

Evolution de nos idées sur l'Univers

La naissance de l'astrophysique

- La nature des astres et de la matière « céleste »: Antiquité - Renaissance
- Spéculations sur la nature du Soleil : avant la spectroscopie
- L'analyse spectrale - naissance de l'astrophysique
- Mesurer le Soleil : masse, luminosité
- Soleil : durée de vie et source d'énergie - idées du XIXème siècle
- L'énergie nucléaire du Soleil - XXème siècle

Astronomie / astrophysique

- Depuis l'antiquité : recherches sur la nature des mouvements des astres (« astronomie »)
 - Comment interpréter les mouvements observés en projection sur la sphère céleste : modèles géocentrique / héliocentrique
 - Comment comprendre ces mouvements : dynamique, puis (depuis le 17ème siècle) gravitation (combinaison physique et astronomie)
- Pas d'autres moyens de comprendre la nature des astres que **la spéculation.**

- **au début du XVIIIème siècle:**

Banalisation de l'idée de la pluralité des mondes

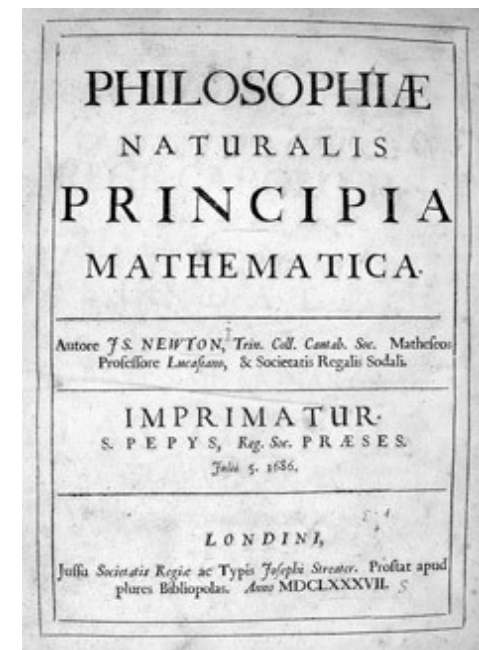
La découverte de la Gravitation Universelle (Newton)

Un programme unique :

vérifier les lois de Newton (mécanique céleste)

Un phénomène géopolitique :

le calcul de la longitude et la maîtrise des mers



Astronomie / astrophysique

Des instruments astrométriques de plus en plus précis

Des calculs de plus en plus complexes

La fondation des grands Observatoires

(Paris, Greenwich, Leyden, Aberdeen, Pékin...)

Les grandes expéditions scientifiques

(mesure du méridien, les parallaxes de Vénus et Mars...)



- À partir du XIX^{ème} siècle : de nouveaux moyens observationnels pour des recherches sur la nature des astres (« astrophysique »)

La nature des astres et de la matière « céleste »

Evolution des idées de l'antiquité
grecque à la Renaissance

La nature du Soleil et des étoiles (antiquité grecque)

- **Anaxagore (5^{ème} siècle av JC) : Soleil = rocher incandescent**
- **Aristote (4^{ème} siècle av JC) :**
 - les corps célestes ne sont pas constitués des 4 éléments terrestres (terre, eau, air, feu) ; il existe une matière céleste : « éther », « quintessence » (nom donné après Aristote) ;
 - correspondance corps - type de mouvement
(4 éléments ↔ m^{vts} rectilignes ; « éther » ↔ m^{vt} circulaire).

⇔ **Des principes philosophiques sans lien avec l'observation.**

Voir discussion Galilée, *Dialogo*, pour une critique de cette approche.

(Pas d'analyse plus approfondie dans l'antiquité grecque)

La nature du Soleil (antiquité grecque)

Plutarque (46-125); Œuvres morales : les opinions des philosophes

(EXTRAITS)

La nature du Soleil (antiquité grecque)

Plutarque (46-125); Œuvres morales : les opinions des philosophes

(EXTRAITS)

- ⇒ **Une variété d'interprétations spéculatives (forcément)**
 - Feu - notion chaleur
 - pierre ardente (interprétation matérialiste - notamment Démocrite)
 - Interprétations liées à l'analogie avec la matière terrestre
 - Mais aussi : corps doué de raison, réverbération du feu remplissant le monde, ...

- ⇒ **Toujours la tentative de comprendre** et de ne pas se contenter d'une interprétation mythologique !

- ⇒ **Aristote a clos ce débat** par le postulat d'une 5^{ème} espèce de matière et d'un monde supra-lunaire distinct et éternel

La nature du Soleil et des étoiles (VI^{ème} siècle après JC - Renaissance)

- **Jean Philopon (VI^{ème} siècle ap JC ; philosophe chrétien)**

(EXTRAIT)

étoiles = Soleils

critique de l'idée d'Aristote d'un Univers éternel et sans création

Les étoiles ne sont pas des corps simples

La variété des étoiles provient de la variété de leurs composition

- **Giordano Bruno (fin XV^{ème})**

pluralité des mondes (habités), les étoiles (au moins: certaines étoiles) sont des Soleils, entourés de planètes (qui nous sont invisibles, tout comme des planètes éventuelles au-delà de Saturne).

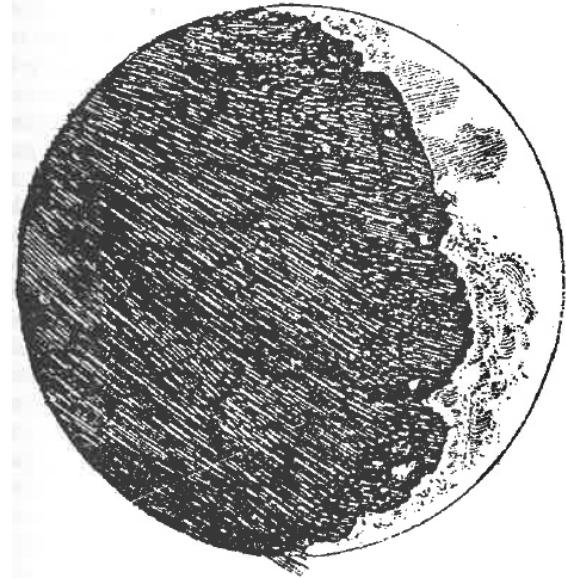
L'abandon de la séparation aristotélicienne entre sub-lunaire et supra-lunaire

(1) génération et corruption dans le monde supra lunaire :

- Tycho Brahe et la distance des comètes, absence de parallaxe de la « nouvelle étoile » (cours 3)
- Harriot, Fabricius, Scheiner, Galilée : les taches solaires

(2) Galilée :

observation de la Lune, non sphérique, surface rugueuse, similaire à la Terre
(*Sidereus Nuncius*) – (**EXTRAIT**)



L'abandon de la séparation aristotélicienne entre sub-lunaire et supra-lunaire

(1) génération et corruption dans le monde supra lunaire :

- Tycho Brahe et la distance des comètes, absence de parallaxe de la « nouvelle étoile » (cours 3)
- Harriot, Fabricius, Scheiner, Galilée : les taches solaires

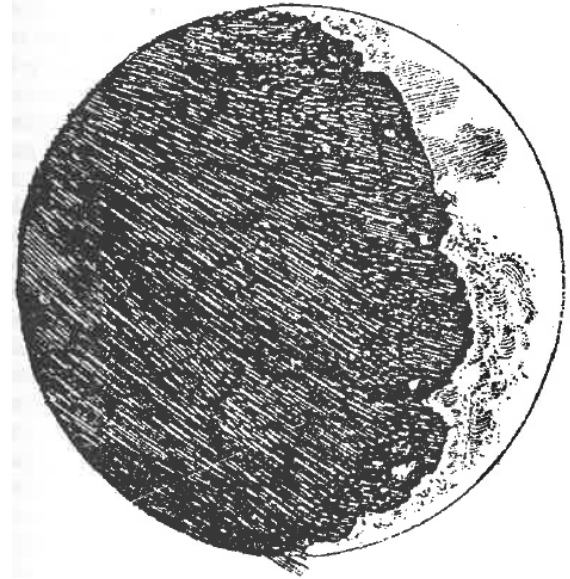
(2) Galilée :

observation de la Lune, non sphérique, surface rugueuse, similaire à la Terre
(*Sidereus Nuncius*) – (**EXTRAIT**)



Au début du XVII^{ème} siècle, les observations commencent à suggérer que la matière des astres n'est pas fondamentalement différente de celle de la Terre

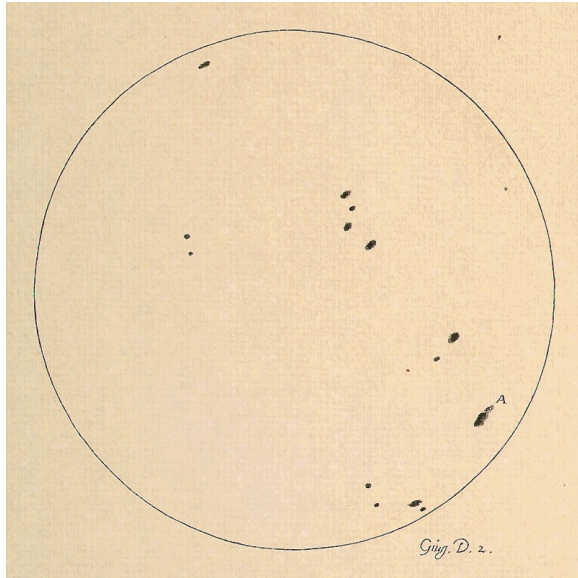
(confirmation des idées de certains penseurs précédents, voir Philopon ; éléments nouveaux : moyens d'observation, lunette).



