

Le monde des étoiles

Classer les étoiles

- luminosité et température
- diagramme de Hertzsprung-Russell

Le Soleil

- une étoile banale
- nucléosynthèse, sources d'énergie stellaire

Les étoiles

- évolution des étoiles
- formation des étoiles

Classer les étoiles



Constellation d'Orion

Comment caractériser les étoiles (sources ponctuelles)?

- par leur différence d'éclat et de couleur



Les étoiles observées sont plus ou moins brillantes

Echelle des magnitudes apparentes: une étoile A irradiant pour l'observateur 100 fois moins qu'une étoile B se voit attribuée une magnitude $m_B = m_A + 5$ (échelle logarithmique inversée)

Soleil: -26.7 / Lune: -12.6 / Venus: -4.6 / Sirius: -1.5 / Véga: 0.0 / limite visibilité : ~+6

La brillance observée (**magnitude apparente**) dépend de la **magnitude absolue** de l'étoile et de sa distance: décroissance en d^2

Les étoiles A (9 fois plus brillante intrinsèquement mais 3 fois plus éloignée) et B partagent la même magnitude apparente

Importance de la détermination des distances des étoiles

Méthode de la parallaxe: fondation de la mesure des distances (cf. cours 2)



Classement des étoiles selon leur luminosité intrinsèque

Luminosité apparente (flux lumineux, en $J \cdot s^{-1}$) + distance (en parsec) = **luminosité intrinsèque** ou absolue, exprimée en *luminosité solaire*

$$L_{sol} = 3.846 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

Etoiles les plus brillantes: $100\,000 L_{sol}$ / astres les plus faibles: $10^{-5} L_{sol}$

➤ Premier axe d'un **diagramme** pour classer les étoiles

Pourquoi cette vaste gamme de luminosités?

Dépend principalement de la taille? de la masse? de la composition? du stade évolutif? d'une combinaison de ces paramètres?

➤ Nécessité de déterminer **la source d'énergie stellaire**



Les étoiles observées sont de différentes couleurs

Différences perçues à l'œil nu confirmées par l'utilisation de **filtres** qui vont permettre de quantifier les différences de couleur (*système photométrique*)

Filtre U (ultraviolet) / B (bleu) / V (visible-vert) / R (rouge) / I (infrarouge) / etc

Une étoile apparaît bleue car elle émet plus de lumière bleue que de lumière rouge: la **magnitude mesurée** dans le filtre B sera plus petite (i.e. davantage de flux: échelle inversée!) que celle dans le filtre V ou R

Classement par l'indice de couleur

Indice de couleur: calcul de la quantité B-V (ou U-B, V-R, etc)

➤ Second axe d'un diagramme pour classer les étoiles

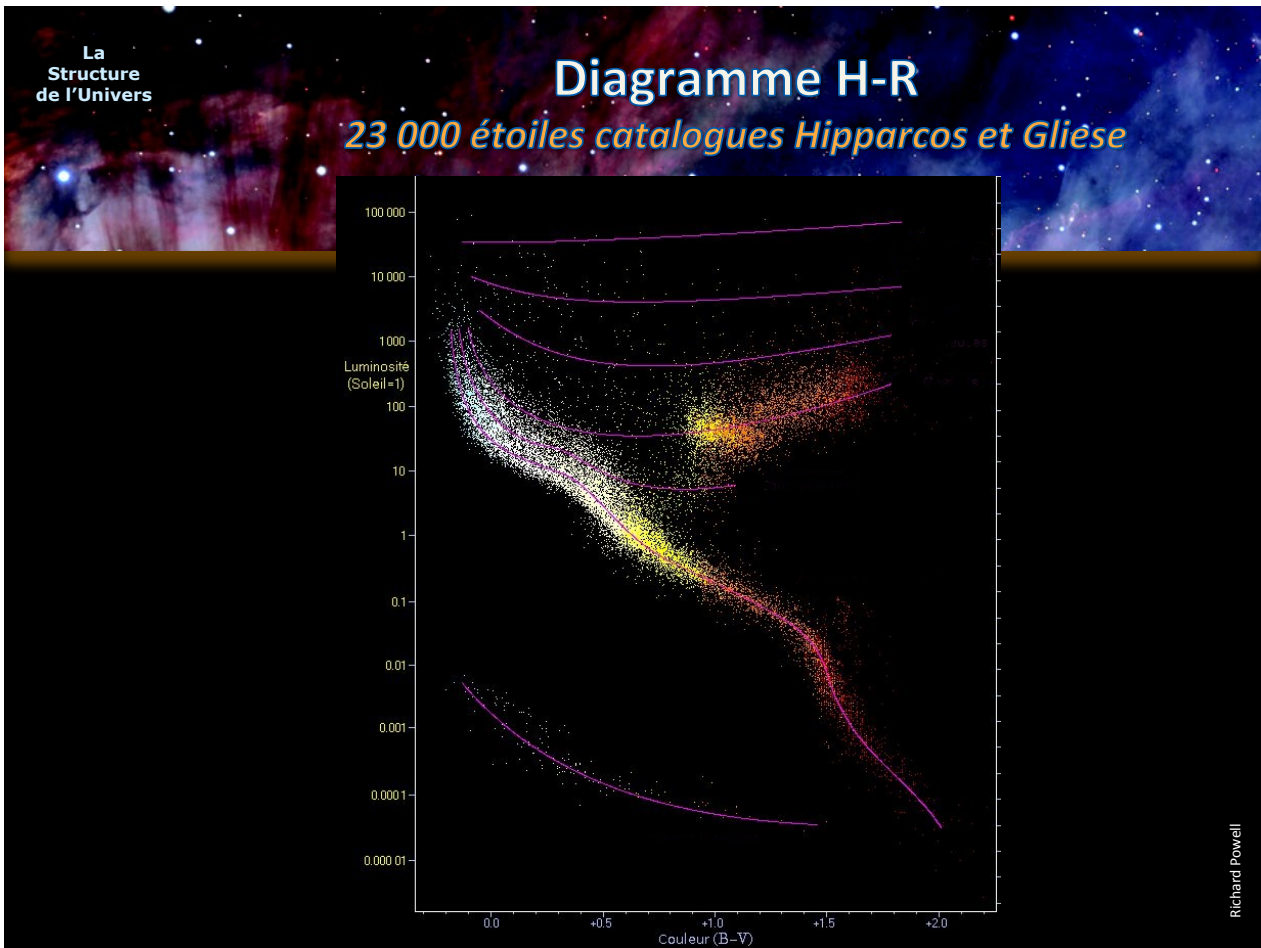
Indice de couleur « B-V » : -0.2 pour une étoile bleue, +1.7 pour une étoile rouge



Classement luminosité *versus* indice de couleur

D'après Ejnar Hertzsprung (1873-1967) et Henry Russell (1877-1957): diagramme portant la luminosité en ordonnée et l'indice de couleur en abscisse

➤ **Diagramme H-R**



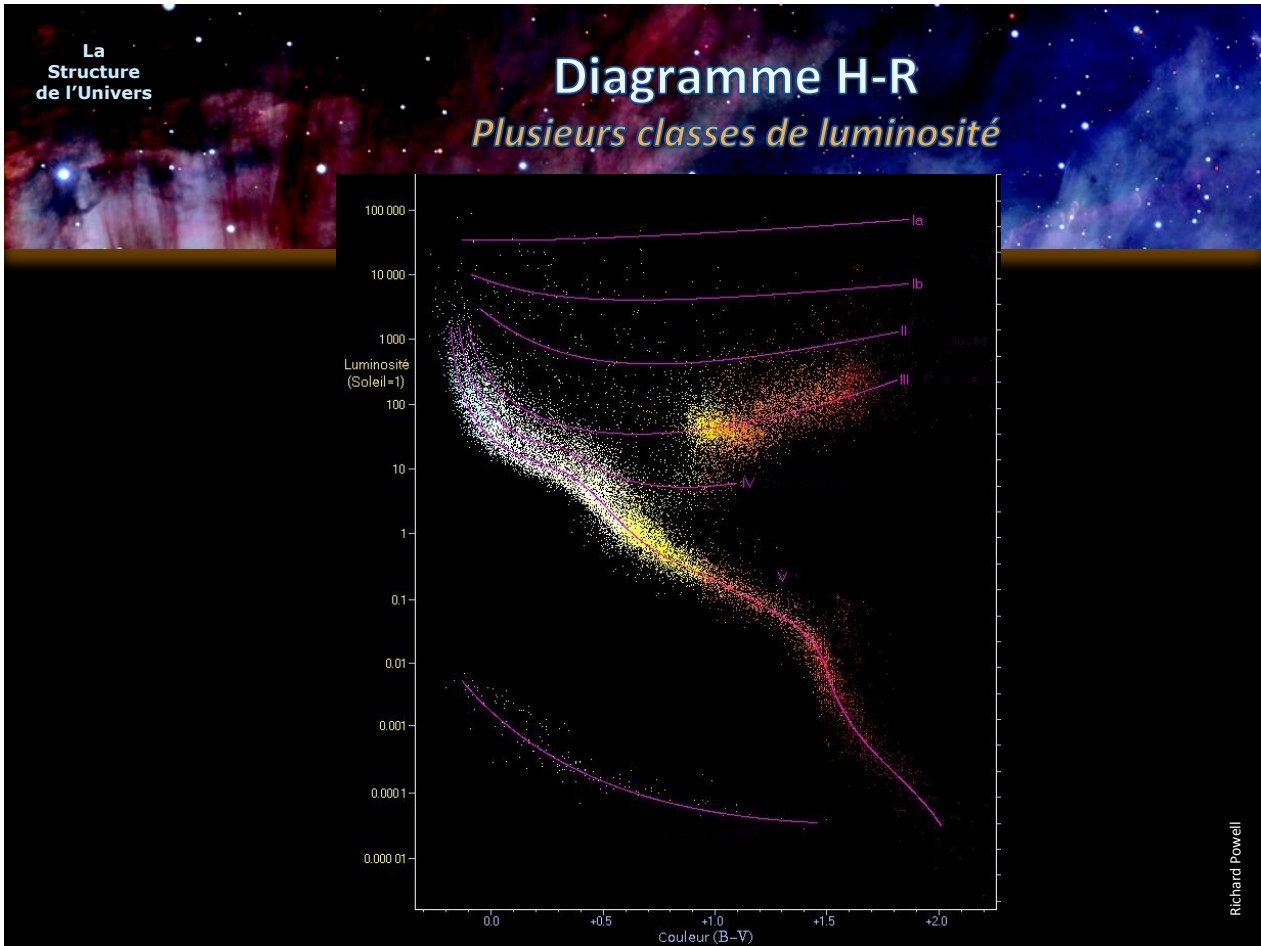
Classement luminosité *versus* indice de couleur

D'après Ejnar Hertzsprung (1873-1967) et Henry Russell (1877-1957): diagramme portant la luminosité en ordonnée et l'indice de couleur en abscisse

➤ Diagramme H-R

Plusieurs séquences d'étoiles apparaissent :

- il existe un lien entre la luminosité et l'indice de couleur (car pas de distribution aléatoire)
- indique le rôle caché d'un ou plusieurs paramètres supplémentaires (car plusieurs séquences: Ia/Ib/II/III/IV/V = **classe de luminosité**)



Classement luminosité *versus* indice de couleur

D'après Ejnar Hertzsprung (1873-1967) et Henry Russell (1877-1957): diagramme portant la luminosité en ordonnée et l'indice de couleur en abscisse

➤ Diagramme H-R

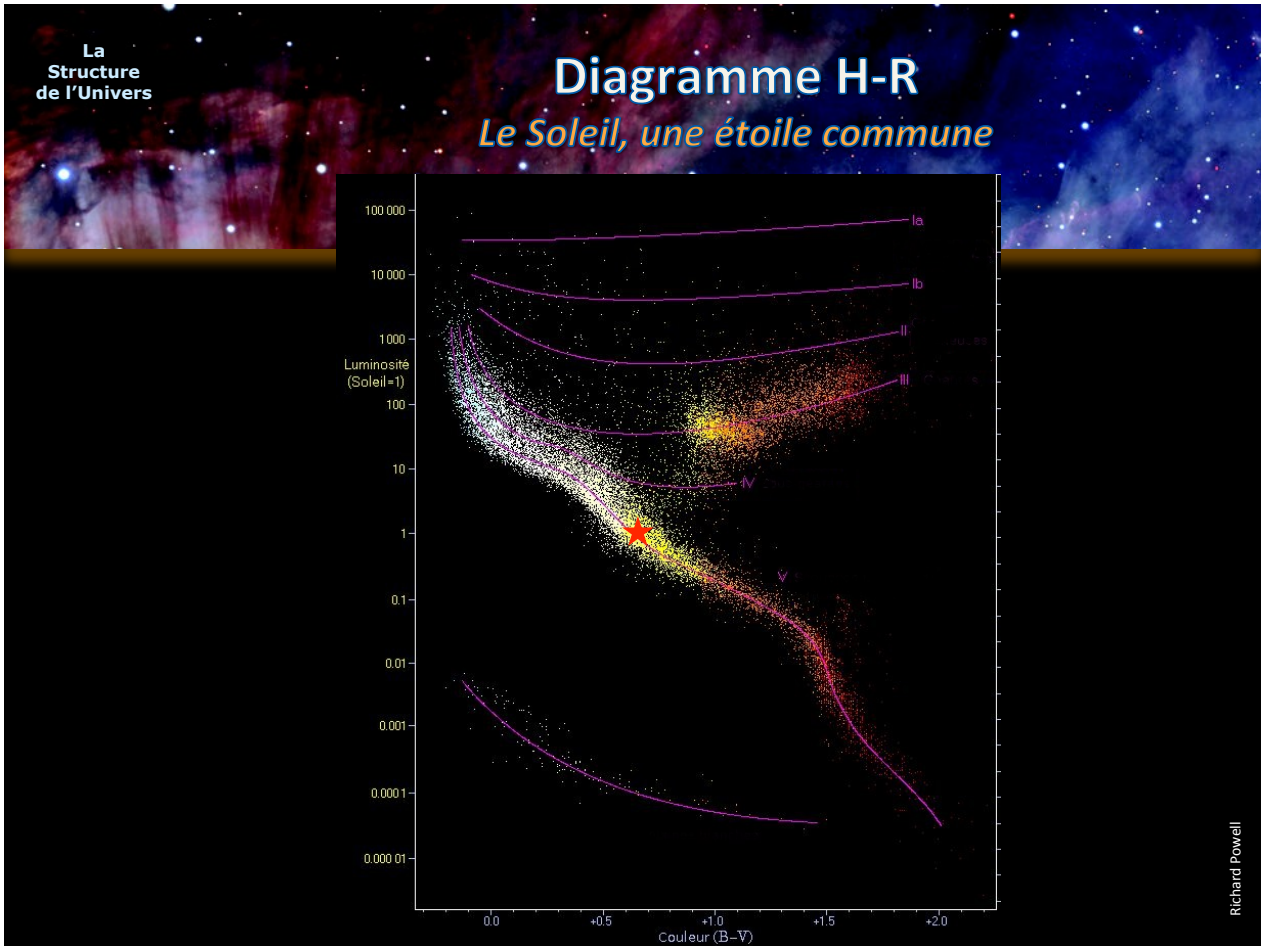
Plusieurs séquences d'étoiles apparaissent :

- il existe un lien entre la luminosité et l'indice de couleur (car pas de distribution aléatoire)
- indique le rôle caché d'un ou plusieurs paramètres supplémentaires (car plusieurs séquences: Ia/Ib/II/III/IV/V = *classes de luminosité*)

Le Soleil: une étoile banale

Position du Soleil ($L=1 L_{\text{sol}}$ et $B-V = 0.66$) au milieu de la séquence d'étoiles la plus peuplée (*séquence principale*)

➤ Étoile peu particulière!



