

Le soleil

& Iter

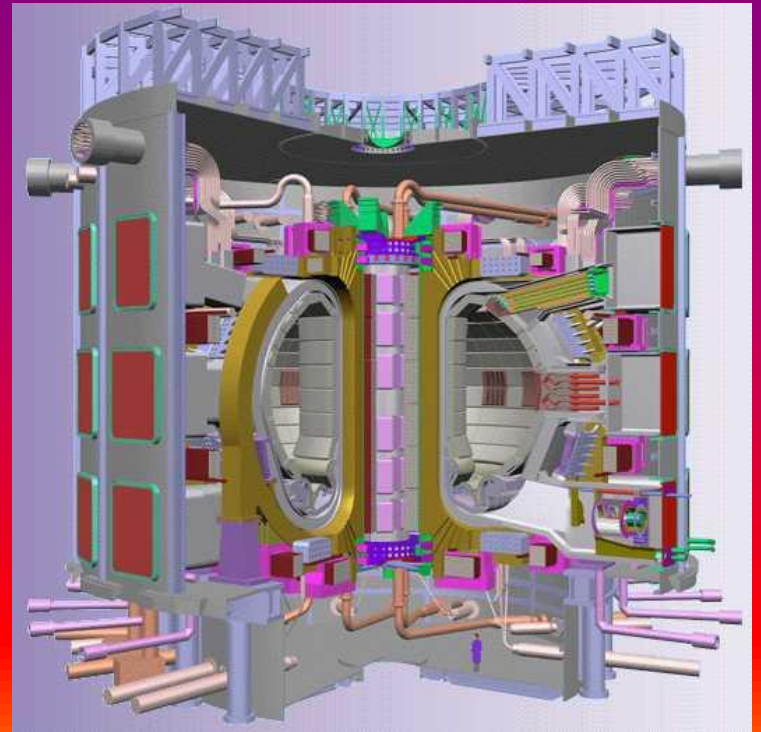


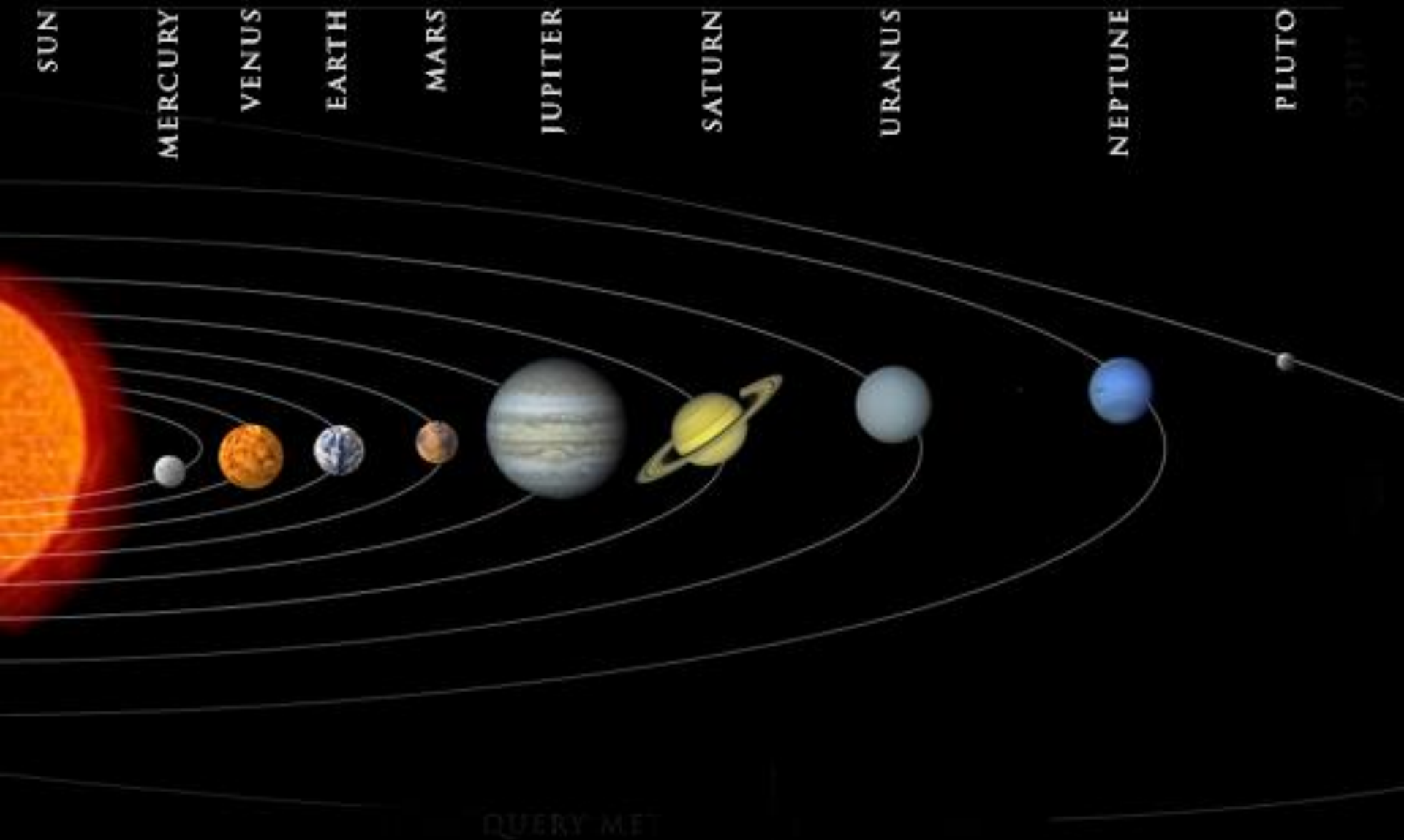
Association d 'astronomie loi 1901

31 Avenue de l 'Etoile

44500 La Baule Escoublac

TEL : 02 40 15 30 93





Notre système solaire

Comment connaît-on le soleil ?

Intérieur	Héliosismologie - Phénomènes d'oscillations. Flux des neutrinos.
Masse	Observation du mouvement des planètes
Rayon	Mesures échos radar.
Rayonnement	Mesuré par satellites hors atmosphère terrestre.
Age	Mesure de la radioactivité terrestre et des météorites.
Histoire	Observation des autres étoiles.

Comment observe t-on le soleil ?

De la Terre

En orbite à quelques centaines de km de la Terre

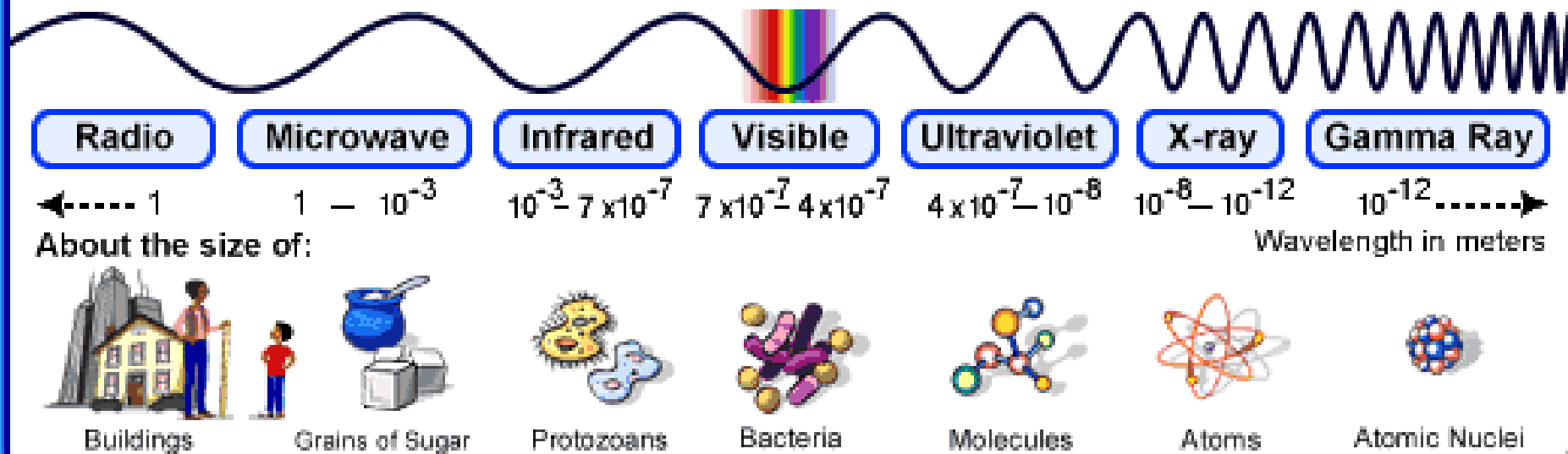
En orbite Encore plus loin !

Avec des instruments spécifiques

Dans des longueurs d 'ondes différentes

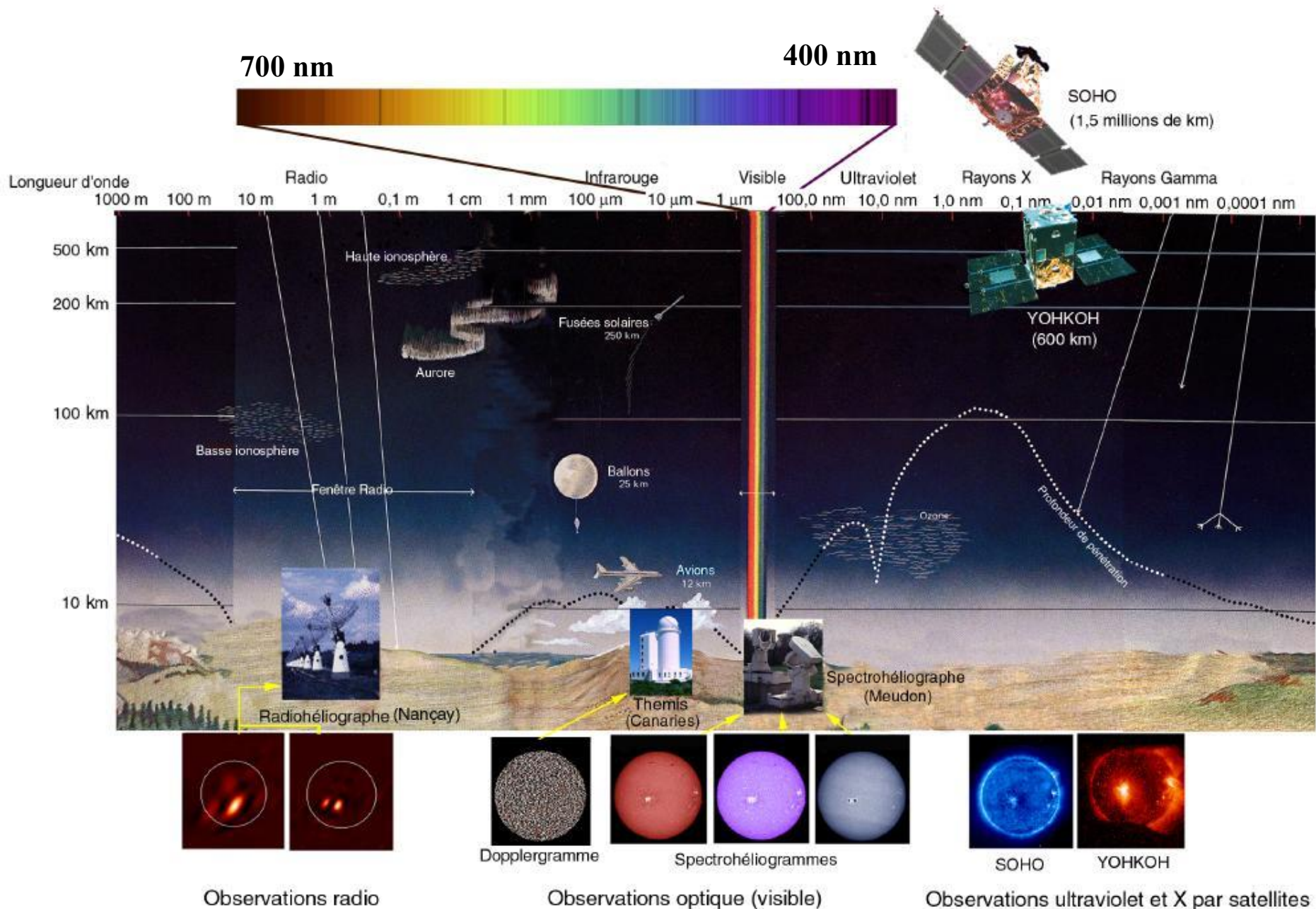
L'œil ne voit pas grand chose ...

The Electromagnetic Spectrum

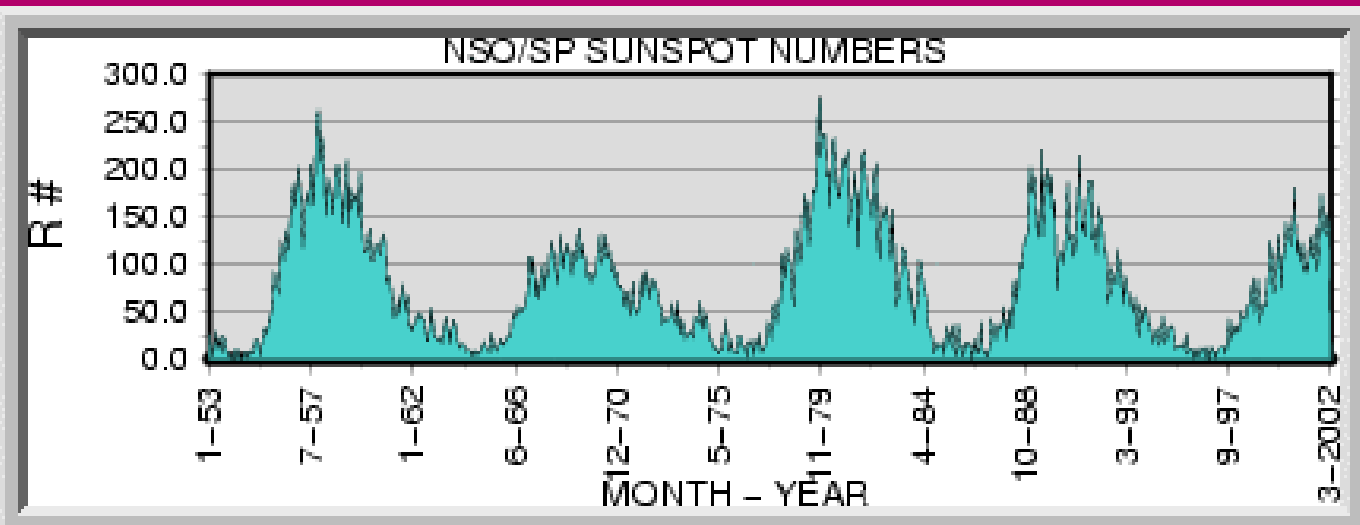
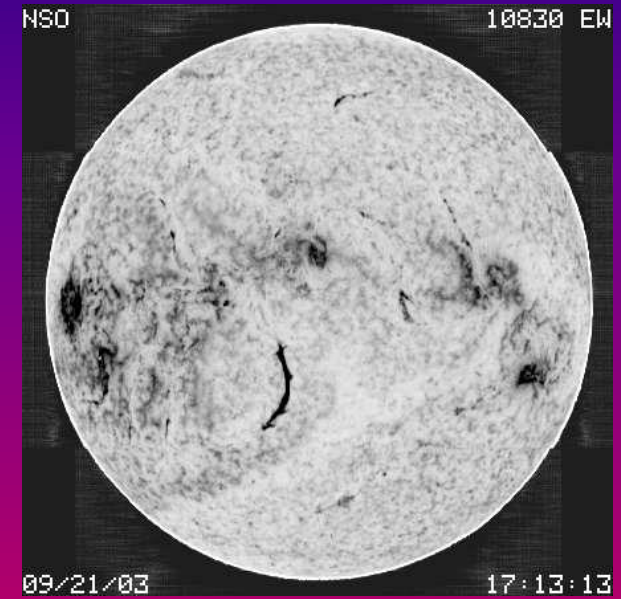