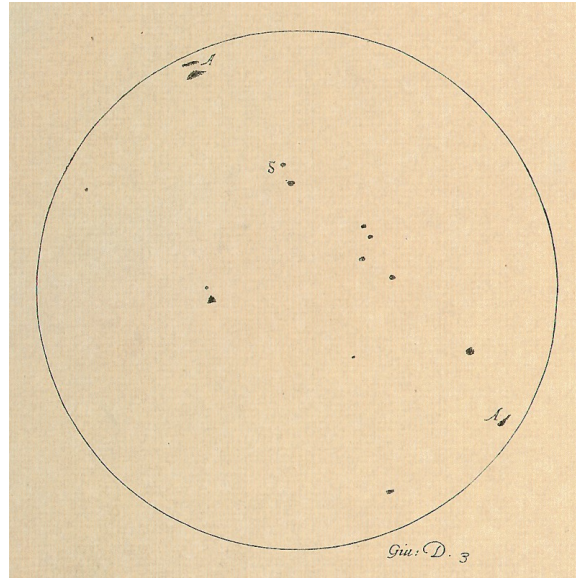
Les taches solaires

Le changement
dans le monde supra-lunaire

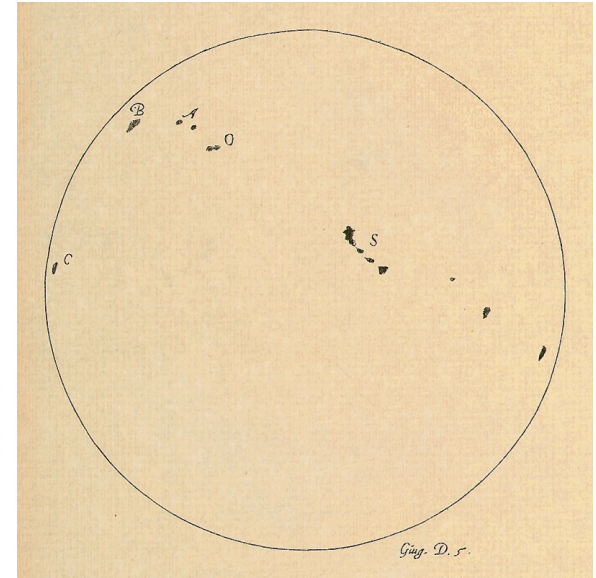
Génération et corruption dans le monde supra-lunaire - les taches solaires (1610-1612)



2 juin



3 juin



5 juin

Galilée : Dessin de taches solaires observées en juin 1612

- Taches sombres à la surface du Soleil
- Ecart à la « perfection » (sphère uniforme) !
- Rotation du Soleil

• <http://elbereth.obspm.fr/~charnoz/grav4.html>

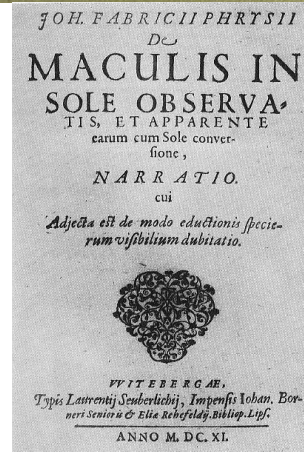
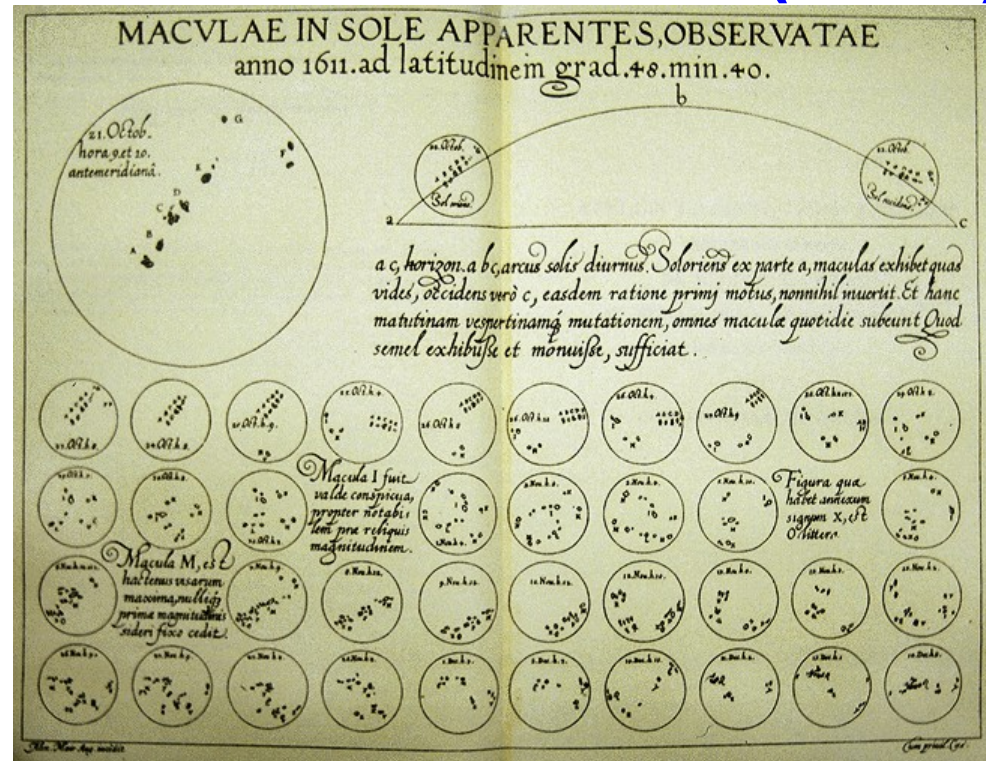
• <http://galileo.rice.edu>

Génération et corruption dans le monde supra-lunaire - les taches solaires (1611)

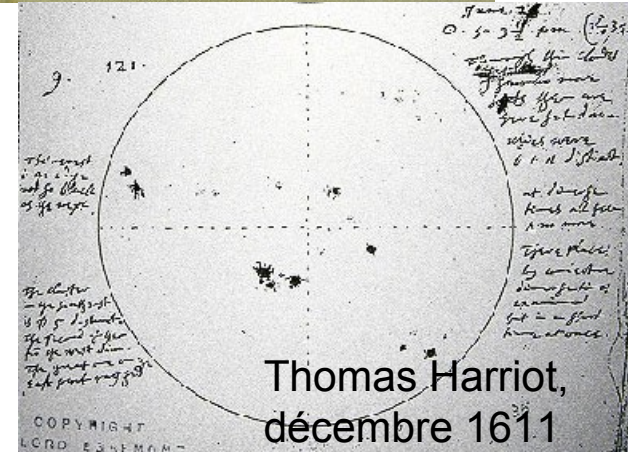
Scheiner (père jésuite) : dessin d'un groupe de taches solaires pendant plusieurs jours successifs (octobre 1611)

Que révèle le déplacement des taches de jour en jour ?

- Phénomènes à la surface du Soleil ? (Johann Fabricius ; Galilée)
- Corps opaques en orbite autour du Soleil ? (idée initiale de Scheiner)



Johann Fabricius
Février 1611

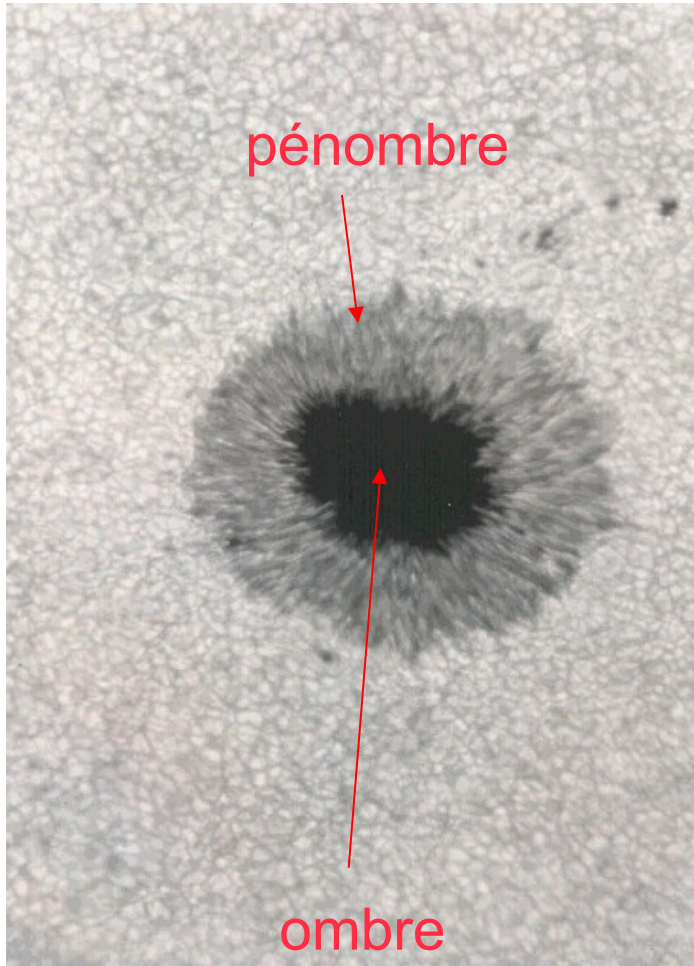


Thomas Harriot,
décembre 1611

Les taches solaires: observations contemporaines (Observatoire Meudon)



Que révèlent les taches solaires ?