Couleur et longueur d'onde

La perception de couleur est la manifestation sensorielle de la longueur d'onde de la lumière

➤ Nature **ondulatoire** de la lumière

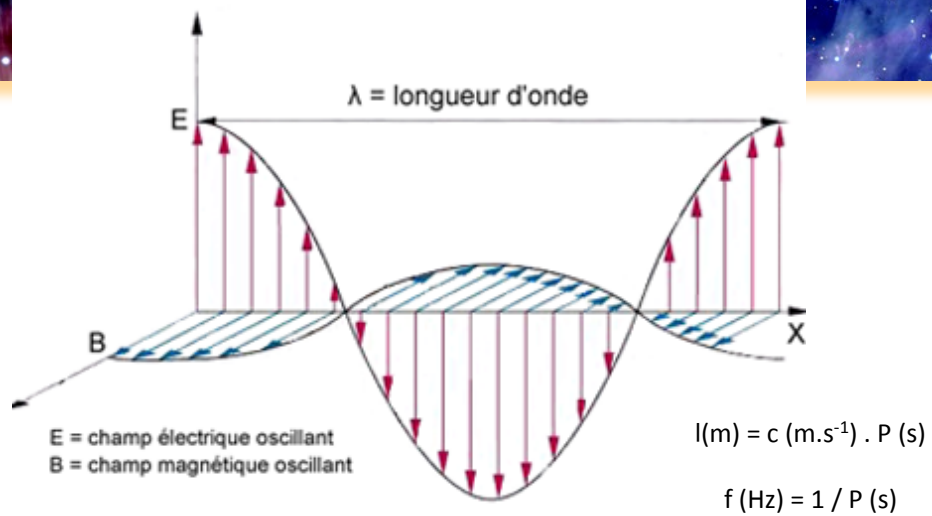
La lumière visible (colorée) ou invisible (UV, IR, ...) est (notamment) une onde; la couleur dépend de la **longueur d'onde** (ou de la fréquence)

violet: 380-430 nm / indigo: 430-450 / bleu: 450-500 / cyan: 500-520 / vert: 520-565 /
jaune: 565-590 / orange: 590-625 / rouge: 625-740

Vers les **petites** longueurs d'onde : bleu => violet => ultraviolet

Vers les **grandes** longueur d'onde : orange => rouge => infrarouge

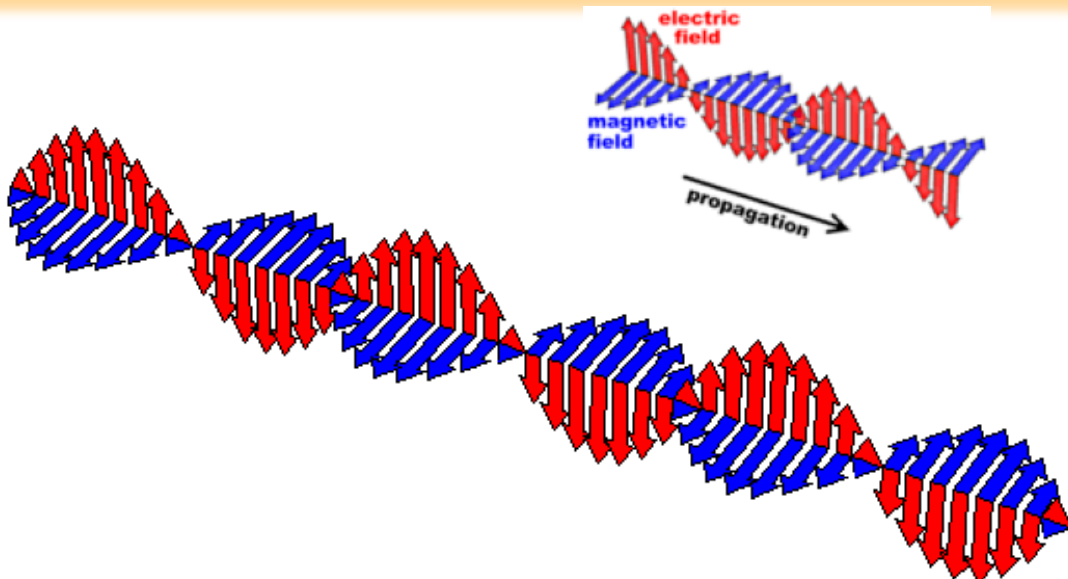
Lumière

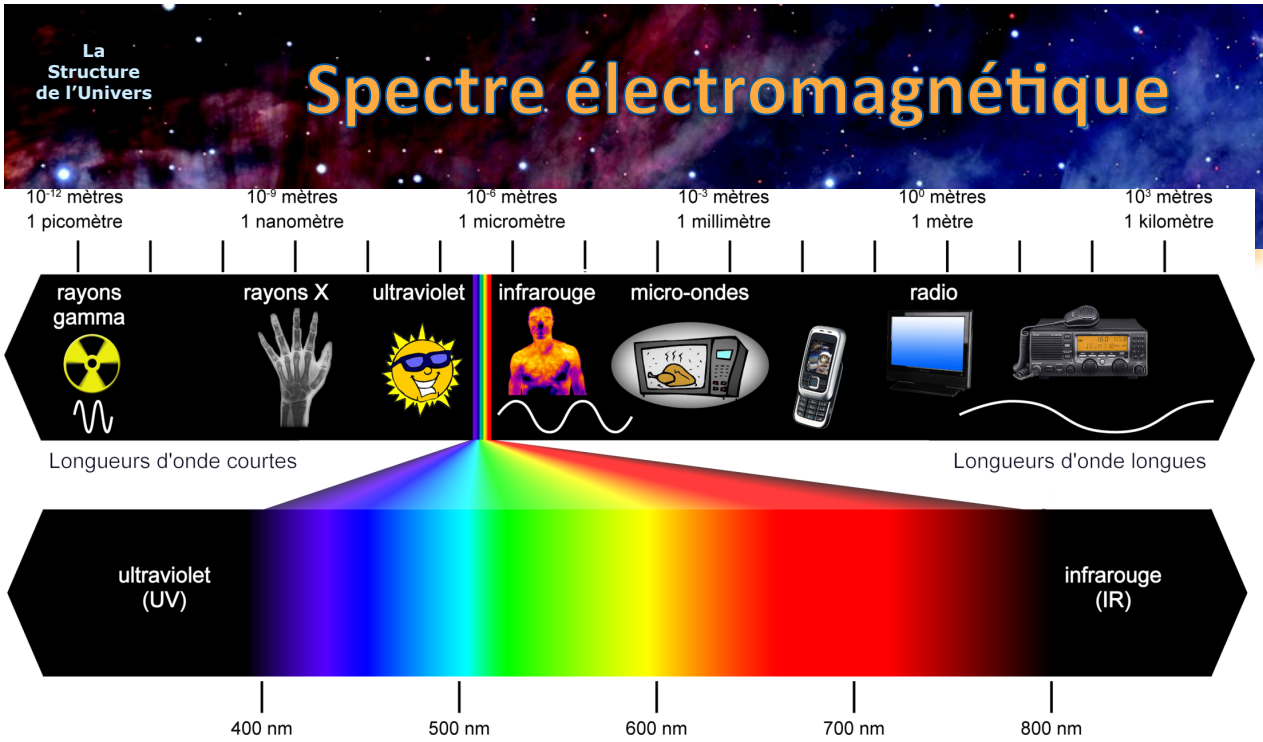


Onde électromagnétique: Champs électrique et magnétique oscillants, dotés d'amplitudes (intensité), d'une longueur d'onde/fréquence/période et d'une vitesse de propagation (célérité $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$)

Onde électromagnétique

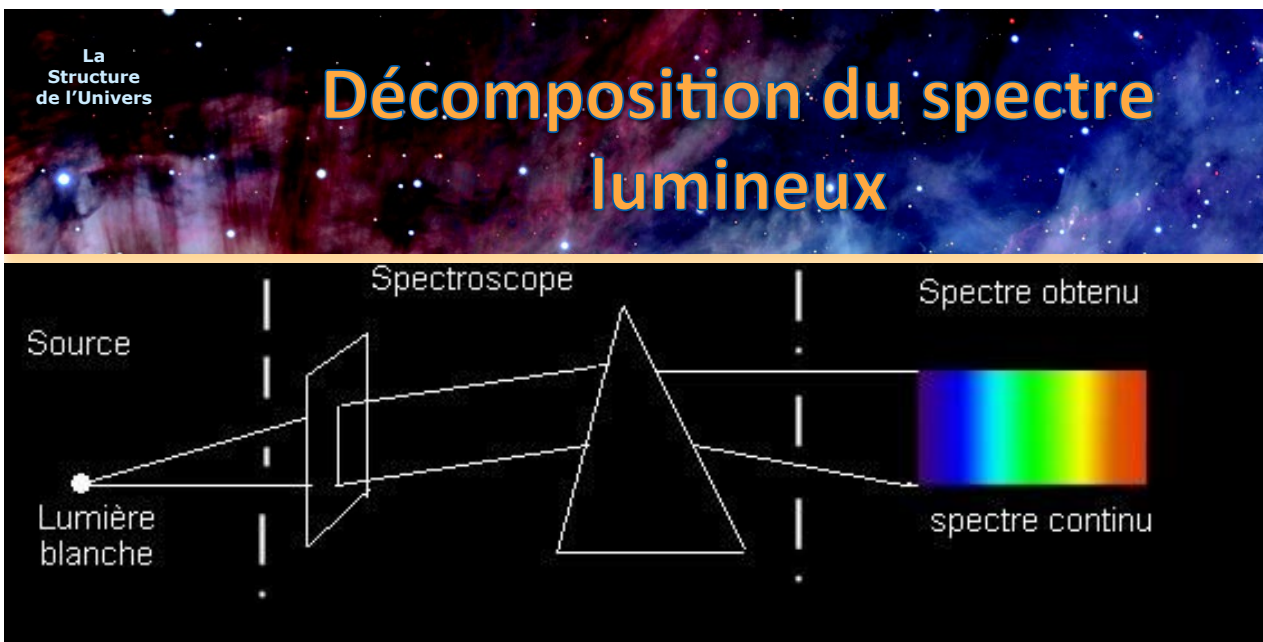
Oscillation couplée des champs électrique et magnétique



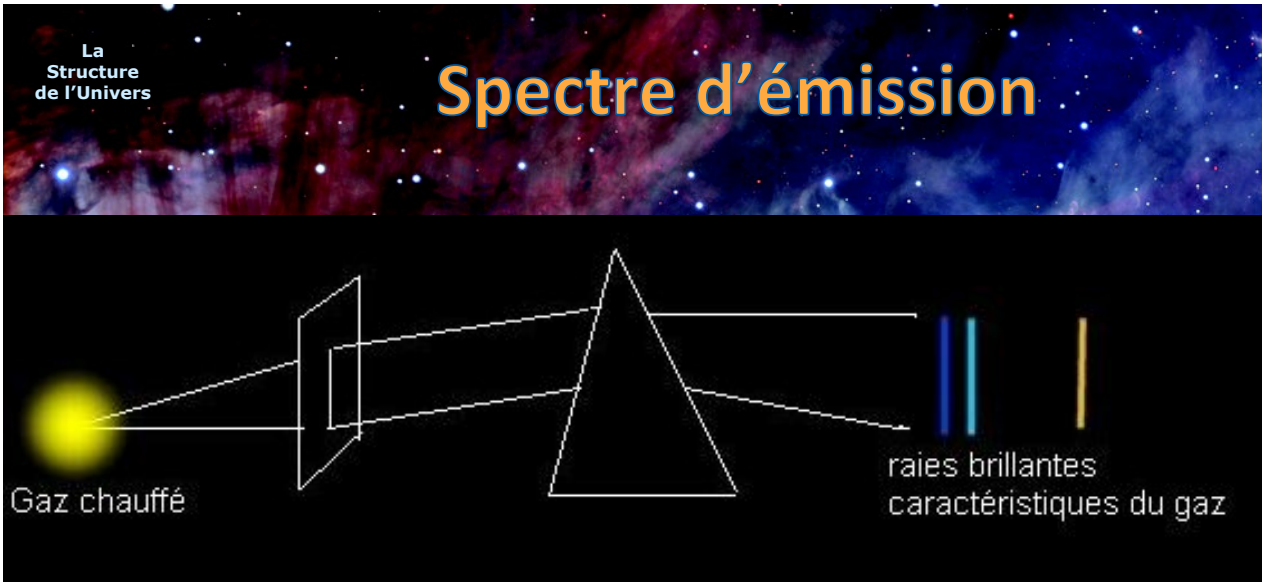


Couleurs généralisées:

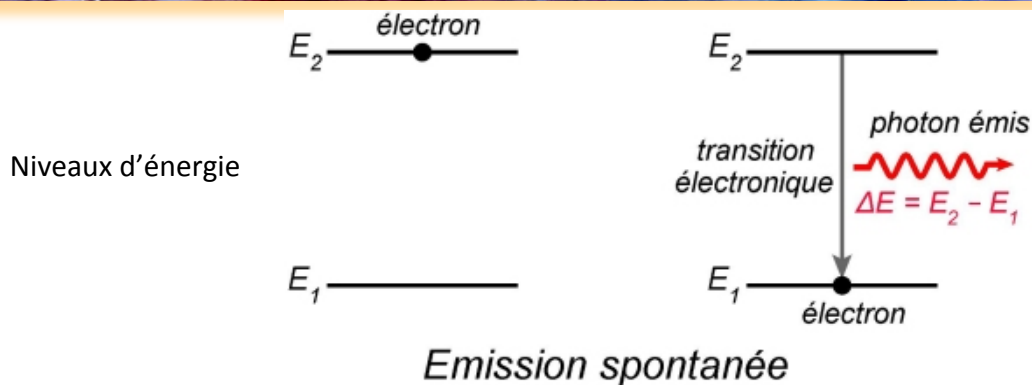
rayons gamma / rayons X / ultraviolet / visible / infrarouge / submillimétrique / micro-ondes / radio



Spectroscopie: analyse de l'intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde, grâce à un prisme ou un réseau diffractant (*spectroscopie*)



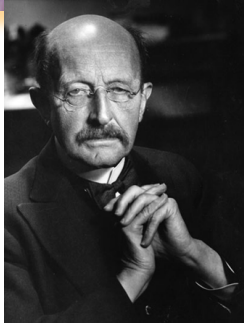
- Lumière d'un gaz peu dense chauffé analysée par un spectroscope: obtention d'un **spectre d'émission** (discontinu) caractéristique de l'espèce chimique
- chauffage: collisions et excitation des atomes
 - transitions électroniques entre niveaux excités et de repos



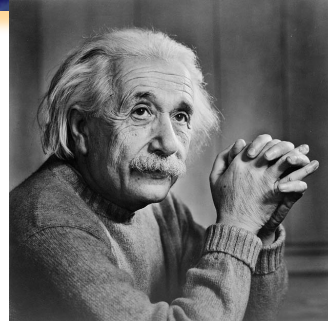
Transition électronique: la désexcitation ΔE d'un électron s'accompagne de l'émission d'un **photon** (quantum de lumière) de fréquence f

- $\Delta E = h f$ h : constante de Planck = $6.63 \cdot 10^{-34}$ J.s

Les pères du photon



Planck, 1858-1947



Einstein, 1879-1955

Max Planck: théorie des quanta (petits paquets d'énergie) en 1900

Albert Einstein: explication de l'effet photoélectrique en 1905 en utilisant le concept de particules de lumière

Raies d'émission

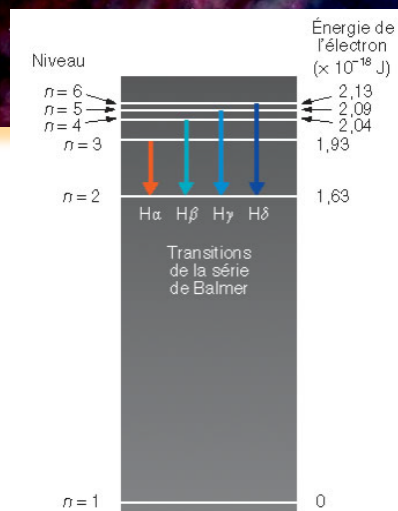


Figure 4.7

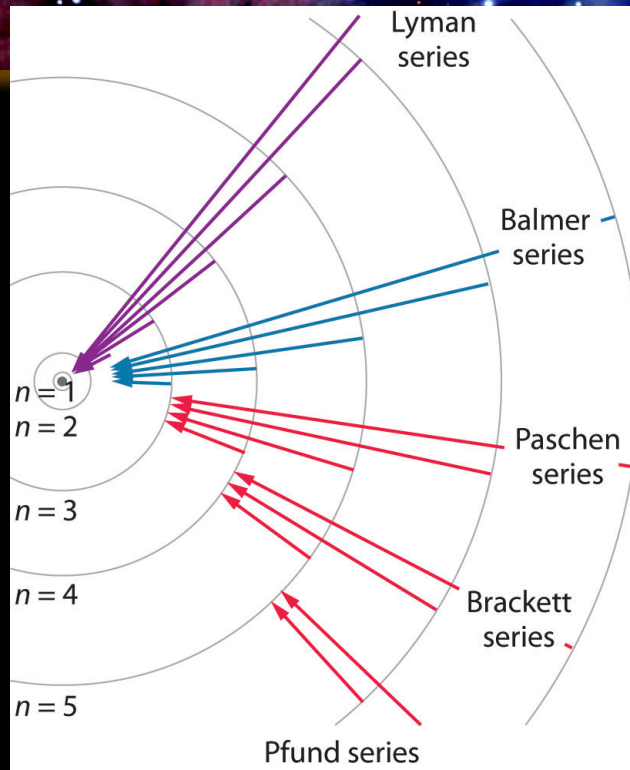
Série de Balmer: raies spectrales de l'atome d'hydrogène correspondant à une transition électronique d'un état de niveau $n > 2$ vers l'état de niveau 2

➤ dans le domaine visible : $H_a = 656.3$ nm / $H_b = 486.1$ nm

Raies de l'hydrogène

Séries de Lyman, Balmer, Paschen, Brackett, Pfund

- Lyman: UV
- Balmer: visible
- Paschen: IR
- Brackett: IR
- Pfund : IR



Grand « saut » d'énergie



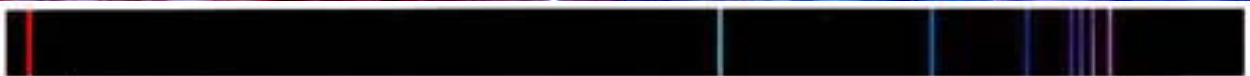
Grande fréquence du photon ($E=hf$)



Petite longueur d'onde (g, X, UV, bleu)