Energie du rayonnement

Impact de notre atmosphère



Observatoire Kitt Peak



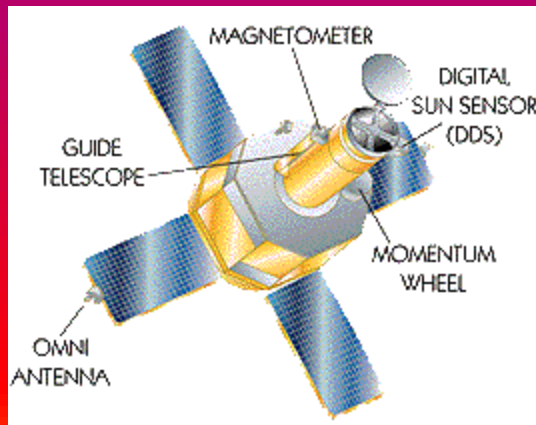
Satellite Trace

Lancement fin 1997

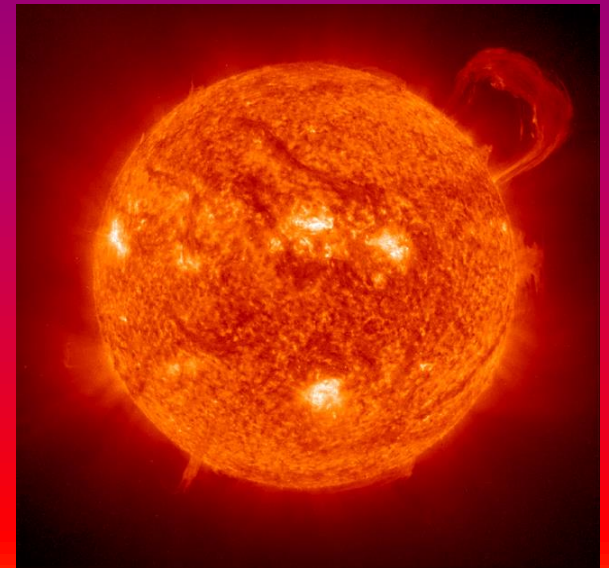
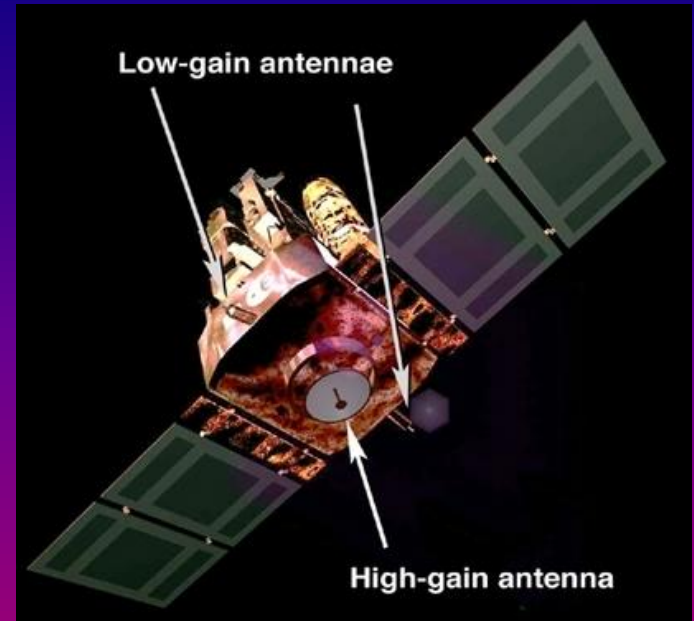
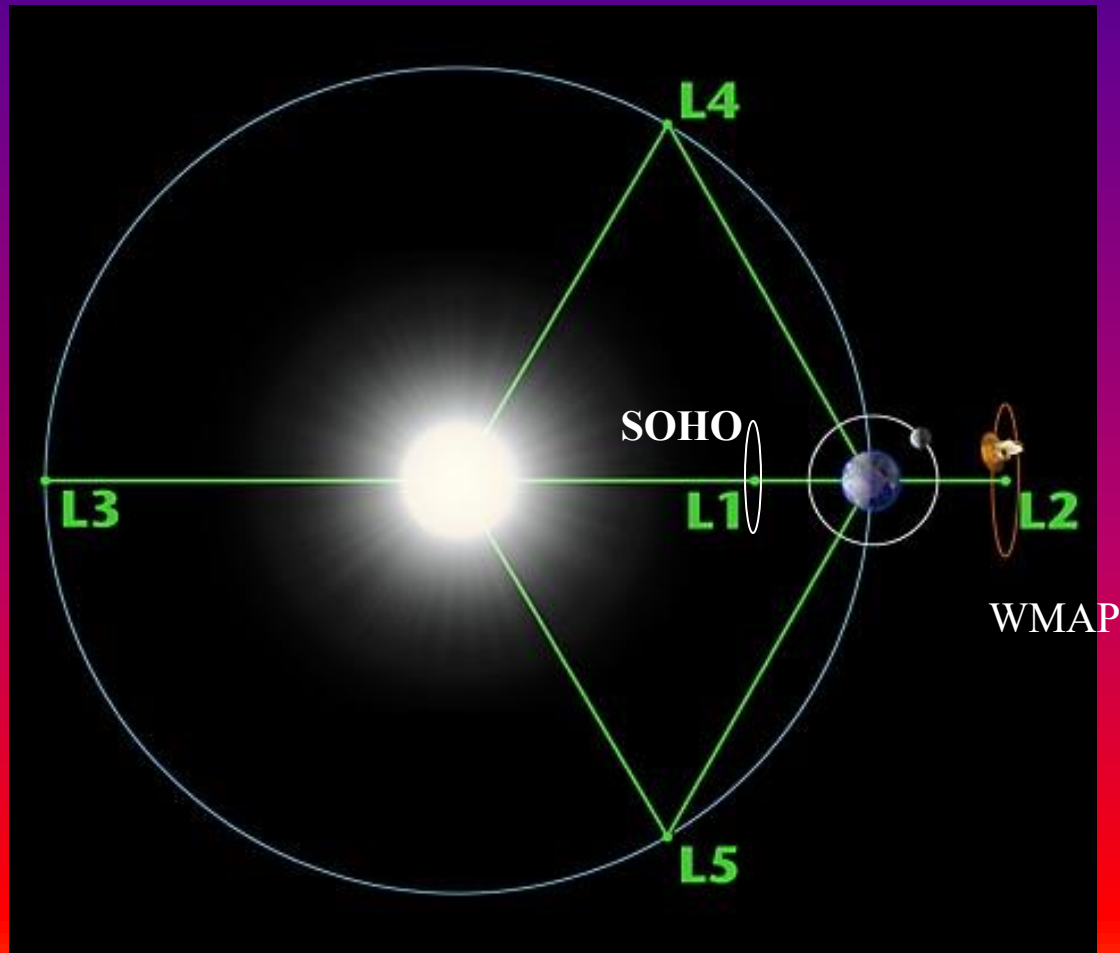
Orbite basse 600 x 650 km

Analyse magnétique du soleil

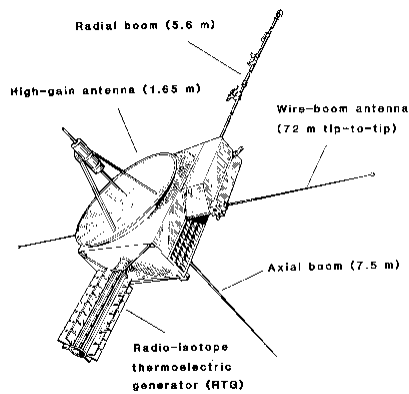
→ mouvements de plasma



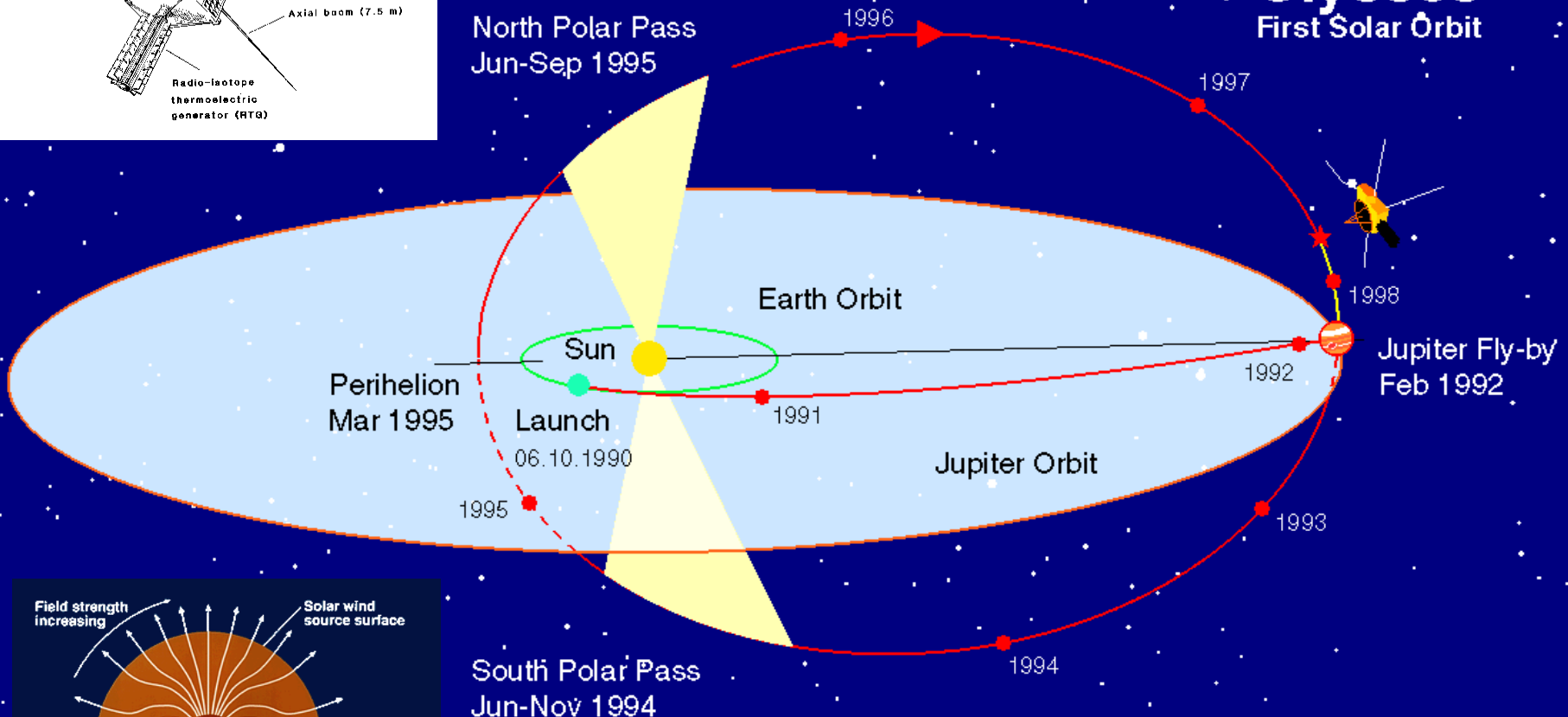
Satellite SOHO



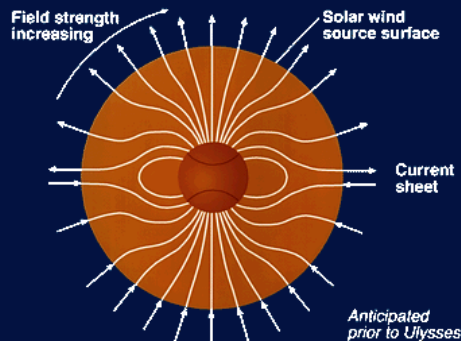
Satellite Ulysses



Ulysses First Solar Orbit



★ Ulysses position on 01.10.1997



Quelques chiffres

Masse $\approx 99,9 \%$ masse du système solaire

Diamètre ≈ 109 fois celui de la Terre

Densité moyenne $\approx 1,4$ (Eau = 1 , Terre $\approx 5,5$)

Température surface (Photosphère) ≈ 5700 K

Température centre ≈ 15 millions K

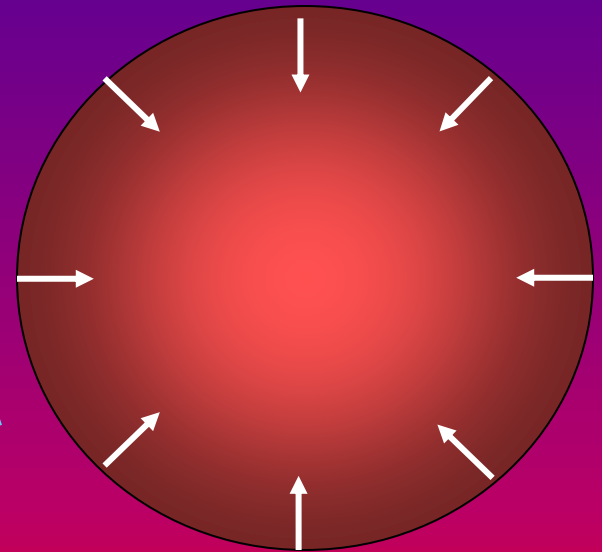
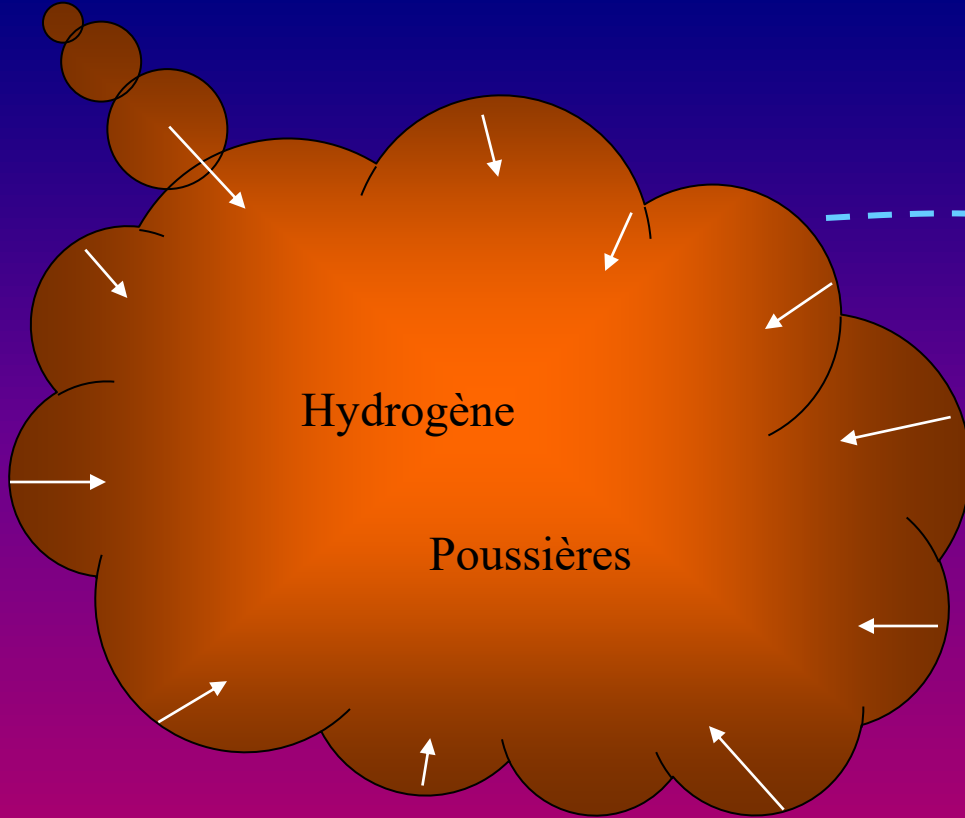
Rotation : 26 jours à l'équateur - 37 jours aux pôles.