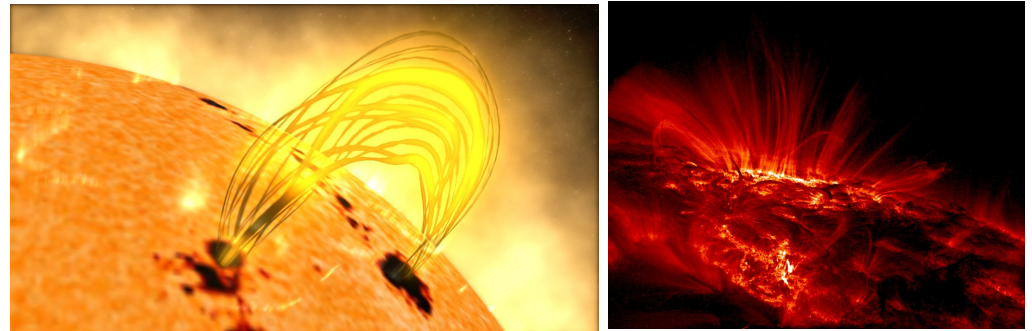
Cliché Pic du Midi

Deux composantes :

- noyau sombre (« ombre »)
- entourage moins sombre (« pénombre »)

Interprétation d'aujourd'hui :

- Dans une tache solaire, le champ magnétique émerge de l'intérieur du Soleil, empêchant l'échange de chaleur entre intérieur et extérieur (plus froid □ plus sombre)



Galilée : *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*

DIALOGUE

P A R

GALILEO GALILEI

DE L'ACADÉMIE DES LINCEI
MATHÉMATICIEN EXTRAORDINAIRE
DE L'UNIVERSITÉ DE PISE

Philosophe et Premier Mathématicien du
SÉRÉNISIME

GRAND DVC DE TOSCANE

Dans lequel, lors de rencontres pendant
quatre journées, on discourt des deux

PLUS GRANDS SYSTÈMES DV MONDE
PTOLÉMÉEN ET COPERNICIEN

*En présentant sans décider entre elles les raisons philosophiques et physiques
en faveur de l'une comme de l'autre position.*

AVEC



PRIVILÈGE

A FLORENCE, chez Gio. Batista Landini, 1632.

AVEC LA PERMISSION DES AUTORITÉS.

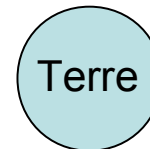
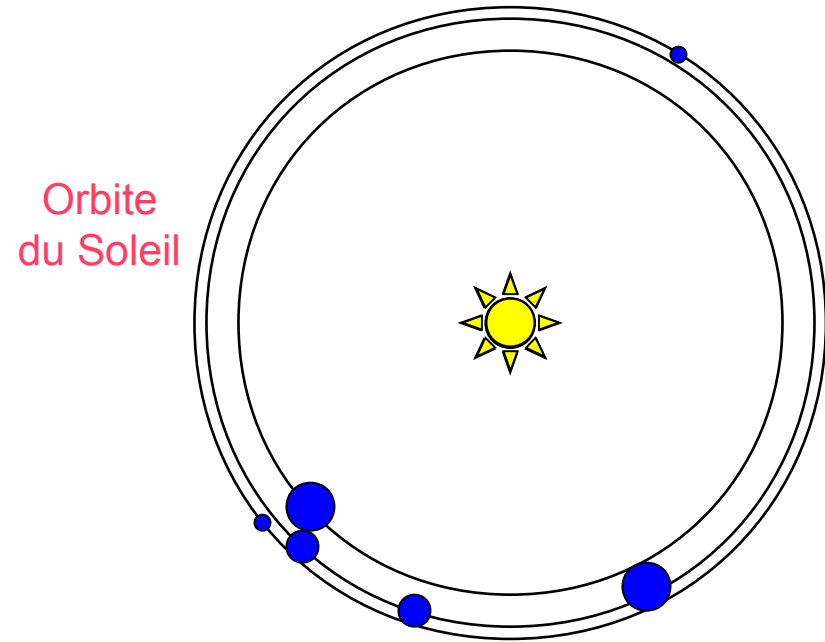
- **Ecrit par Galilée** en guise de discussion « objective » des systèmes géocentrique (Aristote, Ptolémée) et héliocentrique (Copernic) - physique et astronomie
- En fait **une défense du système copernicien** (et une glorification des exploits de Galilée) + ridiculisation des idées opposées
- Les protagonistes :
 - **Salviati** (parti Galilée)
 - **Sagredo** (bourgeois éclairé partisan Galilée)
 - **Simplicio** (moine, défenseur de la théorie d'Aristote et de l'Eglise)

(EXTRAIT)

La nature des taches solaires (*Dialogue*)

Simplicio :

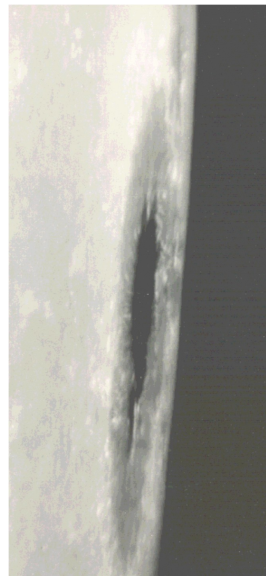
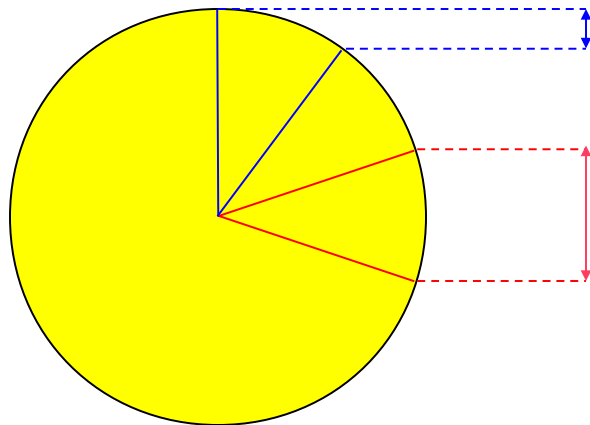
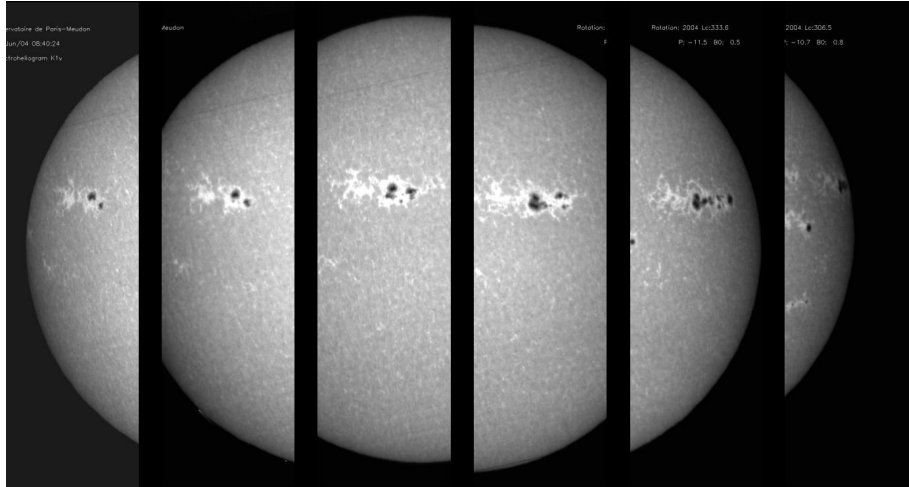
- **Des « étoiles »** (comme Mercure, Vénus) tournant autour du Soleil
= l'interprétation initiale de Scheiner (1612)
 - **Des phénomènes** dans l'air ou dans les lentilles de la lunette.
 - **Des corps opaques** de formes irrégulières tournant autour du Soleil, s'agrégeant / désagrégeant au hasard. Retour des mêmes taches.
- ⇒ Changement visuel sans génération ou corruption (Scheiner paraît réussir ainsi à sauver l'immutabilité du Soleil, en sacrifiant l'idée qu'au centre de tout mouvement est la Terre)



- Centre de l'orbite du Soleil (modèle géocentrique)

La nature des taches solaires (*Dialogue*)

Salviati :