Spectre d'émission

de quelques éléments chimiques



Hydrogen



Sodium



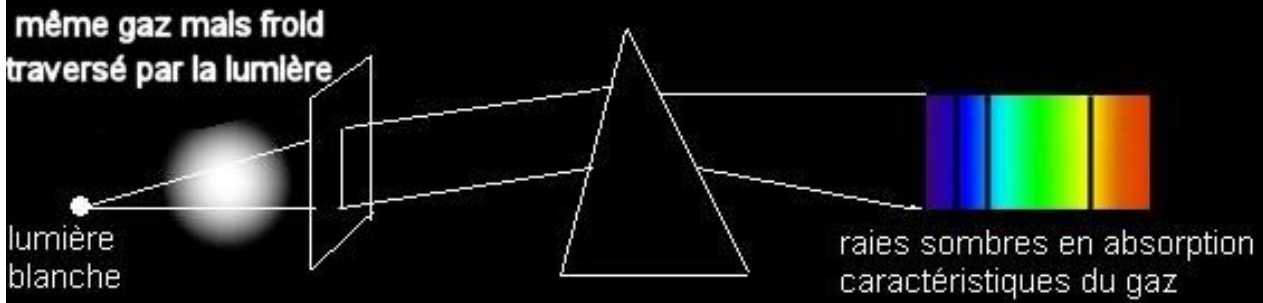
Helium



Neon

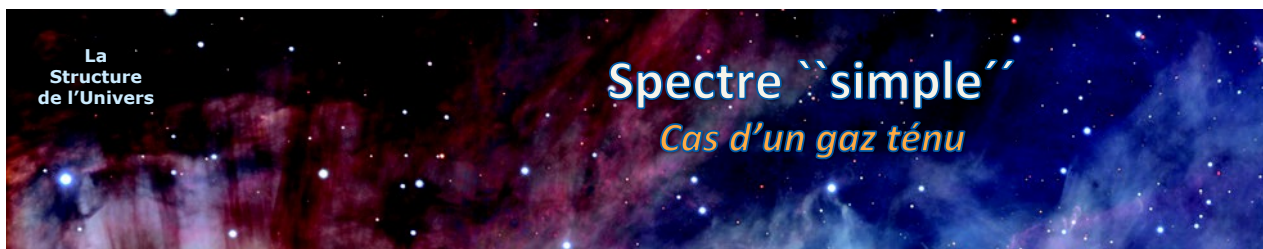


Mercury



Lumière (spectre continu) traversant un gaz ténu froid analysée par un spectroscopie: obtention d'un **spectre d'absorption** (discontinu) caractéristique de l'espèce chimique

➤ exact « négatif » du spectre d'émission



Emission d'un gaz ténu chaud

Chaleur => agitation des atomes => excitation des niveaux électroniques par collision => désexcitation et émission de photons de longueurs d'onde précises

➤ Raies d'émission

Transmission d'un gaz ténu froid

Photons incidents de toutes longueurs d'onde => absorption par atomes de certains photons selon gamme de niveaux électroniques => spectre émergent privé de photons de longueurs d'onde précises

➤ Raies d'absorption



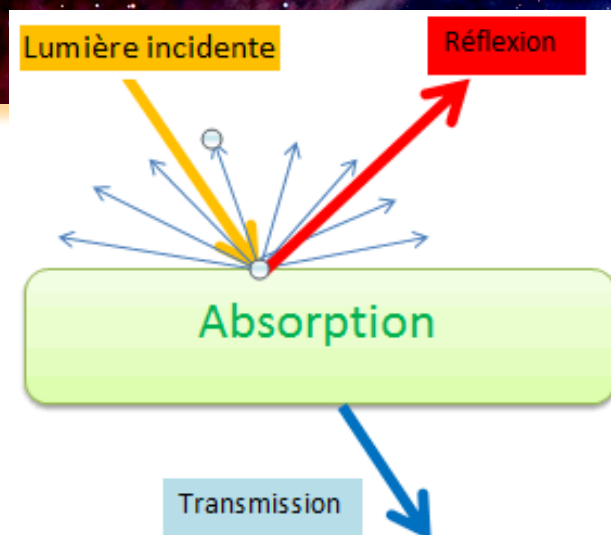
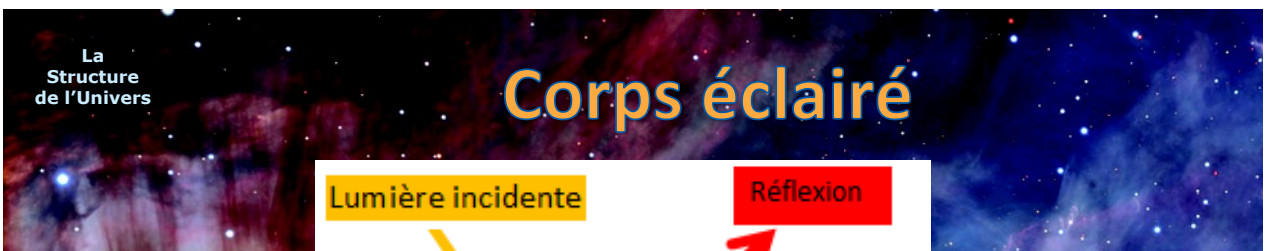
Interaction photons-matière

Un corps **suffisamment dense** permet au photon émis (désexcitation d'un atome « bousculé ») ou reçu de l'extérieur (corps éclairé) d'interagir à de très nombreuses reprises avec les composés du corps

- **Redistribution** complète des longueurs d'onde des photons

Le spectre émis devient **complexe**, il est défini (dans le cas général d'un corps chauffé et éclairé):

- par l'état d'excitation des composés du corps, i.e. la densité d'énergie interne (agitation), i.e. la **température** du corps
- par la nature du corps qui conditionne la manière dont la lumière incidente est **absorbée** (puis réémise) et/ou **réfléchi**



Flux lumineux incident se décompose au contact du corps en:

- un flux **transmis** qui traverse le corps
- un flux **réfléchi**
- un flux **absorbé** puis **réémis** par rayonnement (*émissivité*)

Transmission lumineuse



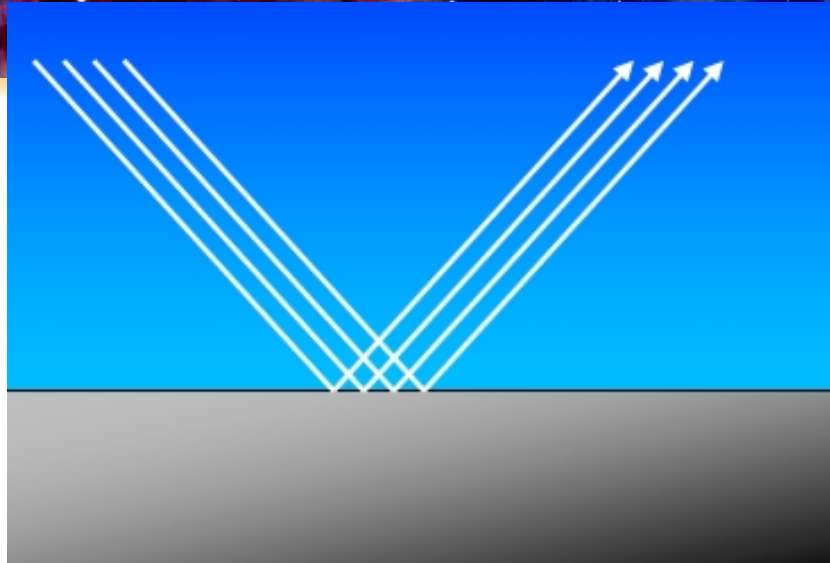
Transparence: un matériau est transparent s'il se laisse traverser par la lumière. Propriété **dépendant de la longueur d'onde:** le verre est transparent dans le visible mais il bloque les UV

Réflexion lumineuse



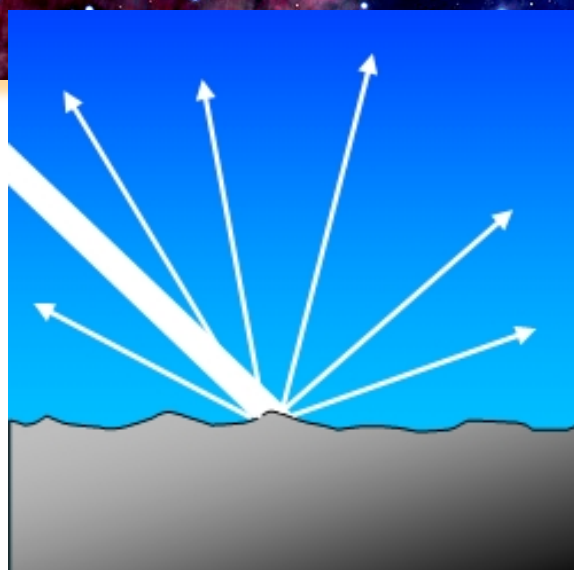
Réflexion dans le domaine visible: permet de voir les objets qui ne sont pas eux-mêmes sources de lumière visible

Réflexion lumineuse



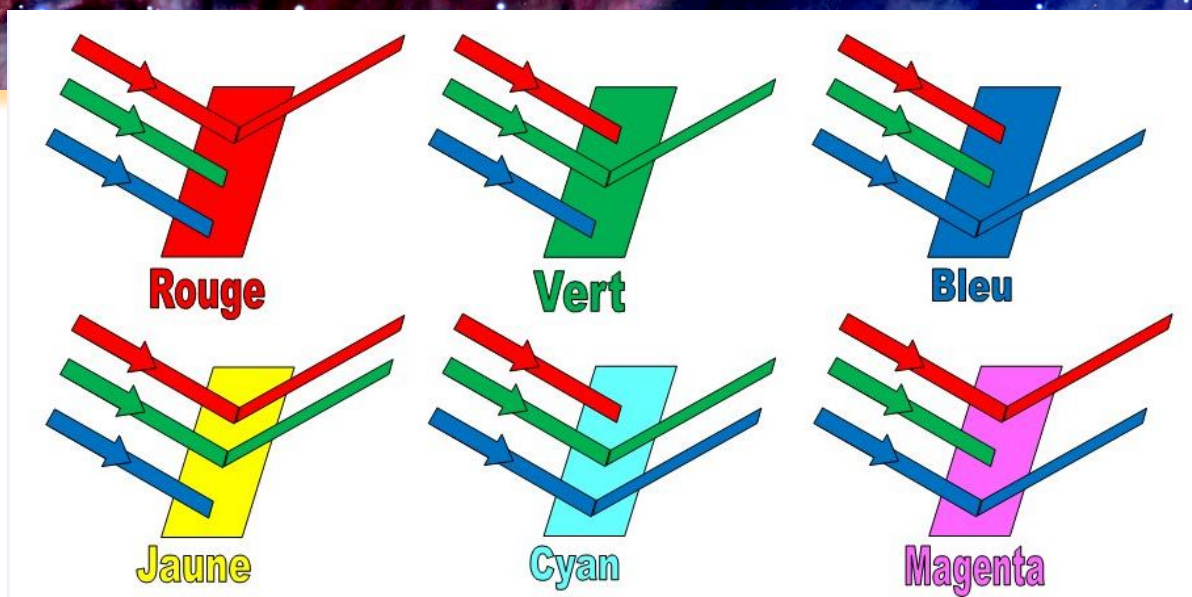
Réflexion spéculaire: réflexion régulière de la lumière, dans le cas d'une surface parfaitement plane ou polie (**miroir**)

Réflexion lumineuse



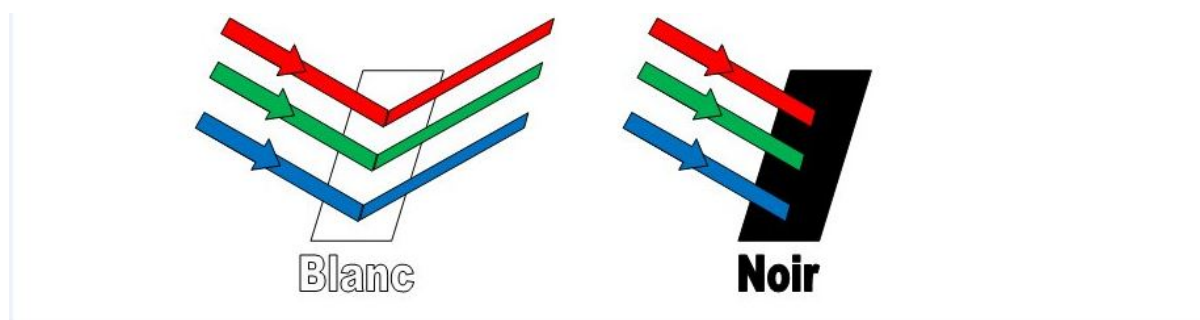
Réflexion diffuse: réflexion irrégulière (dans **toutes les directions**) de la lumière. L'efficacité de la réflexion dépend potentiellement de la longueur d'onde

Absorption lumineuse



Origine des couleurs: l'**absorption sélective** est la raison des couleurs des objets (le b-carotène absorbe entre le violet et le vert, laissant se réfléchir la partie allant du vert à rouge = orange des carottes)

Corps blanc, corps noir



Corps blanc (resp. gris): toutes les longueurs d'onde visibles sont pareillement réfléchies (resp. partiellement absorbées)

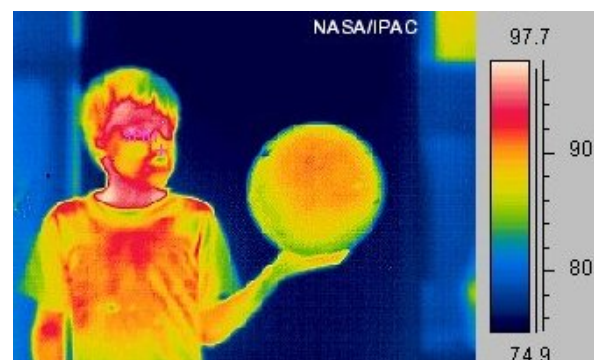
Corps noir: toutes les longueurs d'onde visibles (si tout le spectre électromagnétique: **corps noir idéal**) sont totalement absorbées



Rayonnement thermique: tout corps suffisamment dense émet un rayonnement lumineux caractérisé par la **température** du corps (température ambiante: rayonnement à environ 10 mm = infrarouge)



Balle froide



Balle chaude

Température et longueur d'onde: plus un corps est chaud, plus il émettra majoritairement à des longueurs d'onde petites (la balle chaude apparaît dans une gamme de rayons IR de plus grande fréquence que la balle froide)



Température et longueur d'onde: une haute température peut mener un corps à émettre thermiquement dans le visible (métal chauffé à rouge: ~800°C pour le fer)



Courbe-étalon du rayonnement thermique

Par définition, un corps noir idéal absorbe **toute** la lumière incidente (pas de réflexion, pas de transmission)

- Son spectre d'émission est toujours limité au **seul rayonnement thermique**

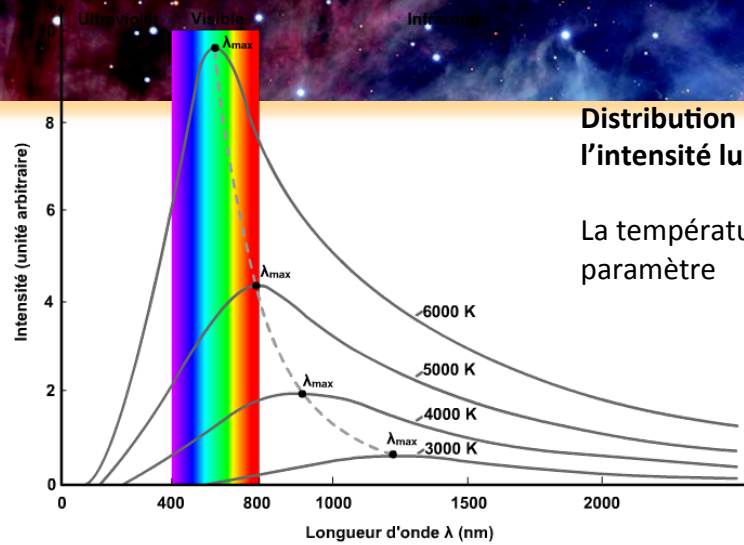
Aucune hypothèse sur la nature de l'objet: **indépendant de la nature du corps**

Détermination théorique du spectre de rayonnement d'un corps noir

Situation d'équilibre thermodynamique entre la matière et son rayonnement: nécessite l'apport de la **mécanique quantique** et de la **mécanique statistique** (gaz de bosons)

- **Loi de Planck:** intensité du rayonnement en fonction de λ , pour une T donnée

Loi de Planck

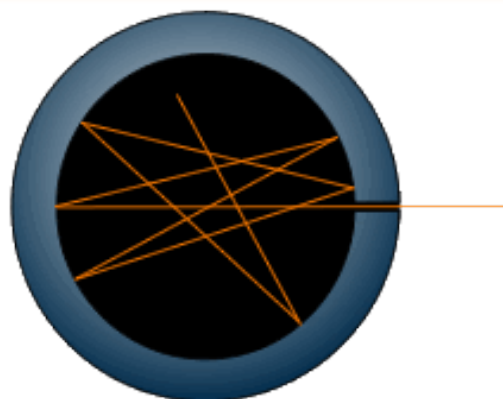


Loi de Wien:

$$\lambda_{\text{max}} = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ (m.K) / T}$$

➤ un corps noir n'est donc pas forcément noir si émission dans le visible !