Cycle magnétique : 11 ans

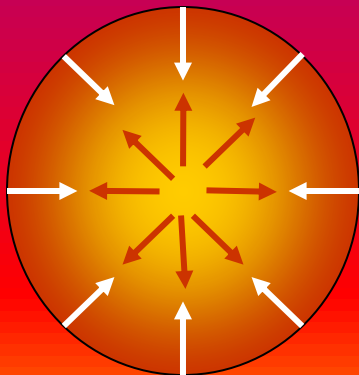
Révolution dans la galaxie ≈ 250 millions années

Age ≈ 5 milliards d'années

Naissance du soleil



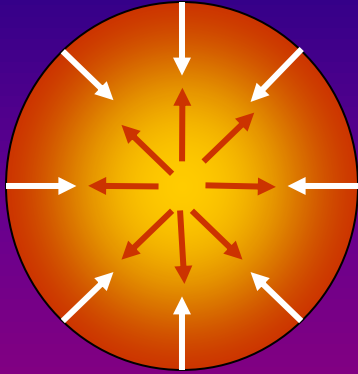
Fusion



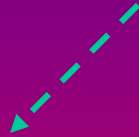
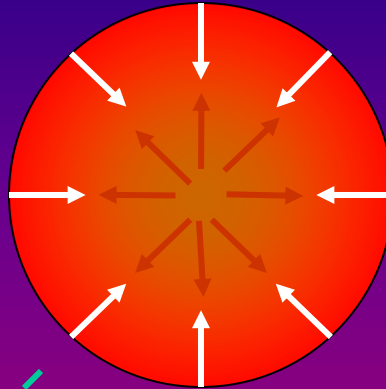
Force gravitationnelle = Pression thermique

Fin du soleil

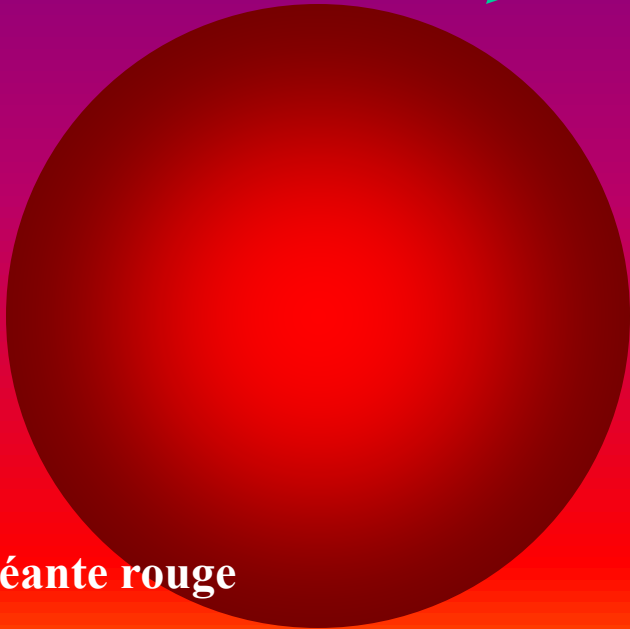
Fusion ${}^1\text{H} \longrightarrow {}^4\text{He}$



Fusion ${}^4\text{He} \longrightarrow {}^{12}\text{C}$



Géante rouge



Nébuleuse planétaire



Quelques chiffres

Rayonnement solaire : 4×10^{20} MW

Puissance centrale nucléaire Flamanville : 2 x 1300 MW

Puissance centrale nucléaire du Bugey : 4 x 900 MW

Puissance centrale Cordemais : 3100 MW

Consomme 140 T fuel & 200 T charbon / heure

Puissance consommée par un TGV : 6 à 9 MW

Combustion totale d'un « soleil charbon » en 5000 ans.

Derniers chiffres ...

Chaque seconde, le soleil transforme :

600 millions de tonnes d'hydrogène en

596 millions de tonnes d'hélium

Chaque seconde, le soleil éjecte :

2 millions de tonnes de matière dans l'espace

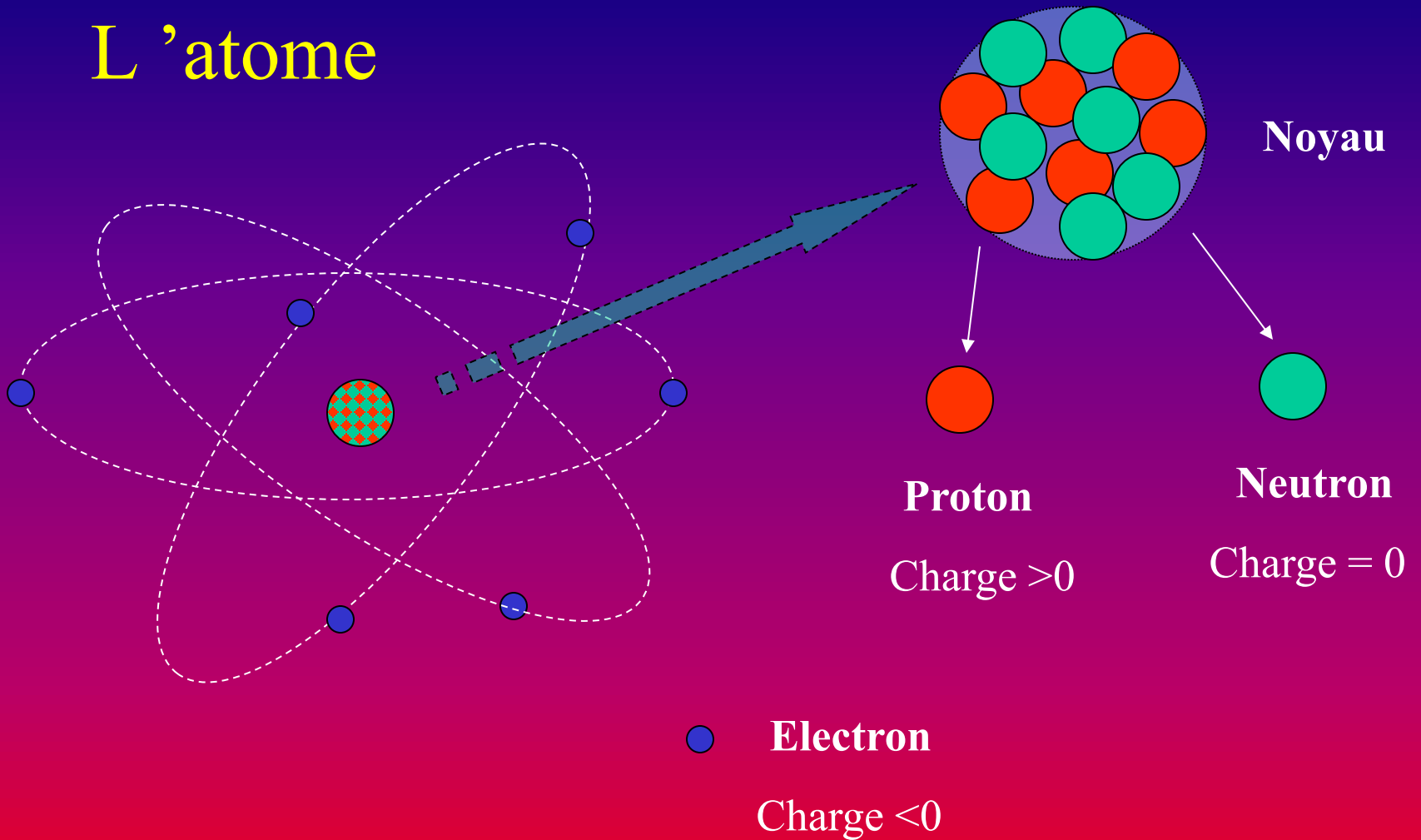
Composition du Soleil

	Nb Atomes	Masse
Hydrogène	92,1 %	75 %
Hélium	7,8 %	25 %
+		
Oxygène	Carbone	Azote
Néon		
Magnésium	Fer	Silicium



PLASMA

L 'atome



Le nombre de protons définit l 'élément

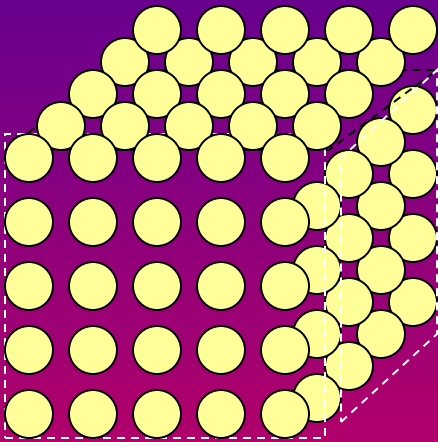
Classification périodique des éléments

	I.A																VIII.A	
1	H 1	II.A											III.A	IV.A	V.A	VI.A	VII.A	He 2
2	Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
3	Na 11	Mg 12	III.B	IV.B	V.B	VI.B	VII.B	VIII.B			I.B	II.B	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
4	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
5	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
6	Cs 55	Ba 56	La 57	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
7	Fr 87	Ra 88	Ac 89	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Uun 110	Uuu 111	Uub 112	Uut 113	Uuq 114	Uup 115	Uuh 116	Uus 117	Uuo 118

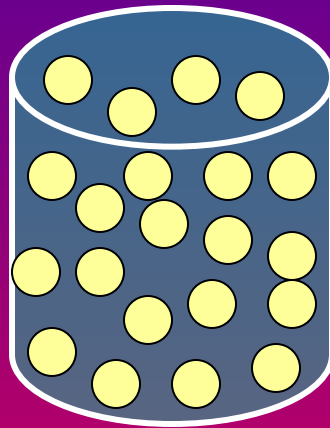
6	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
7	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103

Les 4 états de la matière

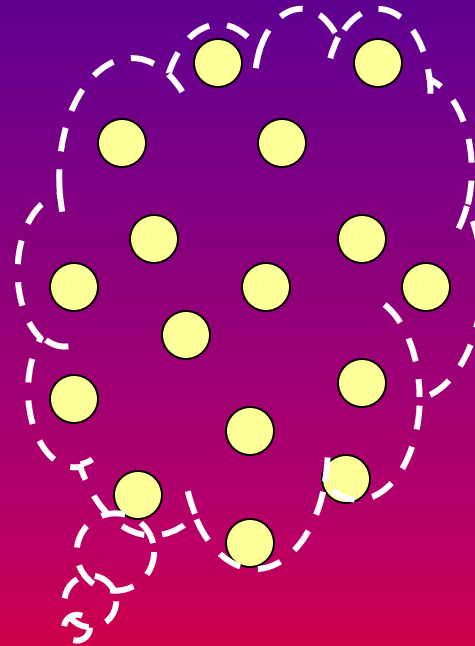
SOLIDE



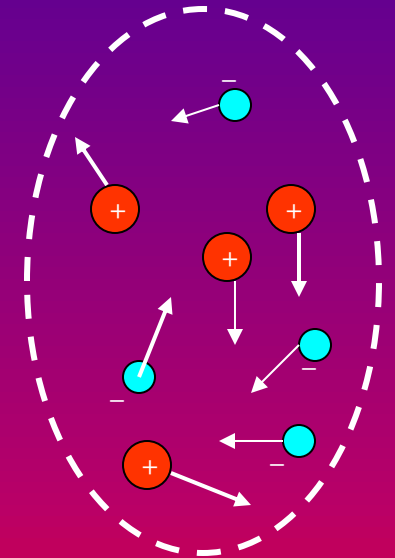
LIQUIDE



GAZ



PLASMA



H₂O → Glace

$T < 0^{\circ}$

Eau

$0^{\circ} < T < 100^{\circ}$

Vapeur

$T > 100^{\circ}$

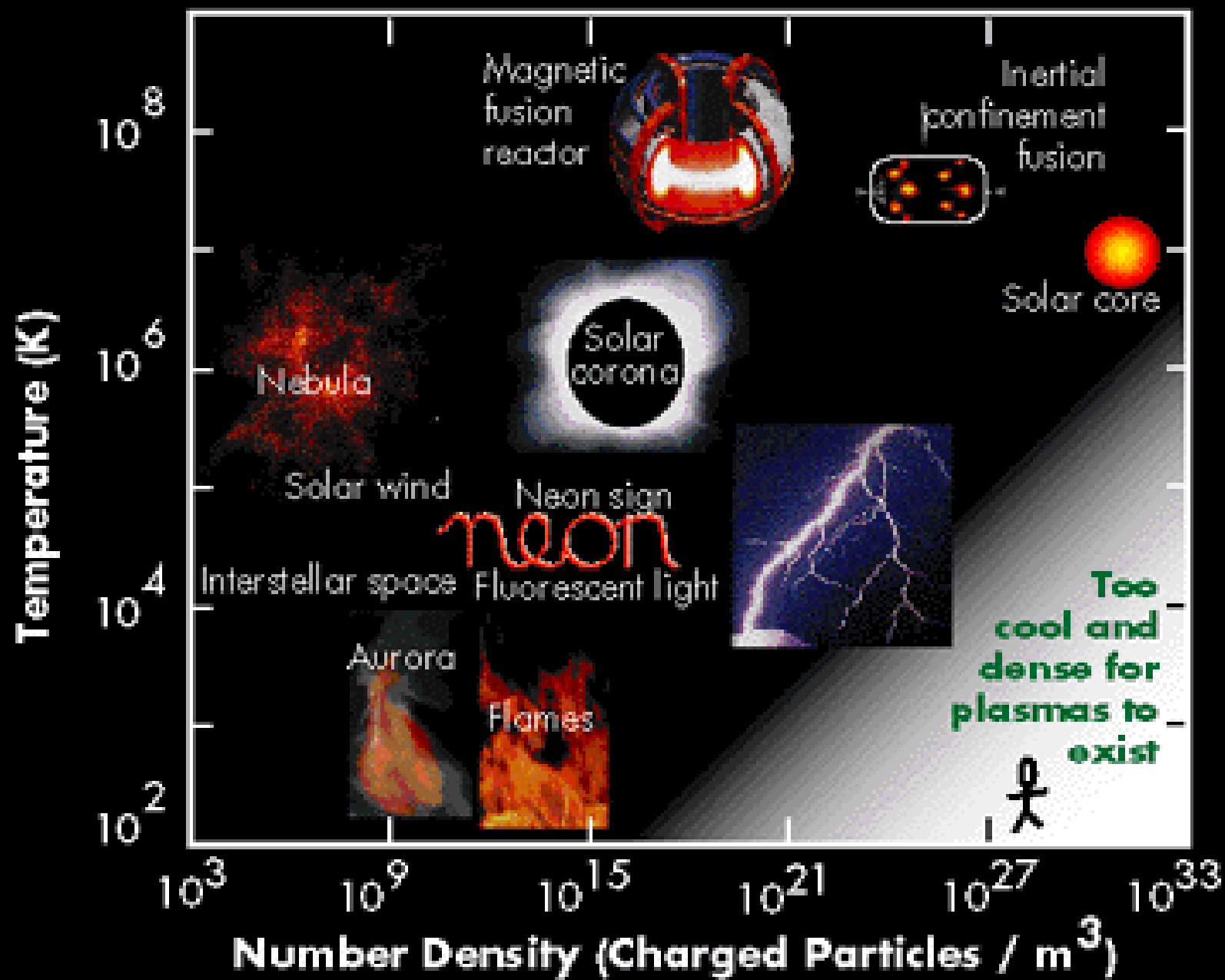
Gaz ionisé

$T > 100.000^{\circ}$

LE PLASMA ...

99 % de l'univers ...

Selon les astrophysiciens.



