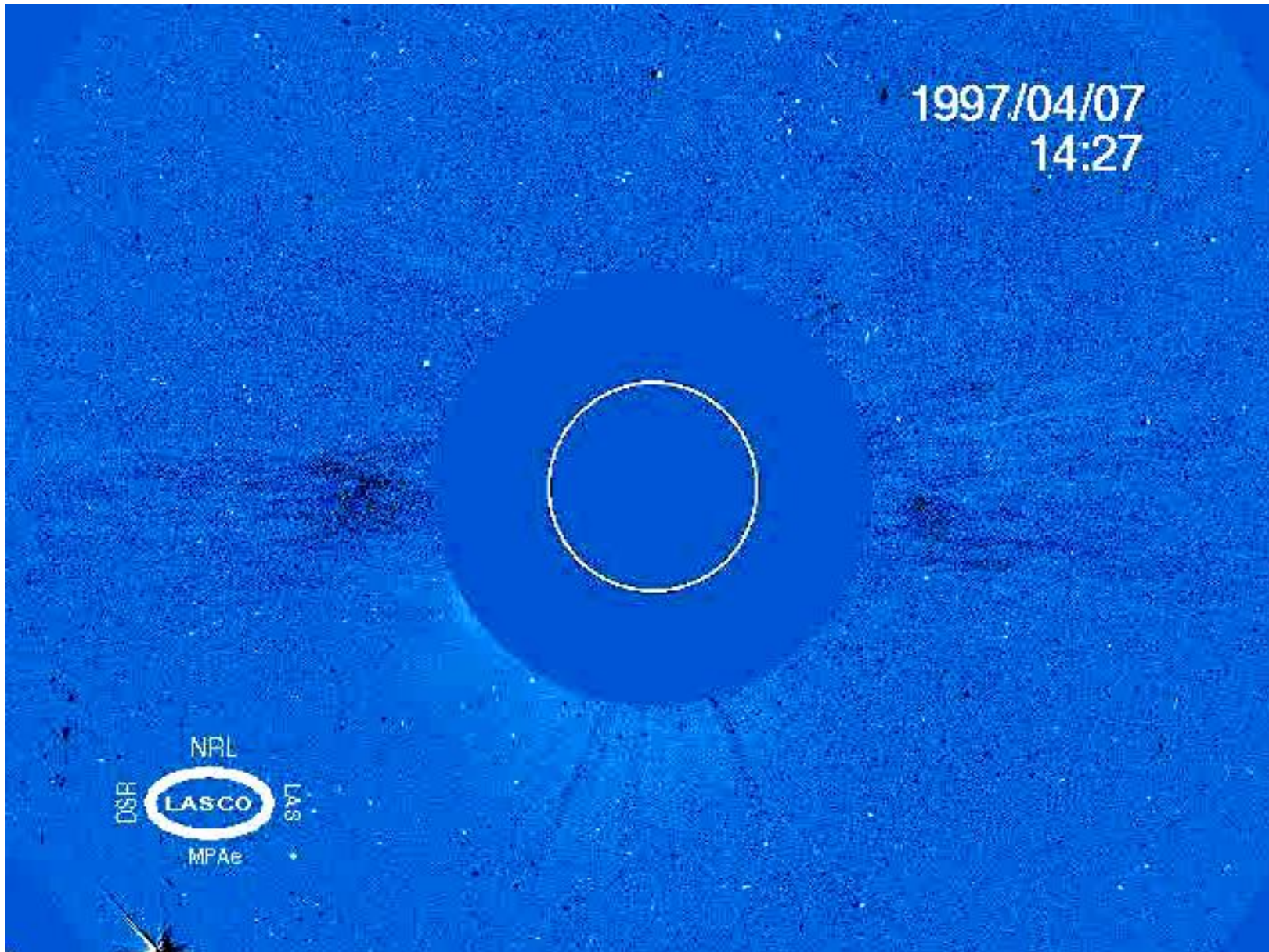


Le Soleil



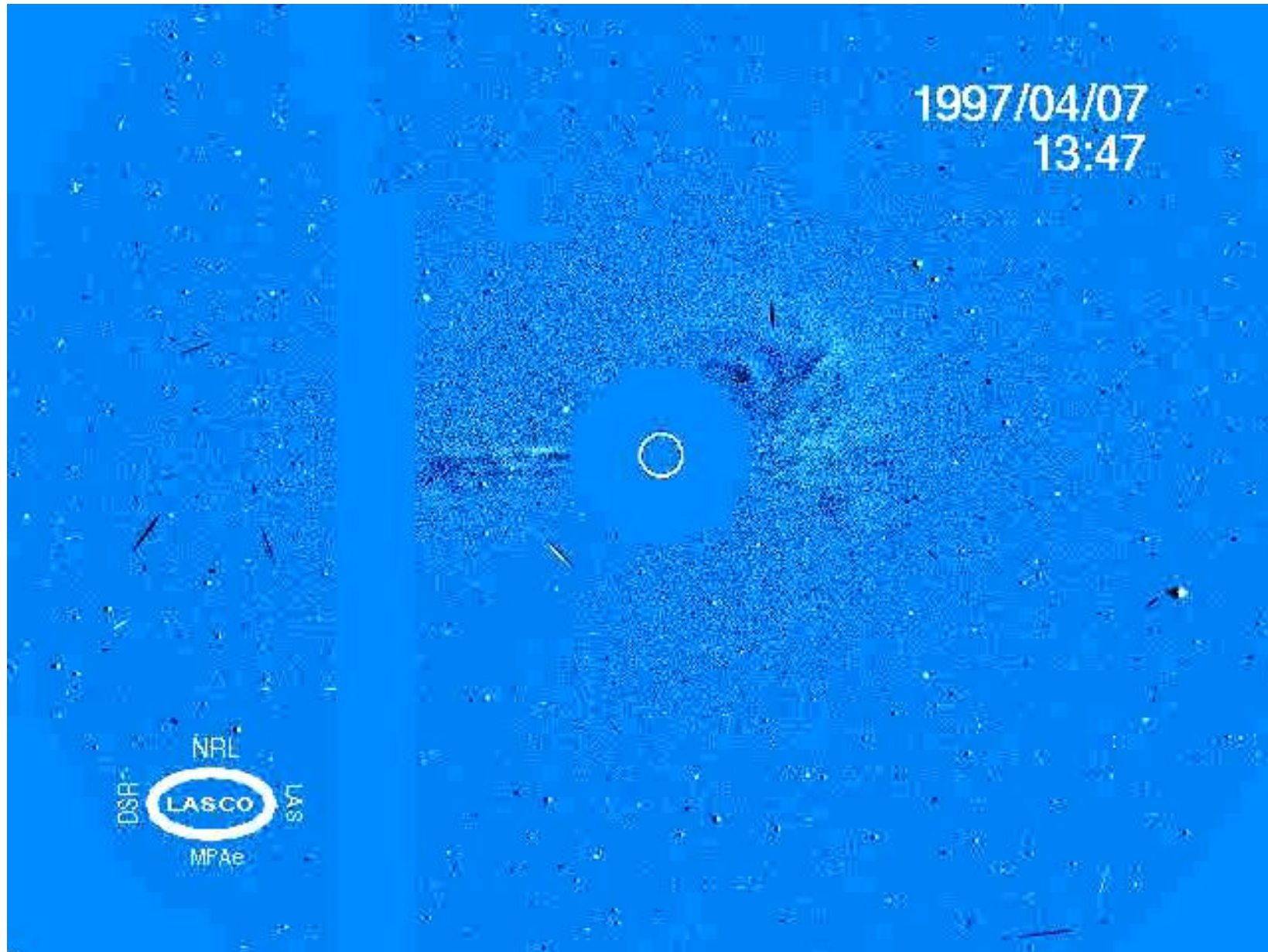
La couronne

Le Soleil



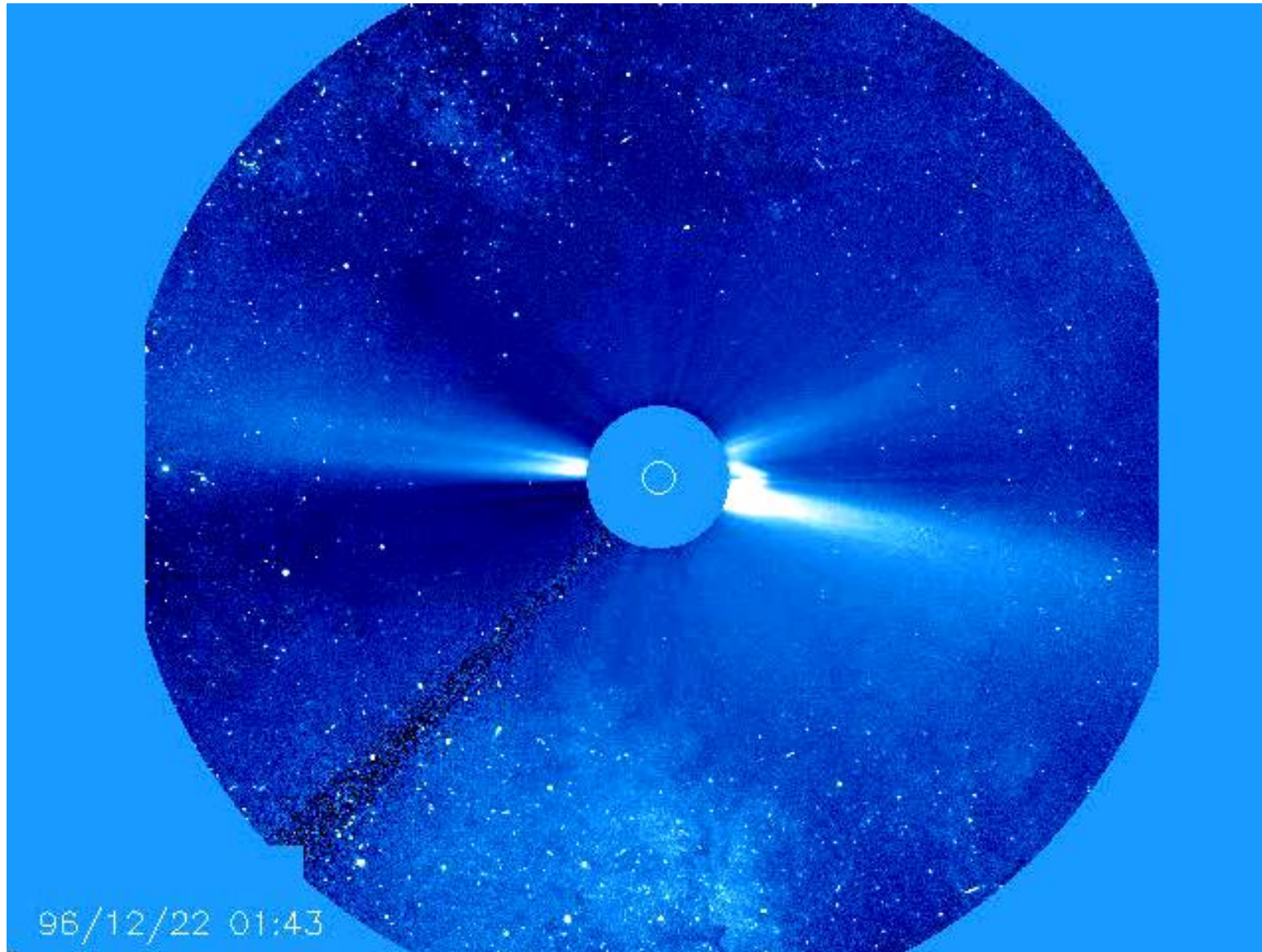
La couronne

Le Soleil



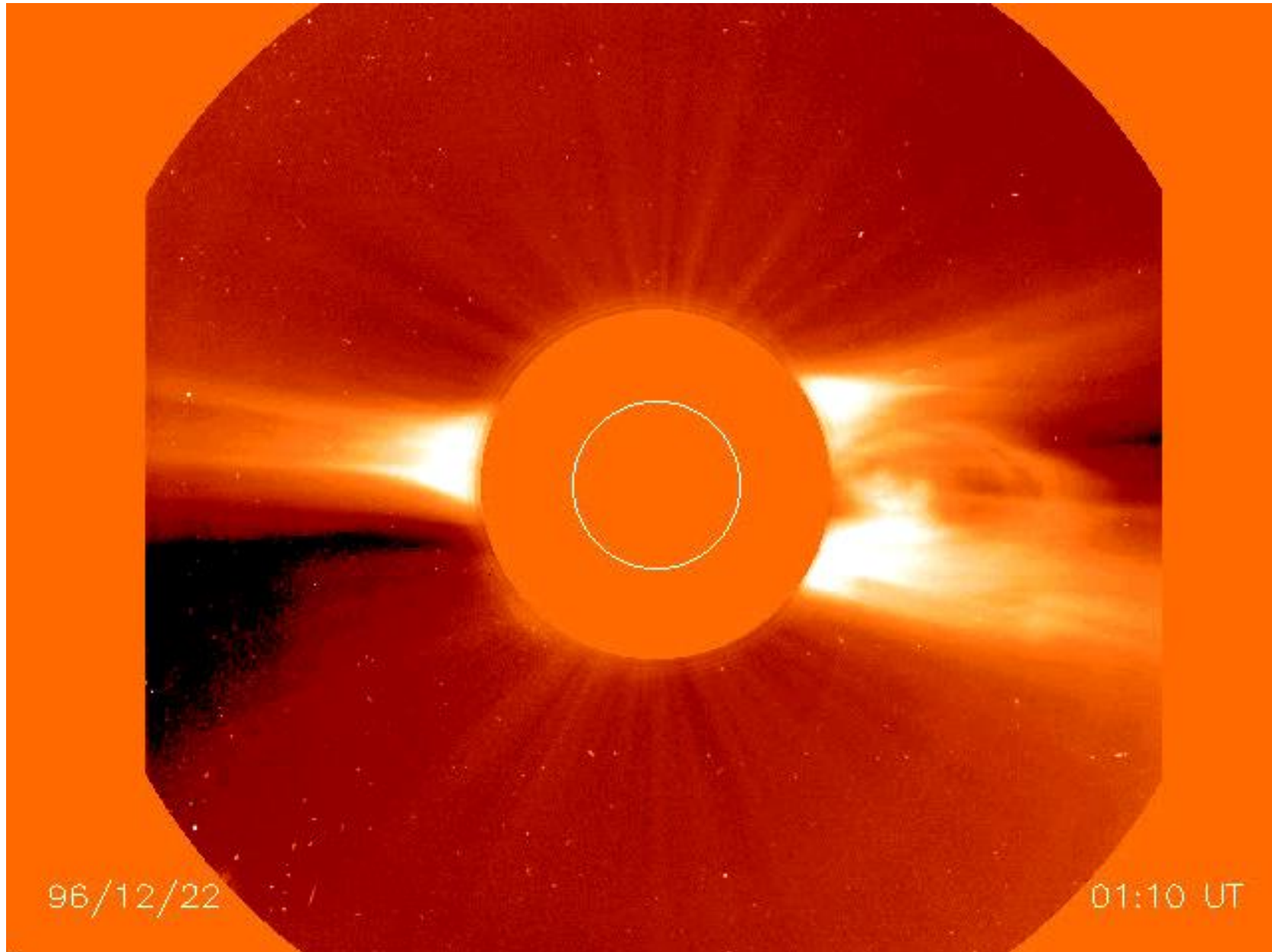
La couronne

Le Soleil



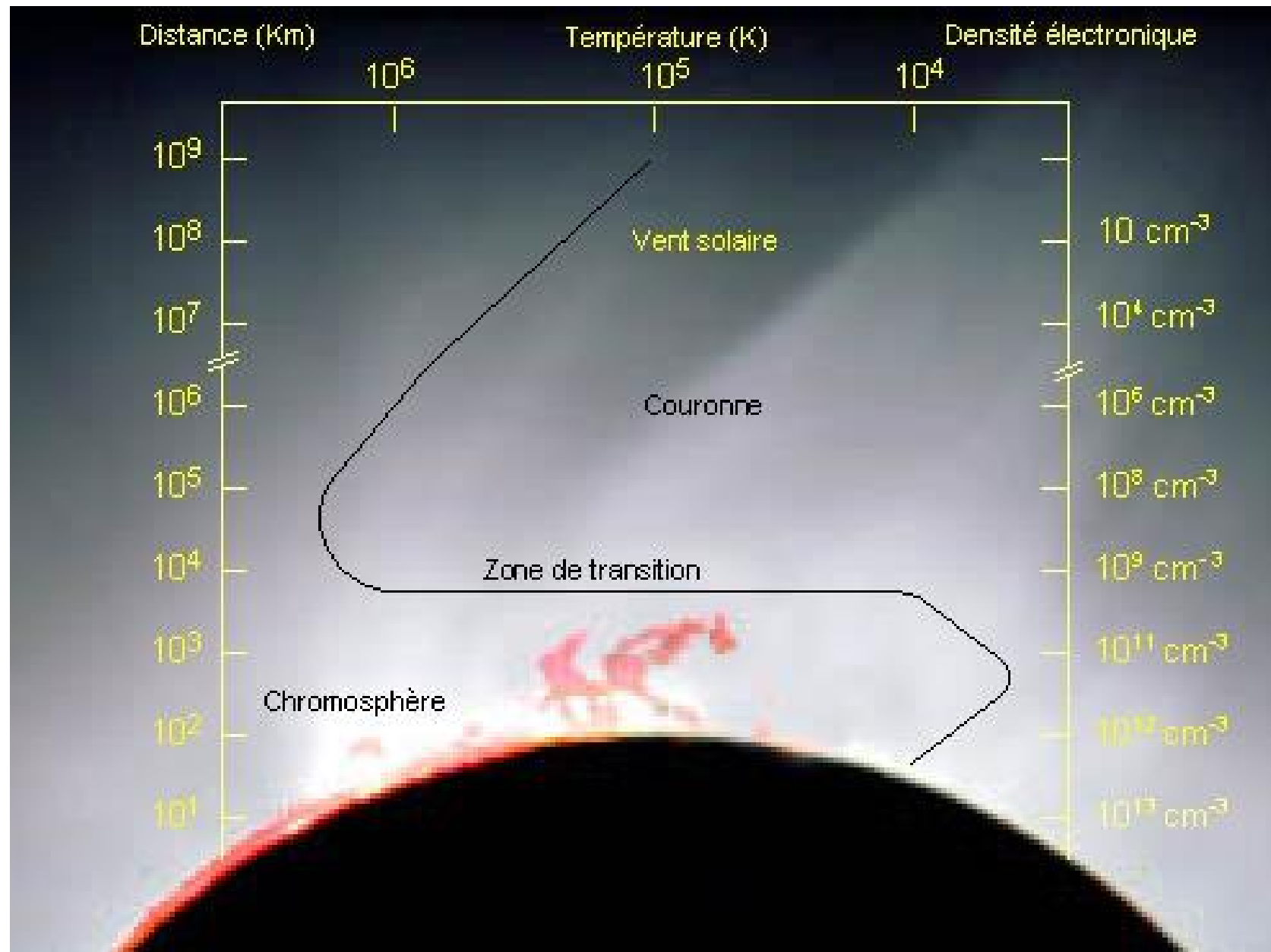
La couronne et
le déplacement du Soleil