Réalisation pratique d'un corps noir



Orifice d'une cavité thermostatée: enceinte aux parois opaques (pas de transparence!), chauffée (four) pour étudier la dépendance en température, à l'équilibre thermodynamique (équilibre matière/radiation), percée d'un trou (« matérialisation » du corps noir)



Absorption totale

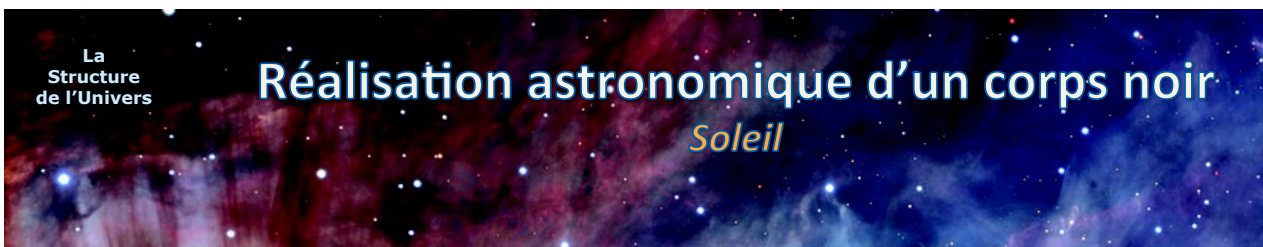
La lumière entrant dans l'orifice ne ressortira pas après son interaction multiple (réflexion, absorption) avec les parois de la cavité

- Pas de réflexion, pas de transmission: **définition du corps noir**

Rayonnement thermique

Le rayonnement établi à l'intérieur de l'enceinte chauffée peut s'échapper par le trou. Si la taille est suffisamment réduite pour que la perte d'énergie lumineuse soit négligeable par rapport à l'énergie disponible à l'intérieur de la cavité: pas de perturbation de la distribution interne de l'énergie

- **Rayonnement de Planck** émis par l'orifice



Absorption totale

Un photon traverserait normalement en ligne droite le rayon du Soleil en 2 secondes

Au lieu de cela, il faut près d'un million d'année pour que l'énergie soit extraite du Soleil (absorptions et réémissions multiples)

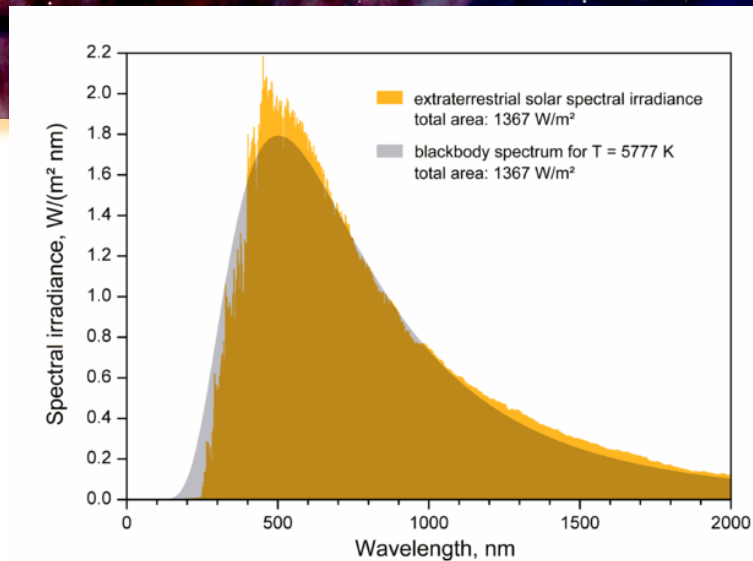
- Le Soleil est très absorbant pour ses propres photons: **corps noir**

Rayonnement thermique

Les photons qui s'échappent (*photosphère*) représentent une infime fraction de l'énergie globale du Soleil

- **Rayonnement de Planck** de température $T_{\text{photosphère}}$

Spectre du Soleil et corps noir



Spectre solaire: le spectre du Soleil est comparable au spectre d'un corps noir de $T = \sim 5800 \text{ K}$

➤ les étoiles émettent en première approximation comme des corps noirs

Diagramme H-R: interprétation

Que mesure l'indice de couleur?

Indice de couleur, étoile et corps noir

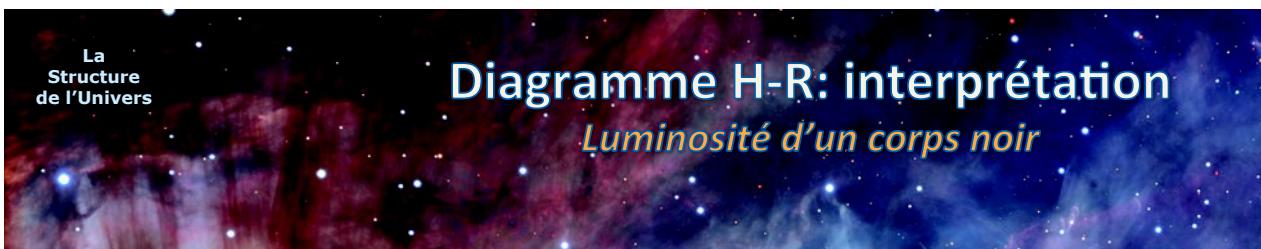
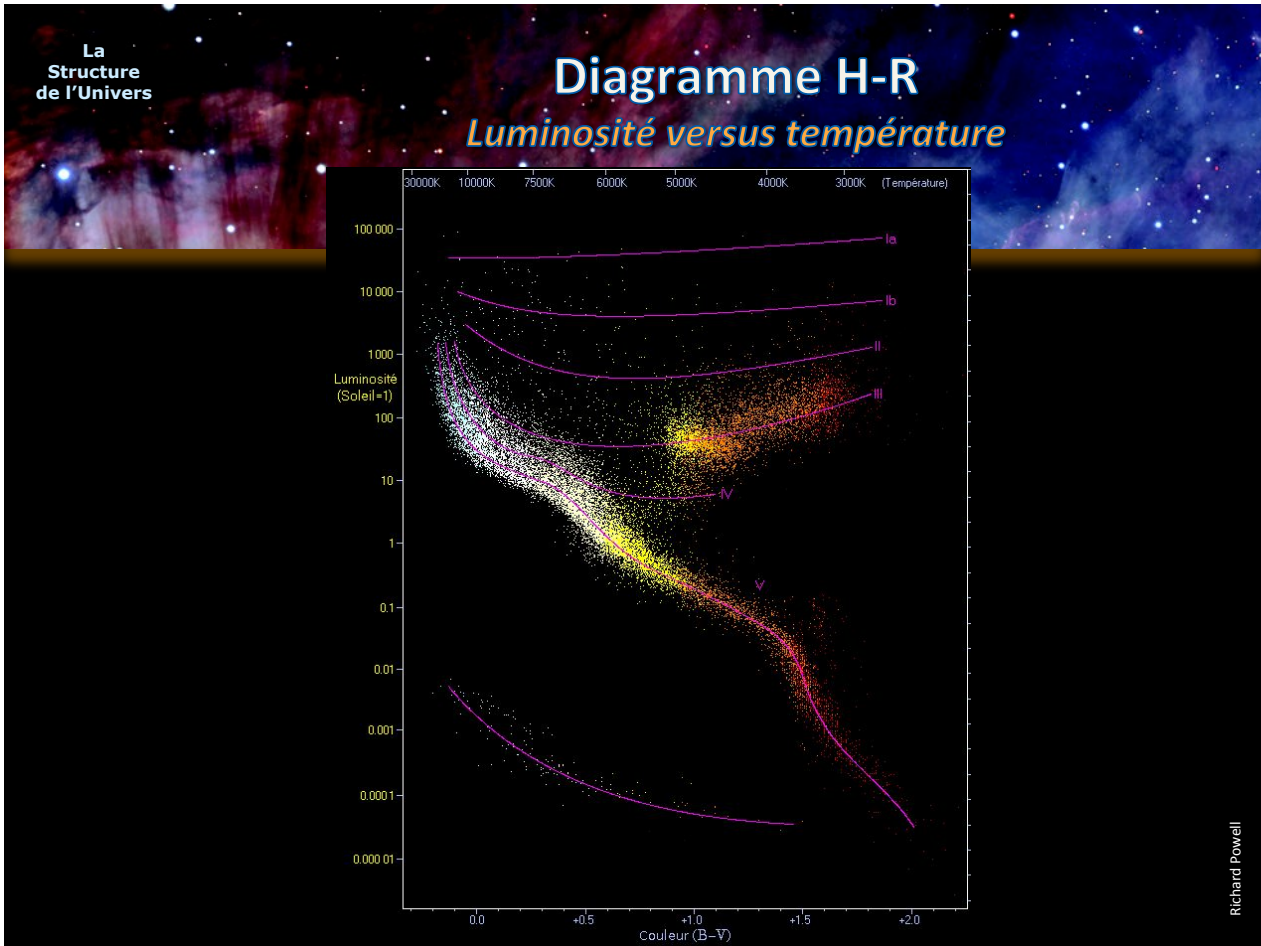
L'indice de couleur est le **rapport des flux stellaires** reçus dans deux gammes de longueur d'onde (deux « couleurs »)

Les étoiles émettent en première approximation comme des **corps noirs** de température $T_{\text{photoshère}} = T_{\text{surface}}$

La courbe du corps noir (flux en fonction de la longueur d'onde) dépend uniquement de la **température**

➤ L'indice de couleur mesure la température de surface de l'étoile

L'indice B-V du diagramme H-R peut être avantageusement remplacé par la température



Corps noir, le retour

La puissance totale rayonnée par unité de surface d'un corps noir (intégrale de la distribution spectrale) est proportionnelle à la puissance quatre de la température

➤ Loi de Stefan-Boltzmann

$$j \text{ (W/m}^2\text{)} = \int_0^\infty I_\lambda d\lambda = s T^4 \quad s = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$$

- j est la **luminosité surfacique** (m^{-2}) **bolométrique** ($\forall \lambda$)
- s est la **constante de Stefan**

Diagramme H-R: interprétation

Raison des classes de luminosité?

Luminosité d'une étoile

Luminosité d'un corps noir sphérique de rayon R: loi de Stefan-Boltzmann + surface d'une sphère de rayon R

$$L = j 4\pi R^2 = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

La **luminosité d'une étoile** de température T et de rayon R est proportionnelle à R^2 et T^4

Pour une température donnée, une étoile est plus lumineuse si elle est plus volumineuse

➤ Classe de luminosité liée à la taille de l'étoile

Ia/Ib: supergéantes / II: géantes lumineuses / III: géantes / IV: sous-géantes
V: naines / VI: sous-naines / VII: naines blanches

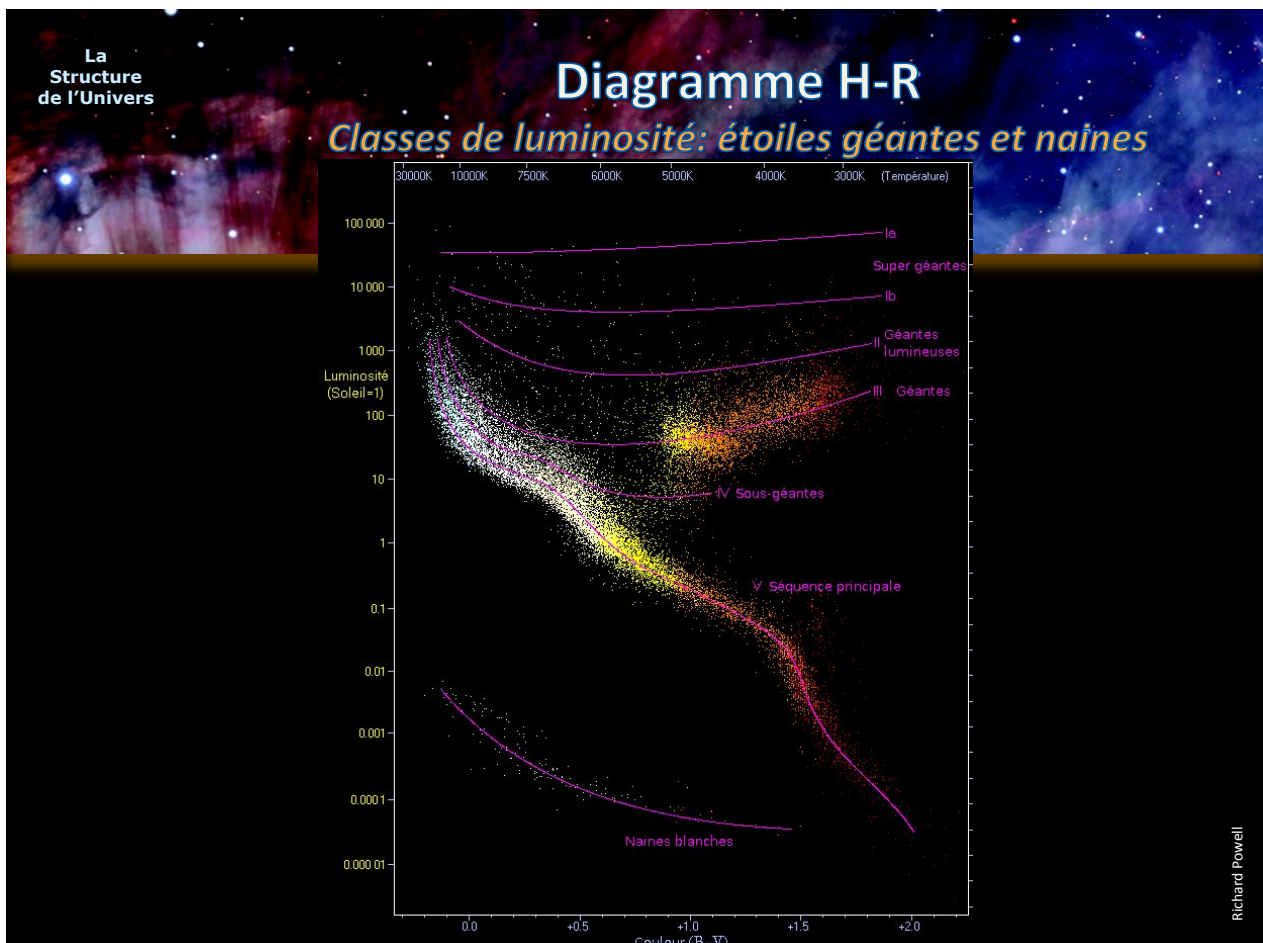


Diagramme H-R: interprétation

Rôle de la masse?

Pourquoi des étoiles de même température mais de rayon différent?

Hypothèse naturelle: étoiles de **masse** différente

Plausible si **densité moyenne** identique pour toutes les étoiles (masse volumique)

➤ Hypothèse à **vérifier!!!**

Mesure de la masse des étoiles

Paramètre physique a priori impossible à déterminer directement pour une étoile isolée: masse \neq photons => **pas de mesure directe** de masse possible (différent du cas de la température ou de la luminosité)

Heureusement, la masse se manifeste par la loi **d'attraction universelle**

➤ Intérêt des **systèmes doubles**

Système Soleil-Terre

Le Soleil

Paramètres physiques du Soleil

Luminosité du Soleil: liée au flux reçu sur Terre (nécessaire de connaître la distance Soleil-Terre – UA – et le rayon de la Terre)

Température du Soleil: obtenue par le spectre solaire (corps noir => température de surface)

Diamètre du Soleil: déduit de la loi de Stefan-Boltzmann ($L+T \Rightarrow R$)

	Soleil
Luminosité	$3.8 \cdot 10^{26}$ W
Température de surface	5800 K
Diamètre photosphère	$1.39 \cdot 10^6$ km



Troisième loi de Kepler généralisée (1687)

$$\frac{A^3}{P^2} = G \frac{M_S + m_T}{4\pi^2} \approx G \frac{M_S}{4\pi^2}$$

- **A: demi-grand axe** de la trajectoire elliptique de la Terre (lié à l'UA)
 - **P: période orbitale** (la Terre tourne autour du Soleil en 1 an = *période de révolution*)
 - **G: constante gravitationnelle** (constante universelle)
 - **Somme des masses:** la masse de la Terre est supposée négligeable par rapport à la masse du Soleil
- On peut déduire la **masse du Soleil** de cette relation, à condition de connaître G et A dans le système international d'unités MKS (\neq UA, M_s , an)



Détermination de l'UA et de la constante G

Problème difficile qui occupa physiciens (mesure de G par **Cavendish** en 1798) et astronomes au 18e siècle (**calibration de l'UA** en système MKS)

- $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ constante gravitationnelle
- $A = 149.6 \cdot 10^9 \text{ m}$ unité astronomique
- $P = 365.25 \times 24 \times 3600 \text{ s}$ année

➤ **Masse du Soleil** : $1.99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

A vérifier : **masse de la Terre** négligeable par rapport à la masse du Soleil ?

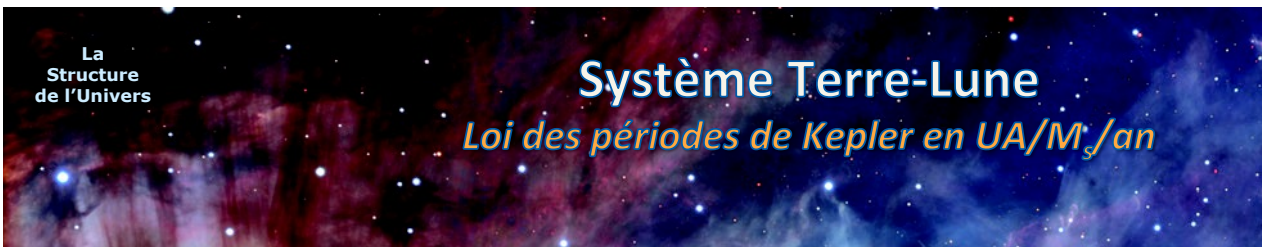


Troisième loi de Kepler appliquée au système Terre-Lune

$$\frac{a^3}{p^2} = G \frac{m_T + m_L}{4\pi^2} \approx G \frac{m_T}{4\pi^2}$$

- a: rayon de l'orbite de la Lune = 0.00257 UA
- p: période de révolution (sidérale) de la Lune = 0.075 an (27 jours)
- G: constante gravitationnelle (constante universelle)
- Somme des masses: la masse de la Lune est supposée négligeable par rapport à la masse de la Terre

➤ Le rapport a^3/p^2 (resp. A^3/P^2) dépend uniquement de m_T (resp. M_s)



Rapports a^3/P^2 dans le système solaire

P_{orb} en an, a en UA => a^3/P^2 en masse solaire M_s

	P_{orb}	a	a^3/P^2
Lune	0.075	0.00257	$3.0 \cdot 10^{-6}$
Mercure	0.24	0.387	1.0
Vénus	0.62	0.723	1.0
Terre	1	1	1.0
Mars	1.88	1.524	1.0
Jupiter	11.86	5.203	1.0
Saturne	29.46	9.54	1.0

Egal à $1 M_s$ (si orbite autour du Soleil) ou $3.0 \cdot 10^{-6} M_s$ (autour de la Terre)

$$\frac{a^3}{p^2} = G \frac{m_T}{4\pi^2} \quad \text{et} \quad \frac{A^3}{P^2} = G \frac{M_S}{4\pi^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{A^3}{P^2} \frac{p^2}{a^3} = \frac{M_S}{m_T}$$



Détermination de masse de la Terre

	Soleil	Terre
Luminosité	$3.8 \cdot 10^{26}$ W	
Température	5800 K	
Diamètre	$1.39 \cdot 10^6$ km	110 fois moins
Masse	$1.99 \cdot 10^{30}$ kg	330 000 fois moins



Système Soleil-Terre

Loi de Kepler utile pour déterminer masse du Soleil

Nécessite la connaissance de la **distance** Soleil-Terre, de la **période orbitale** et de l'hypothèse (vérifiée) $M_s \gg m_T$

➤ Transposable aux **système d'étoiles doubles** ?