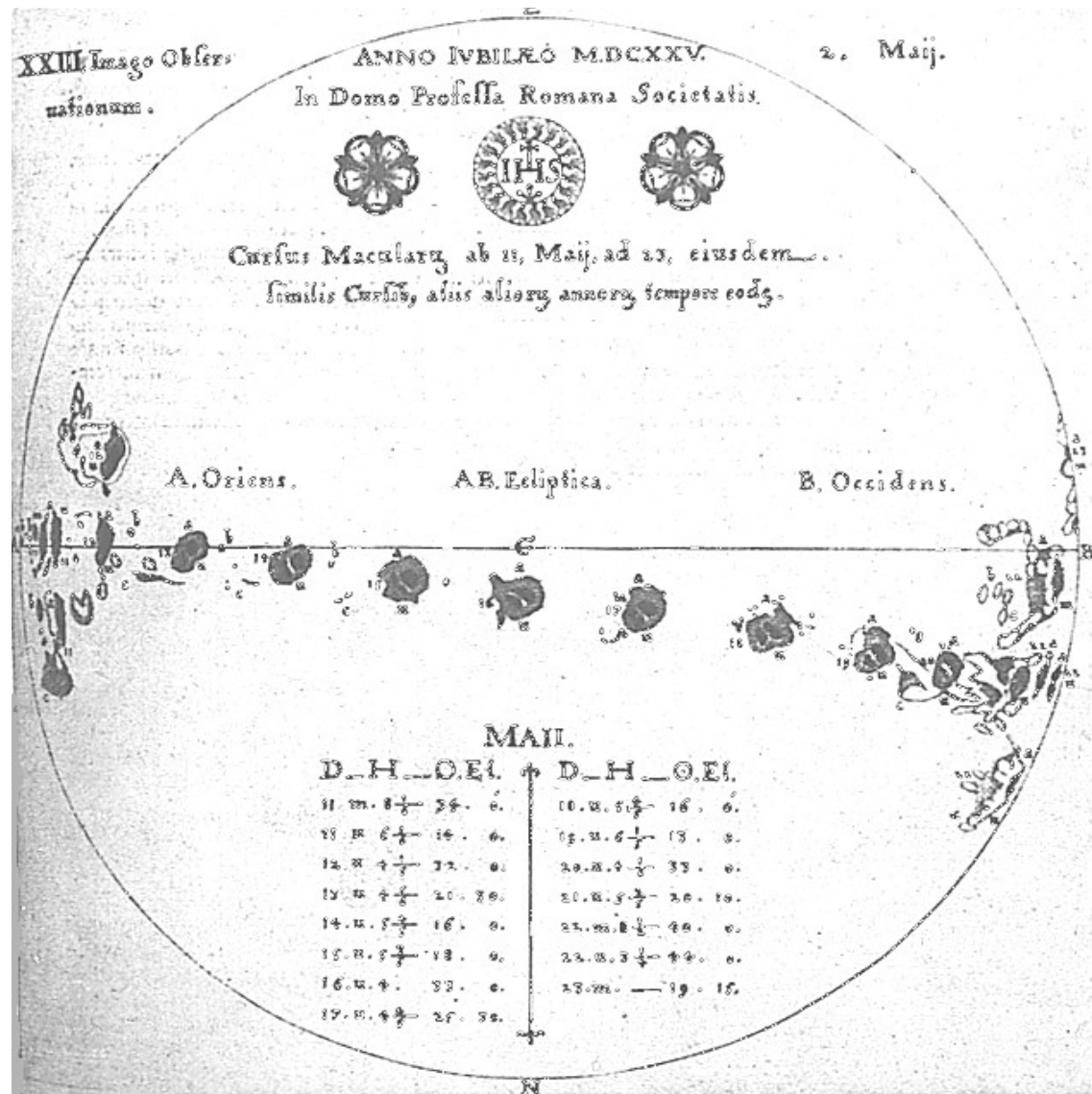
- **Les taches peuvent se former et se désagréger** au milieu du disque solaire.
- **Les taches font partie de la surface** du Soleil :
 - déplacement plus lent près du bord qu'au centre du disque solaire;
 - taches plus étroites près du bord qu'au centre du disque.

⇒ **Génération et corruption au Soleil, pas seulement changement visuel**
(mais : Scheiner utilisait les mêmes arguments en faveur de son idée de corps opaques tournant autour du Soleil).

Le progrès des observations

Scheiner : dessin publié en 1630

- Progrès notable de la qualité des observations :
 - Détails de la structure des taches (ombre, pénombre)
 - Changements de jour en jour
- Scheiner tombe d'accord avec Galilée : tache = phénomène solaire.



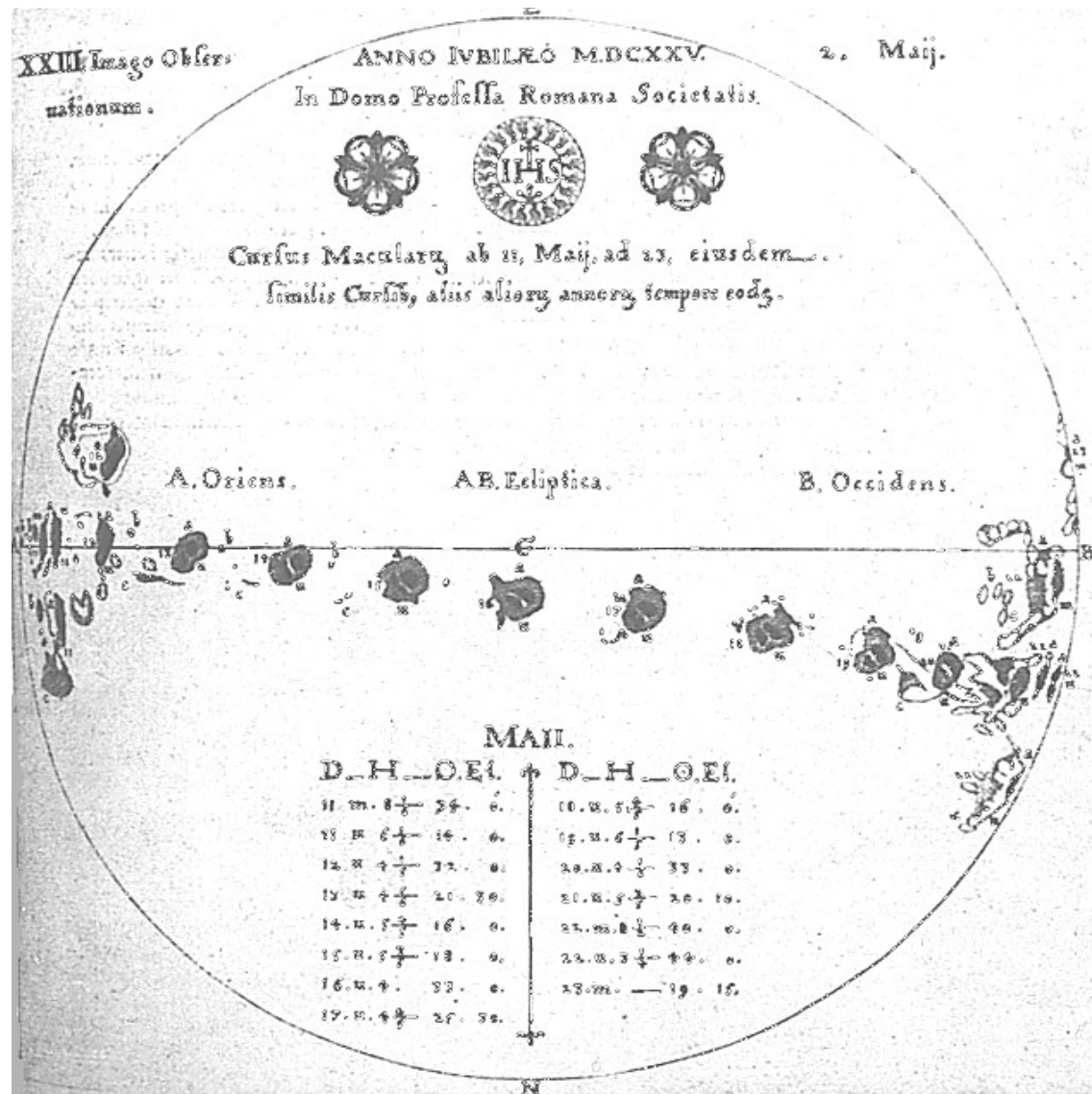
Le changement de vue sur la nature des astres

- **Changement radical de vue au XVII^{ème} siècle :**

- Les astres sont constitués de la même matière que la Terre
- Les astres sont habités (G. Bruno; Fontenelle, *Entretiens sur la pluralité du monde*; vue partagée par certains astronomes, jusqu'au début XIX^{ème} siècle)

- **Mais :**

ce changement de vue résulte de la réflexion / spéculation, sans moyen de vérifier ou invalider la nouvelle image de l'Univers



L'astrophysique est-elle possible ?

Toute recherche qui n'est point finalement réductible à de simples observations visuelles nous est donc nécessairement interdite au sujet des astres, qui sont ainsi de tous les êtres naturels ceux que nous pouvons connaître sous les rapports les moins variés. Nous concevons la possibilité de déterminer leurs formes, leurs distances, leurs grandeurs et leurs mouvemens; tandis que nous ne saurions jamais étudier par aucun moyen leur composition chimique, ou leur structure minéralogique, et, à plus forte raison, la nature des corps organisés qui vivent à leur surface, etc.

A. Comte, *Cours de philosophie positive*,
19^{ème} leçon (1835):

La détermination des températures est probablement la seule à l'égard de laquelle la limite précédemment établie pourra paraître aujourd'hui trop sévère. Mais, quelques espérances qu'ait pu faire concevoir à ce sujet la création si capitale de la thermologie mathématique par notre immortel Fourier, et spécialement sa belle évaluation de la température de l'espace dans lequel nous circulons, je n'en persiste pas moins à regarder toute notion sur les véritables températures moyennes des différens astres comme devant nécessairement nous être à jamais interdite.

La nature du Soleil : Emmanuel Kant (1750)

- **Surface du Soleil** : lacs de feu étendus, tempêtes qui créent l'aspect variable du Soleil, couvrant parfois les régions élevées du Soleil, et les laissant dégagées à d'autres instants (taches).

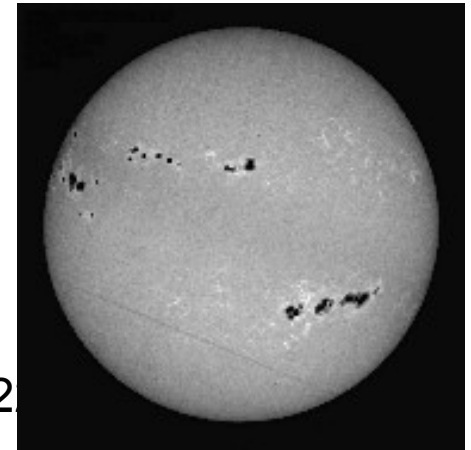
⇒ Notion de **terre solide sous les flammes**.