Le Soleil



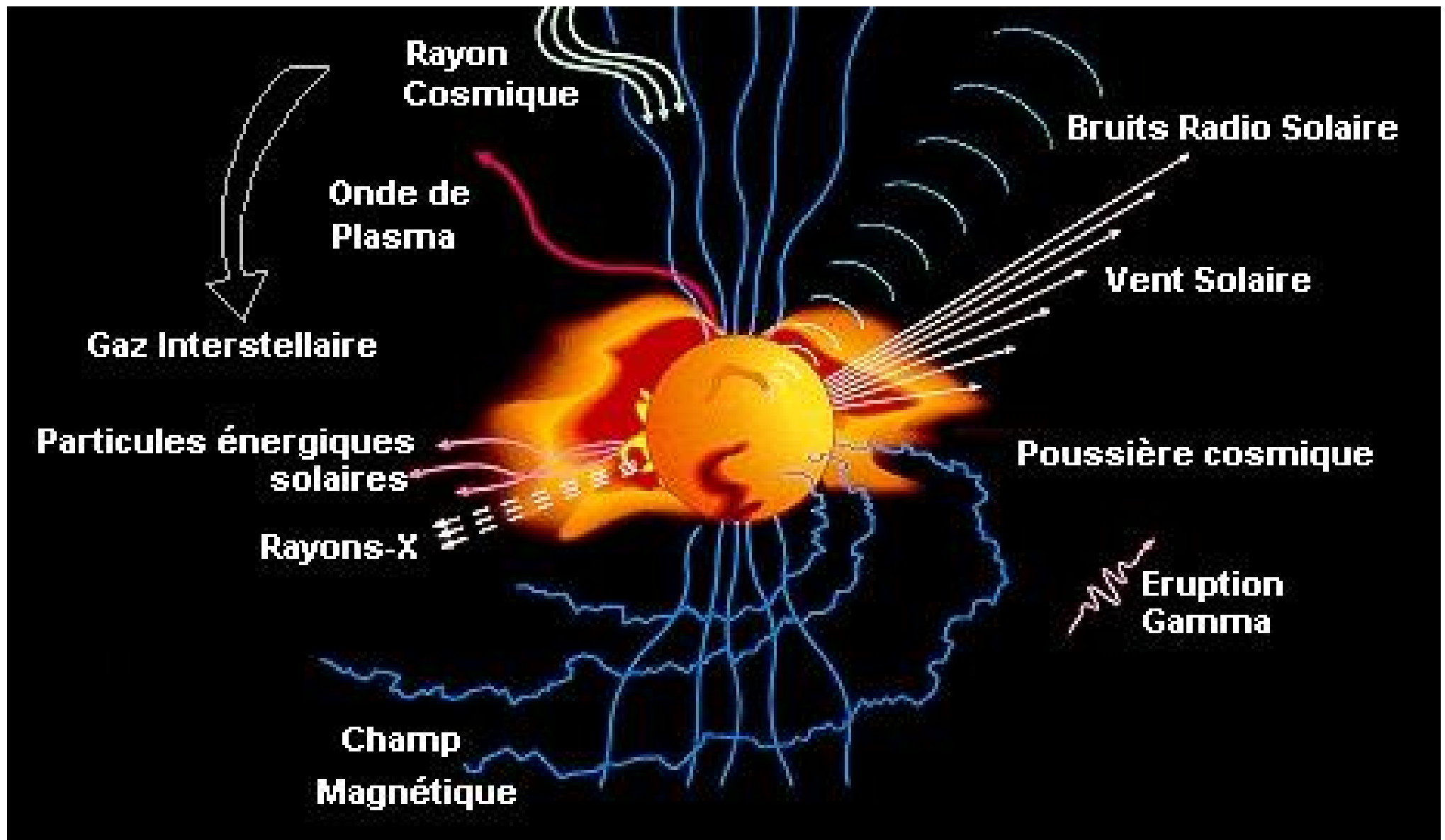
La couronne

Le Soleil



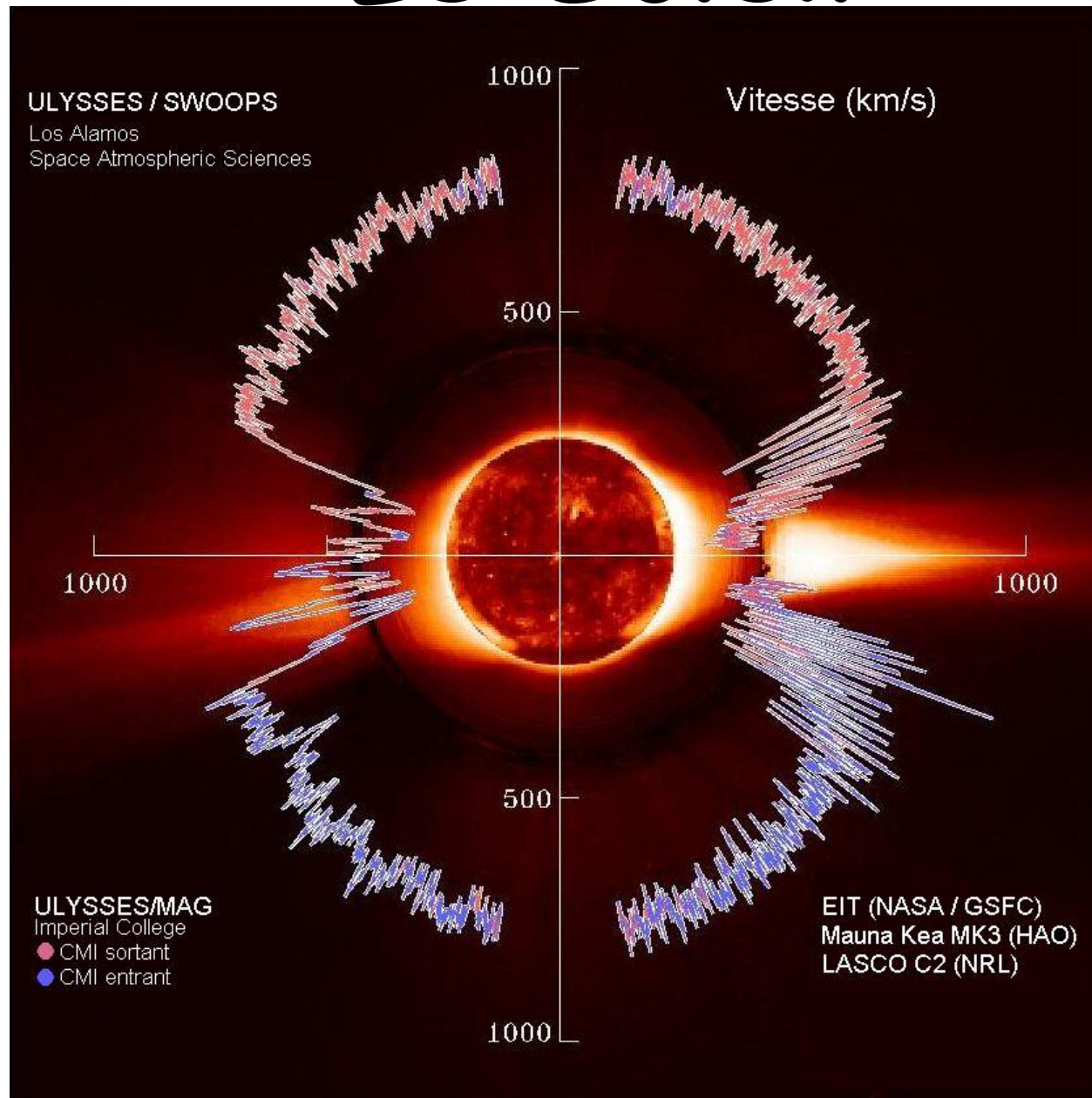
La couronne

Le Soleil



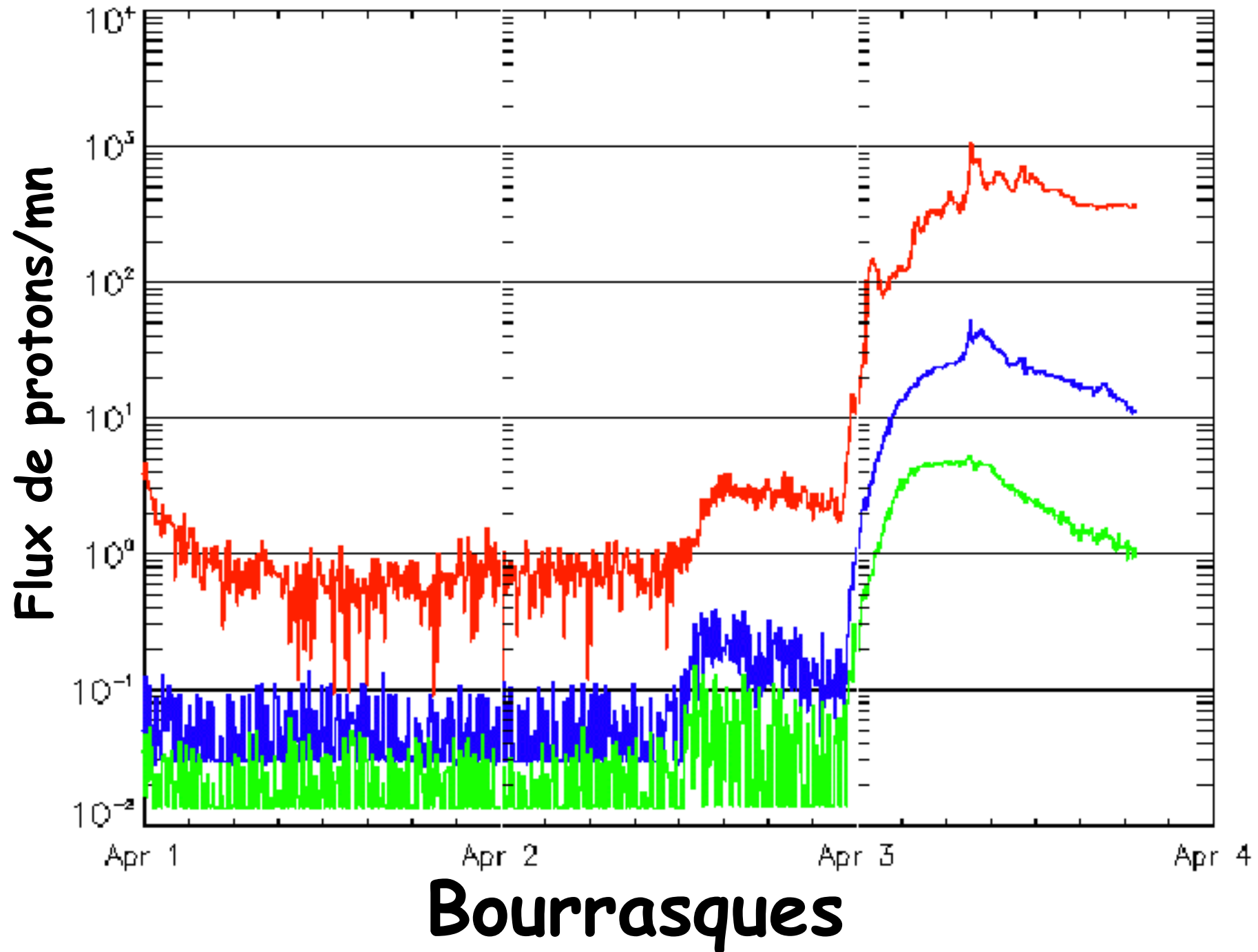
L'héliosphère

Le Soleil



Le vent solaire

Le Soleil



Energie

Rayonnement solaire

0,05 % de $Z > 2$
< 10^{10} eV/nucléon

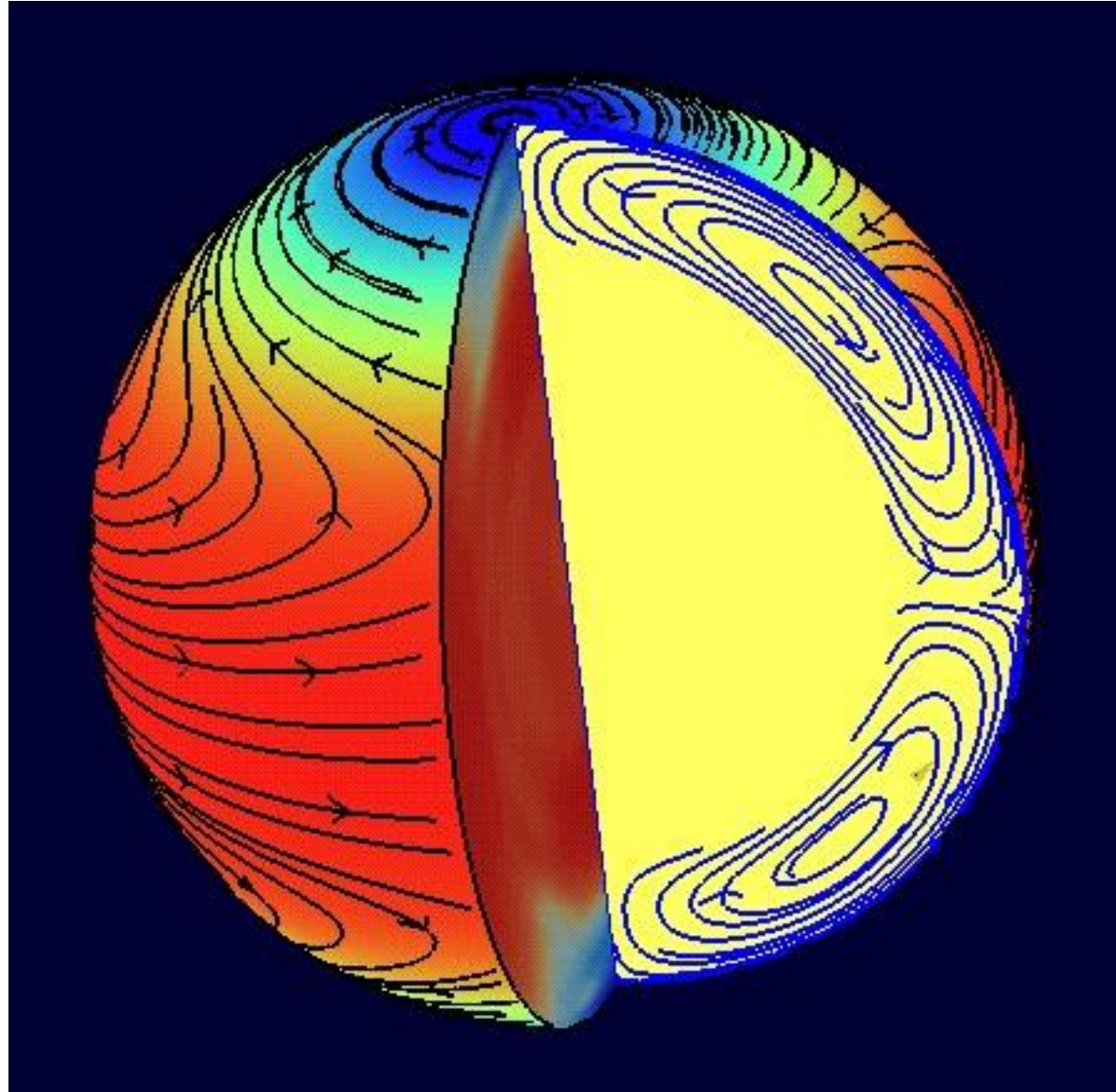