Système d'étoiles doubles

Difficultés attendues: détermination de la séparation, de la période orbitale, masses a priori de même ordre de grandeur

Nécessite conditions particulières du système observé (*système binaire visuel*): méthode non généralisable, mesure de la masses des étoiles généralement **inaccessible** => comment interpréter le diagramme H-R?

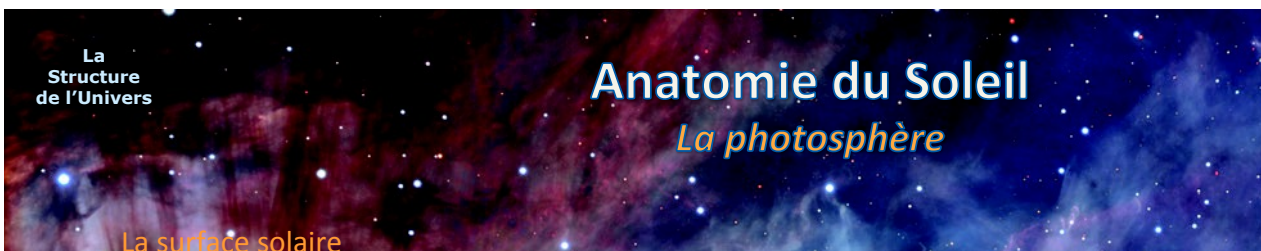
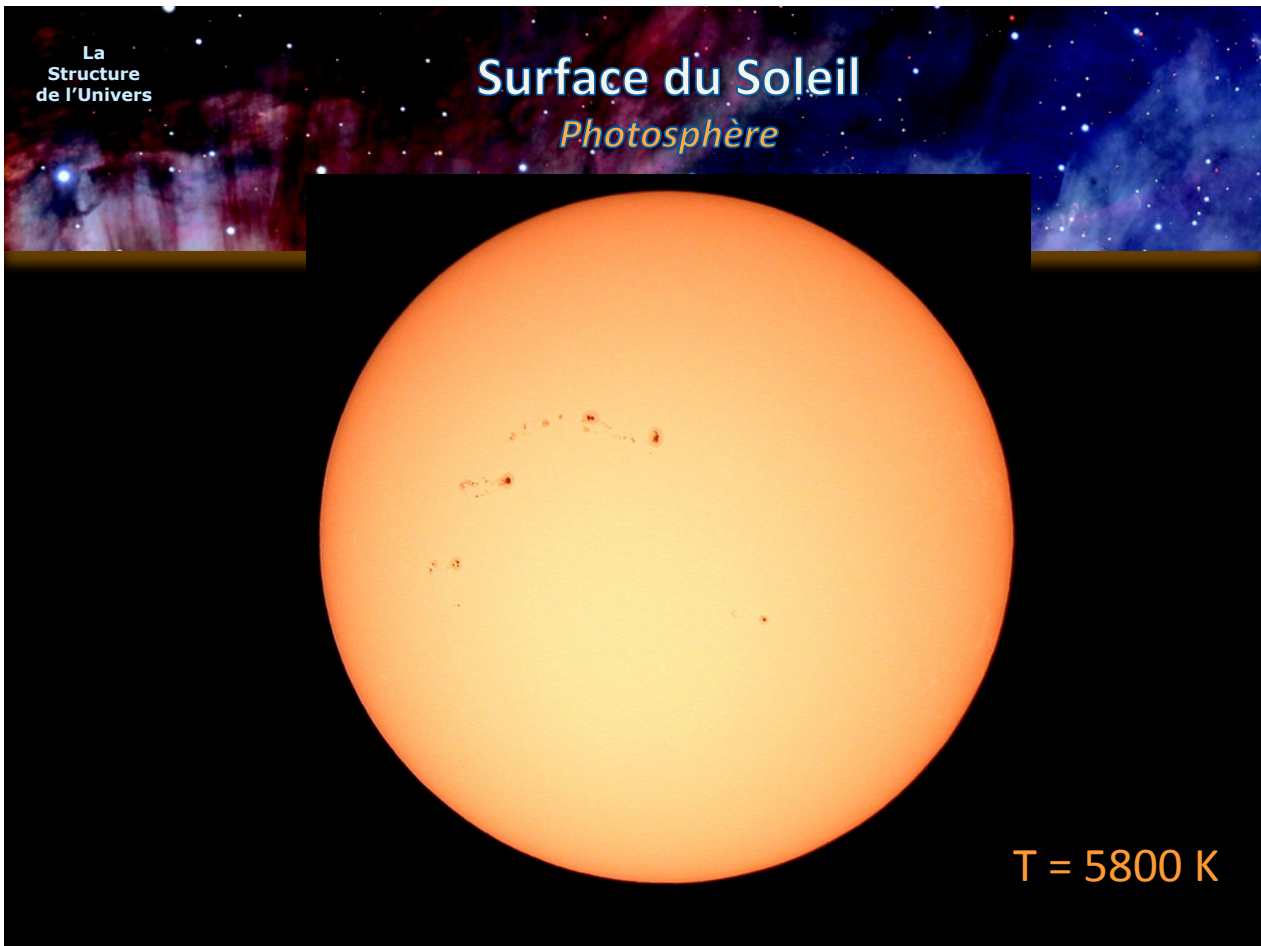
➤ D'abord mieux connaître la **physique des étoiles**, en commençant par **le Soleil**



La surface visible du Soleil constitue la **photosphère**

Il s'agit de la région d'où les photons peuvent **s'échapper** sans être réabsorbés, parce qu'elle correspond à une brutale chute de la densité

- Epaisseur $\sim 500 \text{ km}$ = 0.07% du rayon: le bord du Soleil est net



La surface visible du Soleil constitue la **photosphère**

Il s'agit de la région d'où les photons peuvent **s'échapper** sans être réabsorbés, parce qu'elle correspond à une brutale chute de la densité

➤ Epaisseur **~500 km** = 0.07% du rayon: le bord du Soleil est net

Structure granulaire de la surface

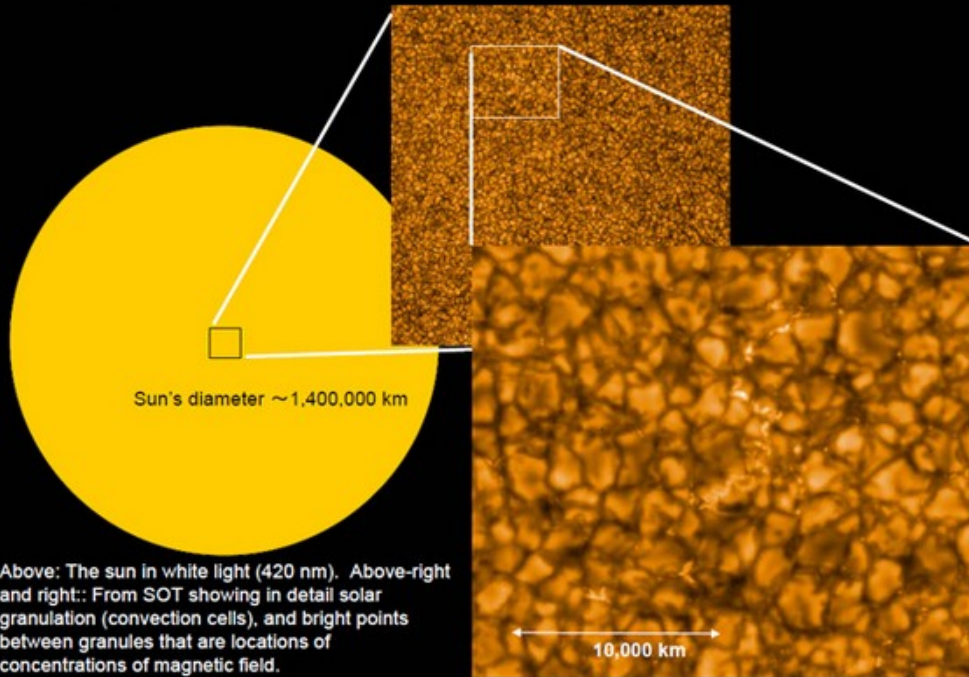
Présence de « grains de riz » ou **granules** à la surface

Durée de vie de **5 à 10 minutes**

Surface du Soleil

Granulation solaire

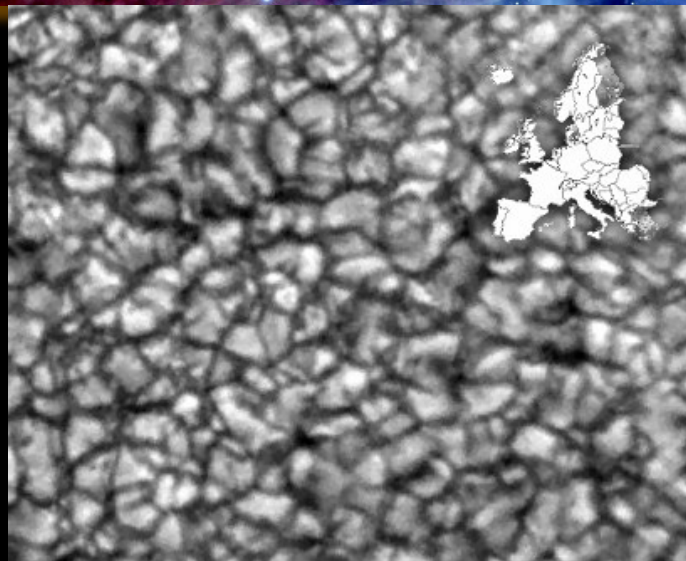
Hinode SOT First Light image



Above: The sun in white light (420 nm). Above-right and right:: From SOT showing in detail solar granulation (convection cells), and bright points between granules that are locations of concentrations of magnetic field.

Granulation solaire

Taille ~1500 km



Anatomie du Soleil

La photosphère

La surface solaire

La surface visible du Soleil constitue la **photosphère**

Il s'agit de la région d'où les photons peuvent **s'échapper** sans être réabsorbés, parce qu'elle correspond à une brutale chute de la densité

- Epaisseur **~500 km** = 0.07% du rayon: le bord du Soleil est net

Structure granulaire de la surface

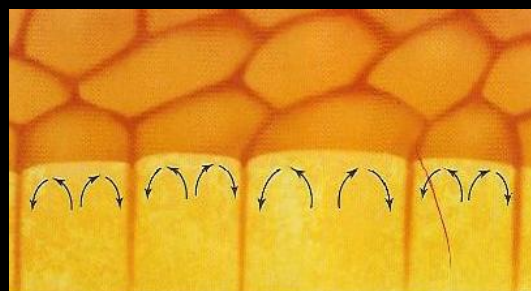
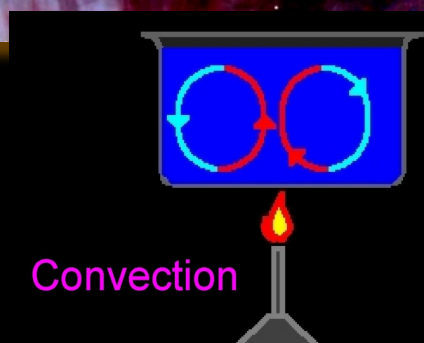
Présence de « grains de riz » ou **granules** à la surface

Durée de vie de **5 à 10 minutes**

- **Cellules convectives**: la matière chaude remonte par le centre d'une cellule, la matière froide s'enfonce via les bords

Granulation solaire

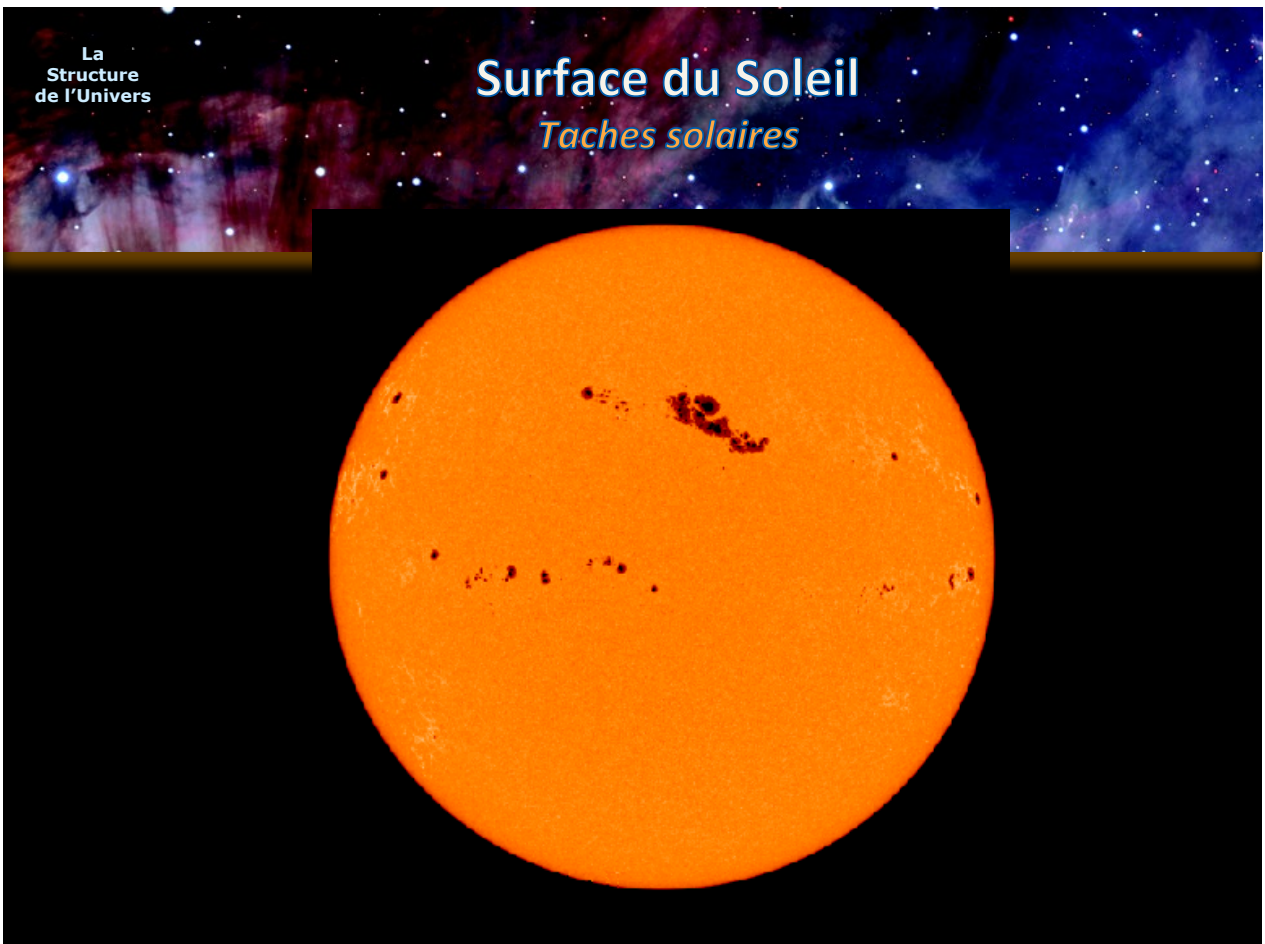
Cellules convectives



Les zones chaudes sont brillantes, les zone « froides » sont sombres: conséquence de la loi de Stefan-Boltzmann: $j = \sigma T^4$



Présence de **taches noires** à la surface du Soleil



Anatomie du Soleil

La photosphère

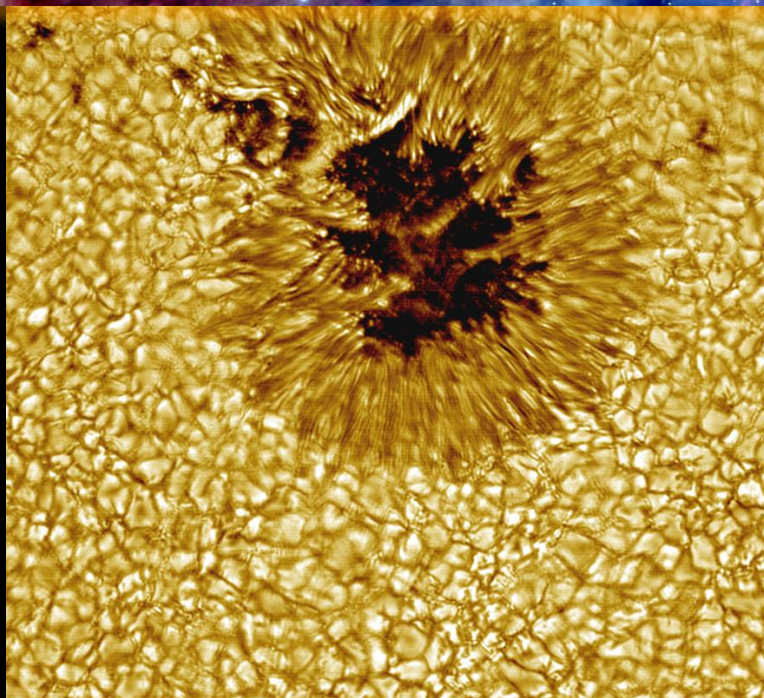
Les taches solaires

Présence de **taches noires** à la surface du Soleil

T~4000 K! Elles apparaissent noires par contraste

Tache solaire

Zone moins chaude



Anatomie du Soleil

La photosphère

Les taches solaires

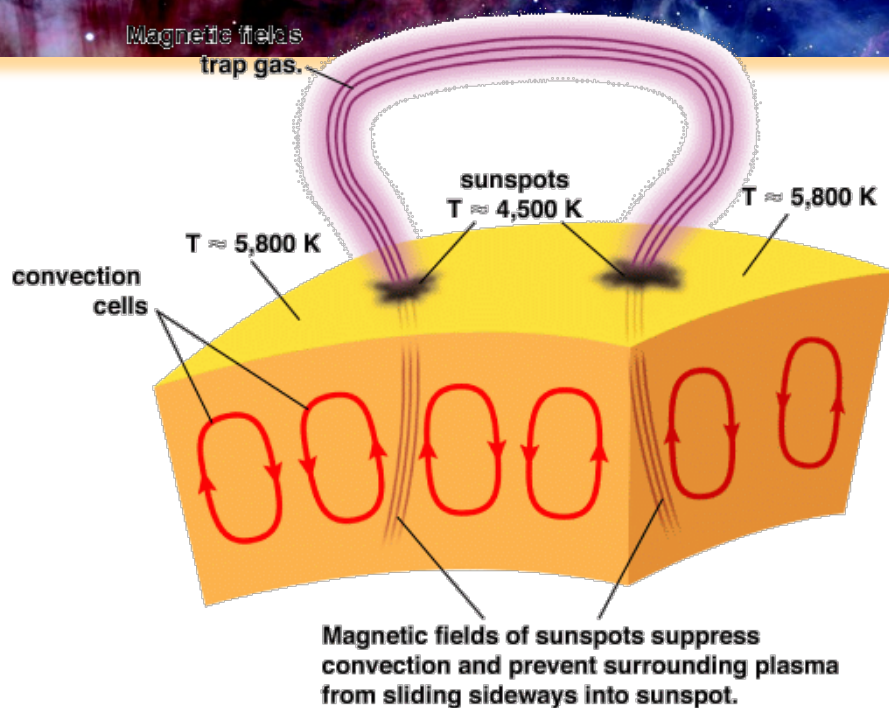
Présence de **taches noires** à la surface du Soleil