L 'énergie du soleil :

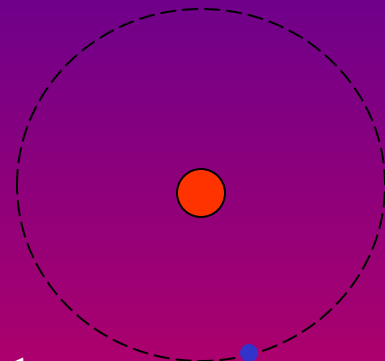
La fusion de l 'hydrogène

Hydrogène

Deutérium

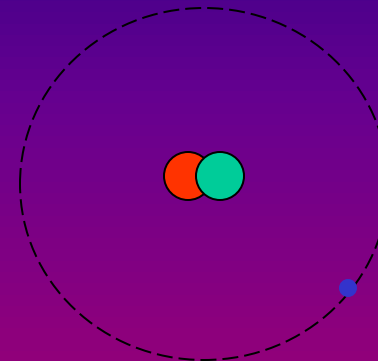
→

1	H	1.008	He	4.003
2	Li	6.941	Be	9.012
3	B	10.811	C	12.011
4	N	14.007	O	15.999
5	F	18.998	Ne	20.180
6	Na	22.990	Mg	24.305
7	Al	26.982	Si	28.086
8	S	32.06	Cl	35.45
9	Ar	39.948	K	39.098
10	Ca	40.078	Sc	44.956
11	Ti	47.88	V	50.942
12	Cr	51.996	Mn	54.938
13	Fe	55.845	Co	58.933
14	Ni	58.693	Cu	63.546
15	Zn	65.38	Ga	69.723
16	Ge	72.64	As	74.922
17	Se	78.96	Br	79.904
18	Kr	83.80	Rb	85.468
19	Sr	87.62	Y	88.906
20	Zr	91.224	Nb	92.906
21	Mo	95.94	Tc	98.906
22	Ru	101.07	Rh	102.905
23	Pd	106.905	Ag	107.868
24	Cd	112.411	In	114.818
25	Sb	121.757	Te	127.6
26	I	126.905	Xe	131.29
27	Ba	137.327	La	138.905
28	Hf	178.49	Ta	180.948
29	W	183.84	Hg	200.59
30	Os	190.23	Ir	192.222
31	Pt	195.084	Au	196.967
32	Hg	200.59	Tl	204.38
33	Pb	207.2	Bi	208.98
34	Po	209	At	210
35	Rn	222	Fr	223
36	Ac	227	Ra	226
37	Th	232.038	Pa	231.036
38	U	238.029	Np	237.048
39	Pu	244.064	Am	243.061
40	Cm	247.07	Bk	247.07
41	Cf	251.08	Es	252.083
42	Fm	257.10	Md	258.10
43	No	259	Lr	262
44	Lr	262		
45				
46				
47				
48				
49				
50				
51				
52				
53				
54				
55				
56				
57				
58				
59				
60				
61				
62				
63				
64				
65				
66				
67				
68				
69				
70				
71				
72				
73				
74				
75				
76				
77				
78				
79				
80				
81				
82				
83				
84				
85				
86				
87				
88				
89				
90				
91				
92				
93				
94				
95				
96				
97				
98				
99				
100				
101				
102				
103				
104				
105				
106				
107				
108				
109				
110				
111				
112				
113				
114				
115				
116				
117				
118				



^1H

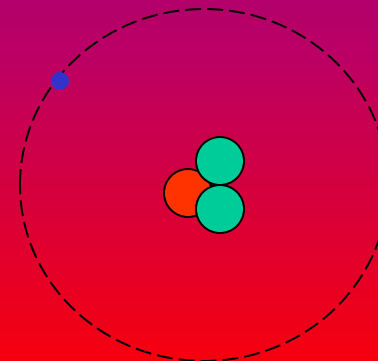
Stable
99,98%



D ou ^2H




Stable
0,015%

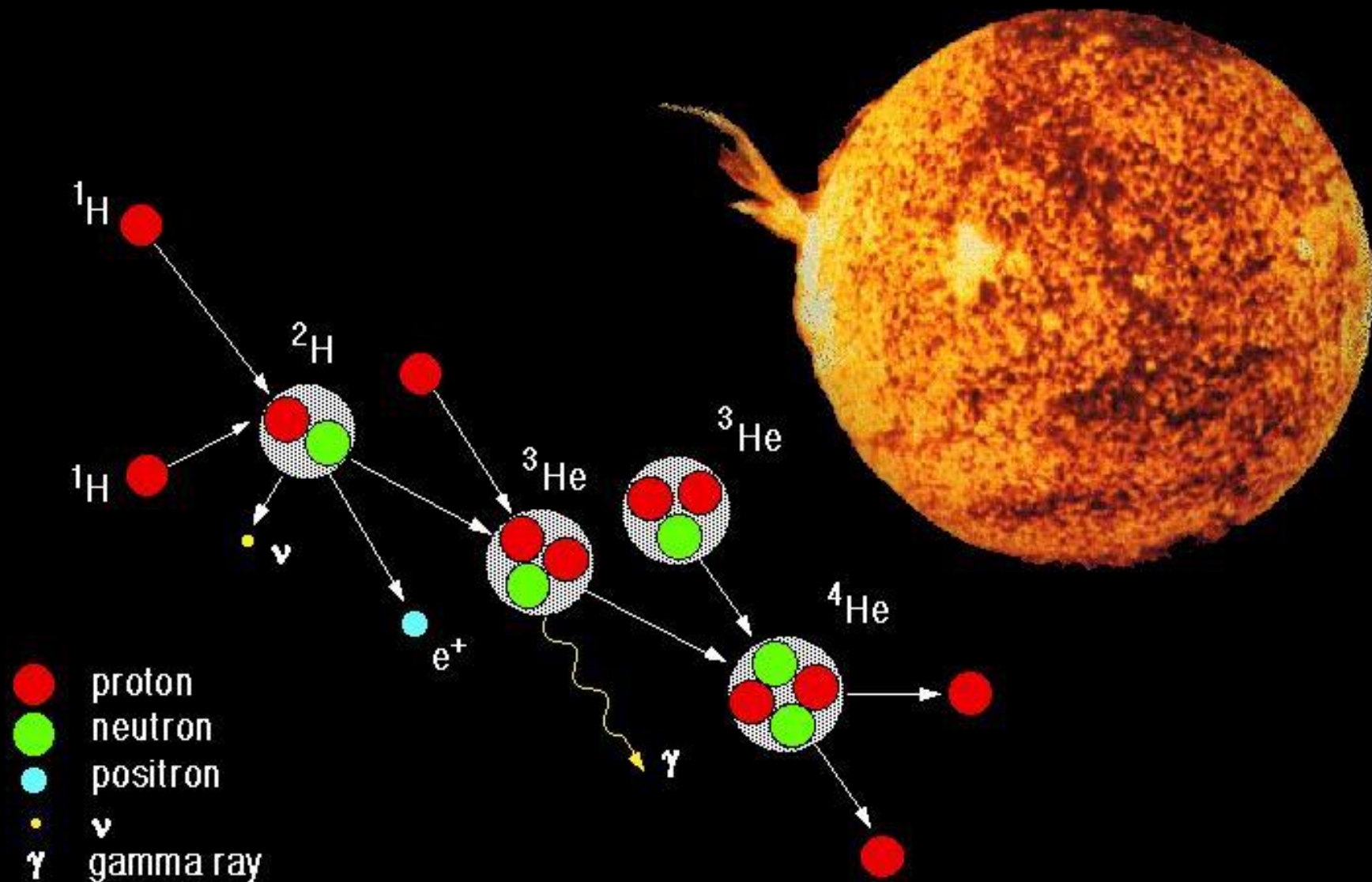
Tritium



T ou ^3H

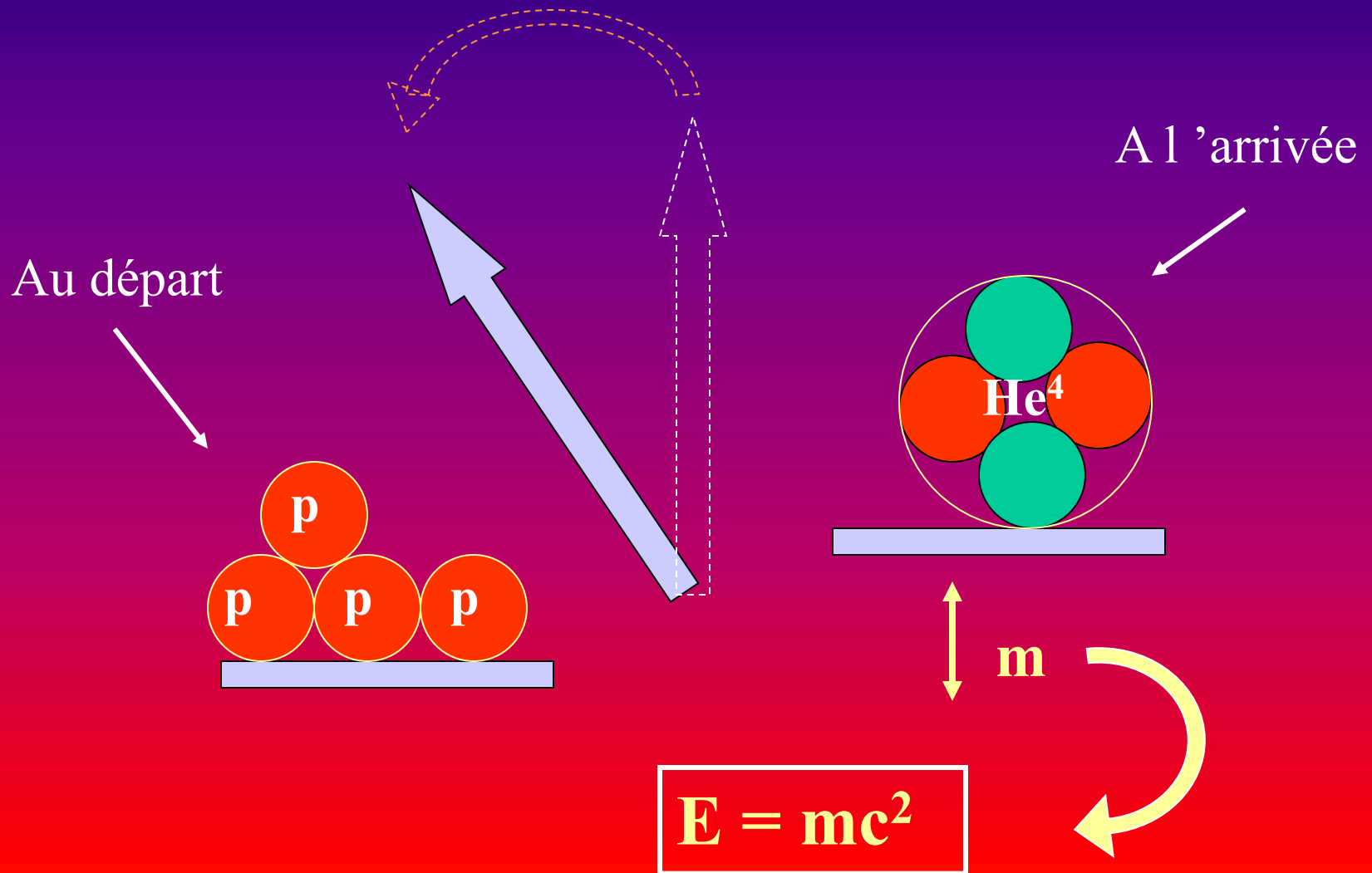
Instable
période 12,3 ans

-  Proton
-  Neutron
-  Electron



**Solar Nuclear Fusion Reactions
via the Proton-Proton Chain**

Bilan énergétique



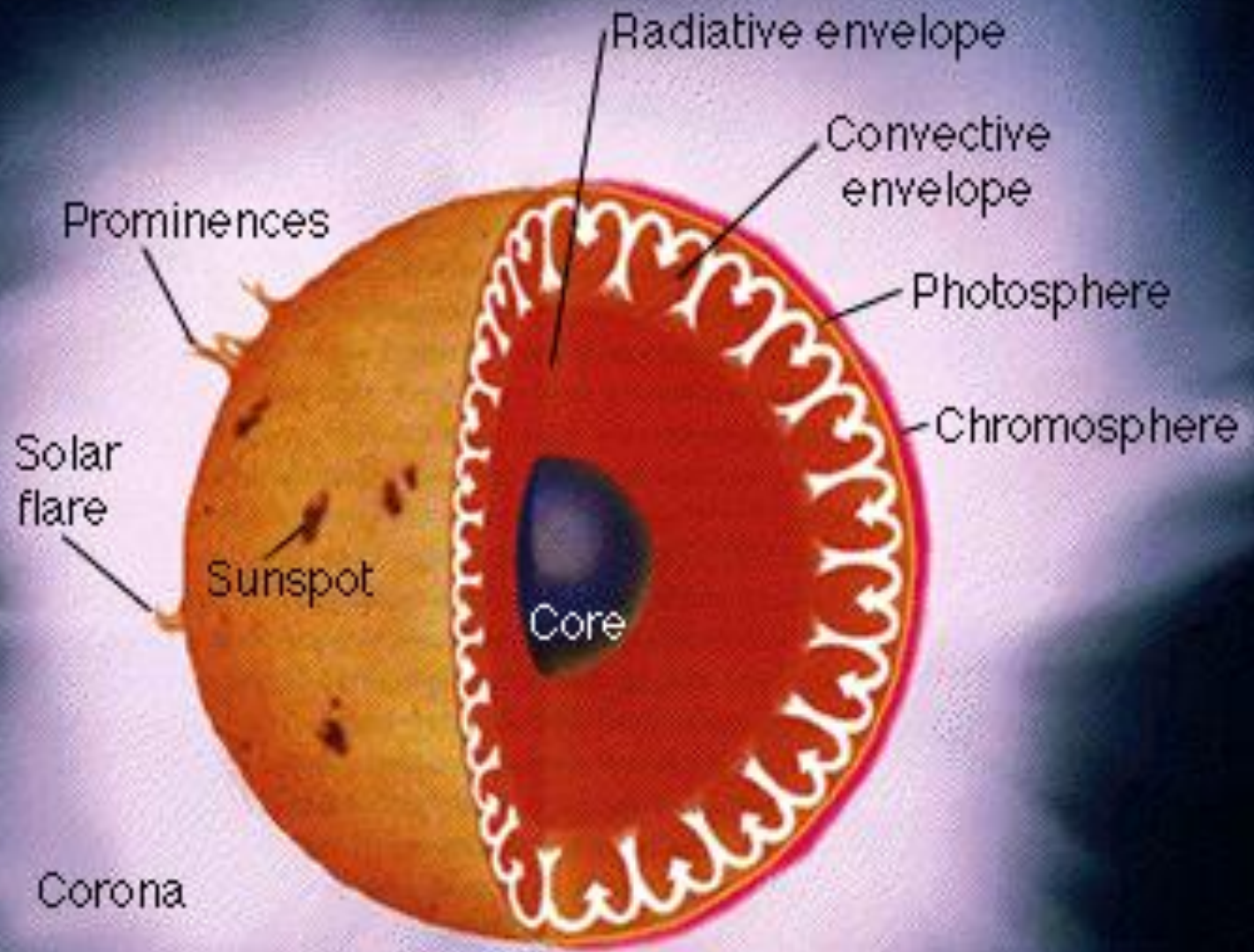
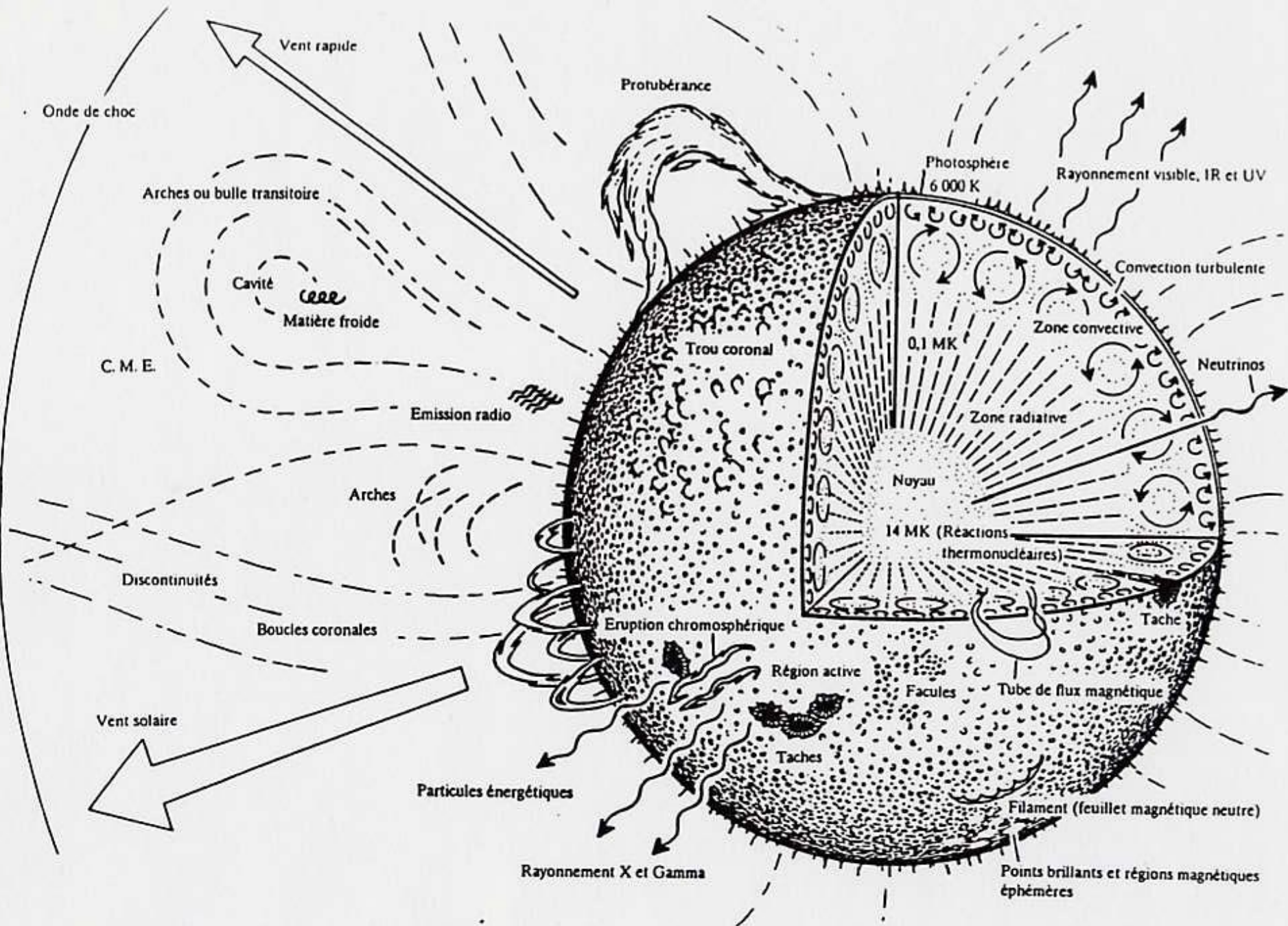