⇒ Existence de la **combustion** (analogie terrestre) ; supposition d'un réservoir d'air dans les cavernes de ce corps prétendument solide. (EXTRAIT)

- **Soleil/étoiles similaires aux planètes** (cf Laplace, Herschel ...).

- Notions importantes :

- durée de vie finie du Soleil,
- variabilité de la luminosité (= étoiles variables),
- analogue au feu qui s'éteint et se rallume par endroits.

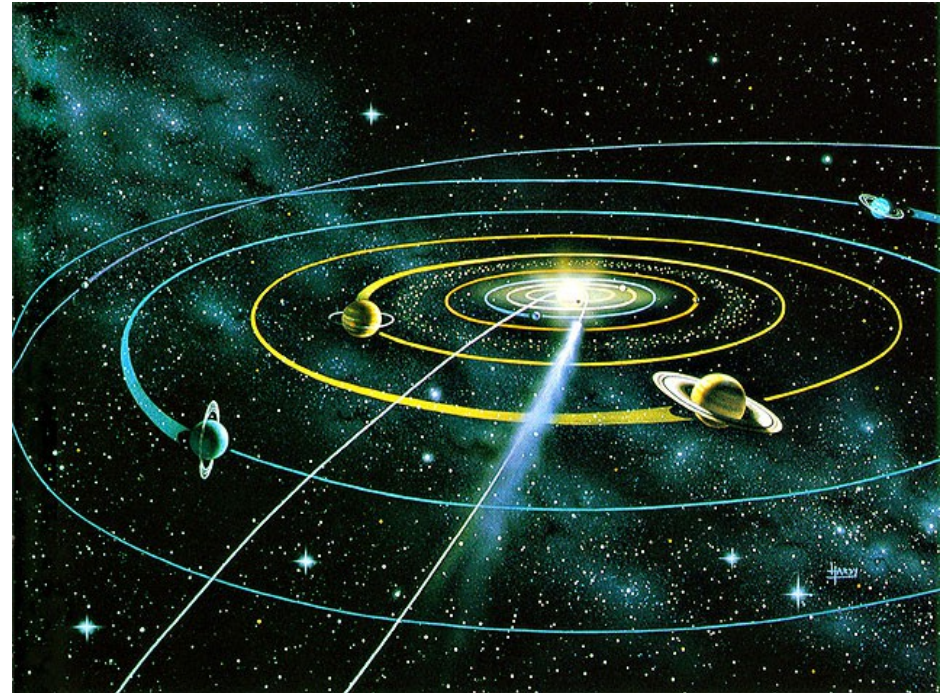


Le système solaire selon Laplace (1796)

- Observations :

les orbites des planètes autour du Soleil sont (presque) **dans le même plan** (puisque les planètes suivent toutes presque la même trajectoire le long du zodiaque).

- **Même sens de révolution** autour du Soleil,
Même sens de rotation autour de l'axe de la planète.
- Révolutions de leurs **satellites également** dans le même sens.



http://www.imcce.fr/page.php?nav=hosted_sites/vt2004/fr/fiches/fiche_n08_C1.html

Cela ne peut pas être du hasard, mais indique une cause commune

⇒ formation des planètes à partir du Soleil

Le raisonnement de Laplace

Exposition du système du monde, ch. VI (~ 1796) :

(EXTRAIT)

- **Interprétation erronée de la supernova de 1572** de Tycho Brahe (en fait une vieille étoile, pas une jeune - voir plus loin)
- Interprétation ultérieure (encore admise de nos jours) de la contraction du Soleil par Laplace : **le Soleil s'est formé par contraction d'un énorme nuage de gaz froid**, sous l'effet de sa gravitation (contraction à partir de la « nébuleuse primitive »), analogie avec les « nébuleuses » vues au télescope.

Astronomie - astrophysique

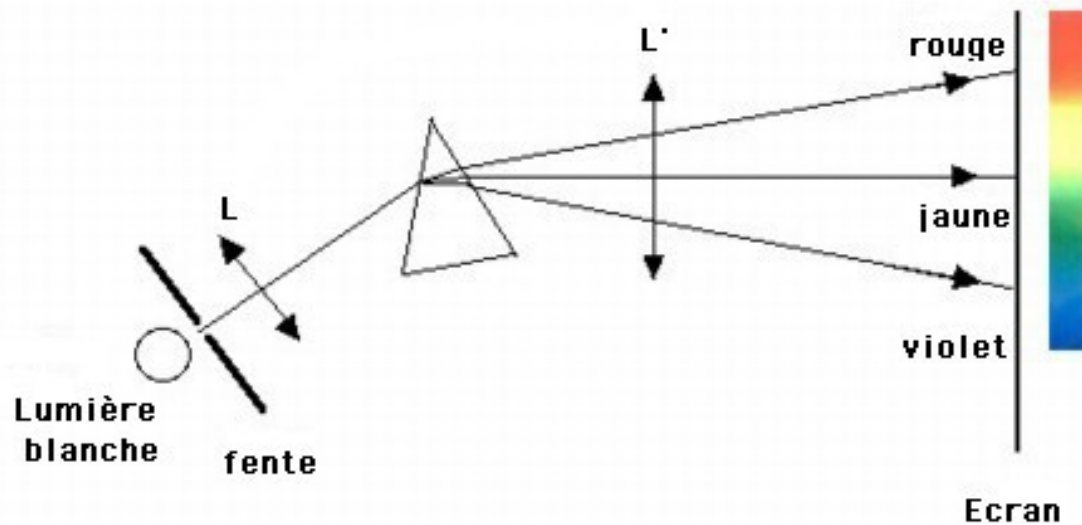
- **Depuis l'antiquité : recherches sur la nature des *mouvements des astres* (« astronomie »)**
 - Comment interpréter les mouvements observés en projection sur la sphère céleste: modèles géocentrique / héliocentrique
 - Comment comprendre ces mouvements: dynamique, puis (depuis le 17ème siècle) gravitation (combinaison physique et astronomie)
- Pas d'autres moyens de comprendre la nature des astres que la spéculation.

- **Depuis le XIXème siècle : moyens observationnels pour des recherches sur la *nature des astres* (« astrophysique »)**
 - Analyse spectrale : composition chimique, températures
 - Evolution des étoiles
 - Plasmas astrophysiques
 - Étude du milieu interstellaire et des nuages moléculaires
 - Découverte de planètes hors du système solaire
 - Mise en évidence de l'existence de « matière noire » ?

La spectroscopie

Naissance de l'astrophysique

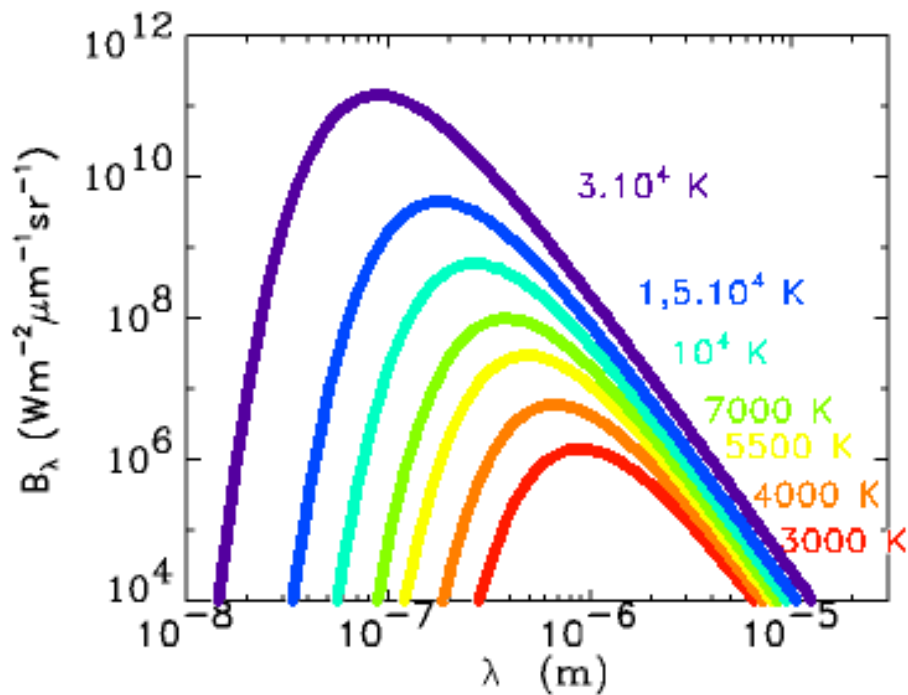
L'analyse spectrale



- Décomposition de la lumière visible par un prisme : spectre (Newton)
- Spectre continu (p. ex. corps solide incandescent ; gaz en équilibre thermodynamique)

Que mesure-t-on par la spectroscopie ?