T \approx 4000 K! Elles apparaissent noires par contraste

Anomalies locales du champ magnétique: plus basse température liée au transport moins efficace de la chaleur par la convection dans ces zones à champ magnétique fort

Champ magnétique

Anomalie locale => efficacité moindre de la convection



Anatomie du Soleil

La photosphère

Les taches solaires

Présence de **taches noires** à la surface du Soleil

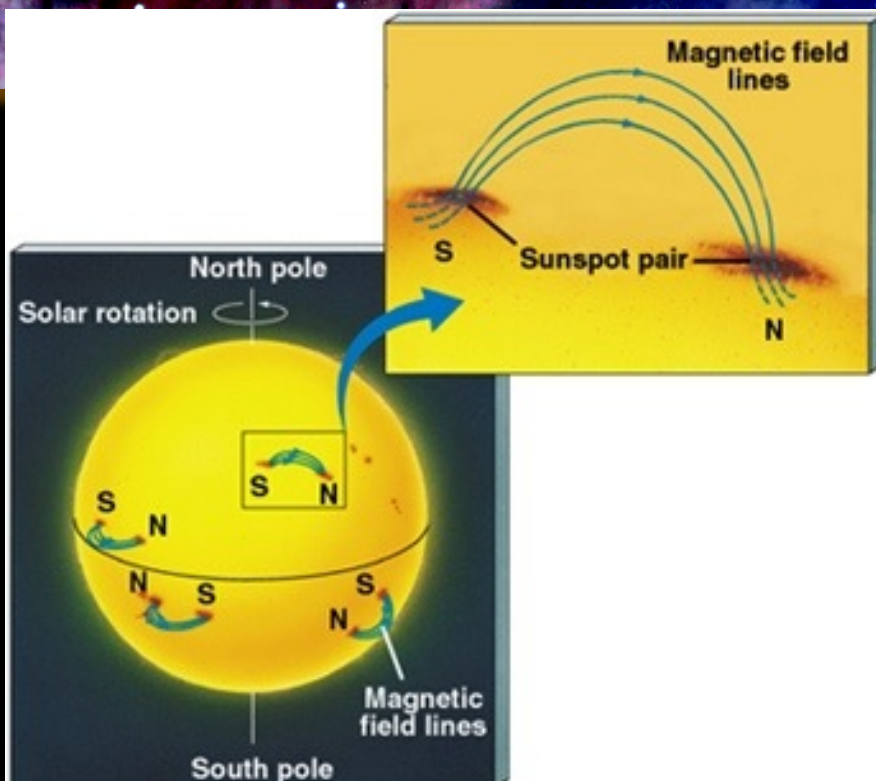
T~4000 K! Elles apparaissent noires par contraste

Anomalies locales du champ magnétique: plus basse température liée au transport moins efficace de la chaleur par la convection dans ces zones à champ magnétique fort

➤ Apparaissent par **paires** (pôles de l'aimant)

Paires de taches solaires

Pôles de l'aimant





Présence de **taches noires** à la surface du Soleil

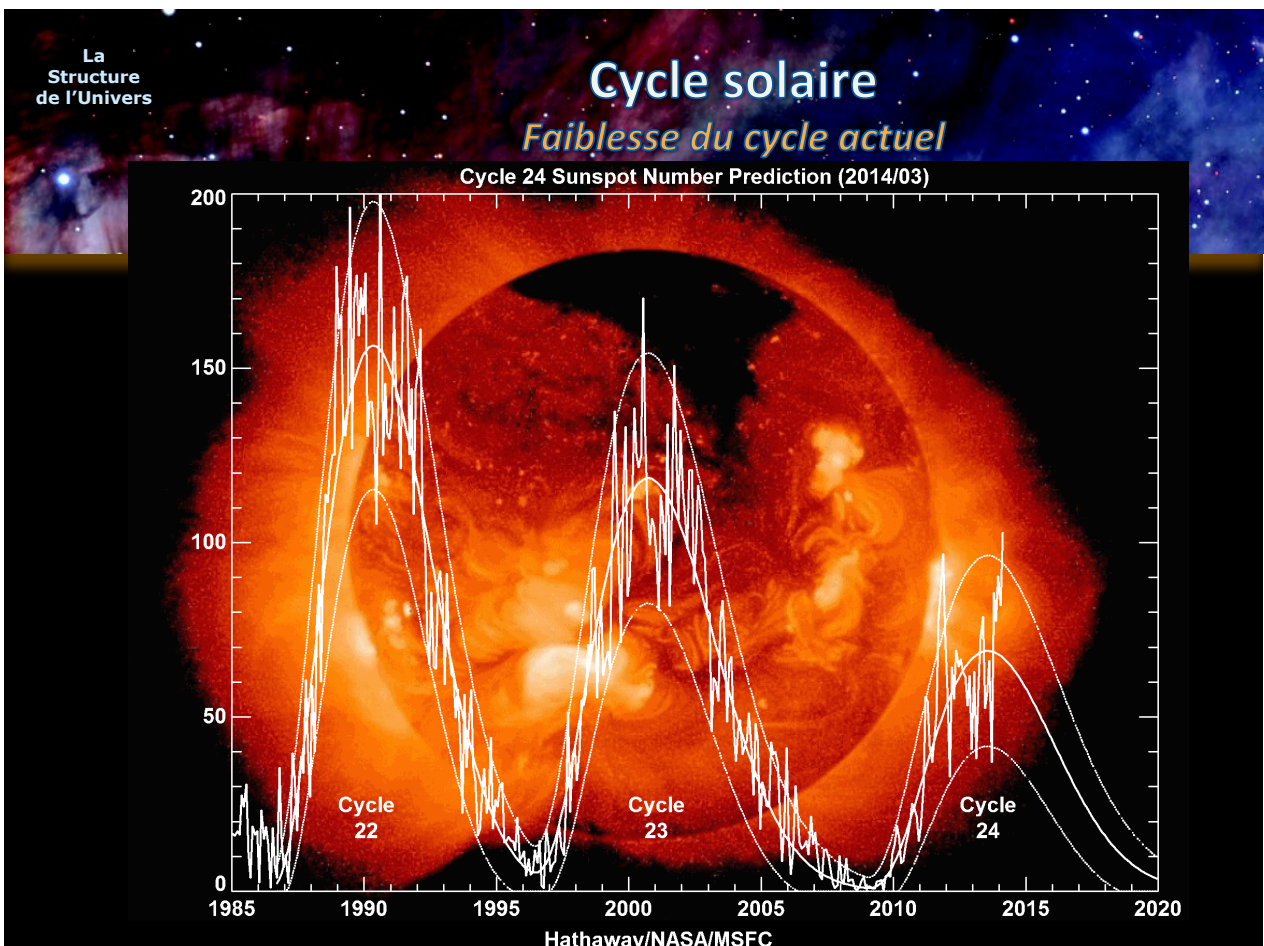
T~4000 K! Elles apparaissent noires par contraste

Anomalies locales du champ magnétique: plus basse température liée au transport moins efficace de la chaleur par la convection dans ces zones à champ magnétique fort

➤ Apparaissent par **paires** (pôles de l'aimant)

Cycle solaire

Cycle undécennal (11 ans) d'activité solaire (dernier maximum d'activité: 2013)





Présence de **taches noires** à la surface du Soleil

T~4000 K! Elles apparaissent noires par contraste

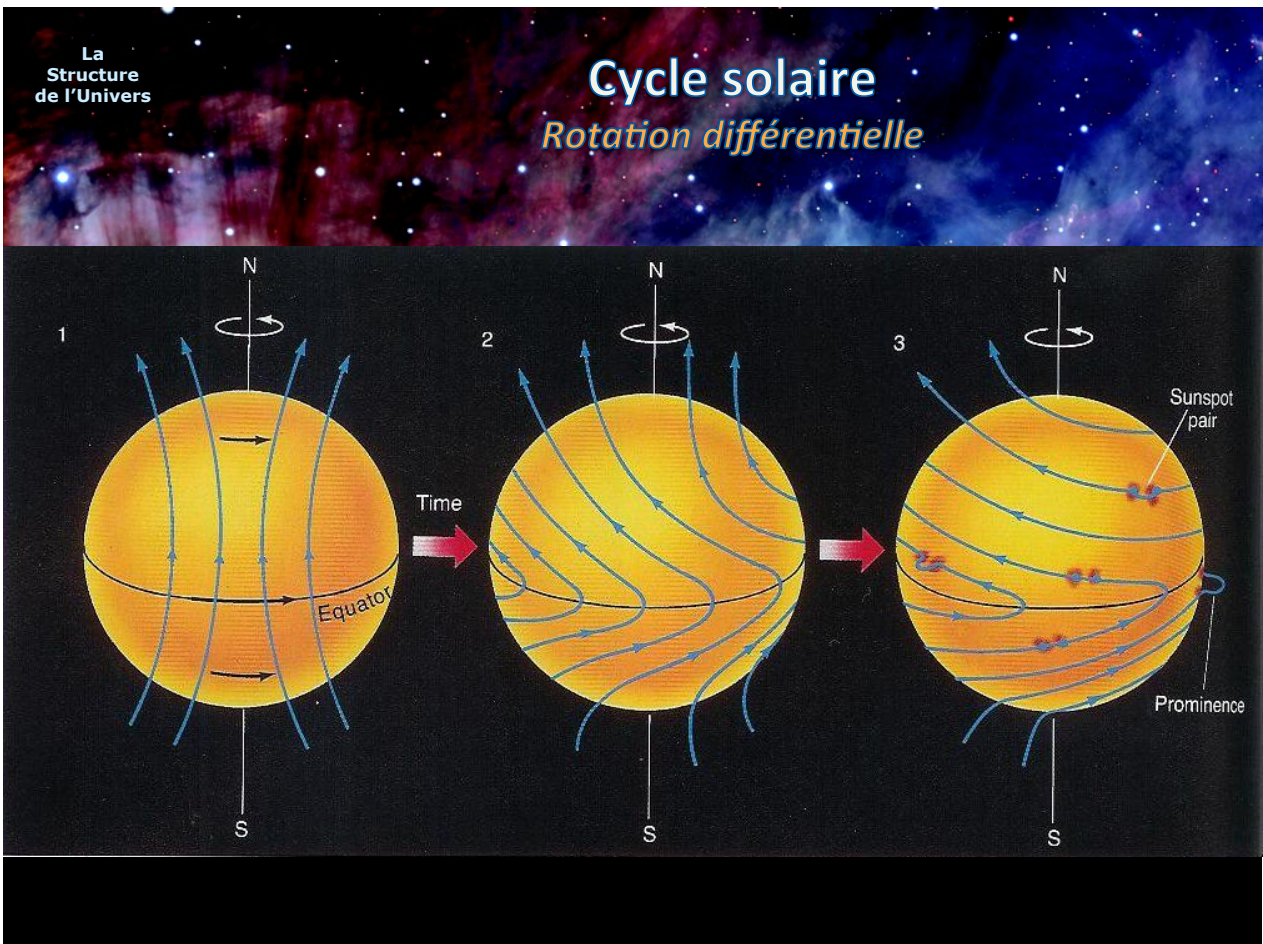
Anomalies locales du champ magnétique: plus basse température liée au transport moins efficace de la chaleur par la convection dans ces zones à champ magnétique fort

➤ Apparaissent par **paires** (pôles de l'aimant)

Cycle solaire

Cycle undécennal (11 ans) d'activité solaire (dernier maximum d'activité: 2013)

Dû à l'effet de la **rotation différentielle** du soleil sur son champ magnétique, qui se tord progressivement





Présence de **taches noires** à la surface du Soleil

T~4000 K! Elles apparaissent noires par contraste

Anomalies locales du champ magnétique: plus basse température liée au transport moins efficace de la chaleur par la convection dans ces zones à champ magnétique fort

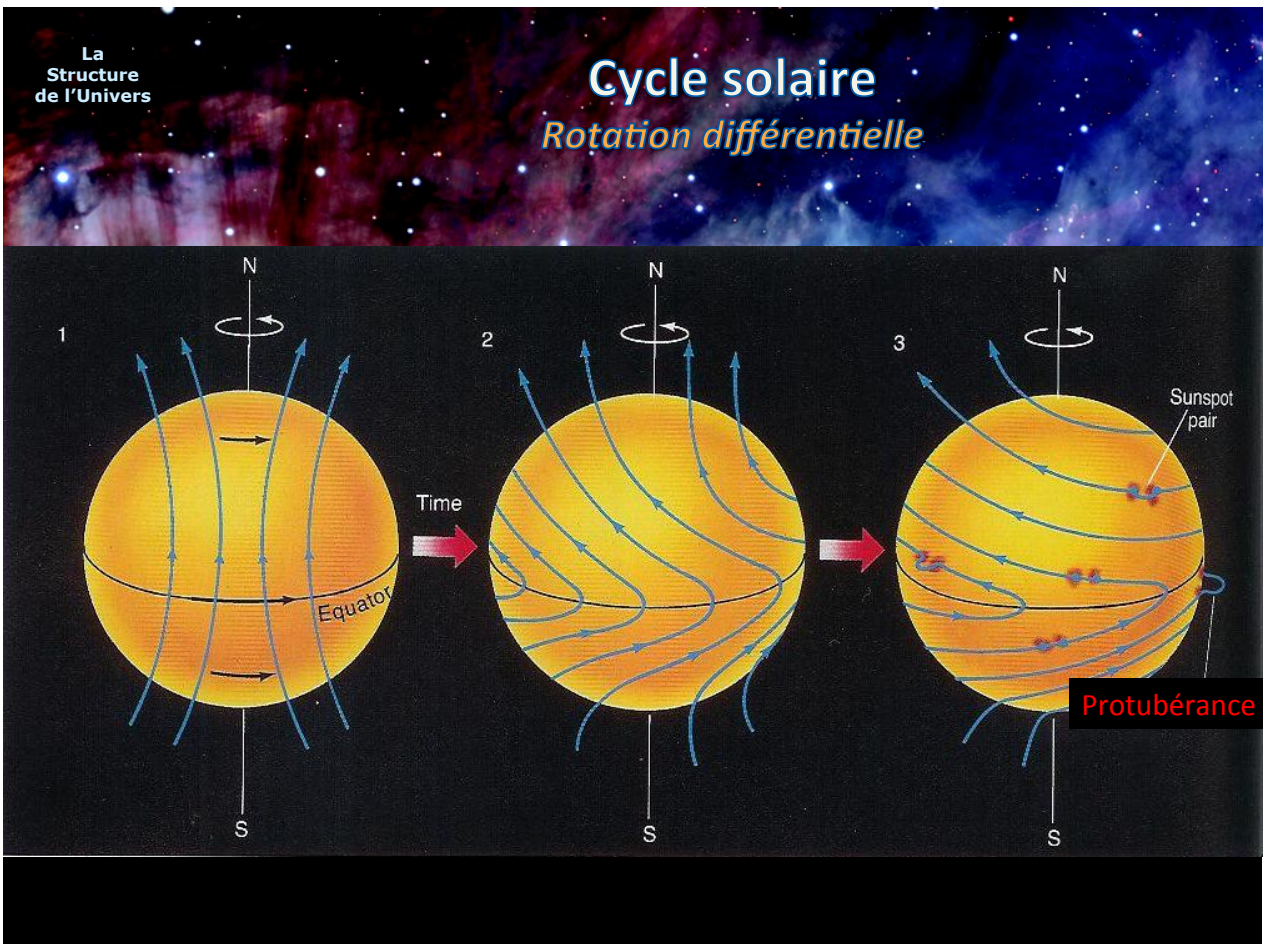
➤ Apparaissent par **paires** (pôles de l'aimant)

Cycle solaire

Cycle undécennal (11 ans) d'activité solaire (dernier maximum d'activité: 2013)