Eruption solaire

protons, ions lourds
 10^9 eV/nucléon

Vent solaire

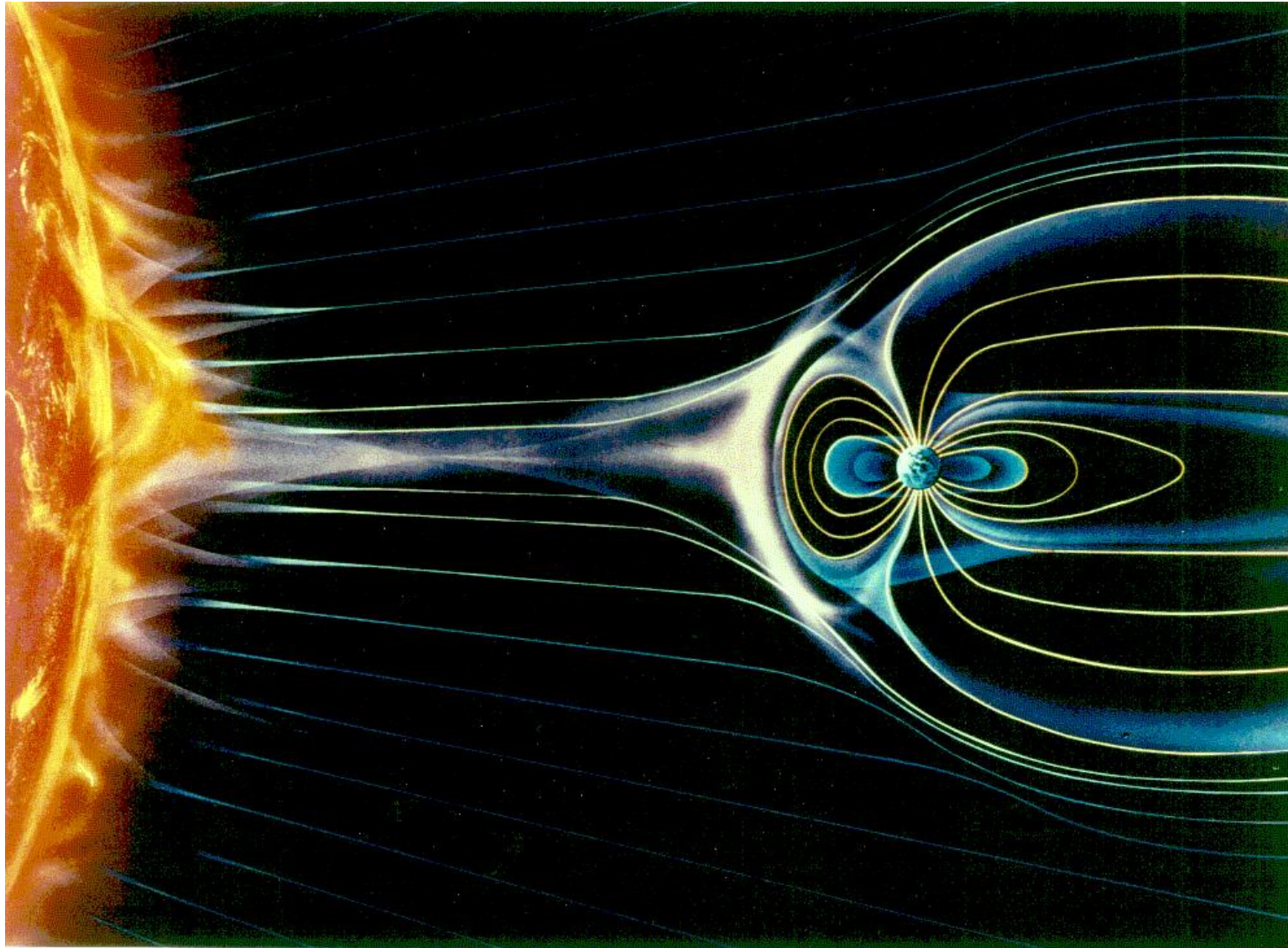
Électrons, protons
 10^3 eV/nucléon

Le Soleil



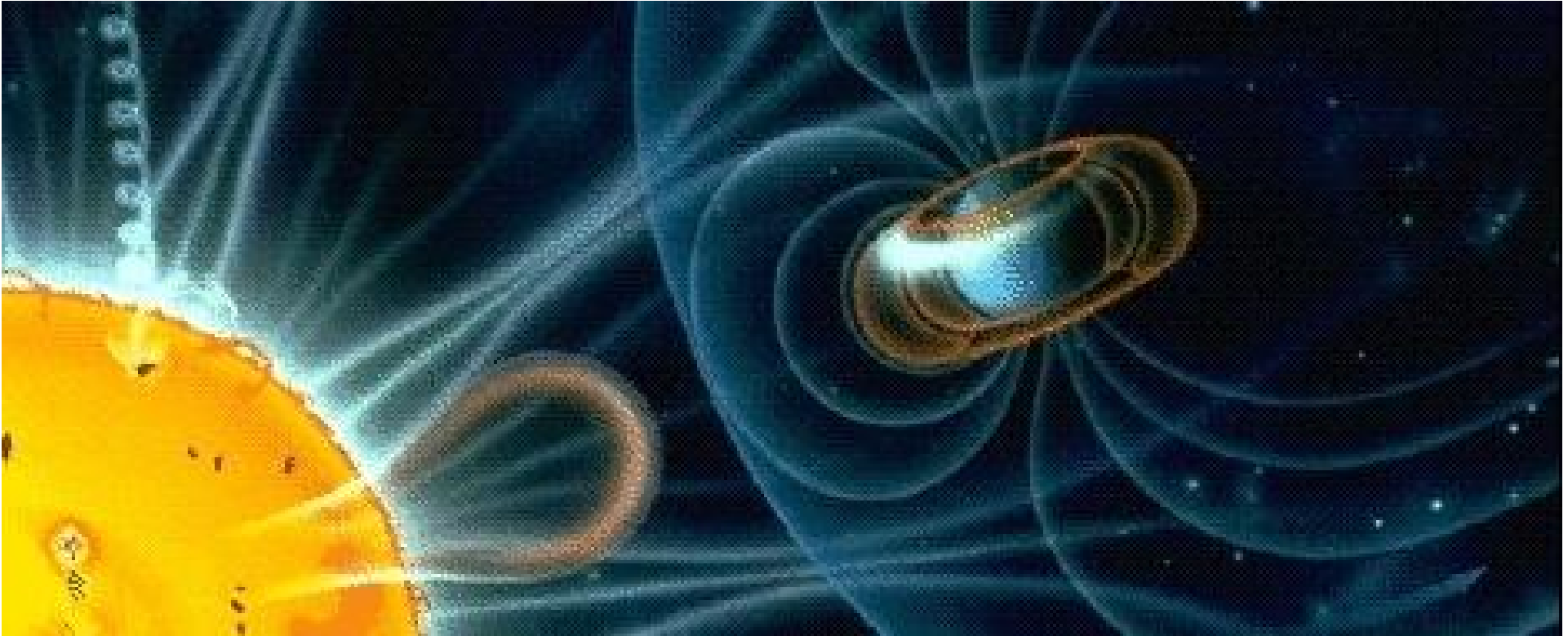
Champ magnétique

Le Soleil



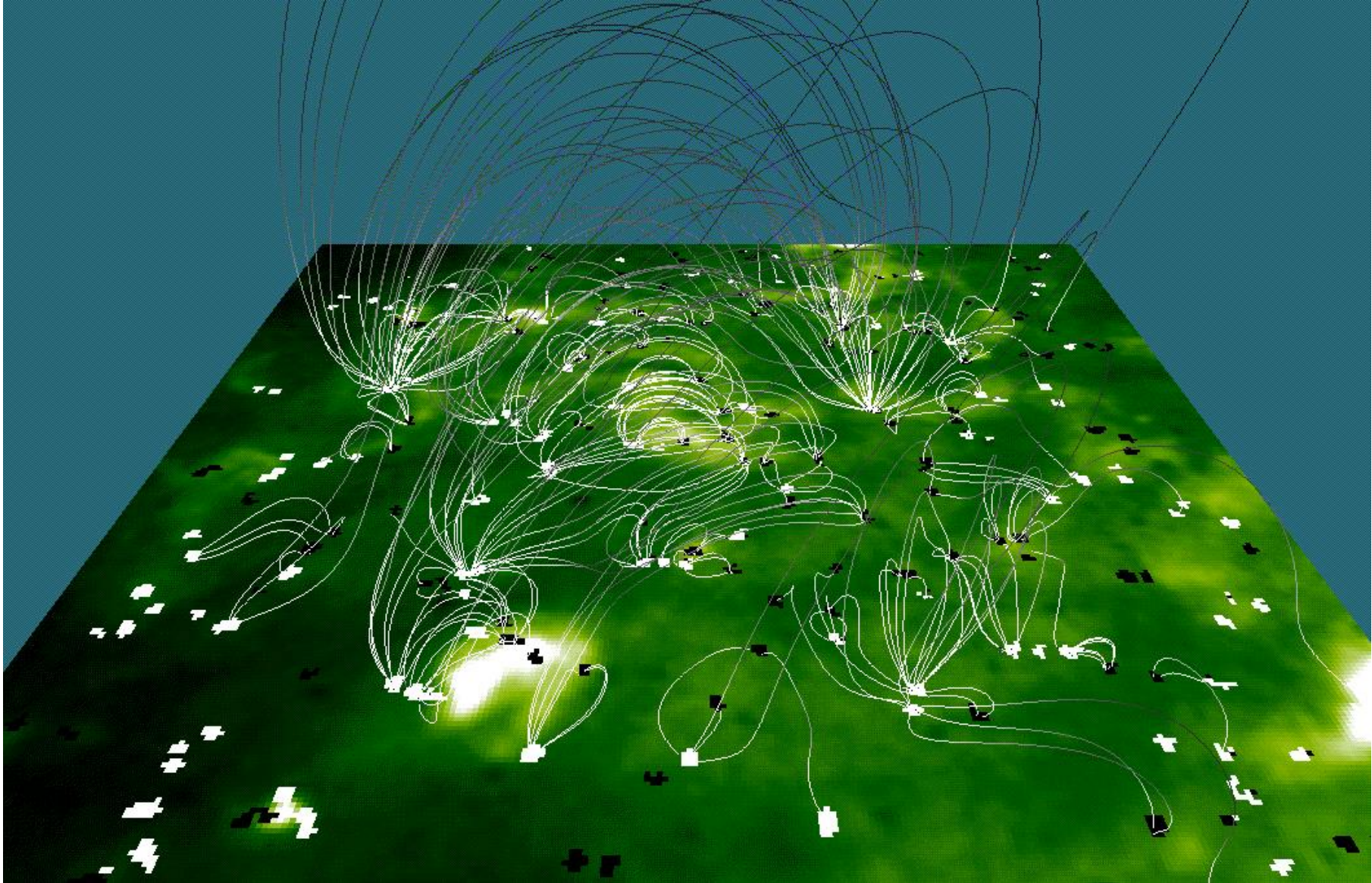
Interaction avec le champ
magnétique terrestre