La température des étoiles



La répartition spectrale du rayonnement selon Planck

- Notion intuitive : plus un gaz est chaud,
 - plus il émet de la lumière
 - plus la couleur s'approche du bleu
- Gaz : loi de Planck (1900), d'où
 - flux émis $F = \sigma T^4$ (Stefan 1879)
 - longueur d'onde du max. de brillance $\lambda_m T = \text{cte.}$ (Wien 1893)

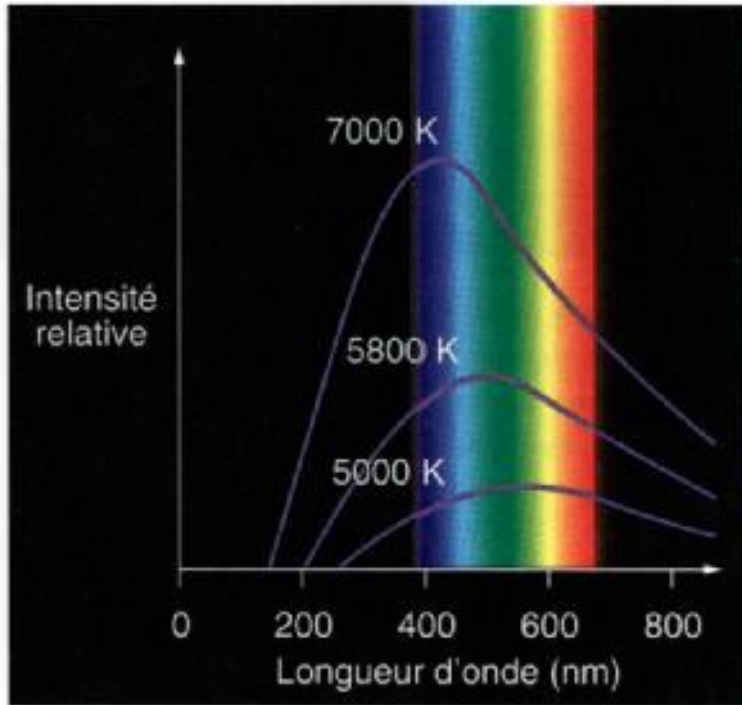
$$I(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot (e^{hc/\lambda kT} - 1)^{-1}$$

Les couleurs des étoiles

- Constellation Orion
- Couleur \Leftrightarrow température
- Laquelle de l'étoile bleue (bas à droite) ou de l'étoile rouge (haut à gauche) est la plus chaude ?
- Étoiles rouges : T_{γ} 3000 K
Étoiles bleues : T_{γ} 30 000 K
- Première mesure de la température d'une étoile : 1909

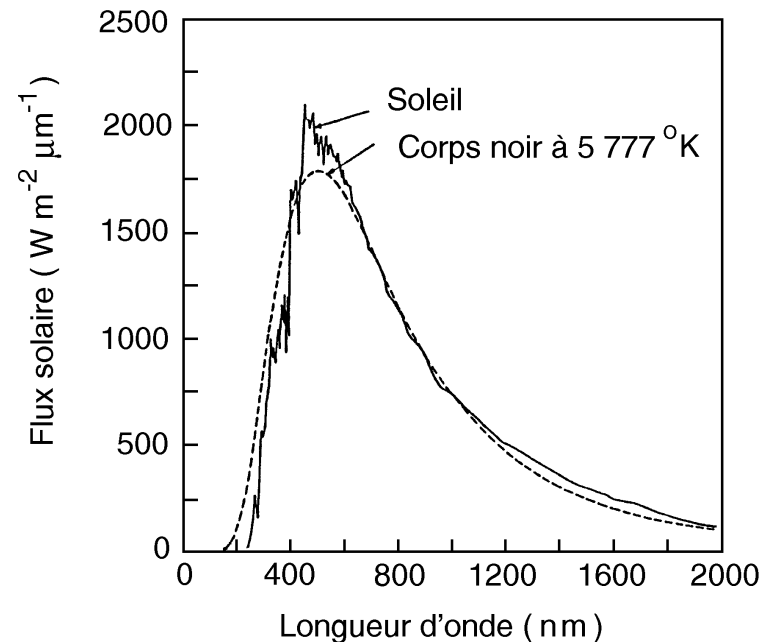


Le spectre du Soleil

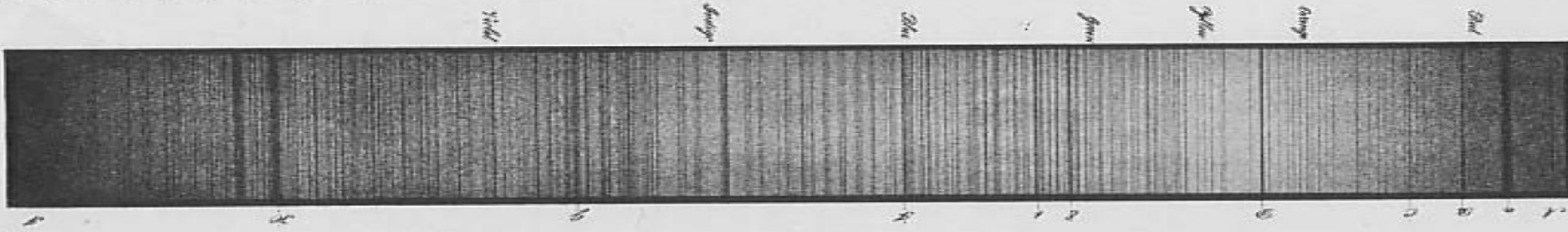


max. du spectre dans le vert (5800 K)

Comparaison entre le spectre observé (hors atmosphère Terre) et la loi de Planck à 5800 K :

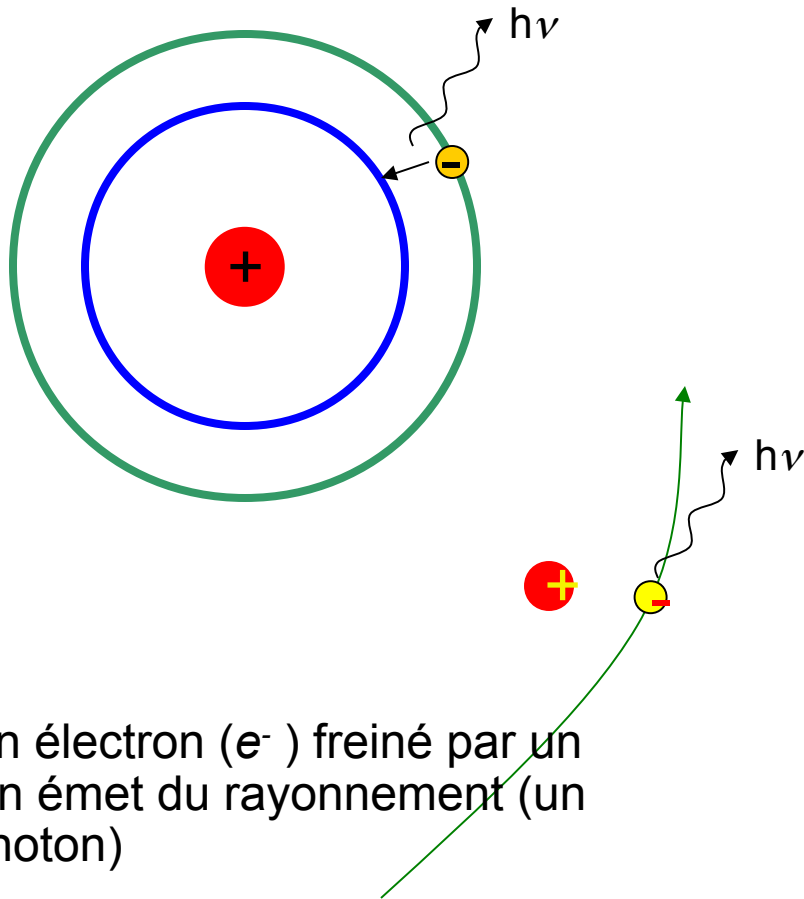


Une surprise dans le spectre du Soleil : les raies spectrales



- **J. von Fraunhofer (1817)** : le spectre du Soleil contient des raies sombres.
 - **Kirchhoff & Bunsen (1854)** : raies sombres dans spectre du Soleil à la place de raies brillantes dans le spectre de flammes. Chaque gaz a un ensemble de raies caractéristiques.
- ⇒ Possibilité d'étudier la composition chimique des étoiles : naissance de l'astrophysique (en contradiction avec Auguste Comte !)
- ⇒ Pourquoi des raies ? Physique atomique début 20^{ème} siècle.