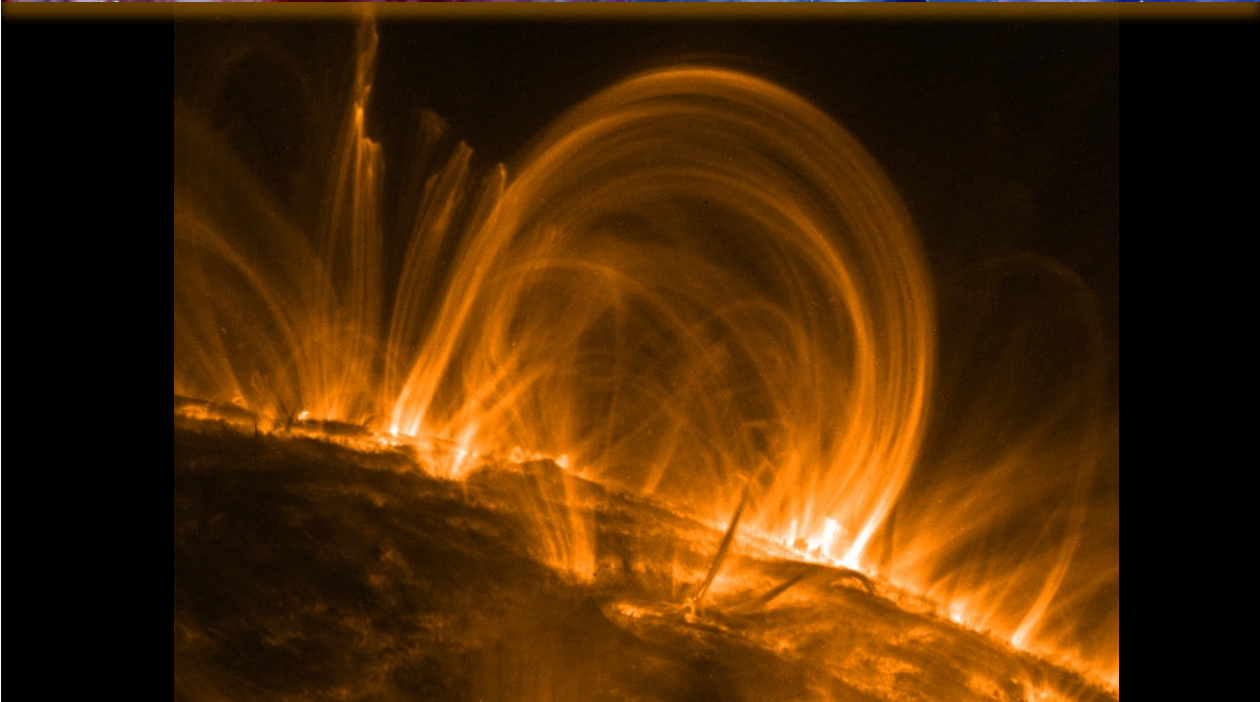
Dû à l'effet de la **rotation différentielle** du soleil sur son champ magnétique, qui se tord progressivement

➤ **Protubérance solaire** (dans la chromosphère)



Protubérance solaire

Visualisation des boucles magnétiques



Anatomie du Soleil

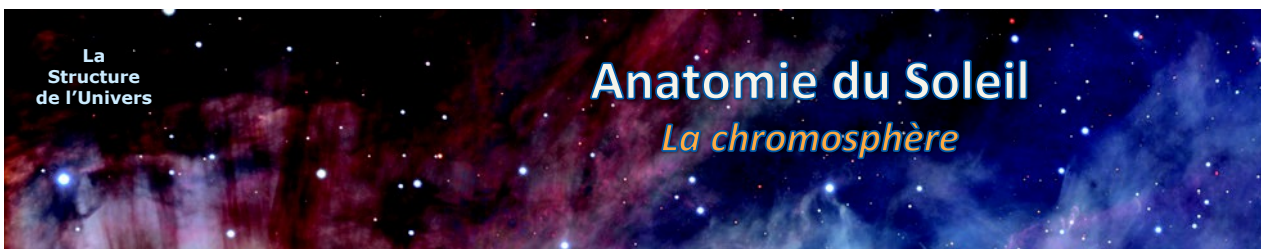
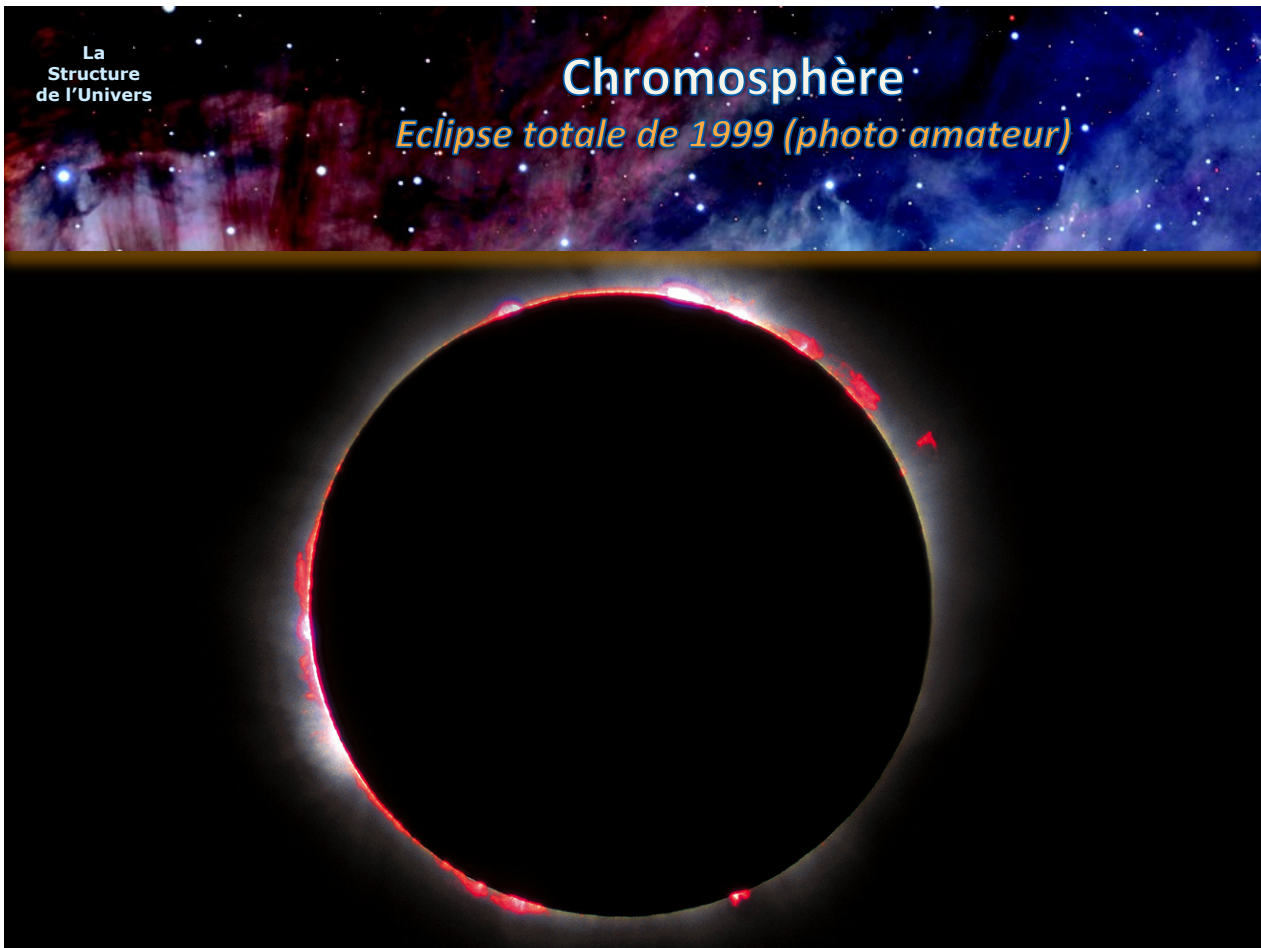
La chromosphère

Etendue de gaz chaud et ténu au-delà de la surface

- Photosphère: 0-500 km, 5800 K
- **Chromosphère:** 500-2400 km, 10 000 K

Fin liseré rouge, dû à l'émission H_{α} (656 nm) de l'hydrogène ionisé

➤ Visible pendant les **éclipses totales** de Soleil



Etendue de gaz chaud et ténu au-delà de la surface

- Photosphère: 0-500 km, 5800 K
- **Chromosphère**: 500-2400 km, 10 000 K

Fin liseré rouge, dû à l'**émission H_α** (656 nm) de l'hydrogène ionisé

➤ Visible pendant les **éclipses totales** de Soleil

Lieu des **protubérances solaires**

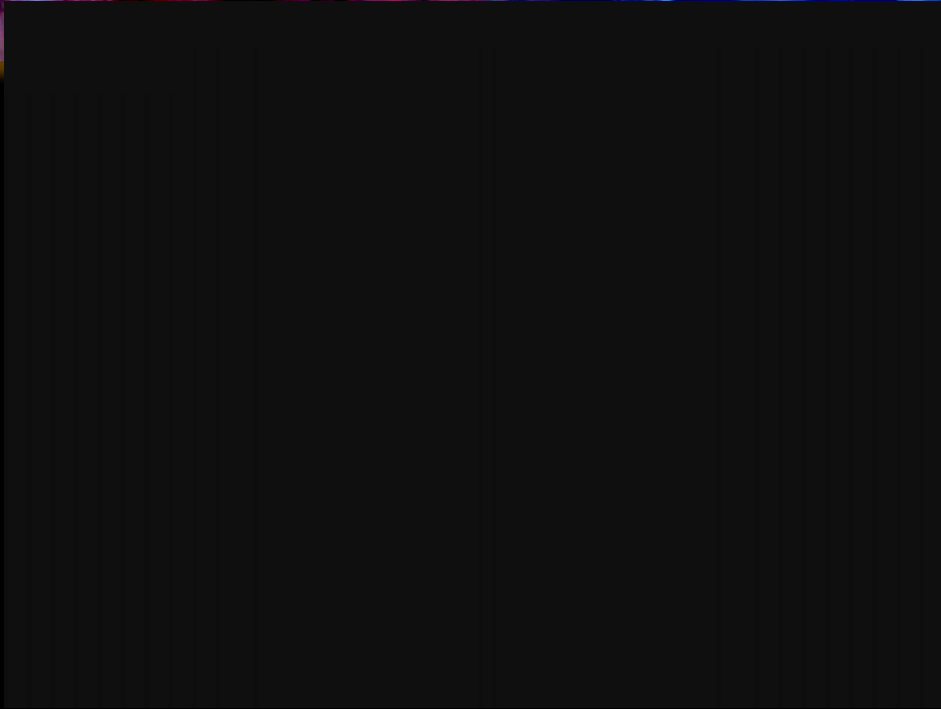
Filaments solaires suivant les **boucles magnétiques**

Emissions en visible, **UV** et rayons X

➤ Téléscope **TRACE**: Transition Region and Coronal Explorer

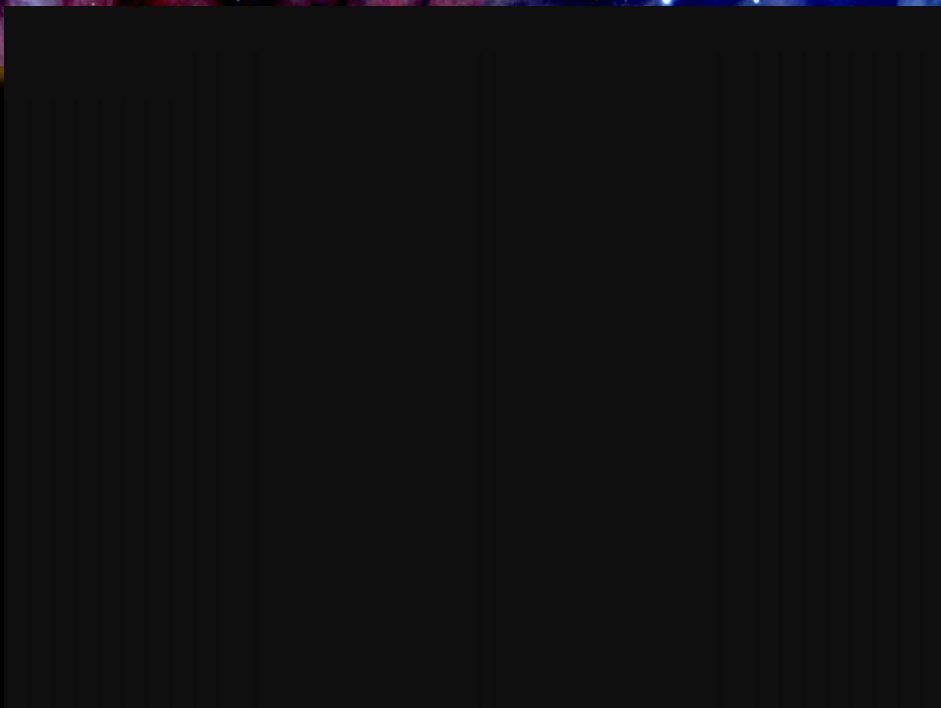
Protubérance solaire

Télescope spatial TRACE (NASA)



Protubérance solaire

TRACE : images UV ($\lambda = 17 \text{ nm}$)



Anatomie du Soleil

La couronne

Plasma extrêmement ténu

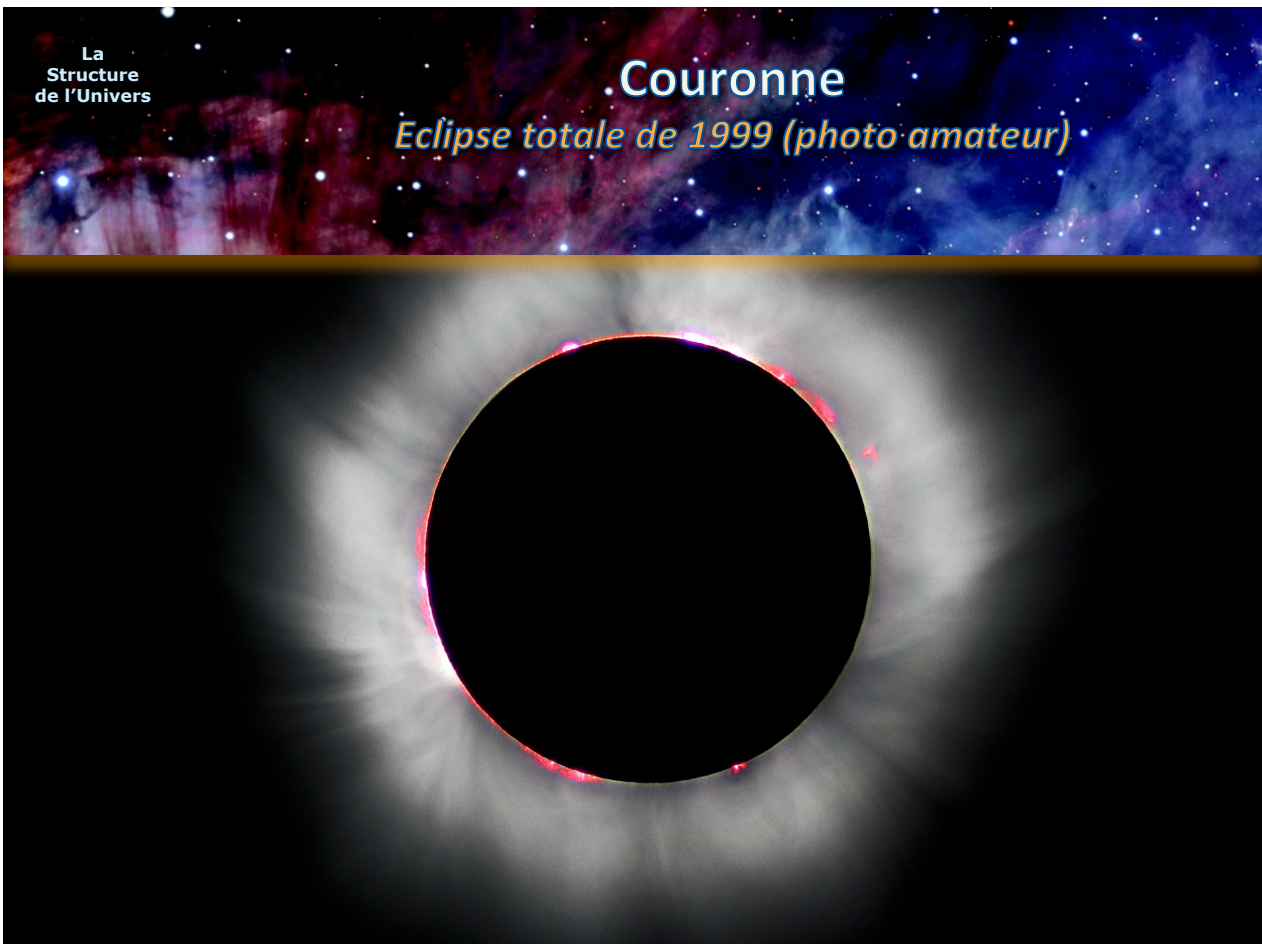
- Photosphère: 0-500 km, 5800 K
- Chromosphère: 500-2400 km, 10 000 K
- **Couronne:** 2400-millions de km, 1-3 millions de degrés K

La **densité** chute drastiquement (facteur 1000 et plus), plasma invisible par rapport à la photosphère

➤ Visible pendant les éclipses totales de Soleil ou via un **coronographe**

Couronne

Eclipse totale de 1999 (photo amateur)



Anatomie du Soleil

La couronne

Plasma extrêmement ténu

- Photosphère: 0-500 km, 5800 K
- Chromosphère: 500-2400 km, 10 000 K
- **Couronne:** 2400-millions de km, 1-3 millions de degrés K

La **densité** chute drastiquement (facteur 1000 et plus), plasma invisible par rapport à la photosphère