Image Credit: Kaler



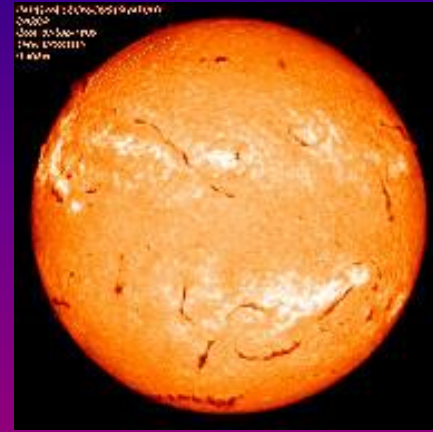
Les visages du soleil



Photosphère



Visuel

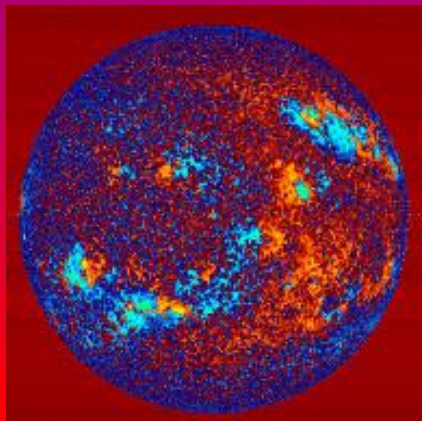


H α 6563

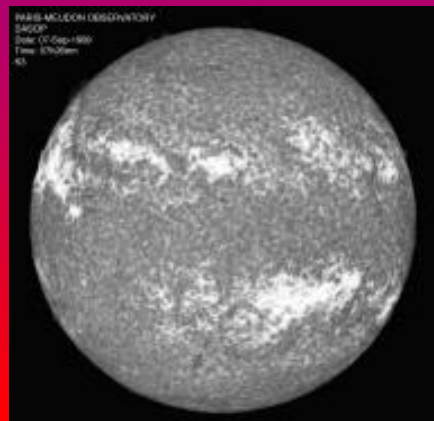
Chromosphère



CaII K1v Meudon



FeI 8688 A

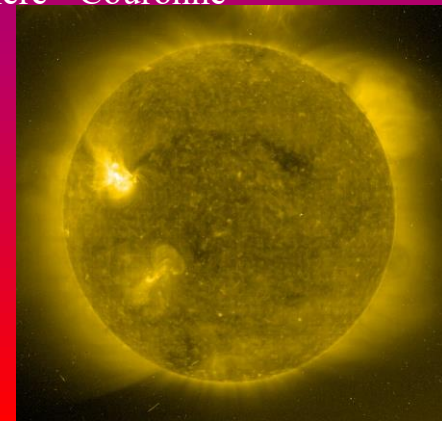


HeII SOHO



3934 A

Chromosphère - Couronne

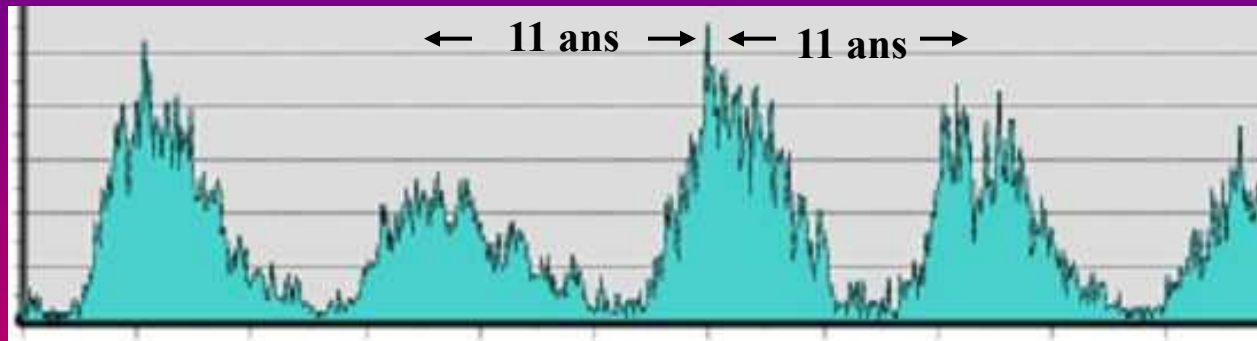


FeXV SOHO

Les taches solaires

Observées systématiquement dès 1666

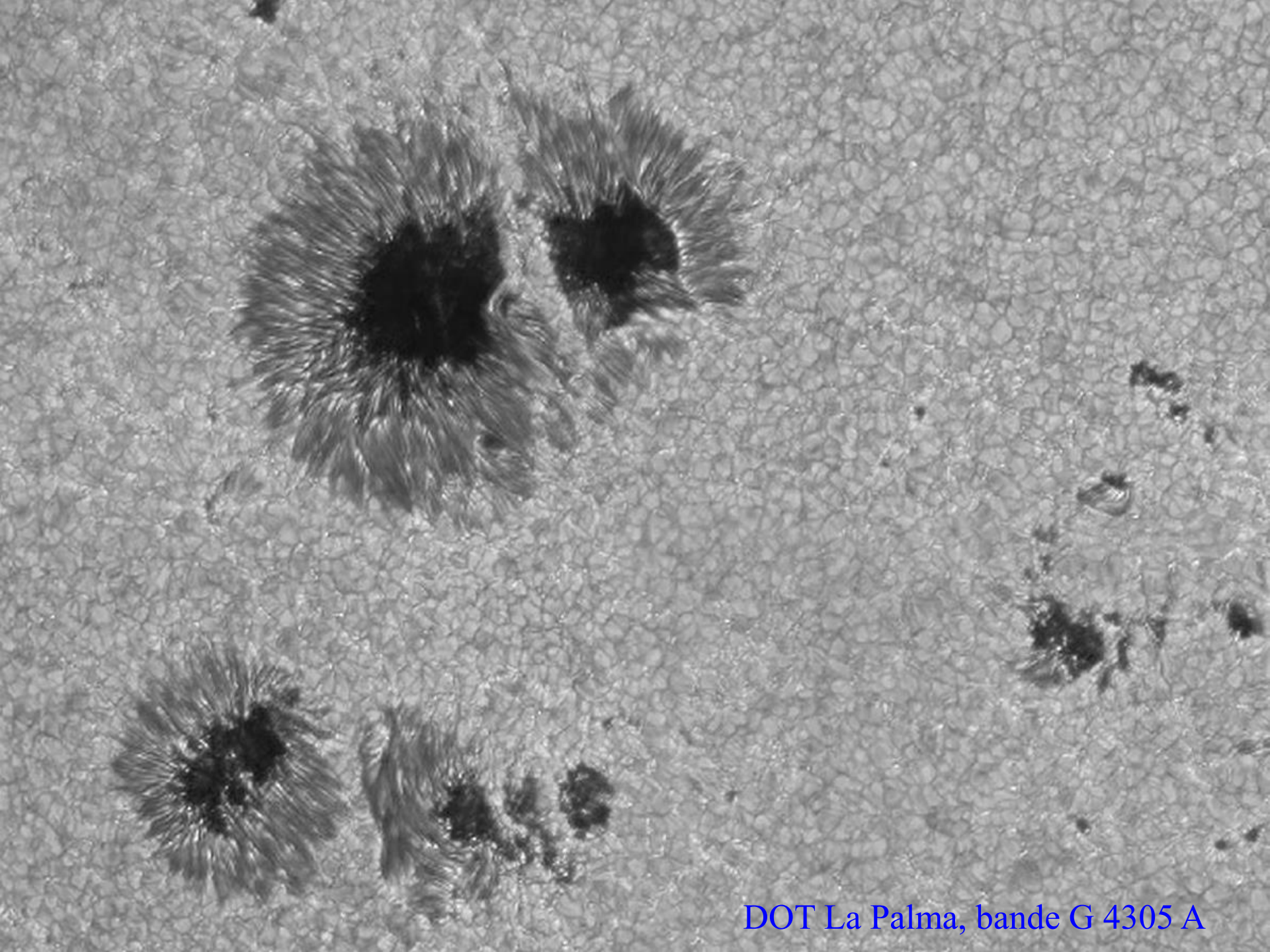
Cycle périodique de 2×11 ans



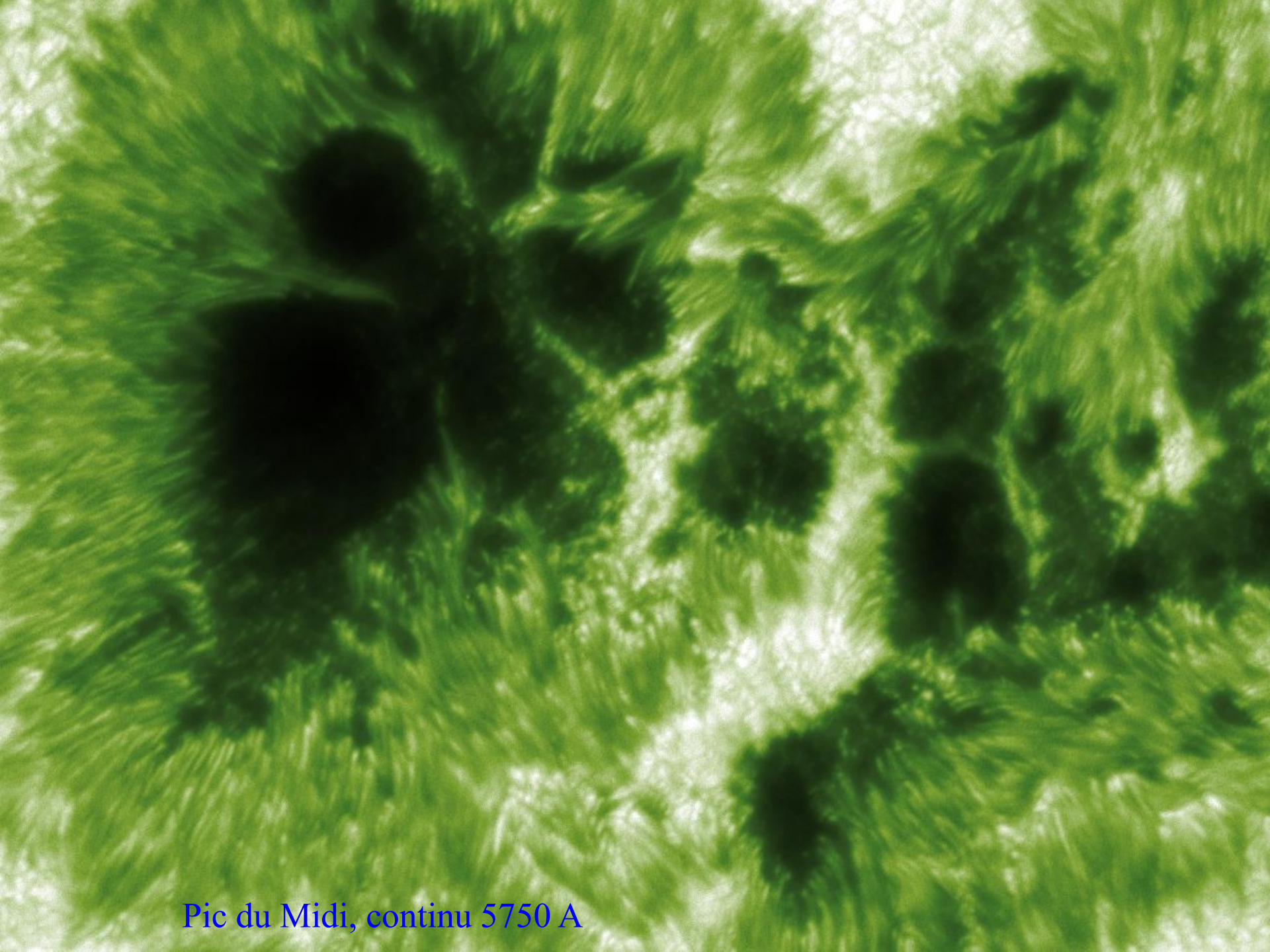
Champs magnétique localement très élevé (10^4 terre)

Un pôle nord et un pôle sud

Partie noire à 500 km de profondeur ...