Le Soleil



Interaction avec le champ
magnétique terrestre

Le Soleil



Taches solaires et champ magnétique

Le Soleil

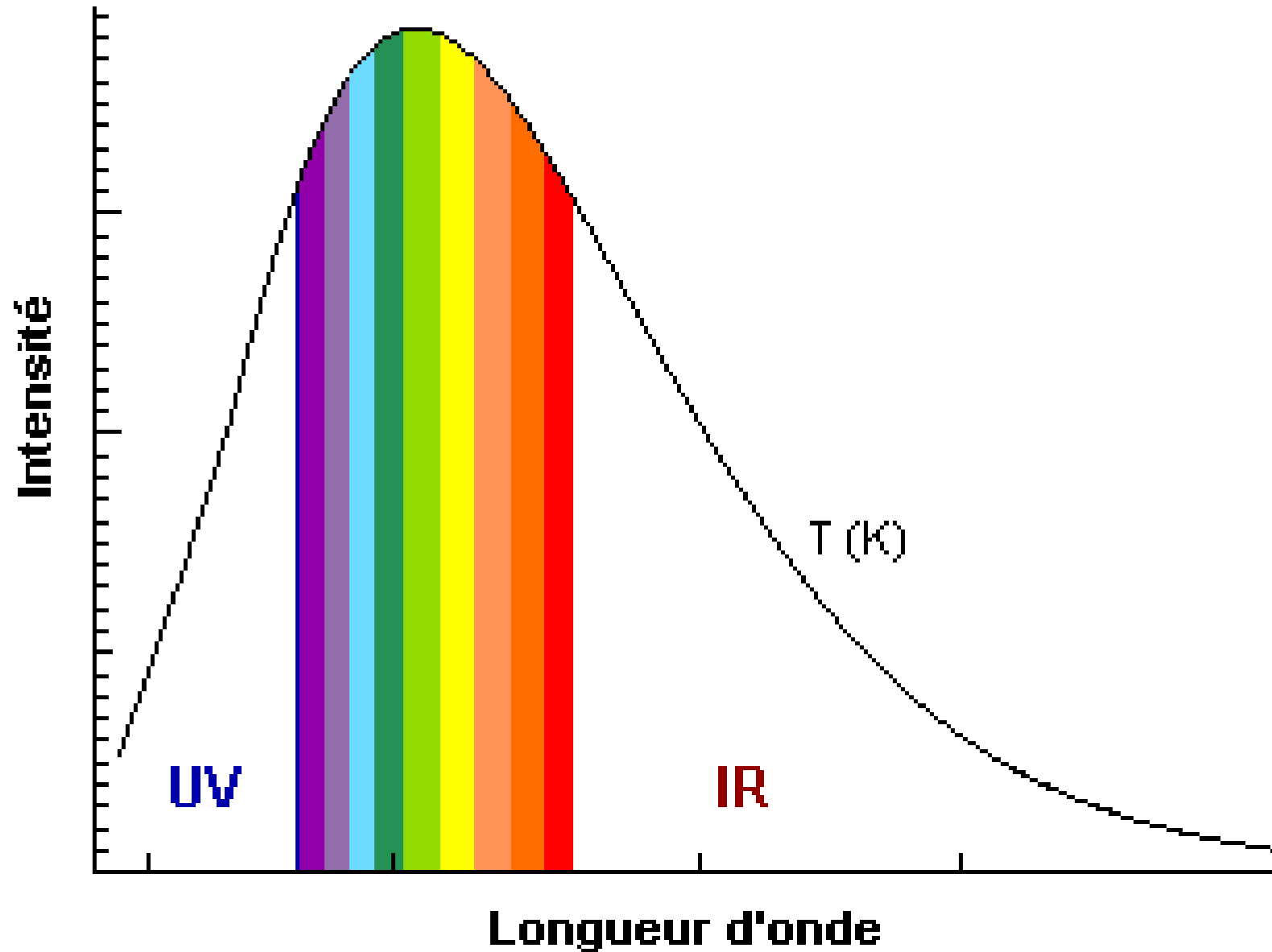
Magnitude

-27

Magnitude absolue
(à 10 parsecs 32,6 a-l)

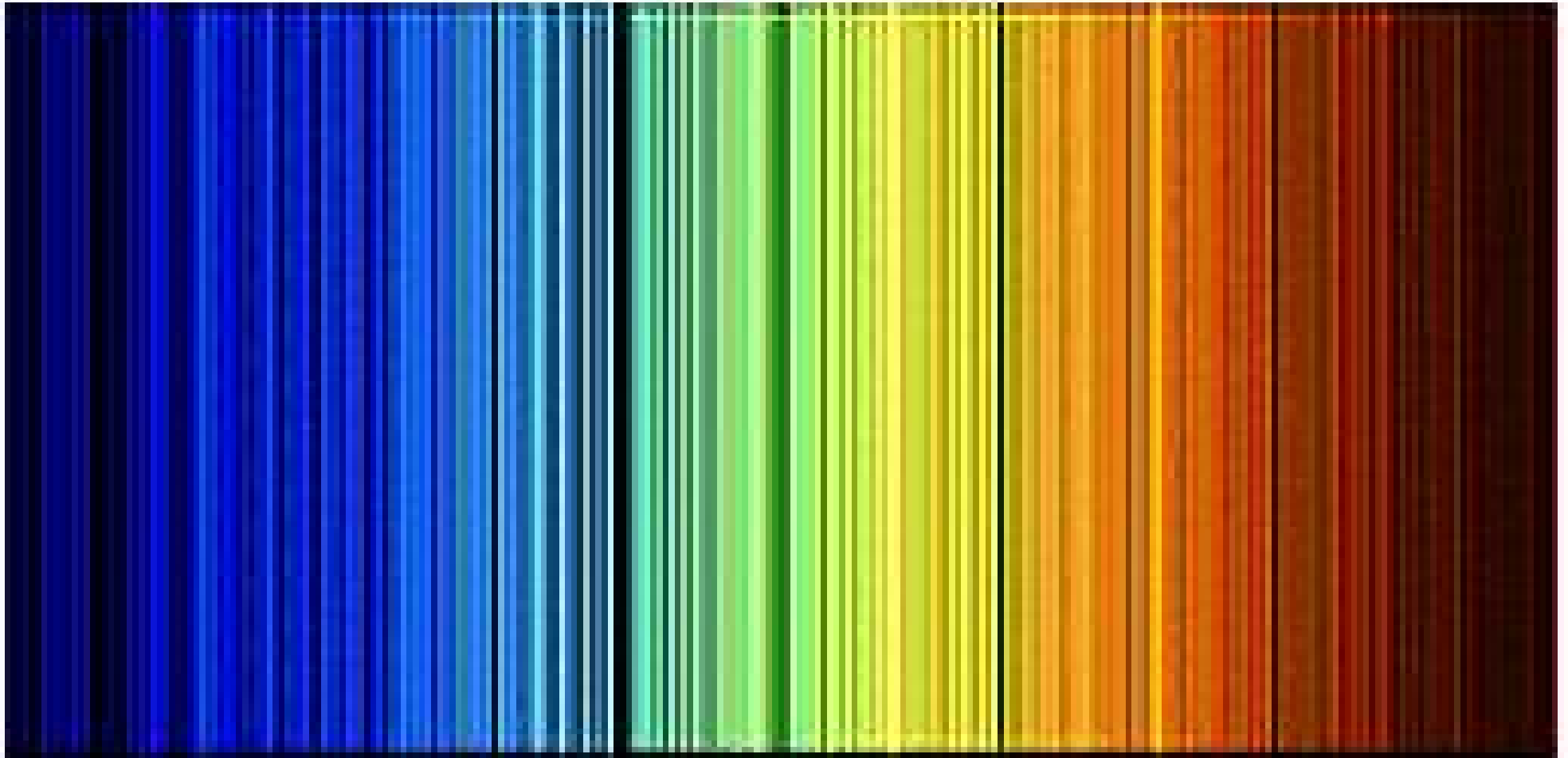
4,83

Le Soleil



Rayonnement

Le Soleil



Spectre du Soleil

Température

En surface
(photosphère)

6000 K

Au centre

15 millions de K

Energie reçue par la Terre

1,4 KW/m²

1 tranche de centrale
nucléaire par km²

Tous les 1000 mètres
un réacteur nucléaire

Energie reçue par la Terre

$1,7 \cdot 10^{14} \text{ KW}$

140 millions de tranches de
centrale nucléaires

Energie

Energie totale
rayonnée par le Soleil

$3,9 \cdot 10^{23}$ KW

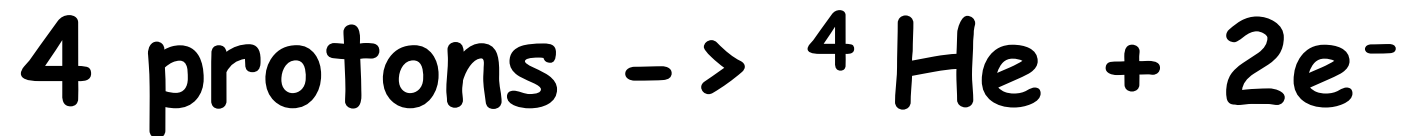
2 milliards de fois
l'énergie reçue par la Terre

Energie

Fusion nucléaire

$$E = mc^2$$

Perte de masse



Perte de masse 0,712%

Energie

La fusion de 1g de H
produit

$6 \cdot 10^{11}$ joules

soit l'équivalent de
80.000 litres d'essence

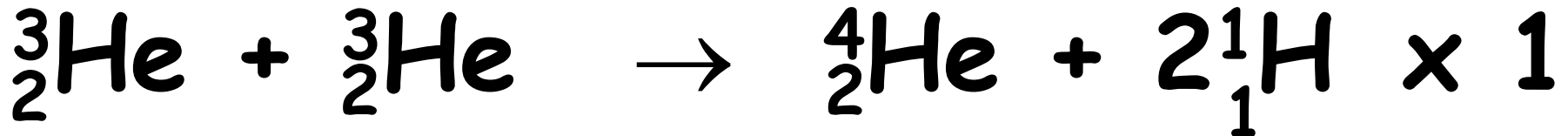
Energie

Le Soleil perd
4 millions de tonnes
par seconde

Energie

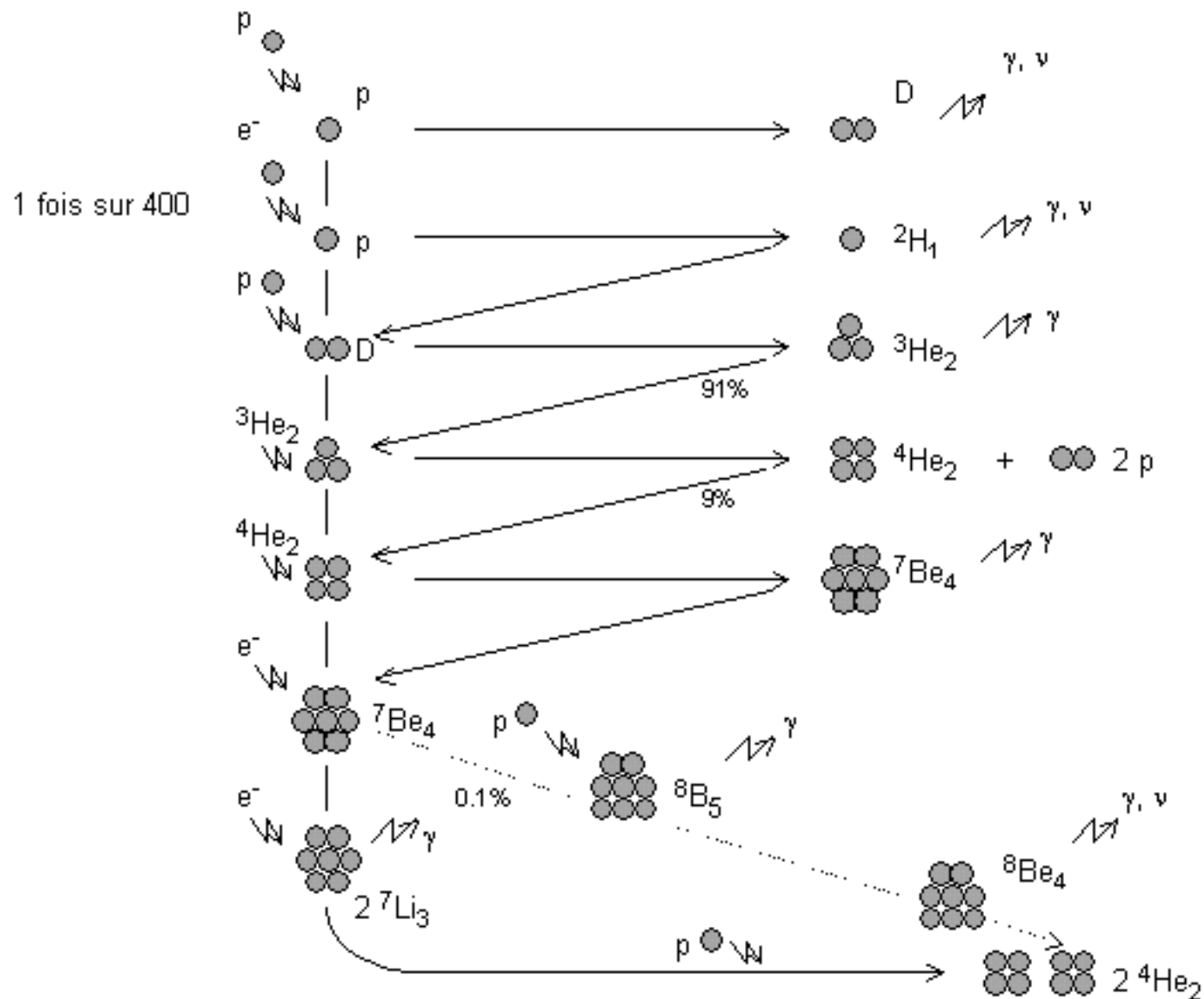
Depuis qu'il existe
environ 5 milliards d'années,
le Soleil a perdu
 $6 \cdot 10^{17}$ tonnes
soit 0,03% de sa masse