Le rayonnement électromagnétique

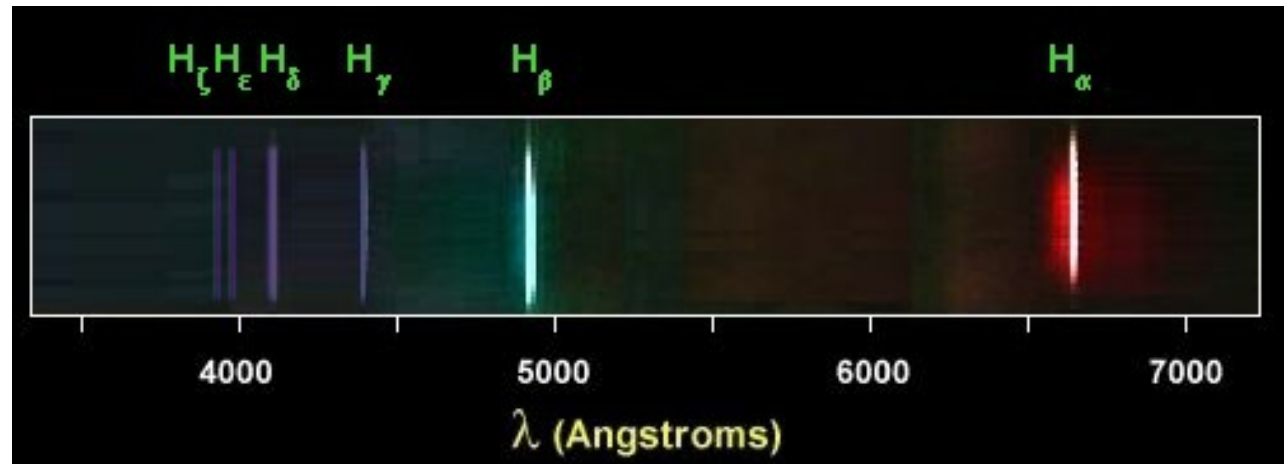
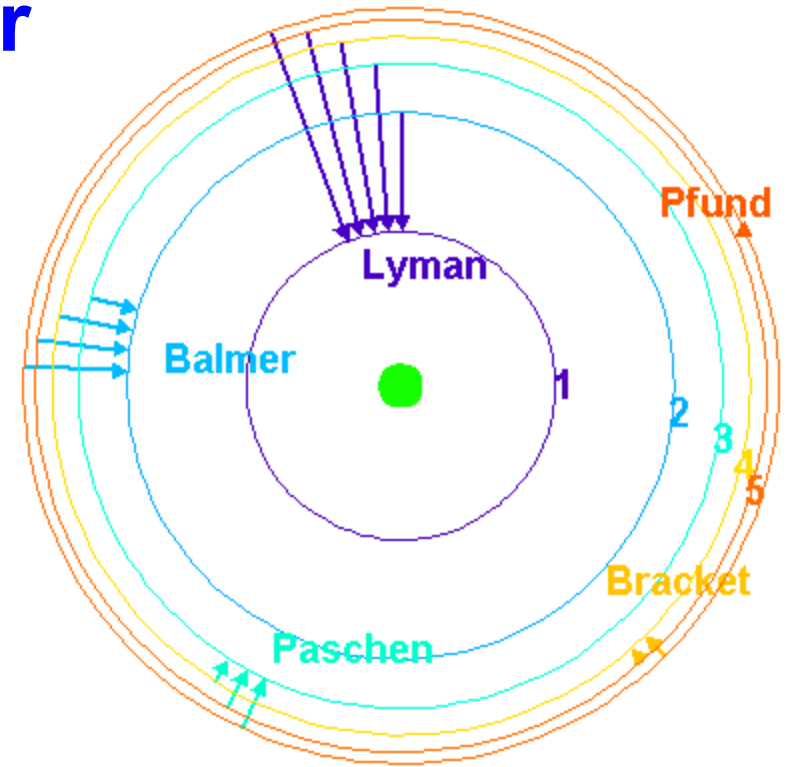


- Un électron (e^-) freiné par un ion émet du rayonnement (un photon)

- e^- dans un atome :
orbites discrètes (Bohr)
⇒ **spectre discret (raies)** des gaz dilués (mécanique quantique, début XX^{ème})
- La différence entre l'énergie de l' e^- avant et après la déviation est l'énergie du photon émis:
 $\Delta E = h\nu = h c/\lambda$
- e^- libre dans un solide : ΔE continu ⇒ **spectre continu** des solides incandescents

Exemple: spectre émis par l'atome d'hydrogène (H)

- Série de raies par transition vers un même niveau final à partir de différents niveaux de départ
- Exemple :
raies d'émission, série de Balmer



La matière de l'Univers

Premières applications de la
spectroscopie

L'analyse spectrale et la nature du Soleil - Jules Janssen 1879⁽¹⁾

- Janssen qualifie l'avis d'Arago (à la suite de W. Herschel) que le Soleil est sans doute habité d'idée 'presque ridicule'
- **La technique d'analyse spectrale** de Janssen transforme la physique solaire
 - La plupart des métaux connus sur Terre sont présents dans le Soleil sous forme gazeuse → 1^{ère} étape décisive pour démontrer l'unité matérielle de l'Univers
 - Les étoiles (= 'soleils lointains') contiennent les mêmes métaux que la Terre → démonstration de l'unité de l'Univers
 - Les étoiles sont entourées de nuages d'hydrogène
 - C'est aussi le cas du Soleil, comme le montrent les observations d'éclipses.
- Mais : cette idée doit s'imposer contre une apparente contradiction : **l'hydrogène est moins abondant sur la Terre que dans l'Univers**
⇒ Un argument contre l'unicité de l'Univers ???

Observations et doutes...

“The outstanding discrepancies between the astrophysical and terrestrial abundances are displayed for hydrogen and helium. The enormous abundance derived for these elements in the stellar atmosphere is almost certainly not real. Probably the result may be considered, for hydrogen, as another aspect of its abnormal behavior” (Payne, 1925, pp. 188-89).

(Thèse Cecilia Payne, 1925)

January 14, 1925.

My dear Miss Payne:

Here, at last, are your notes on relative abundance which you were so good as to send me some time ago....

You have some very striking results which appear to me, in general, to be remarkably consistent. Several of the apparent discrepancies can be easily cleared up. [Here Russell discusses Mg, Mg+, and K in some detail.]

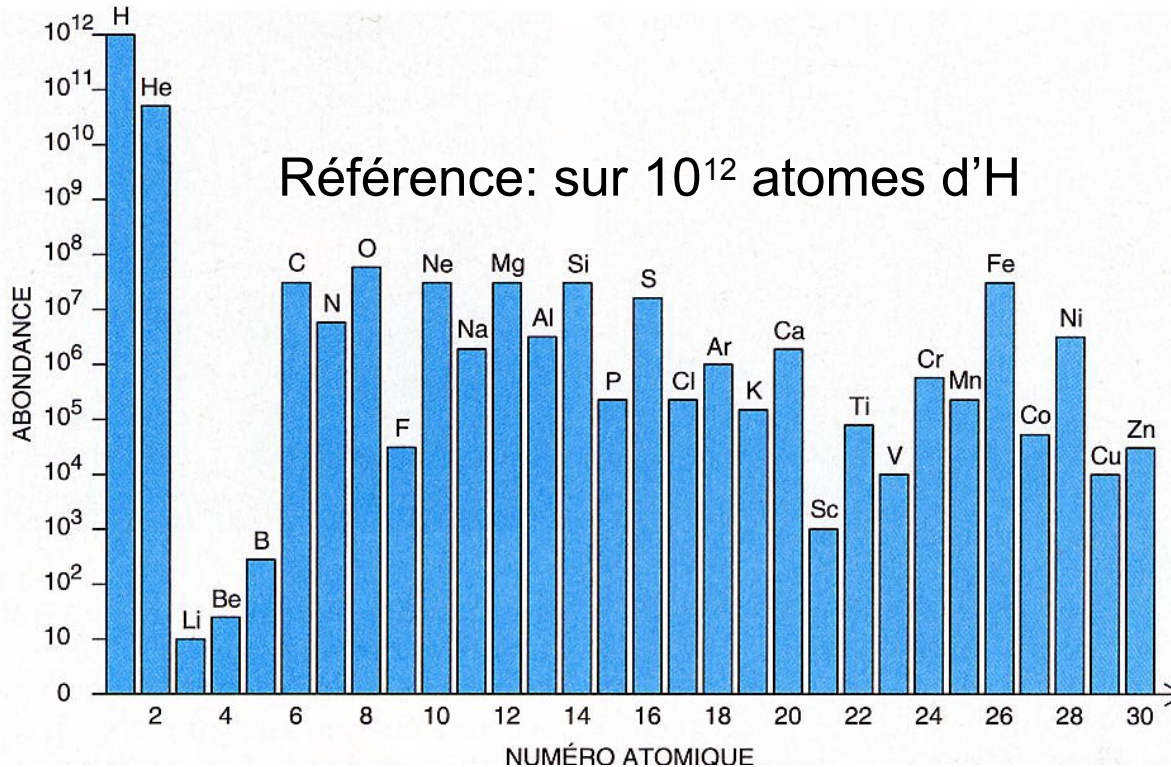
There remains one very much more serious discrepancy, namely, that for hydrogen, helium and oxygen. Here I am convinced that there is something seriously wrong with the present theory. It is clearly impossible that hydrogen should be a million times more abundant than the metals, and I have no doubt that the number of hydrogen atoms in the two quantum state is enormously greater than is indicated by the theory of Fowler and Milne. Compton and I sent a little note to 'Nature' about metastable states, which may help to explain the difficulty....

*Very sincerely yours,
Henry Norris Russell*

C. Payne ne croit pas à ses observations, parce qu'elles contredisent ses attentes

Pareil, son directeur de thèse: « clearly impossible »

... et pourtant (nos connaissances actuelles)



Cliché
Pour la Science

- Prépondérance des éléments légers : H, He
- Tous les autres éléments sont au moins 10 mille fois moins abondants
- Hypothèse erronée début XX^{ème} siècle : le Soleil contient des éléments chimiques connus de la Terre, et *dans les mêmes proportions*.

La solution de l'énigme des éléments légers

- La Terre n'exerce pas une gravitation suffisante sur les éléments légers pour les retenir. Ils sont donc **sous-abondants sur la Terre**.
- Janssen, Payne ... avaient raison. L'hydrogène est l'élément prépondérant des étoiles et de l'Univers dans son ensemble.

→ Une idée a priori (composition chimique identique dans tout l'Univers) a dû être surmontée par des observations et réflexions théoriques approfondies.