DOT La Palma, bande G 4305 A

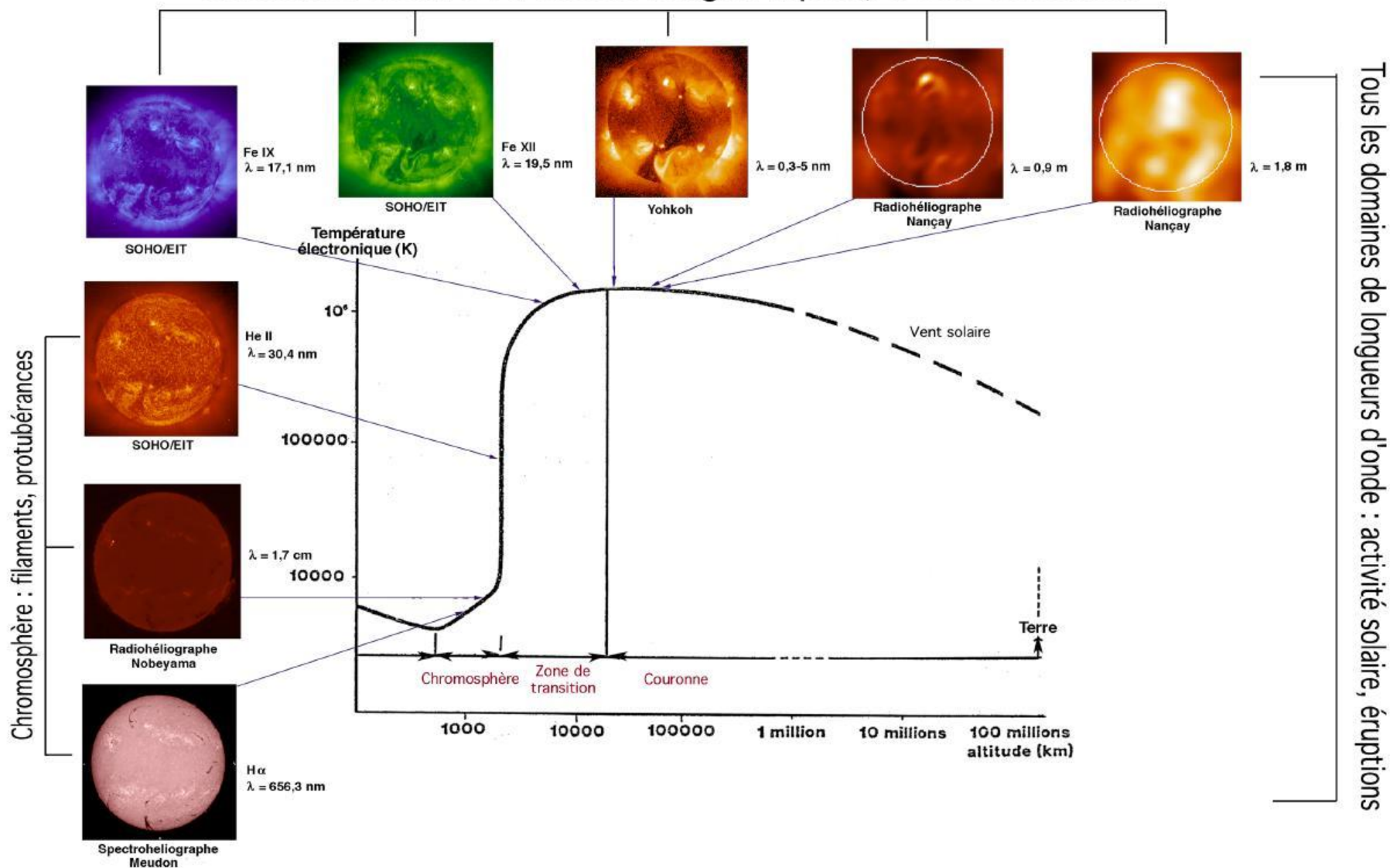


Pic du Midi, continu 5750 A



Evolution des taches sur quelques jours

Couronne solaire : boucles magnétiques, trous coronaux

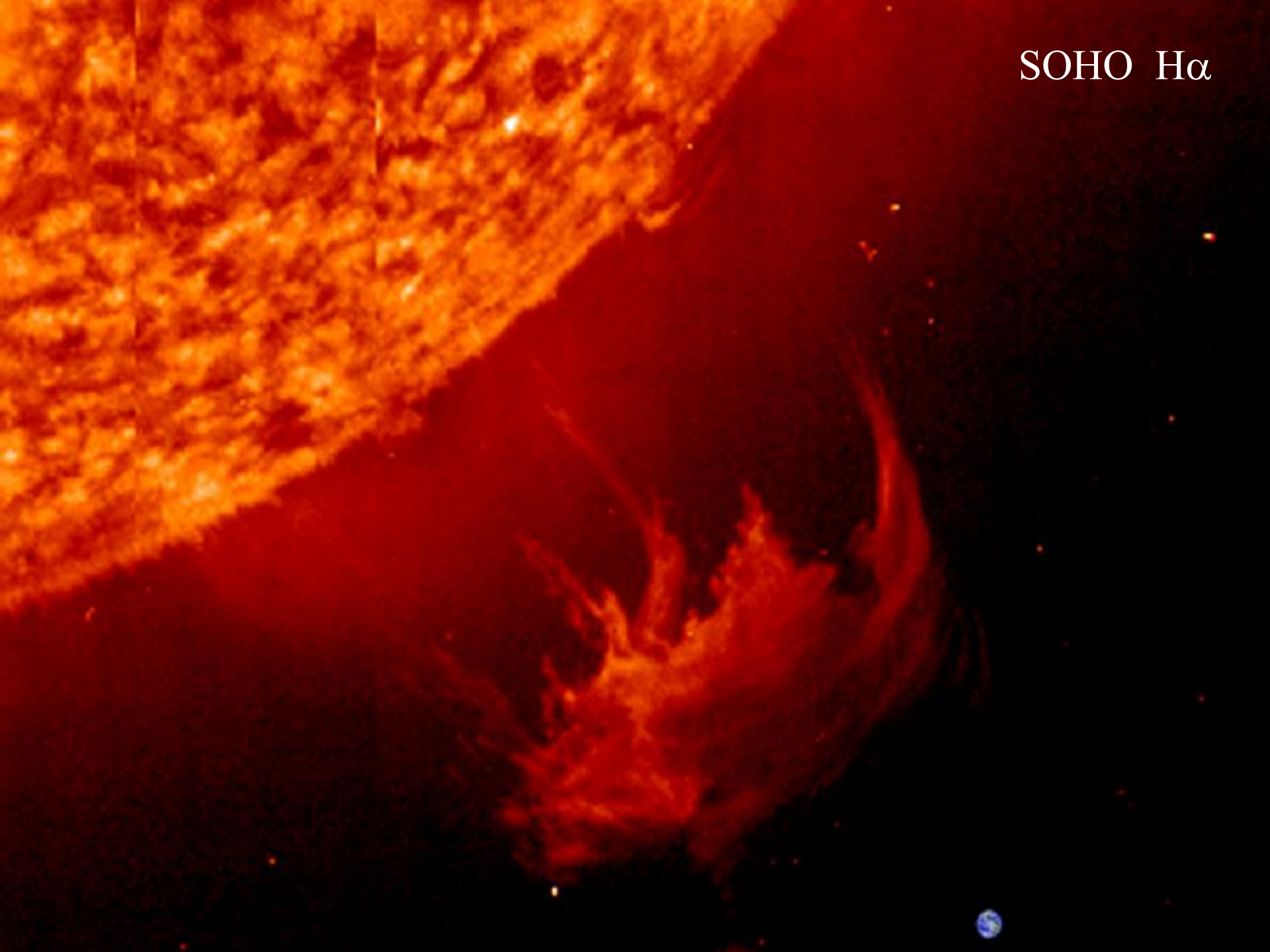


SOHO H α



Approx. size of Earth

SOHO $H\alpha$





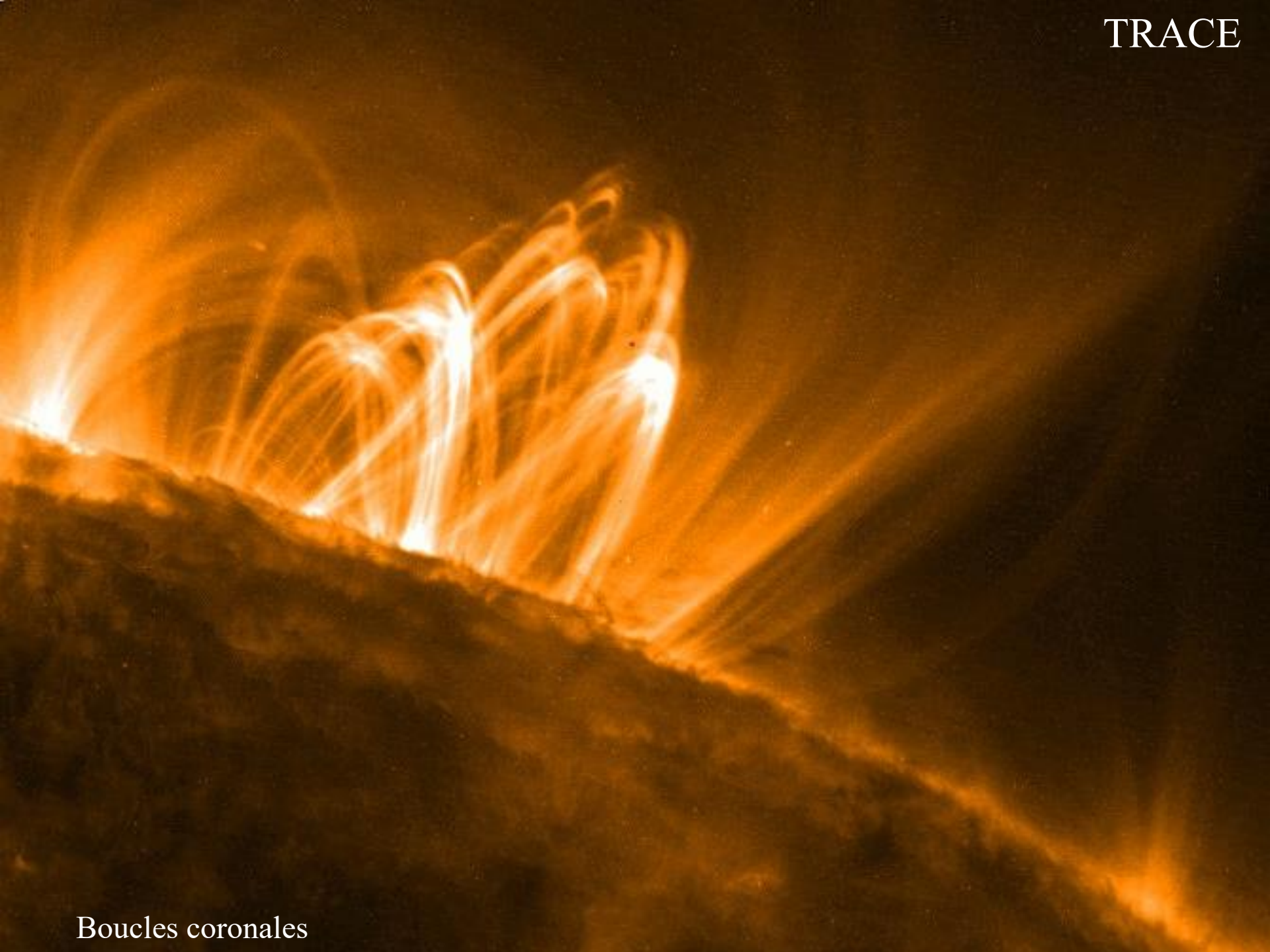
Terre



Filament éruptif ≈ 100.000 km de hauteur

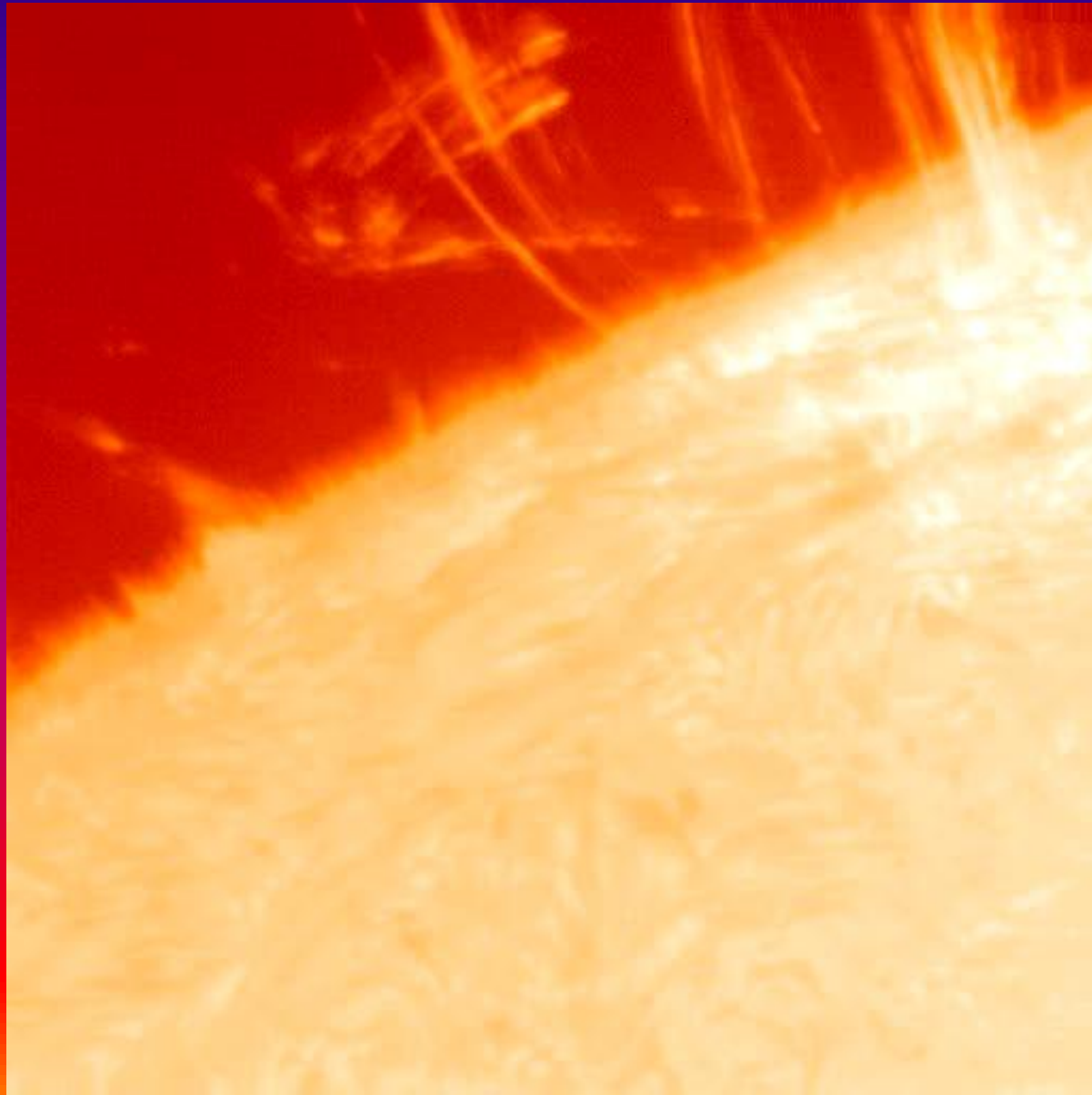


Boucles coronales



Boucles coronales

Boucles post éruptives SVST La Palma



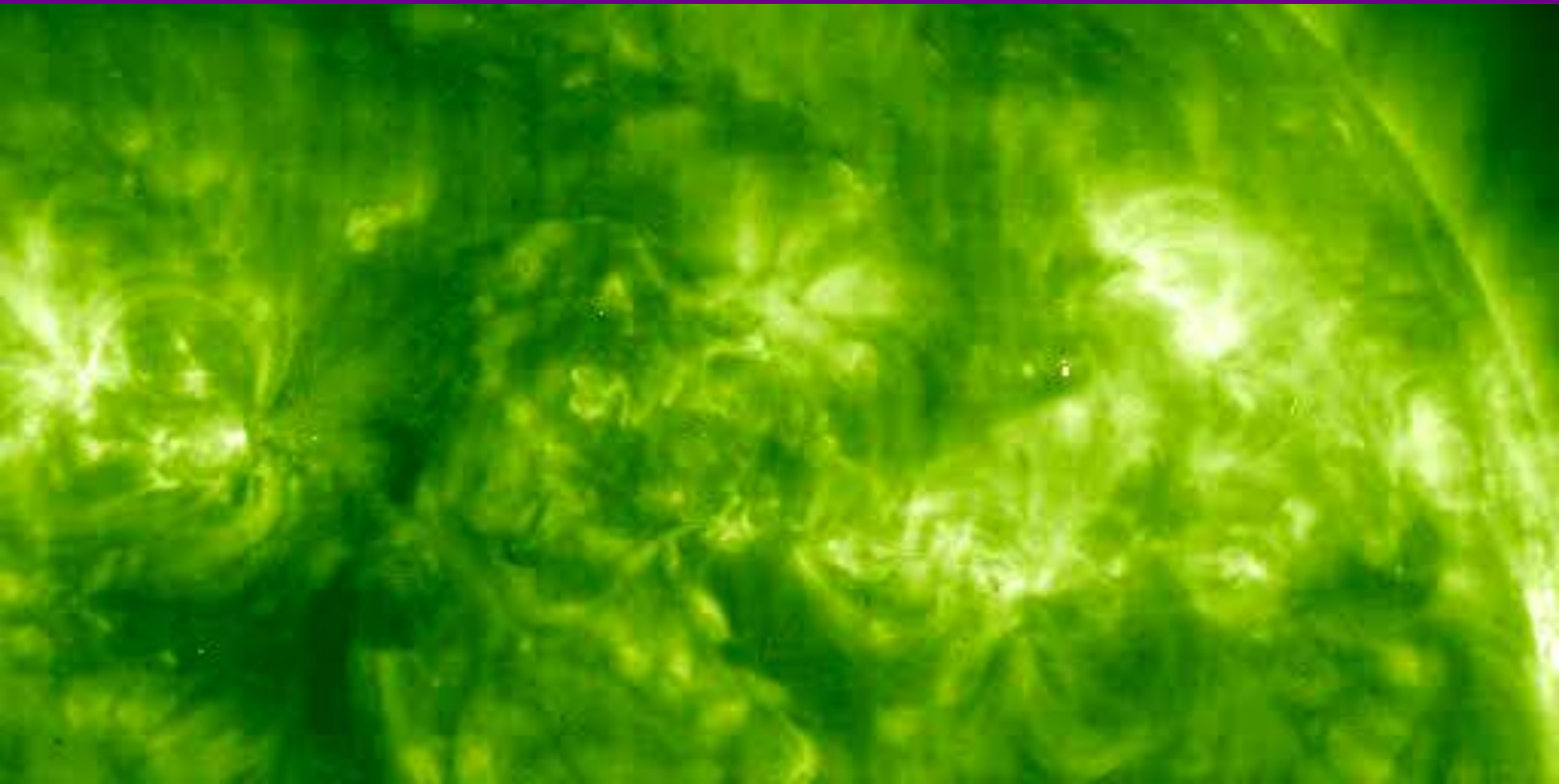


2002-Apr-21
00:43:09

Eruption du 2/04/2002, TRACE

SOHO

Eruptions solaires dans l'UV



Bulletin météo

<http://www.spaceweather.com/>

Solar wind speed : 404,1 km/s

Density : 8,6 protons / cm³

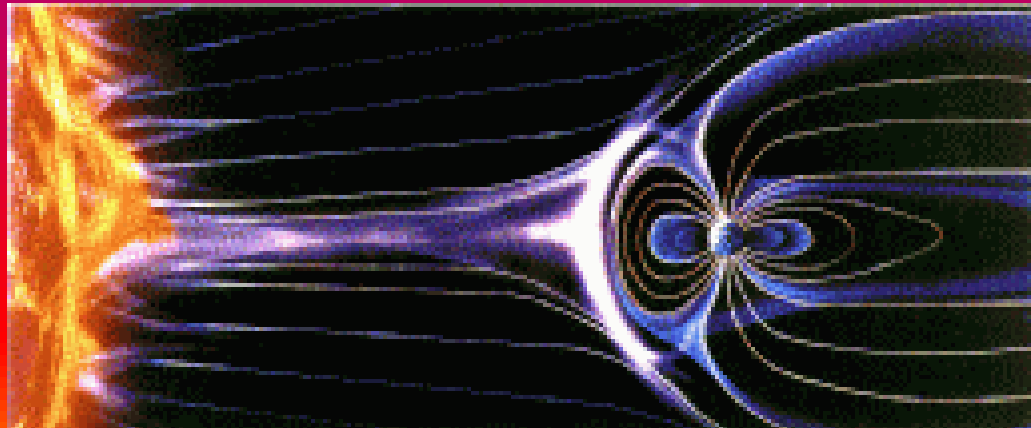
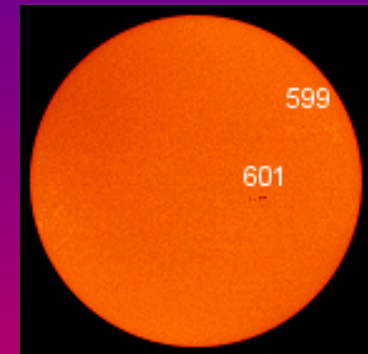
X solar flares

6-hr max B8

24-hr : B8