Energie



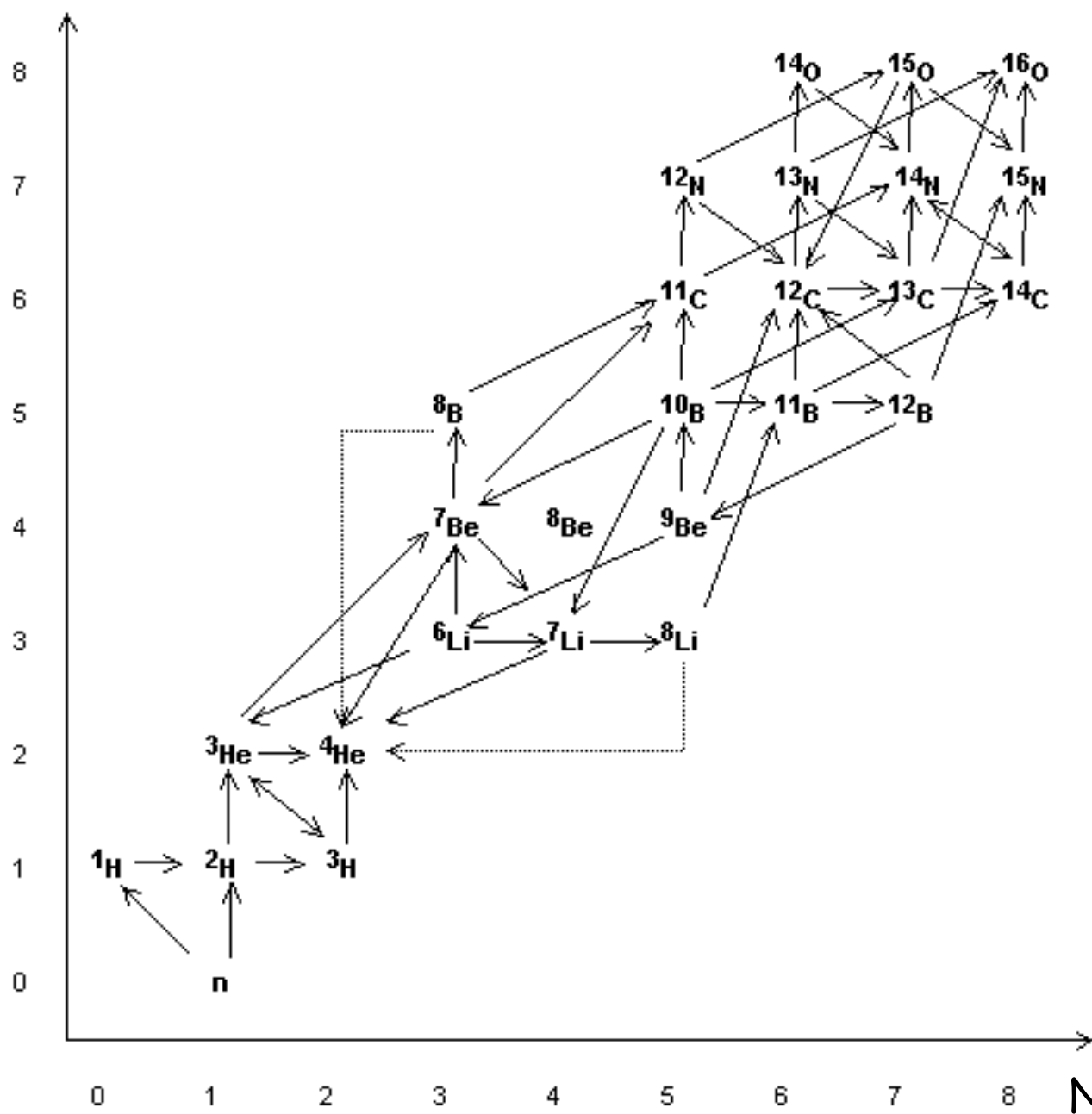
Energie

Le cycle proton-proton



Energie

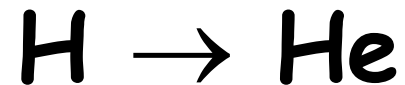
Nbre de
protons



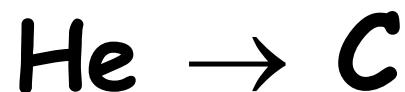
Nbre de neutrons

Avenir du Soleil

Dans 5 milliards d'années,
fin des réactions de fusion



Température interne
(15 millions de K)
insuffisante pour démarrer
la fusion



Avenir du Soleil

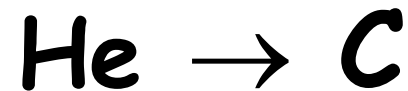
≈ Contraction du Soleil



La température interne
va atteindre 100 millions de K



Démarrage de la fusion



Flash de Hélium
Ejection des couches externes

Avenir du Soleil

Expansion du Soleil au delà de l'orbite
de Vénus



Le Soleil devient une géante rouge
Pendant 1 milliard d'année



Epuisement de l'He
contraction du Soleil
qui ramène au cœur H et He
superficiels qui n'ont pas encore réagit

Avenir du Soleil

≈

Dilatation brutale du Soleil au delà de
l'orbite de Mars



Ejection des couches superficielles

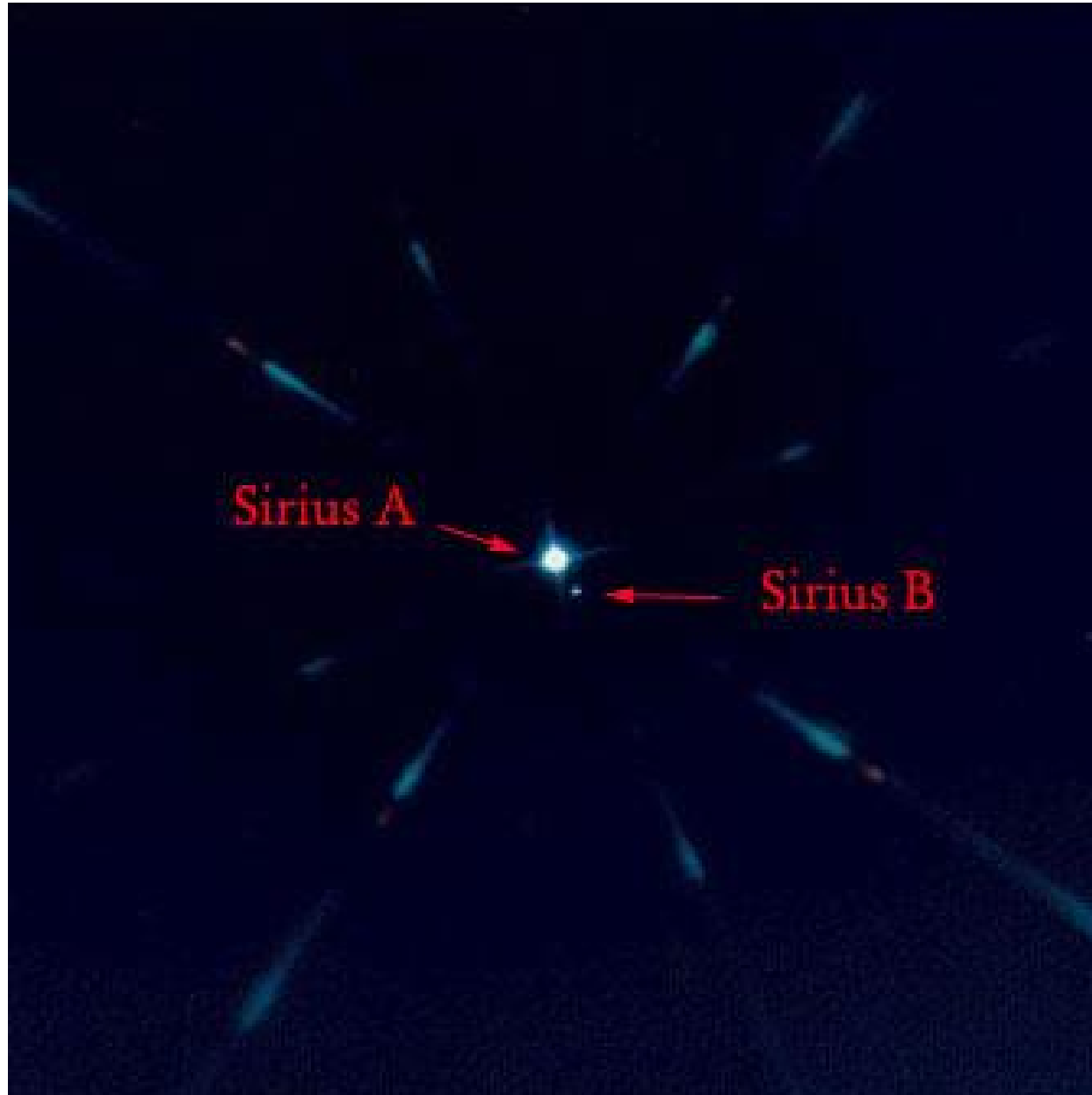


Masse insuffisante du Soleil pour la
fusion $C \rightarrow Fe$



Contraction du Soleil en naine blanche

Avenir du Soleil



Naine blanche - Sirius B

Avenir du Soleil

Sirius B

Naine blanche

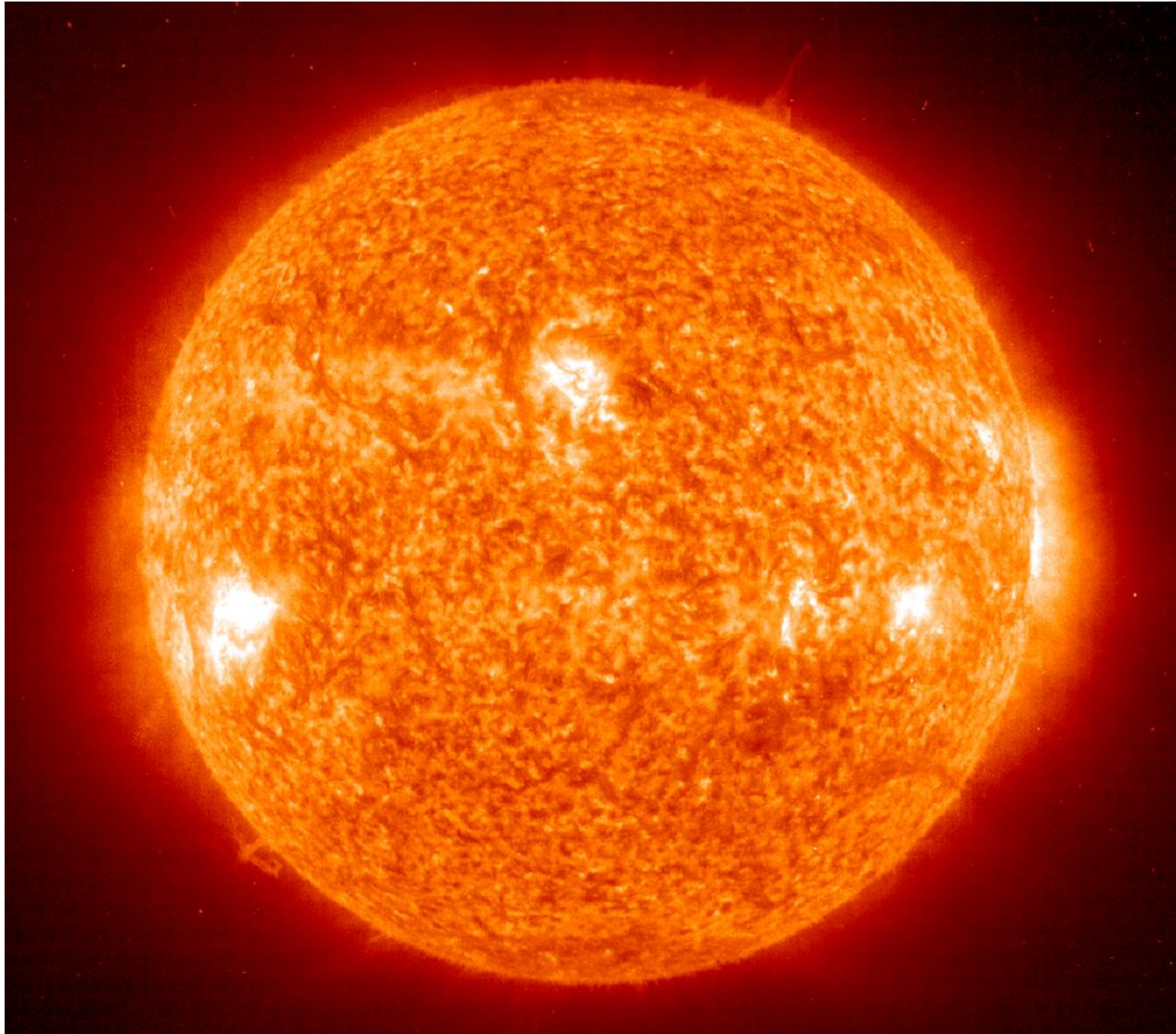
Même masse que le Soleil

Diamètre de 12.000 km (~ Terre)

Densité 2 millions de fois celle du soleil

1 litre pèse 100 tonnes

Le Soleil



Naissance des étoiles



Contraction gravitationnelle
de nuages galactiques

Naissance des étoiles



Contraction gravitationnelle
de nuages galactiques

Naissance des étoiles



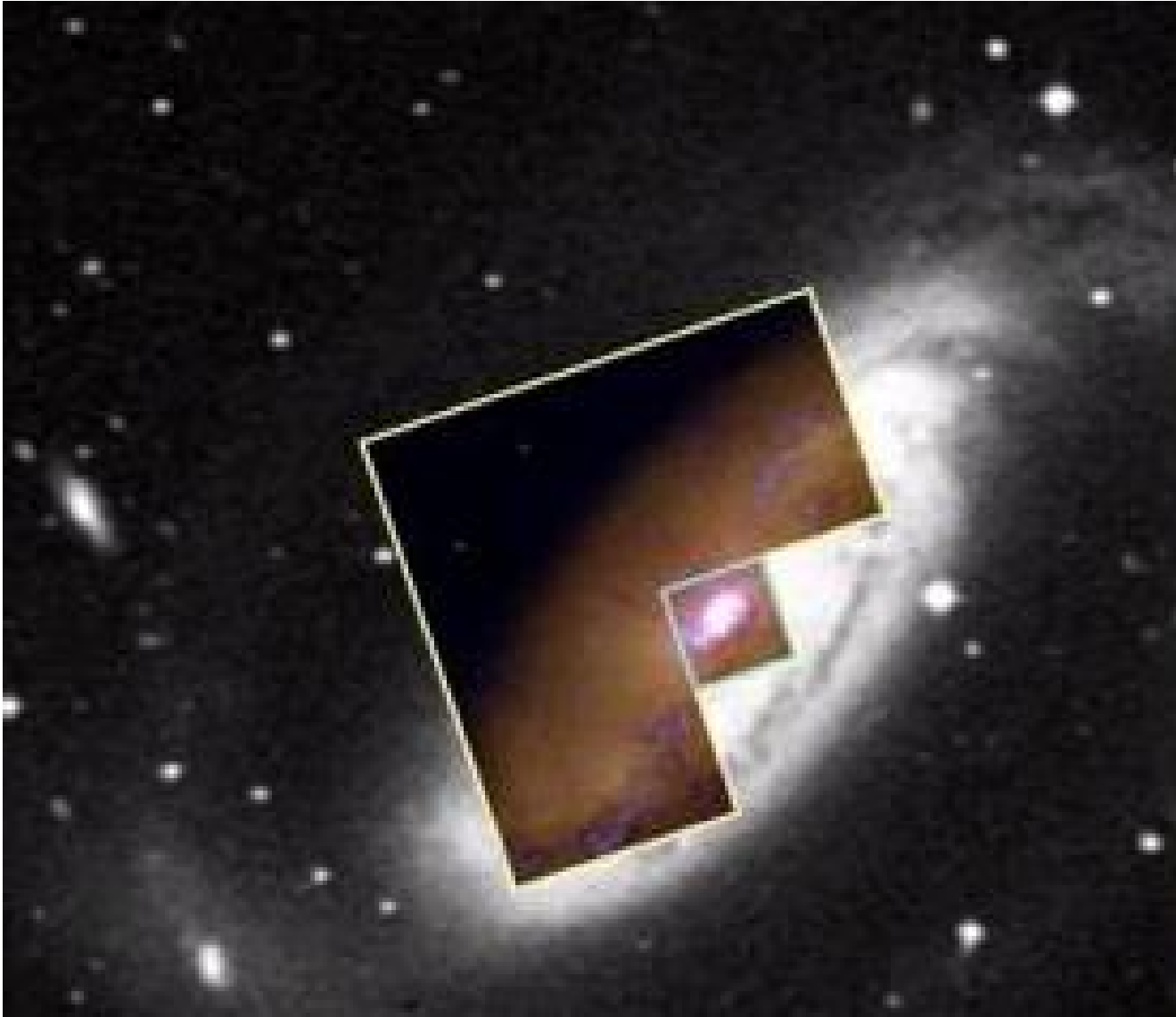
Contraction gravitationnelle
de nuages galactiques