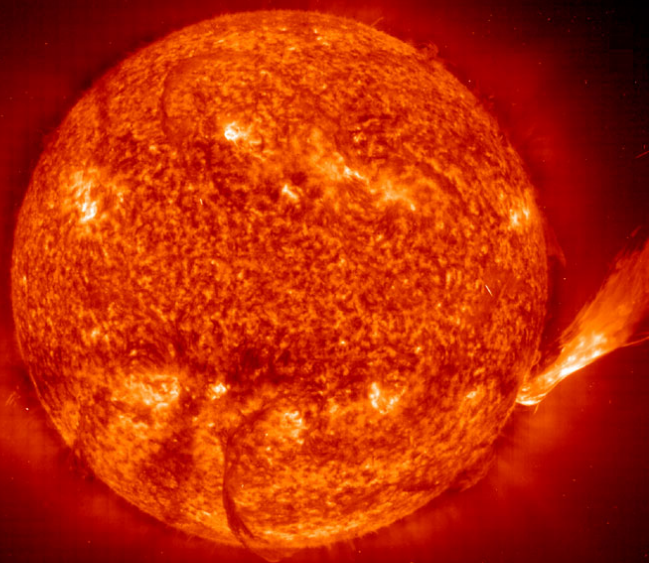
➤ Visible pendant les éclipses totales de Soleil ou via un **coronographe**

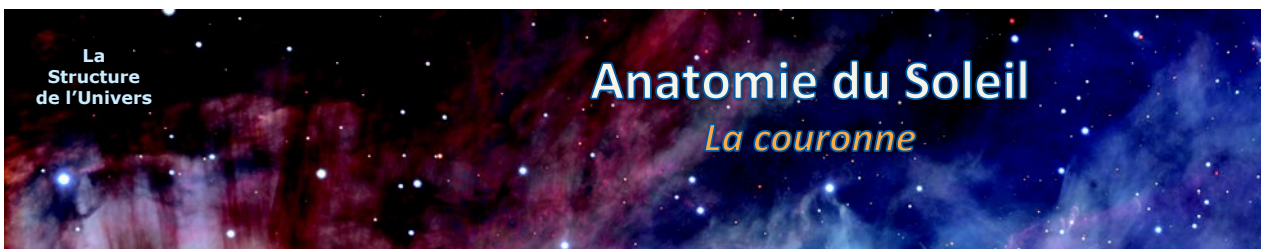
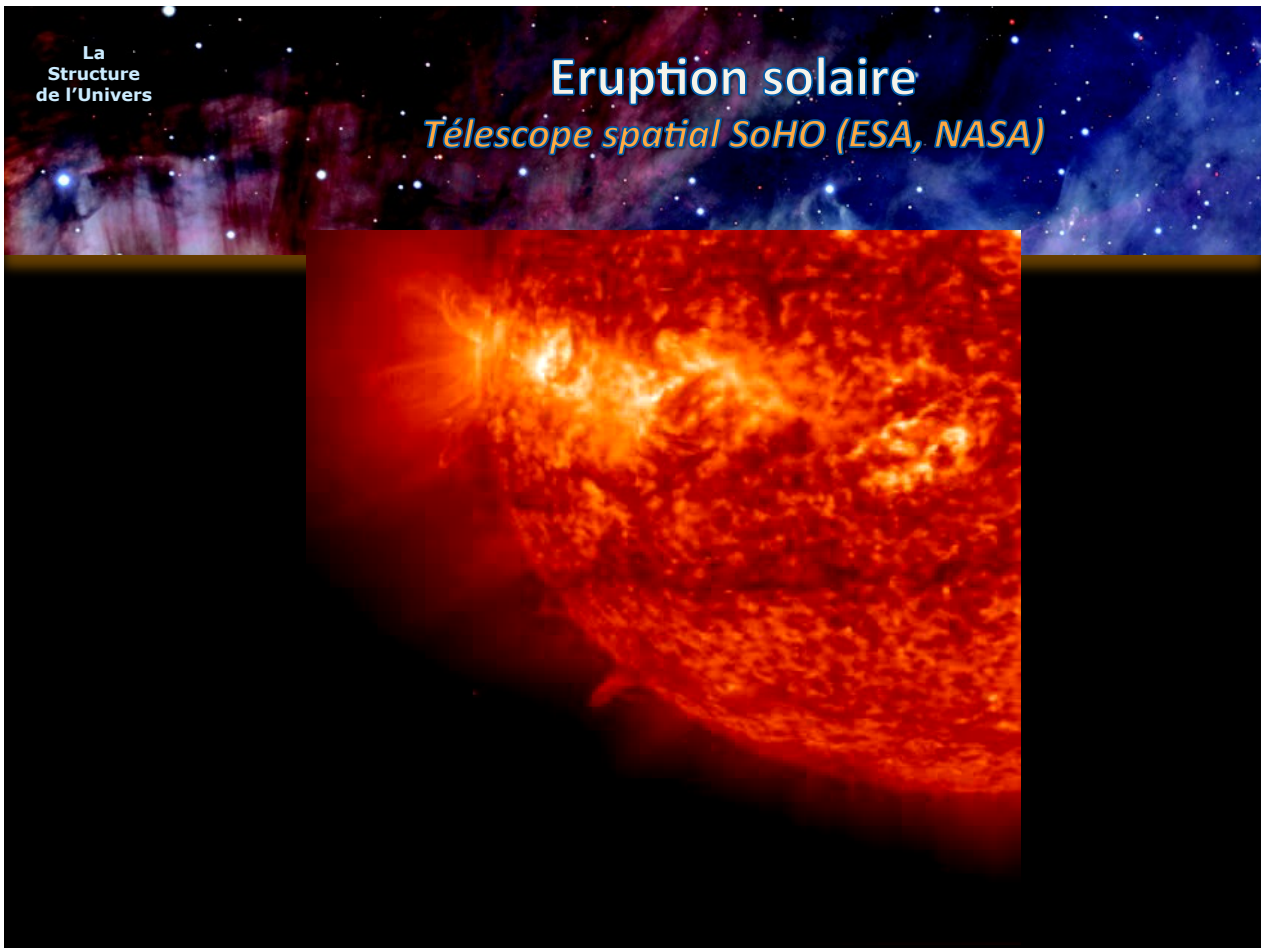
Phénomènes éruptifs

Eruption solaire: due à un phénomène de reconnexion magnétique (réarrangement du champ magnétique, domaine de la magnétohydrodynamique)

Couronne

Eruption solaire





Plasma extrêmement ténu

- Photosphère: 0-500 km, 5800 K
- Chromosphère: 500-2400 km, 10 000 K
- **Couronne:** 2400-millions de km, 1-3 millions de degrés K

La **densité** chute drastiquement (facteur 1000 et plus), plasma invisible par rapport à la photosphère

➤ Visible pendant les éclipses totales de Soleil ou via un **coronographe**

Phénomènes éruptifs

Eruption solaire: due à un phénomène de reconnexion magnétique (réarrangement du champ magnétique, domaine de la magnétohydrodynamique)

Ejection de masse coronale: éjection explosive de particules, en addition du vent solaire continu

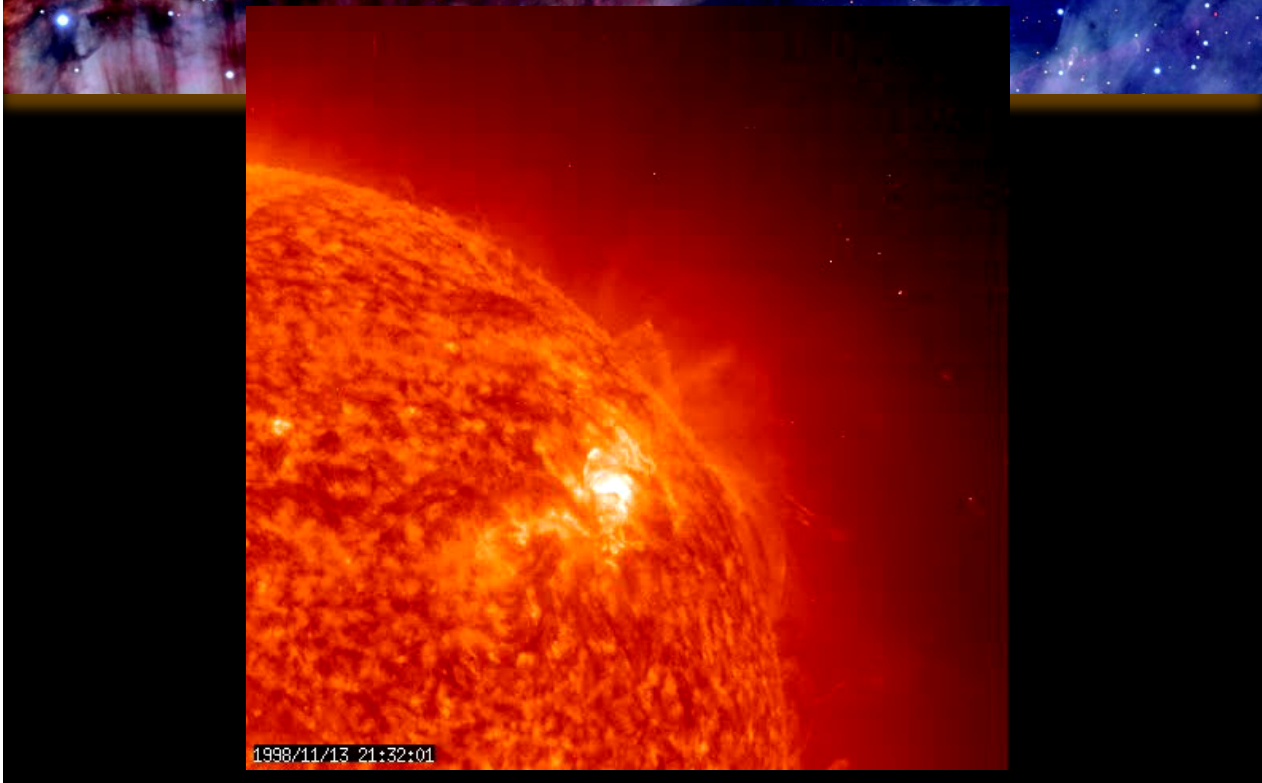
Ejection.de masse coronale

Comparaison avec la taille (pas la distance!) de la Terre



Ejection.de masse coronale

Vitesse pouvant atteindre 2000 km/s!



Interaction Terre-Soleil

Vent solaire et champ magnétique terrestre

Vent solaire

Constitué d'ions et d'électrons: **particules chargées** (flux de plasma)

Vitesse moyenne de **450 km/s**

Mis en évidence par la 2ème queue des **comètes**

Queue ionique des comètes

Manifestation du vent solaire

Structure et composition

← Queue d'ions

← Queue de poussières

← Coma
(ou chevelure)

Interaction Terre-Soleil

Vent solaire et champ magnétique terrestre

Vent solaire

Constitué d'ions et d'électrons: **particules chargées** (flux de plasma)

Vitesse moyenne de **450 km/s**

Mis en évidence par la 2ème queue des **comètes**

Champ magnétique terrestre

Effet dynamo: le noyau métallique liquide de la Terre en rotation engendre un champ magnétique

➤ **Magnétosphère**

Magnétosphère **déformée** par le vent solaire

Effet **protecteur** pour la vie (sinon radiations ionisantes intenses)

Magnétosphère terrestre

Déformation due au vent solaire



Interaction Terre-Soleil

Ceinture de Van Allen et aurore boréale

Ceinture de Van Allen

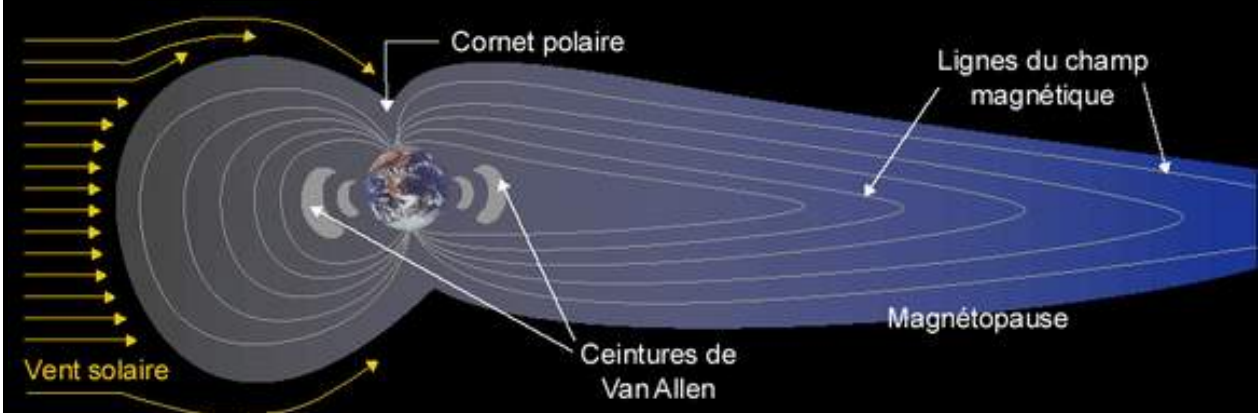
Double zone toroïdale de la magnétosphère contenant une grande densité de particules et encerclant la Terre

Ceinture intérieure: principalement des protons, issus du vent solaire (et du rayonnement cosmique) et piégés par le champ magnétique terrestre

Ceinture extérieure: principalement des électrons

Ceinture des Van Allen

Réservoir de protons et électrons



Interaction Terre-Soleil

Ceinture de Van Allen et aurore boréale

Ceinture de Van Allen

Double zone toroïdale de la magnétosphère contenant une grande densité de particules et encerclant la Terre

Ceinture intérieure: principalement des protons, issus du vent solaire (et du rayonnement cosmique) et piégés par le champ magnétique terrestre

Ceinture extérieure: principalement des électrons

Aurore boréale

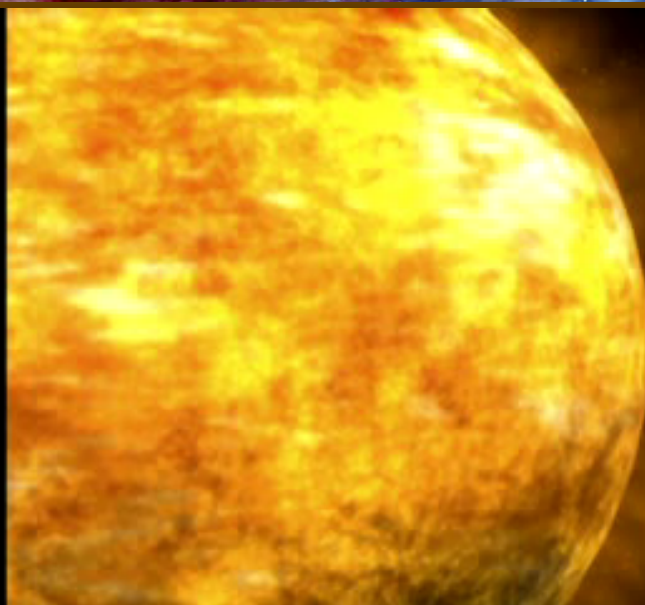
Lors d'une éruption solaire, les ceintures de Van Allen grossissent jusqu'à atteindre l'atmosphère terrestre à proximité des pôles magnétiques = **ovale auroral**

Collision des particules solaires avec les atomes de la haute atmosphère (100 km).

➤ **Aurore polaire**

Ejection de masse coronale

Distance Soleil-Terre parcourue en 3 jours!



Aurore polaire

Aurore boréale (Nord) ou australe (Sud)



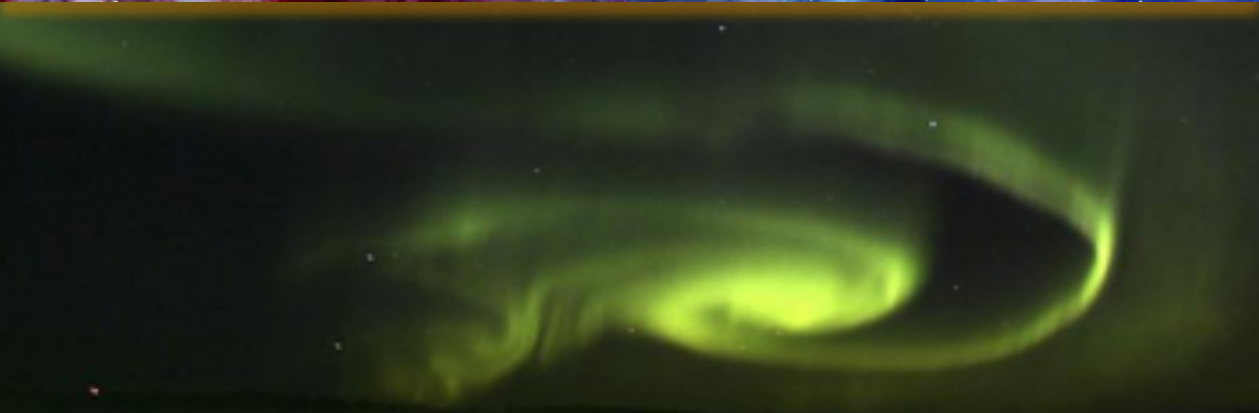
Aurore polaire

Zone aurorale: entre 65° et 75° de latitude



Aurore polaire

Si phénomène intense: orage magnétique



Perturbations électromagnétiques causées par les courants induits dans les lignes aériennes à haute tension

Panne de courant: 1965 aux USA et 1989 au Québec

Aurore polaire

Dominante verte: raie à 577.7 nm de l'oxygène atomique





Trois zones principales

- Photosphère: 0-500 km, 5800 K
- Chromosphère: 500-2400 km, 10 000 K
- Couronne: 2400-millions de km, 1-3 millions de degrés K

Activité solaire

- Granulation de la surface solaire
- Taches solaires
- Protubérances solaires
- Vent solaire
- Eruption solaire
- Ejection de masse coronale

➤ **Source d'énergie** du Soleil ?