Daily sun

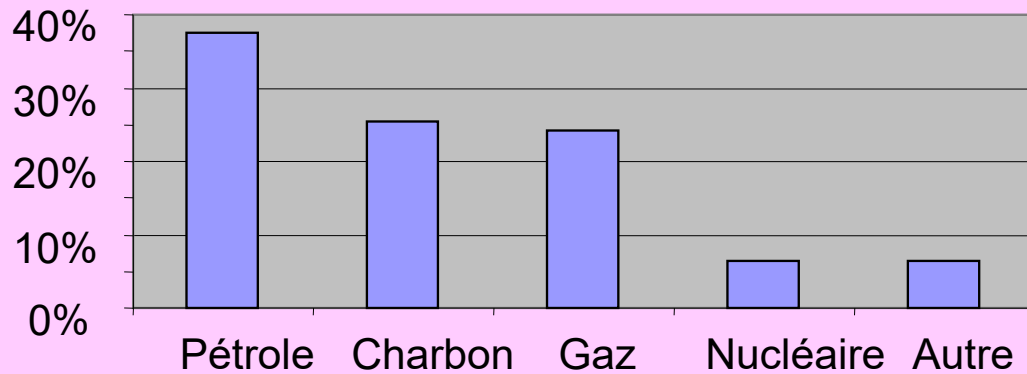
01 may 04



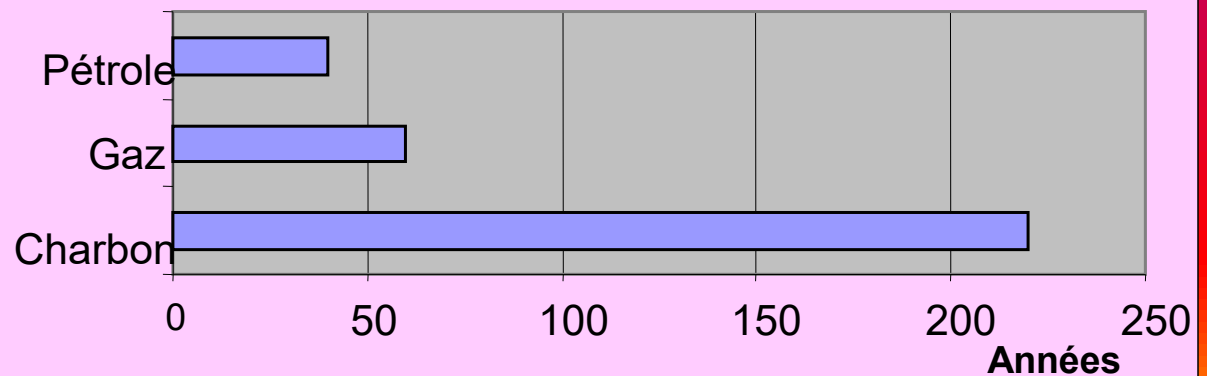
Le soleil : Un débordement d'énergie ...

Dont on ne
récupère
presque rien
sur Terre !

Consommation 2002



Réserves



Pourquoi pas un soleil sur Terre ?

La fusion nucléaire ...

Un axe fédérateur pour la recherche.

Des combustibles « inépuisables ».

Des combustibles « bien » répartis.

Des déchets moins polluants.

L 'énergie pour tous...

Un paradis sur Terre ?

Un soleil sur Terre ...



Mais ...On sait déjà faire !!!

Le projet ITER

Chinese
Participant Team



European
Participant Team



Japanese
Participant Team



Korean
Participant Team



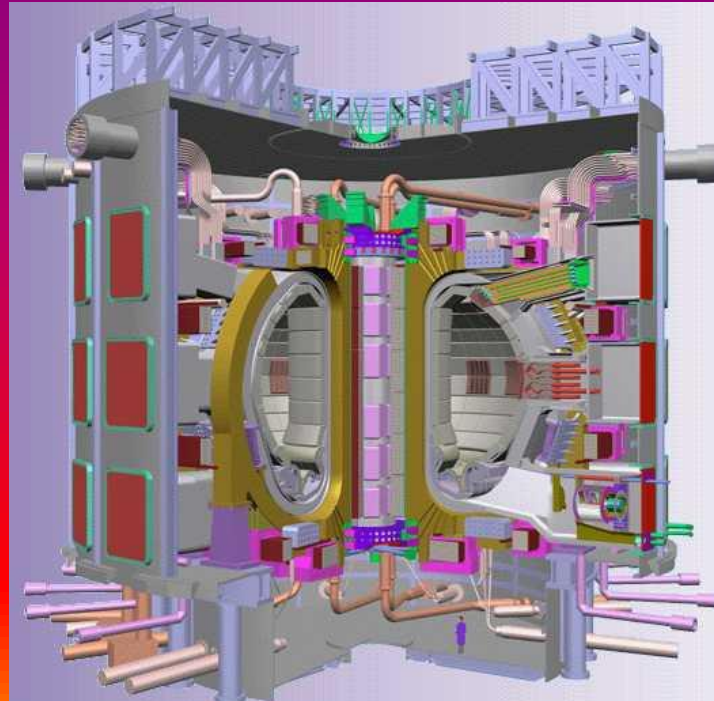
Russian
Participant Team

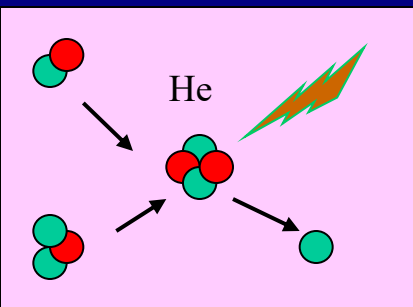


USA
Participant Team



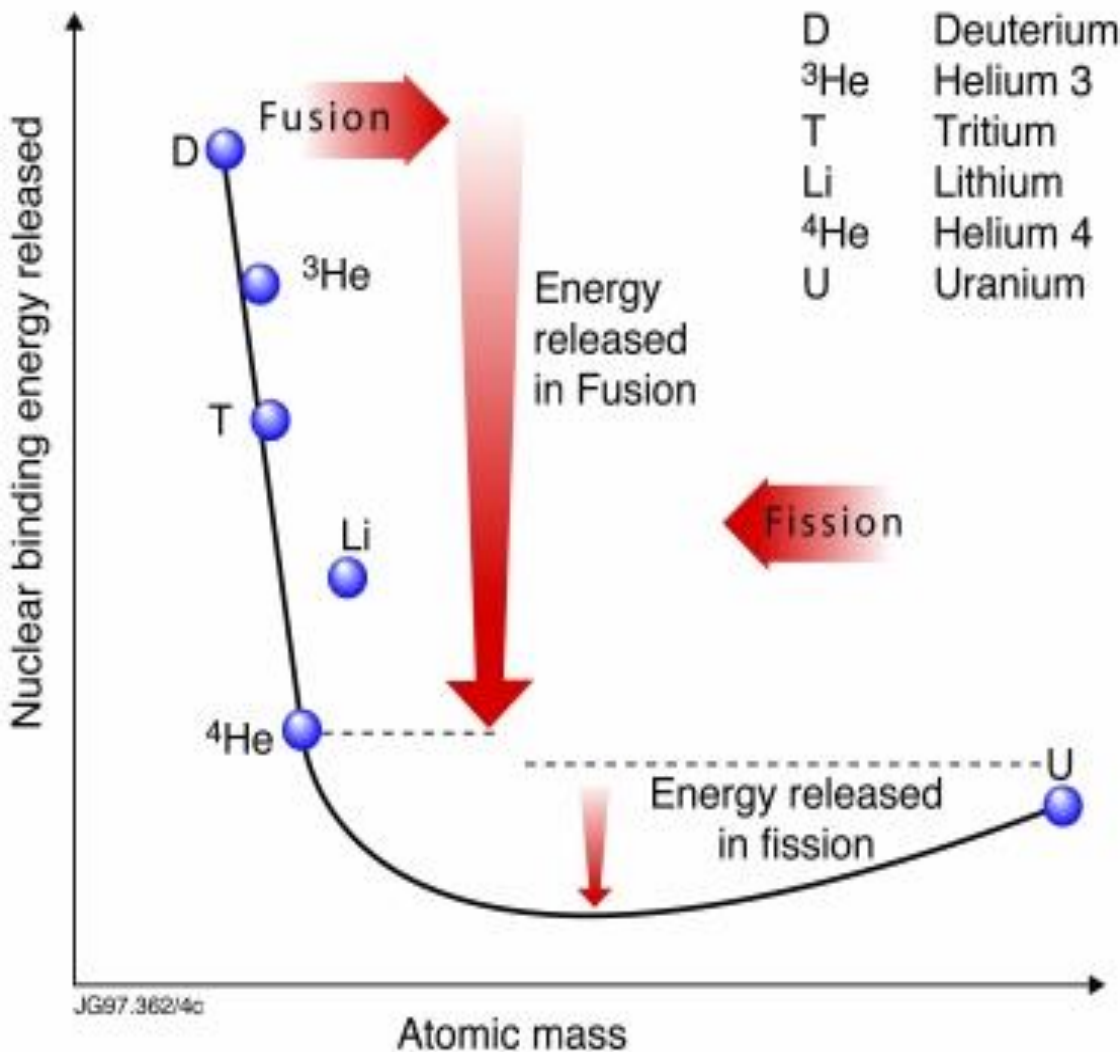
La fusion pacifique
sur Terre ...