Naissance des étoiles



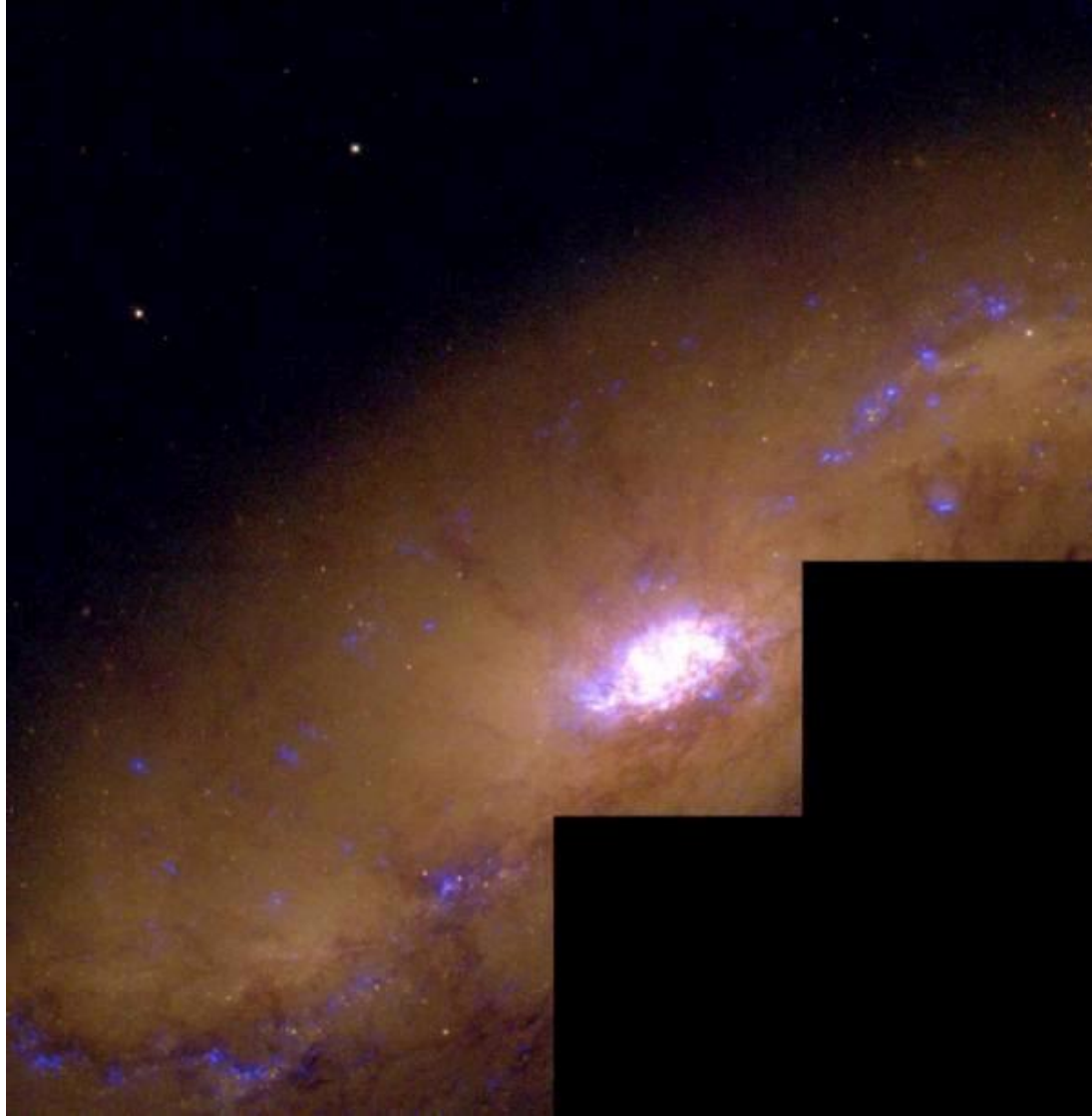
Contraction gravitationnelle
de nuages galactiques

Naissance des étoiles



Contraction gravitationnelle
de nuages galactiques

Naissance des étoiles



Contraction gravitationnelle
de nuages galactiques

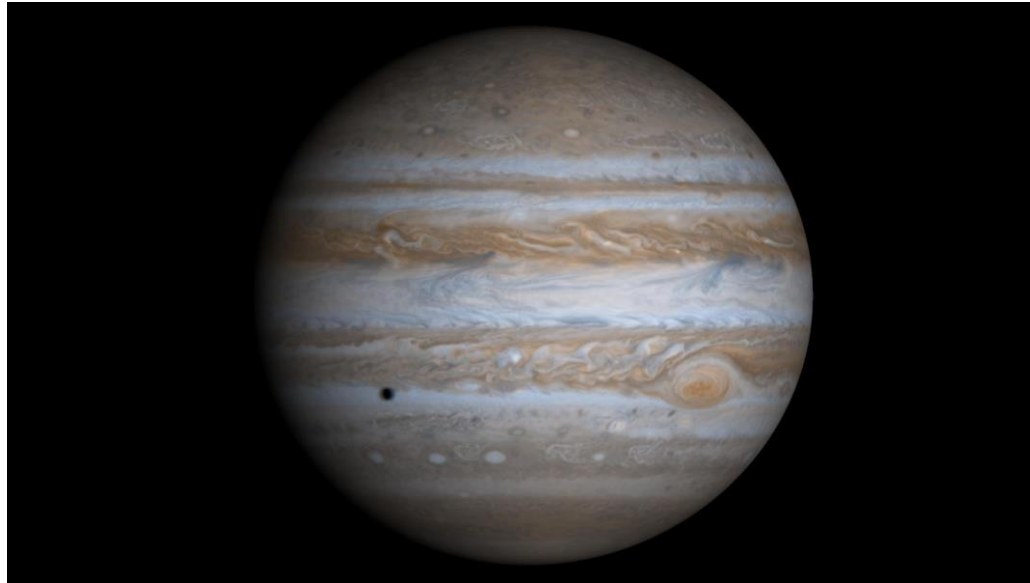
Vie et évolution des étoiles

Dépend de la masse initiale de l'étoile

- $\text{masse} < 1/20 M_{\text{Soleil}}$
- $1/20 M_{\text{Soleil}} < \text{masse} < 1/3 M_{\text{Soleil}}$
- $1/3 M_{\text{Soleil}} < \text{masse} < 8 M_{\text{Soleil}}$
- $\text{masse} > 8 M_{\text{Soleil}}$

masse $< 1/20 M_{\text{Soleil}}$

**Température insuffisante
pour le démarrage
des réactions thermonucléaires**



Exemple : Jupiter ($1/1000^{\text{eme}} M_{\text{Soleil}}$)

masse $< 1/3 M_{\text{Soleil}}$

Réaction $\text{H} \rightarrow \text{He}$

Masse insuffisante



**Température insuffisante
pour démarrer la consommation de He**

$1/3 M_{\text{Soleil}} < \text{masse} < 8M_{\text{Soleil}}$

Réaction $\text{H} \rightarrow \text{He}$



Réaction $\text{He} \rightarrow \text{C}$

Géante rouge



**Masse insuffisante
pour démarrer la consommation de C**



Naine blanche

$$1/3 M_{\text{Soleil}} < \text{masse} < 8M_{\text{Soleil}}$$

Réaction $\text{H} \rightarrow \text{He}$



Réaction $\text{He} \rightarrow \text{C}$

Géante rouge



Masse insuffisante
pour démarrer la consommation de C



Naine blanche

masse $> 8M_{\text{Soleil}}$

Réaction $H \rightarrow He$



**Réaction $He \rightarrow C$
Géante rouge**

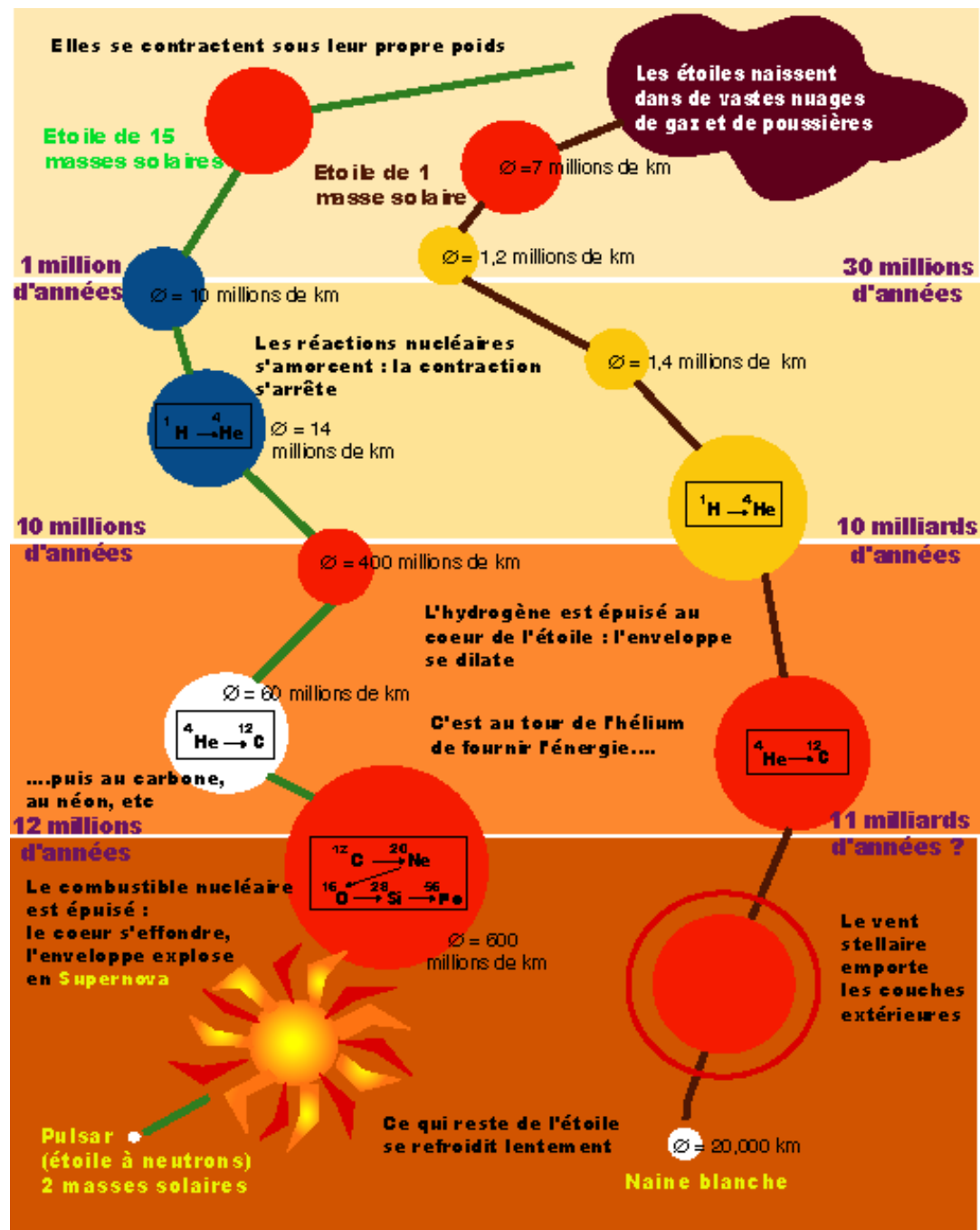


Réactions $C \rightarrow Ne \rightarrow O \rightarrow Si \rightarrow Fe$

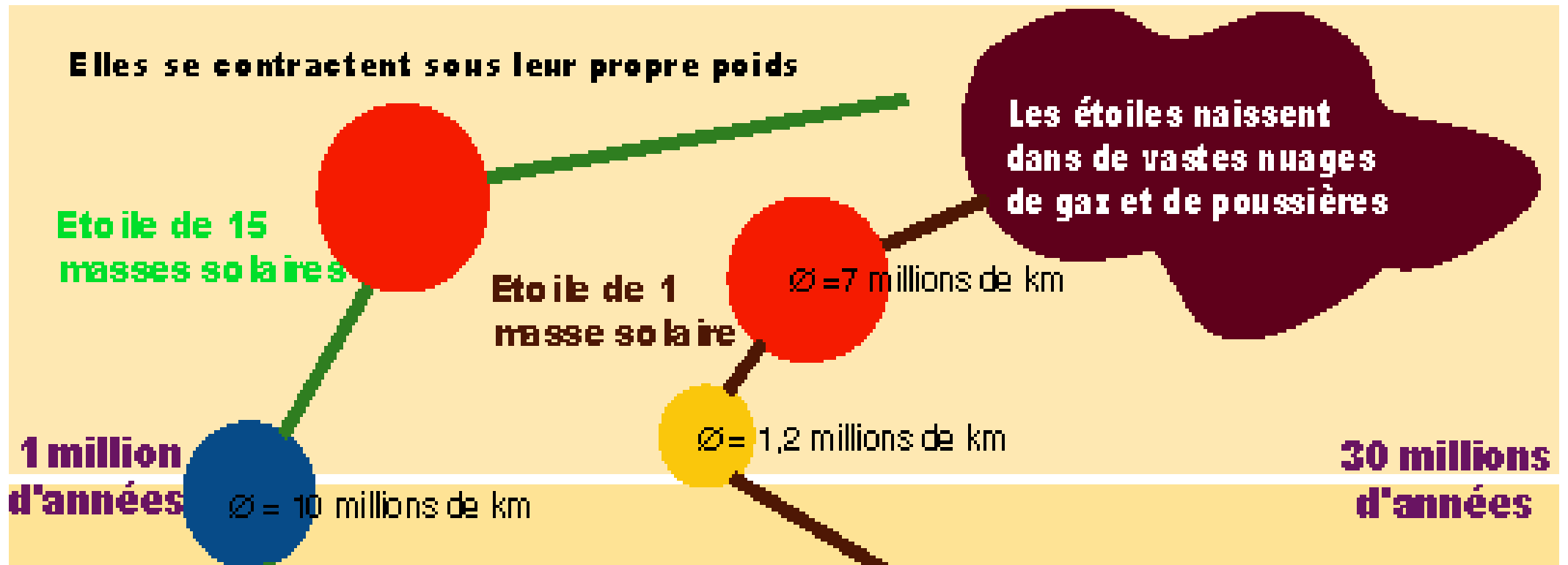


Supernova

Evolution des étoiles

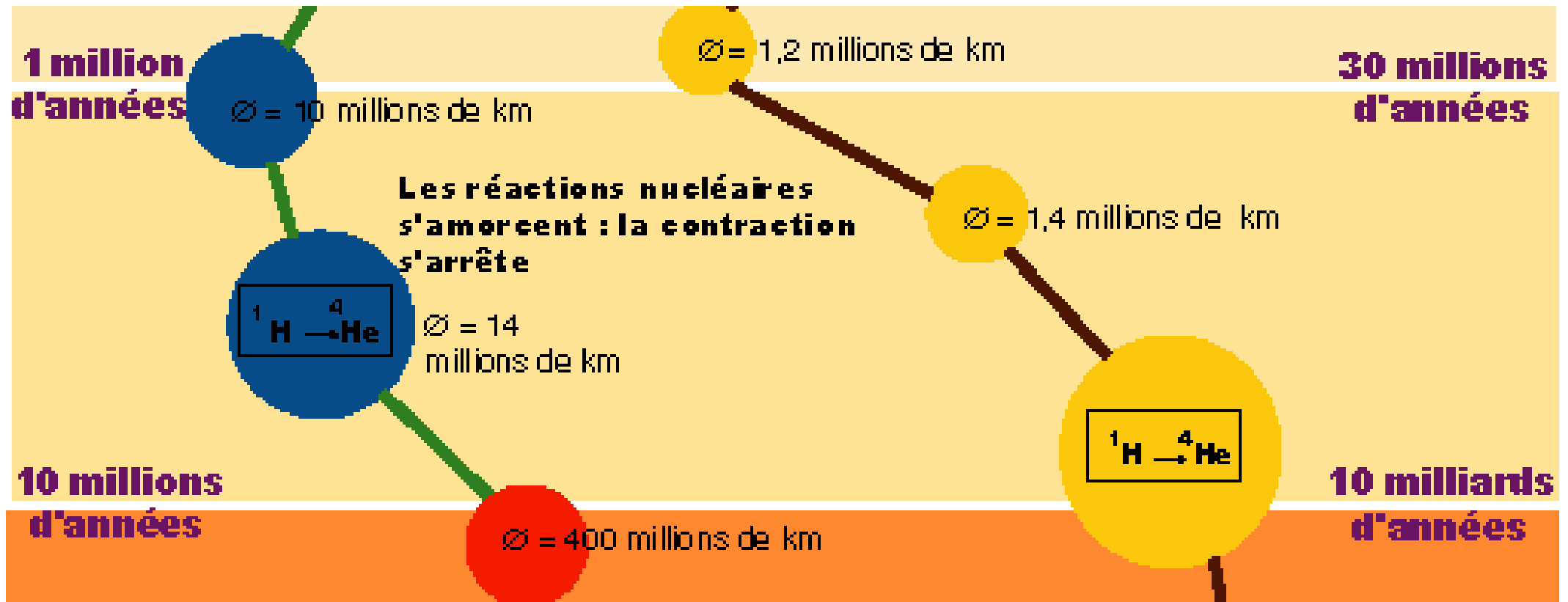


Evolution des étoiles



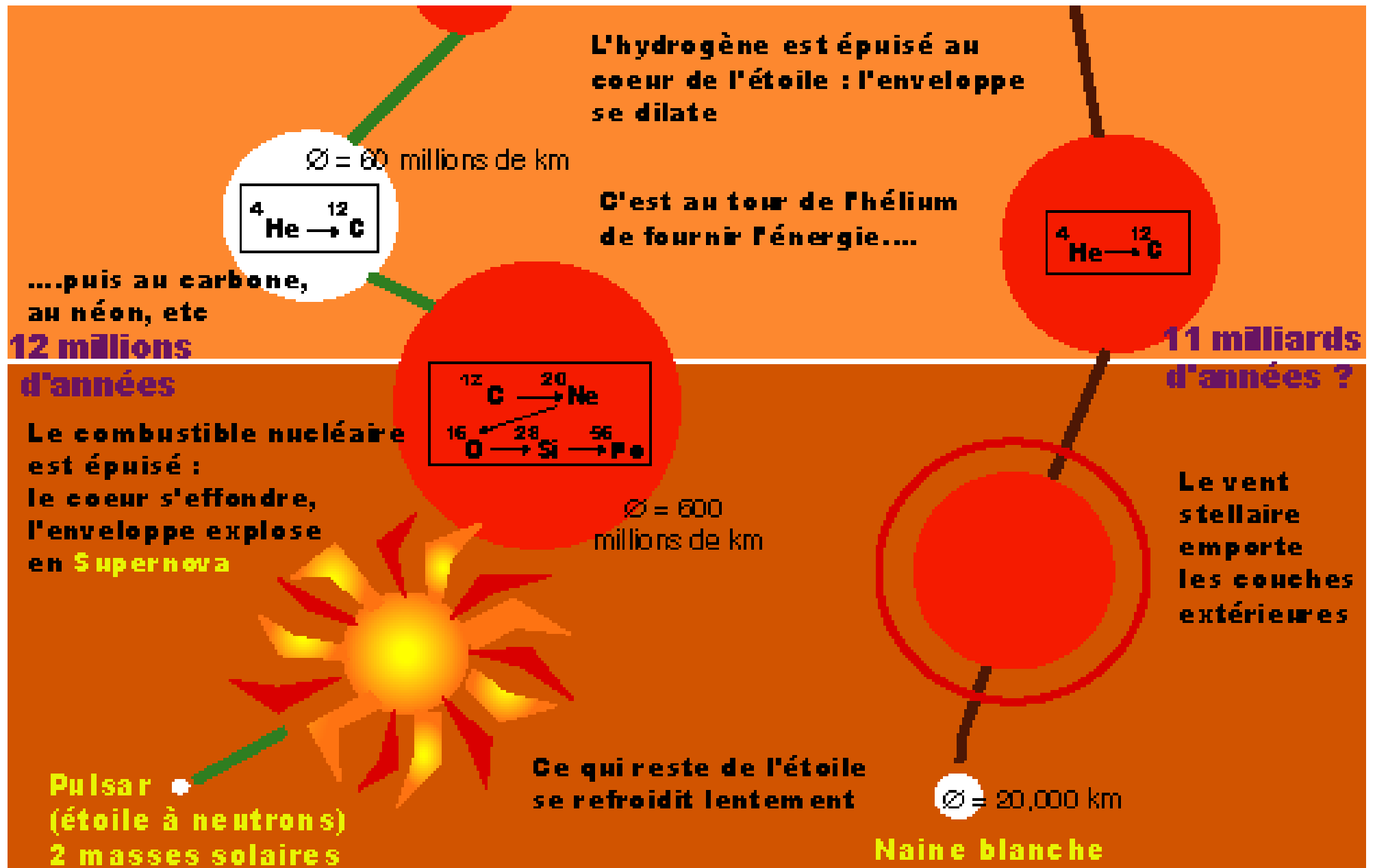
Naissance

Evolution des étoiles



Vie de l'étoile

Evolution des étoiles



Fin de l'étoile

Evolution des étoiles

La masse de l'étoile ne reste
pas constante

- Vent solaire
- Ejections de couche lors de transitions réactionnelles



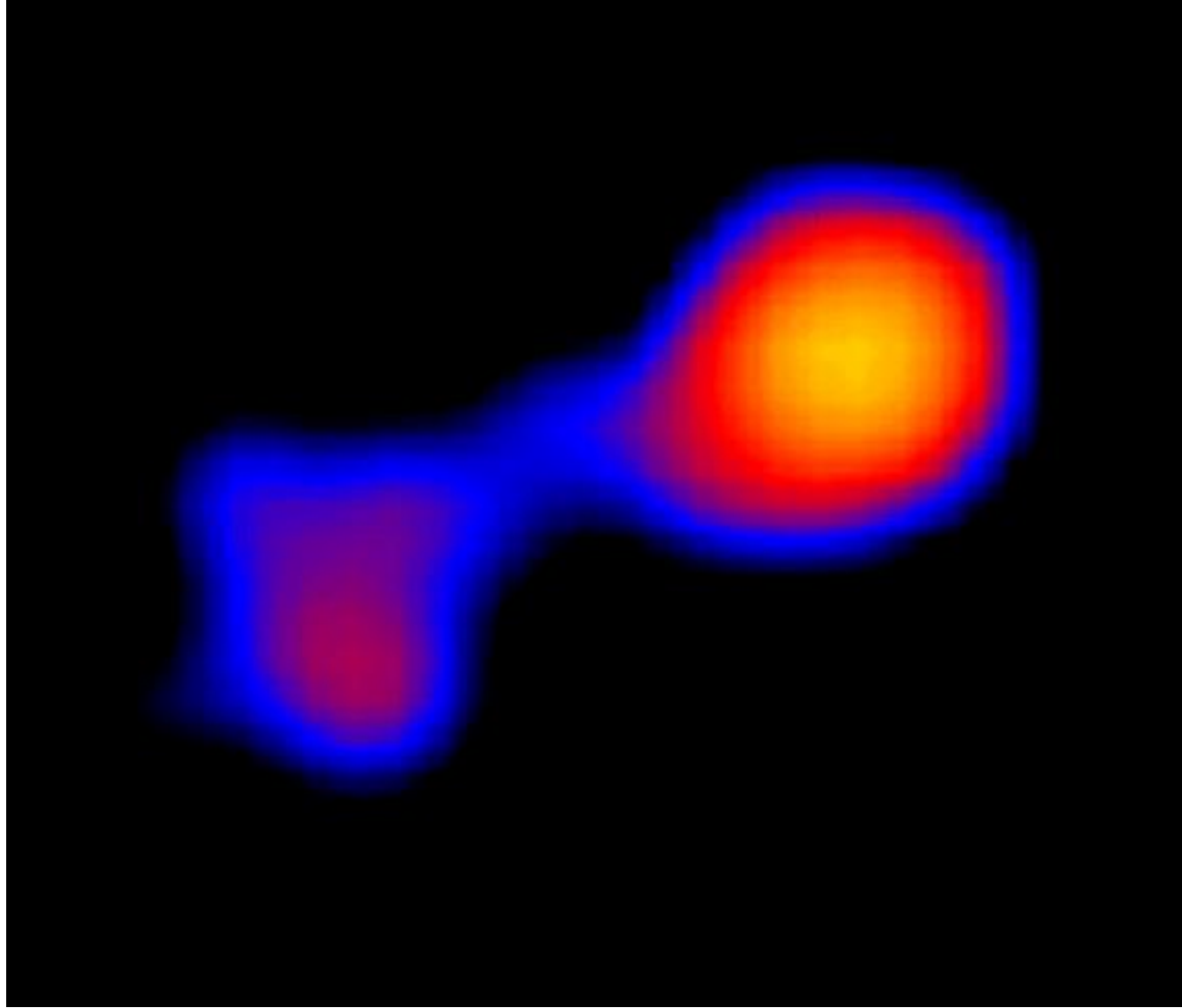
Evolution parfois complexes

Evolution des étoiles



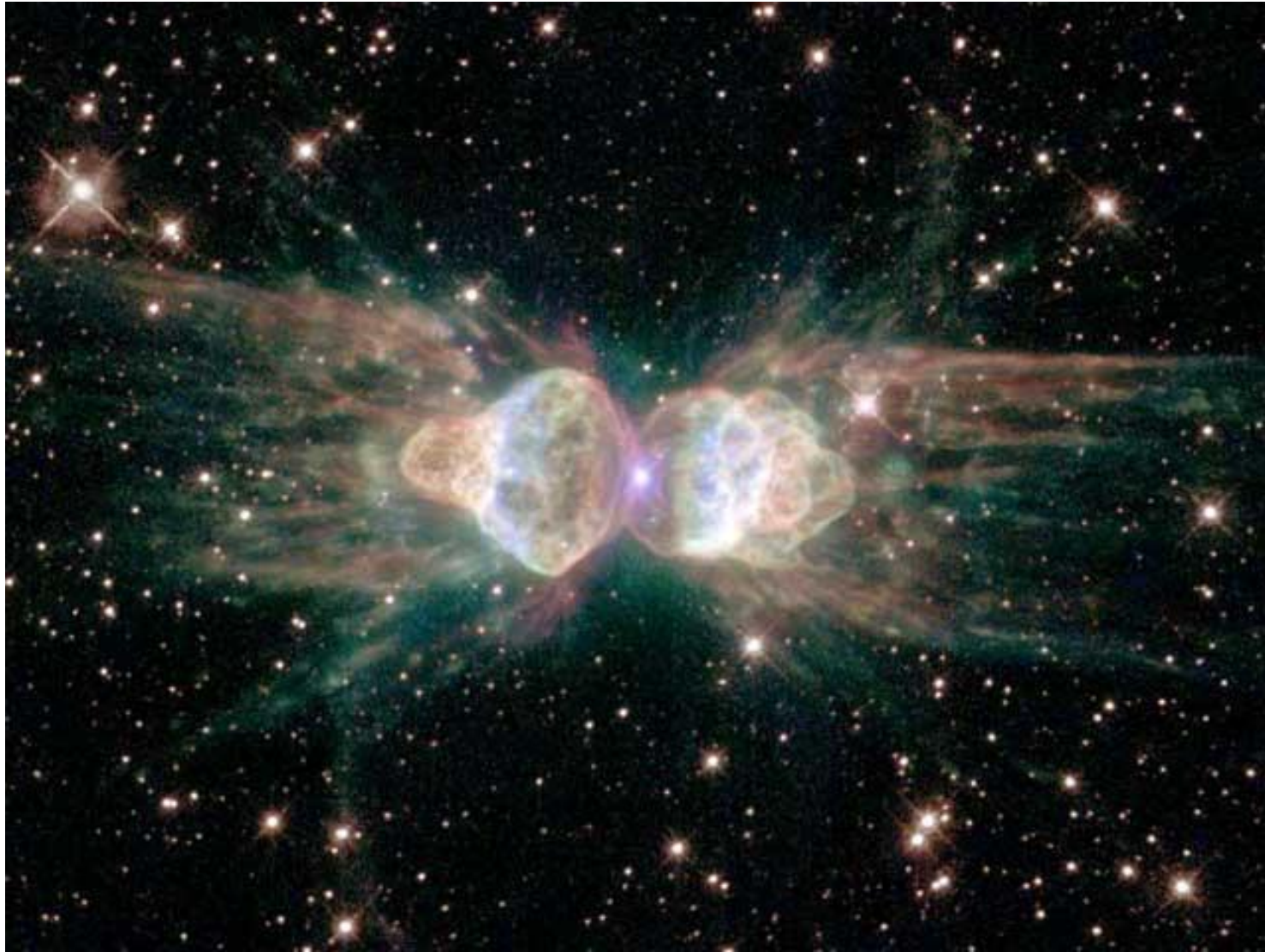
Echange de matière dans les
systèmes stellaires multiples