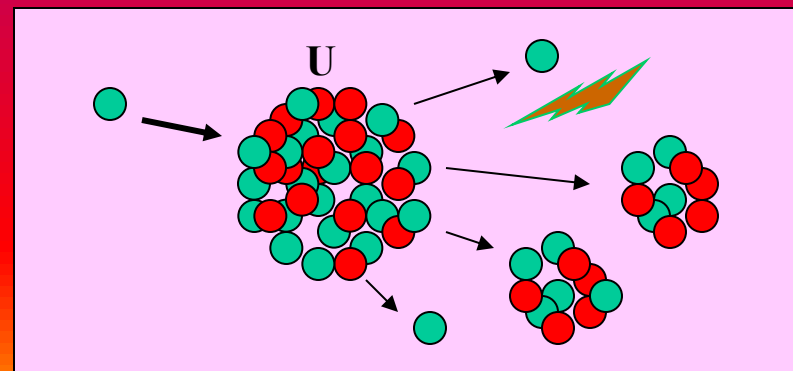


Fusion

1	1A																	101A																				
1	H	1A																	He	2																		
2	Li	3	Be	4																	B	5	C	6	N	7	O	8	F	9	Ne	10						
3	Na	11	Mg	12																	Al	13	Si	14	P	15	S	16	Cl	17	Ar	18						
4	K	19	Ca	20	Sc	21	Ti	22	V	23	Cr	24	Mn	25	Fe	26	Co	27	Ni	28	Cu	29	Zn	30	Ga	31	Ge	32	As	33	Se	34	Br	35	Kr	36		
5	Rb	37	Sr	38	Y	39	Zr	40	Nb	41	Mo	42	Tc	43	Ru	44	Rh	45	Pd	46	Ag	47	Cd	48	In	49	Sn	50	Sb	51	Te	52	I	53	Xe	54		
6	Cs	55	Ba	56	La	57	Hf	72	Ta	73	W	74	Re	75	Os	76	Ir	77	Pt	78	Au	79	Hg	80	Tl	81	Pb	82	Bi	83	Po	84	At	85	Rn	86		
7	Fr	87	Ra	88	Ac	89	Rf	104	Db	105	Sg	106	Bh	107	Hs	108	Mt	109	Uun	110	Uuu	111	Uub	112	Uut	113	Uuq	114	Uup	115	Uuh	116	Uus	117	Uuo	118		
8																																						
9	Ce	58	Pr	59	Nd	60	Pm	61	Sm	62	Eu	63	Gd	64	Tb	65	Dy	66	Ho	67	Er	68	Tm	69	Yb	70	Lu	71										
10	Th	90	Pa	91	U	92	Np	93	Pu	94	Am	95	Cm	96	Bk	97	Cf	98	Es	99	Fm	100	Md	101	No	102	Lr	103										



Fission



La fusion de quoi ?

Combustibles		Résultats	Energie libérée
D + T	→	${}^4\text{He} + \text{n}$	+ 17.6 MeV
D + D	→	$\left\{ \begin{array}{l} {}^3\text{He} + \text{n} \\ \text{T} + \text{p} \end{array} \right.$	+ 3.3 MeV + 4.0 MeV
D + ${}^3\text{He}$	→	${}^4\text{He} + \text{p}$	+ 18.3 MeV
.....			



D + T

Deutérium

Isotope stable de l 'hydrogène

33 grammes / m³ d 'eau de mer

Tritium

Isotope radioactif de l 'hydrogène - Période 12,3 ans

Production : $\text{Li} + \text{n} \longrightarrow {}^4\text{He} + \text{T} + \text{énergie}$

Lithium

50 ppm dans l 'écorce terrestre

0,17g / m³ eau de mer

Réacteur D T de 1000 MW

Consommation annuelle :

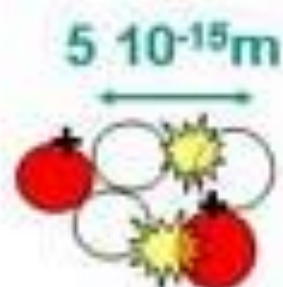
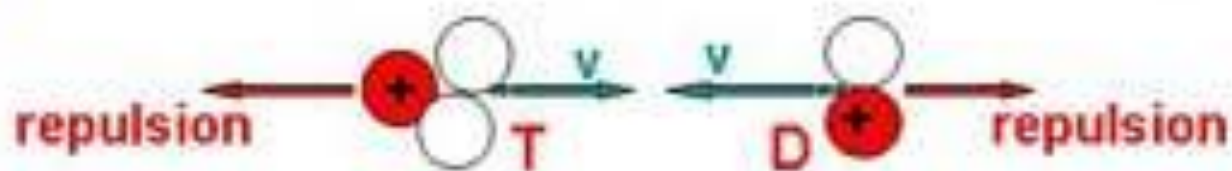
100 kg Deutérium

150 kg Tritium

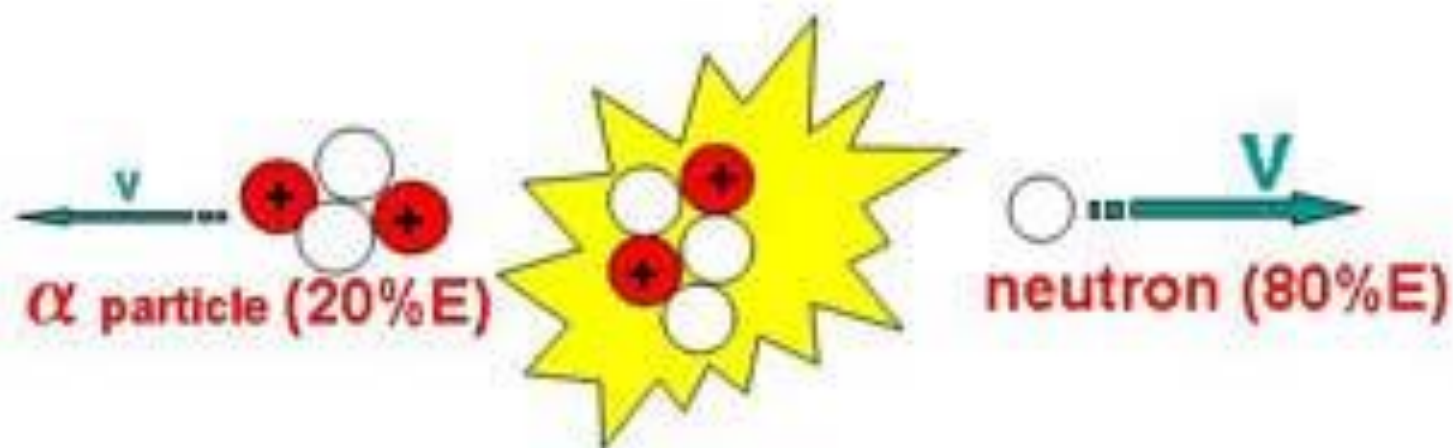
300 kg Lithium



D-T fusion



strong interaction force



ITER in Europe

Quelques problèmes à régler ...

Température

Formation du plasma : 10.000 °

Démarrage fusion : 100 millions °

Confinement

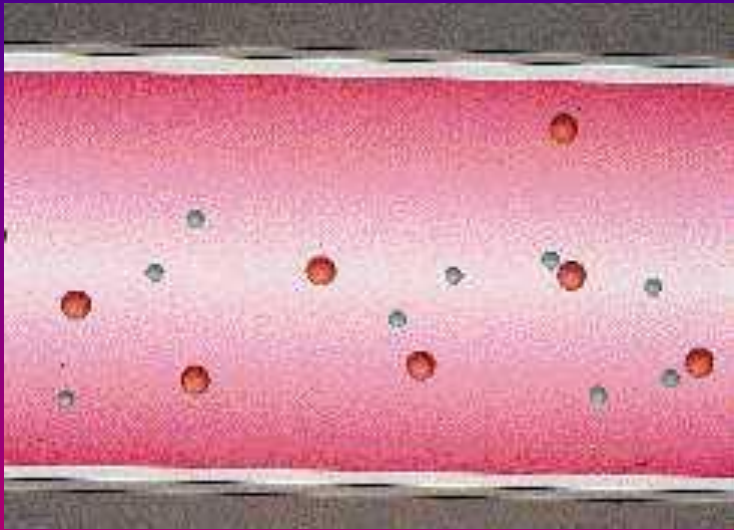
10 secondes

Densité

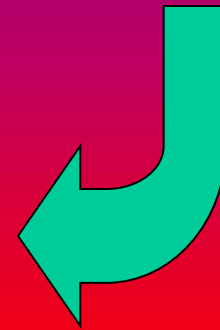
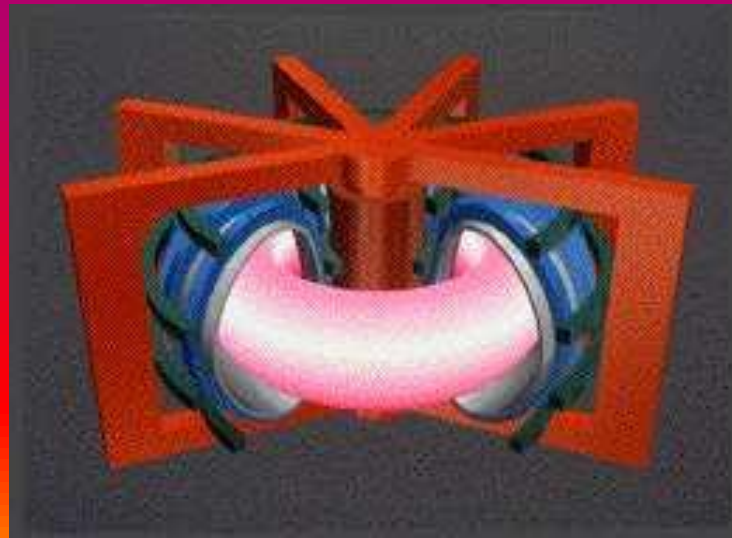
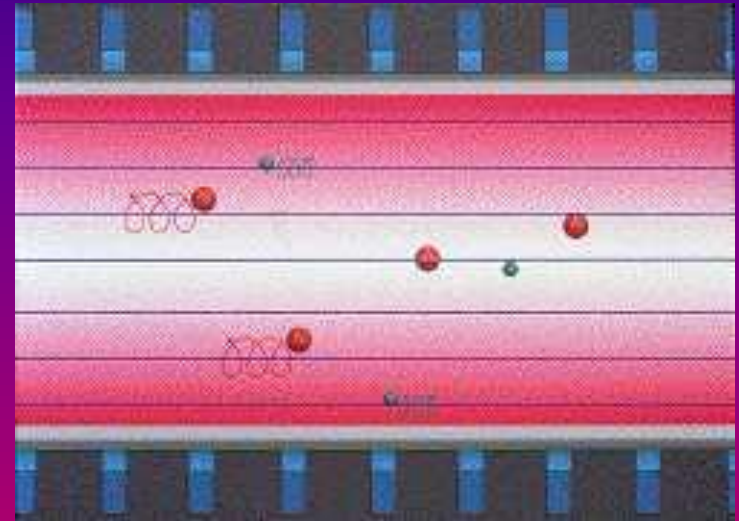
10^{-5} Air sous plusieurs atmosphères

Confinement magnétique

Sans confinement

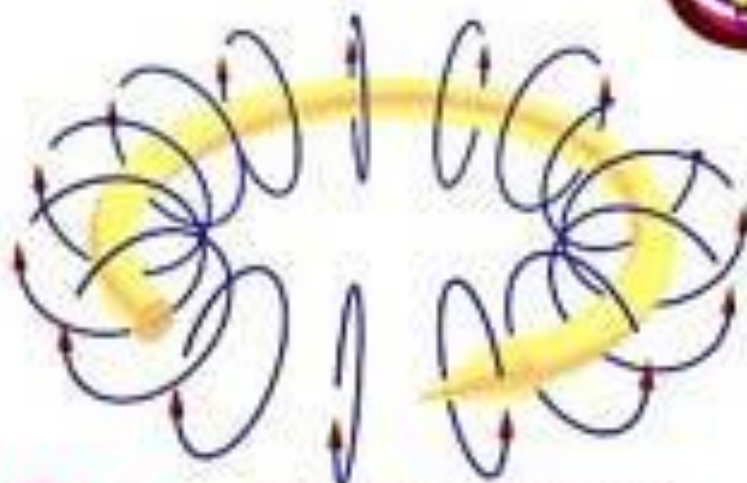


Avec confinement





Total field



Poloidal field from I_p

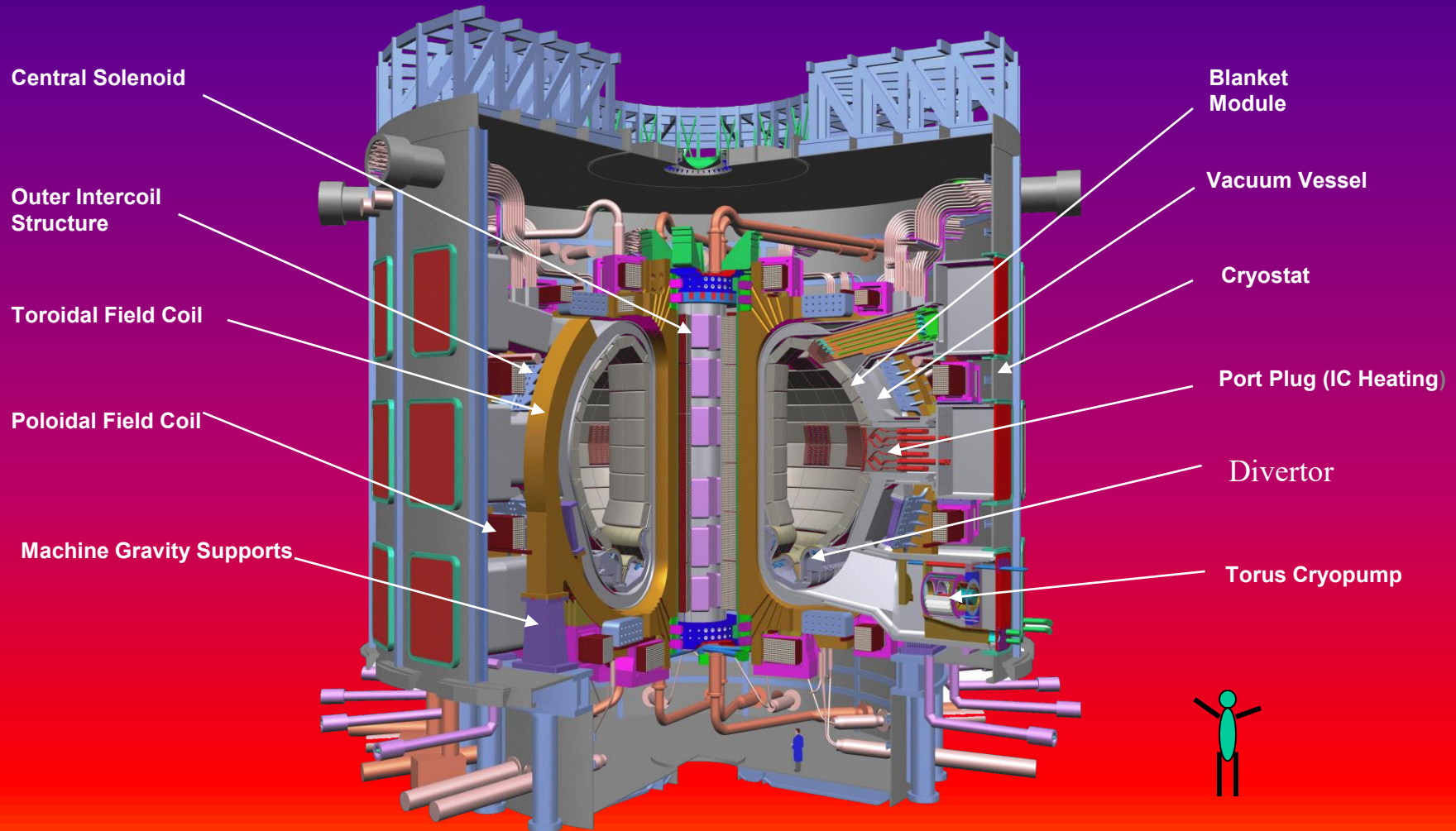


Toroidal field

ITER in Europe

Tokamak

Design - Main Features





ITER

Aujourd'hui

JET : 16 MW sur 1 seconde

Tore Supra : 6 '30 de confinement

Demain ... En 2020

Challenge technologique

Physique des plasmas et supraconducteurs

500 Mw pendant 15 minutes

Oui ...Mais où ?

Cadarache



Rokkasho-mura