Evolution des étoiles



Etoile variable Mira Ceti

Evolution des étoiles



Etoiles instables
Nova récurrentes

Evolution des étoiles



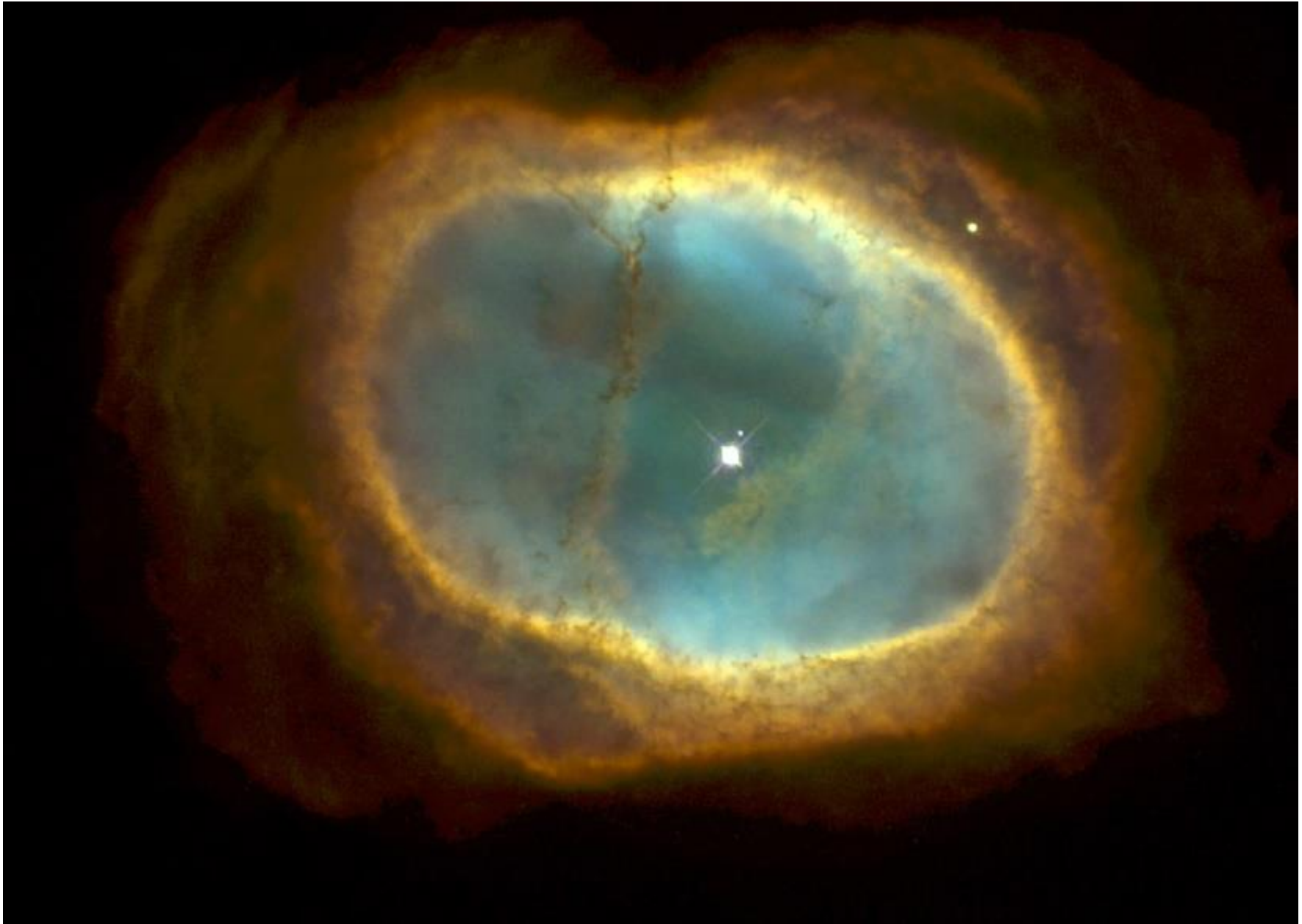
Supernovae, novae, étoiles instables
→ Ejection de matière

Evolution des étoiles



Nébuleuses

Evolution des étoiles



Nébuleuses

Evolution des étoiles



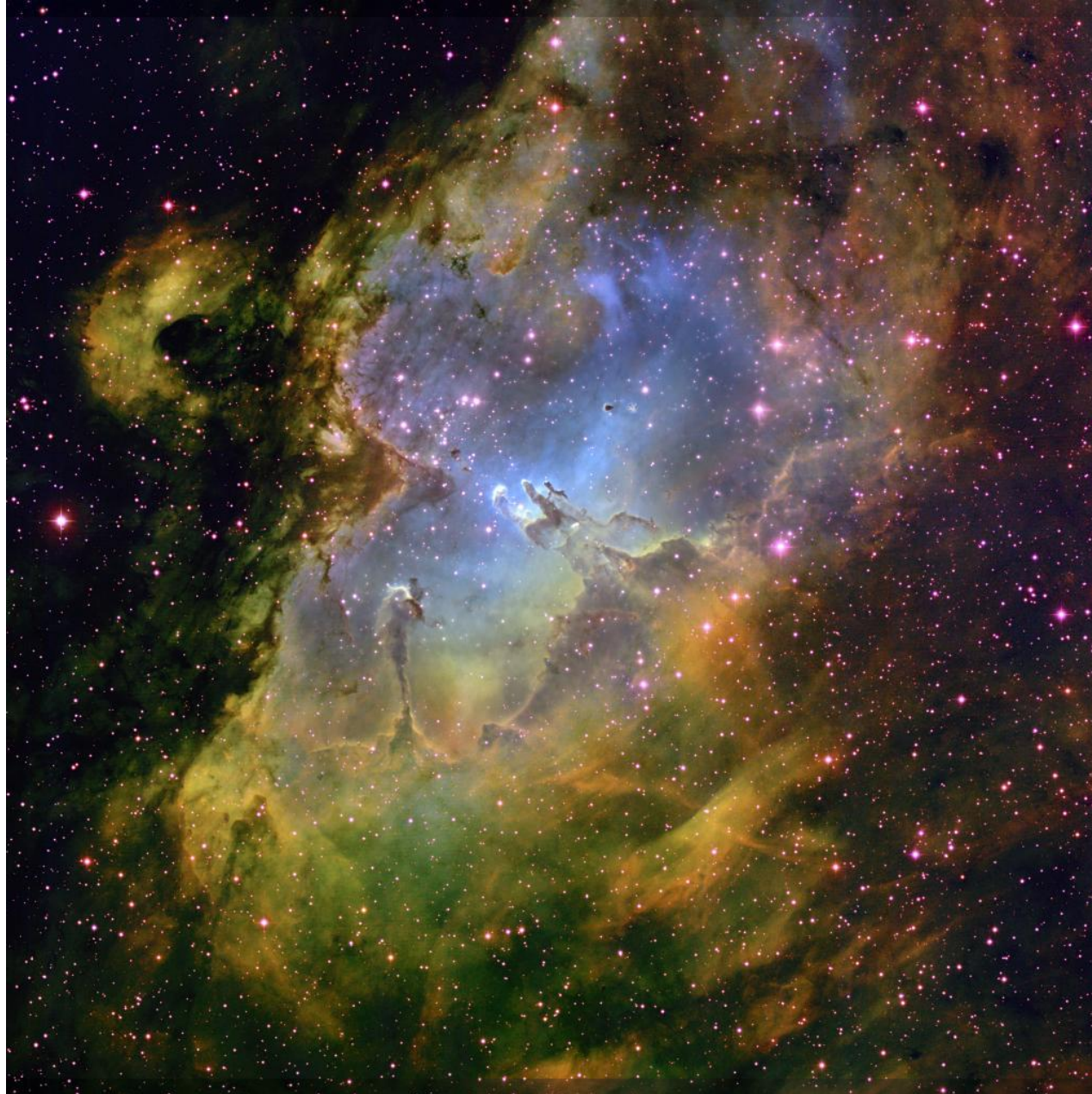
Nébuleuses

Evolution des étoiles



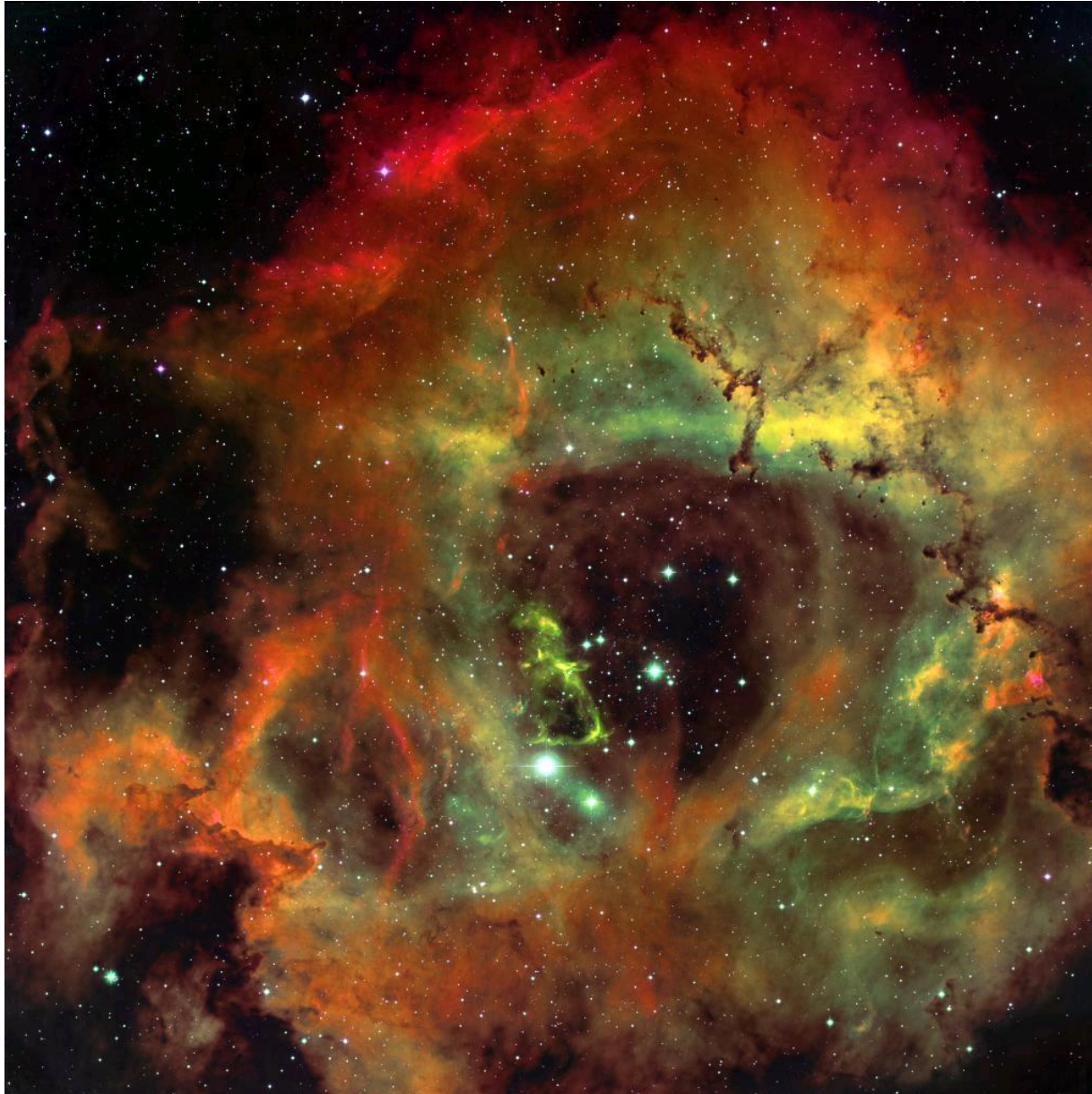
Nébuleuses

Evolution des étoiles



Nébuleuses

Evolution des étoiles



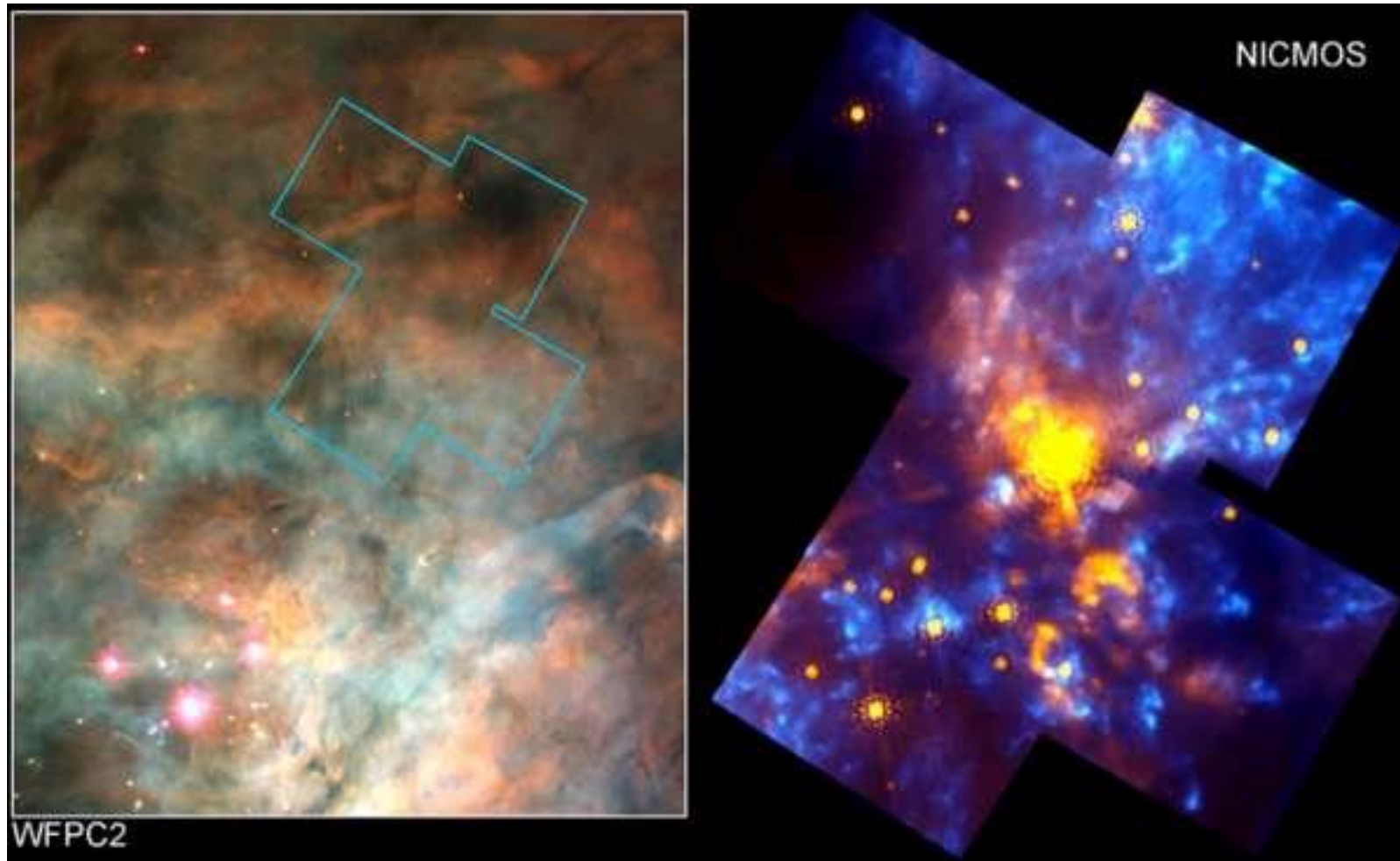
Nébuleuses

Evolution des étoiles

Au début de l'Univers
uniquement H, He, Li
(nucléo-synthèse primordiale)

Tous les éléments
plus massiques que Li
ont été créés
au coeur des étoiles

Naissance des étoiles et des planètes



Initialement nuages de H, He et Li
puis nuages de H, He, C, O, N, Fe

Naissance des étoiles et des planètes



Nous sommes des poussières d'étoiles