A noter les changements radicaux d'une idée erronée à l'autre :

- Terre corps privilégié (avant 1600)
⇒ tous les astres sont habités (γ 1700 (Fontenelle) - \sim 1800 (Herschel) ...)
- Matière céleste = 5^{ème} élément, \neq Terre
⇒ composition chimique partout la même

Spectroscopie stellaire

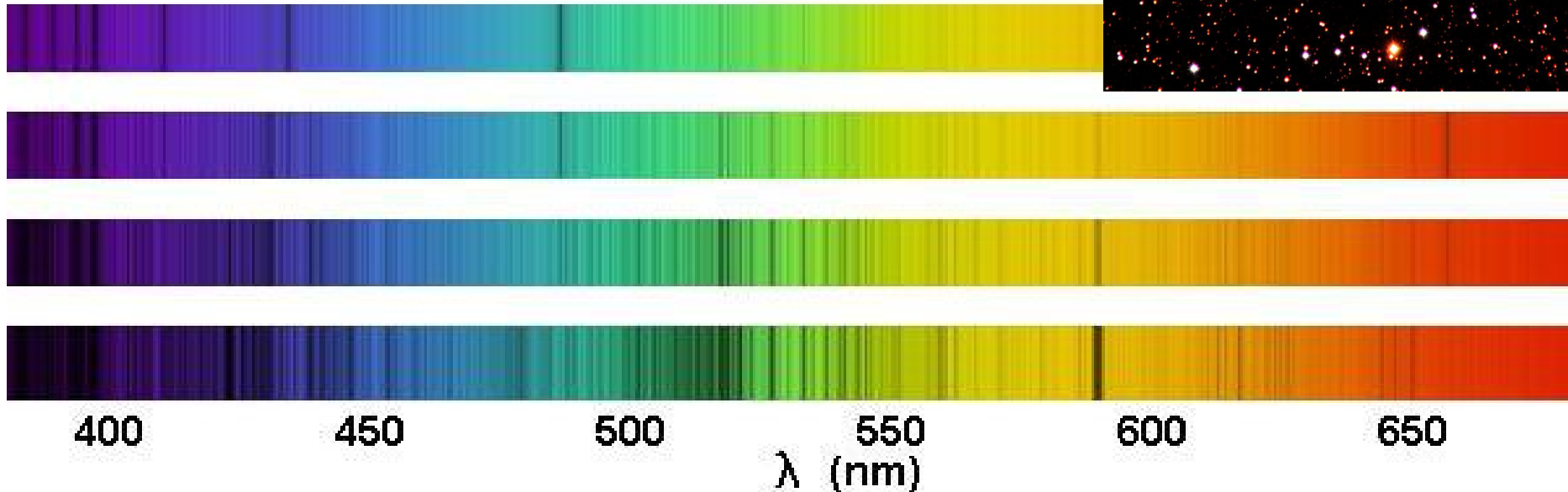
on utilise quatre types d'informations pour décrire une étoile :

sa luminosité ou sa brillance

sa couleur, sa température ou son "type spectral"

son degré d'évolution ou classe de luminosité

sa "métallicité" ou composition chimique



Spectroscopie stellaire

Le Henry Draper Memorial : un projet de catalogue de spectres stellaires : 5000 */mois!
(dir. Edward Pickering, Université d'Harvard)

→ observations depuis Cambridge (Massachusetts) et Arequipa (Pérou)

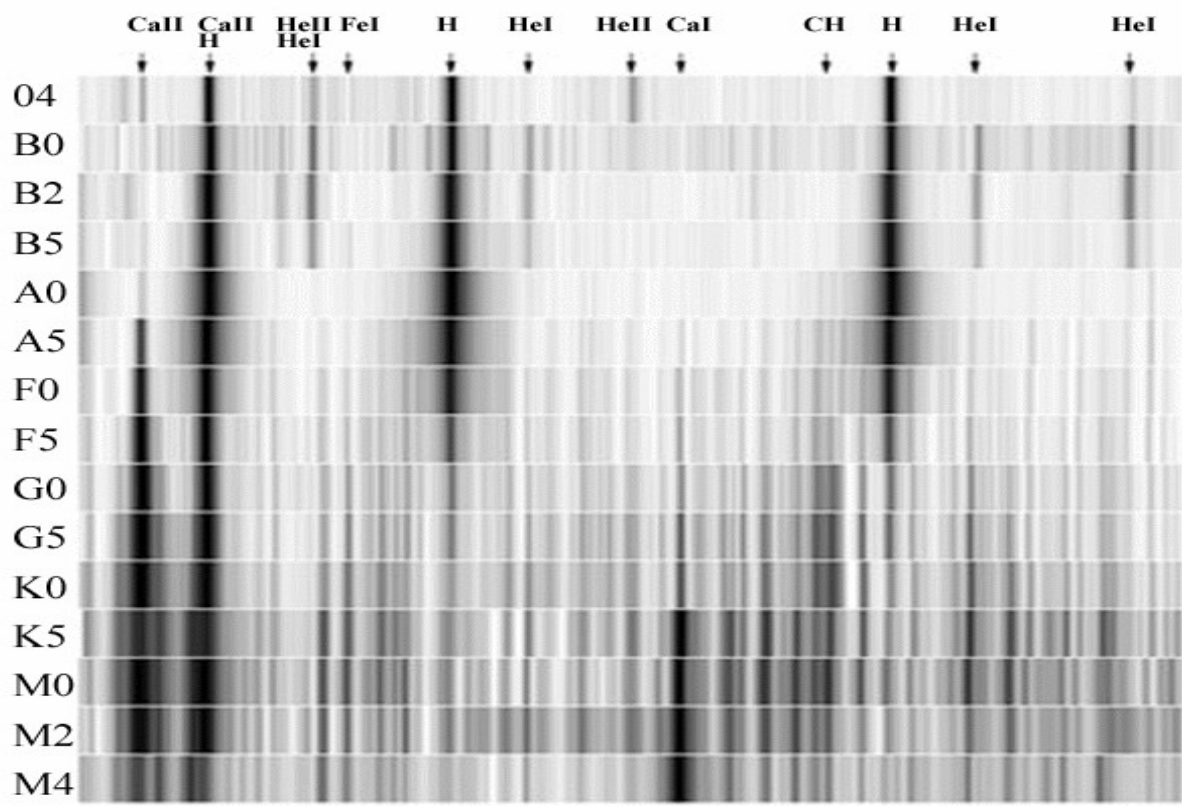


1881, Williamina Fleming, première « calculatrice » de l'observatoire, elle développe une première méthode de classification des étoiles basée sur l'intensité des raies d'absorption de l'hydrogène

1887, Antonia Maury : ciel Nord → elle ajoute une classe de luminosité « a, b, c »

1896, Annie Jump Cannon : ciel Sud → 300*/heure,
elle arrange les classes par ordre de T°
OBAFGKM...

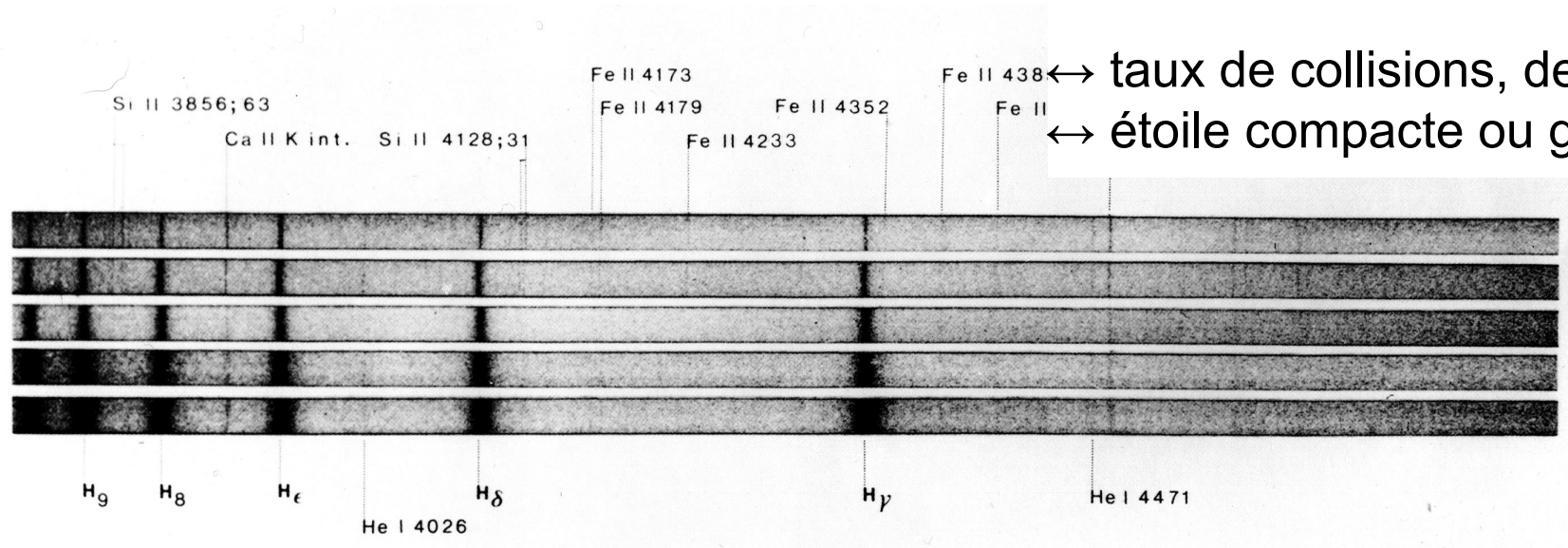
Le Henry Draper Catalogue sera publié en neuf volumes entre 1918 et 1924 et contiendra la position, la magnitude et la classification spectrale de 225.300 étoiles.



Type spectral :
 intensités relatives
 des raies d'absorption
 des différents éléments

↔ température
 de l'enveloppe

Classe de luminosité :
 épaisseur des raies



↔ taux de collisions, densité
 ↔ étoile compacte ou géante

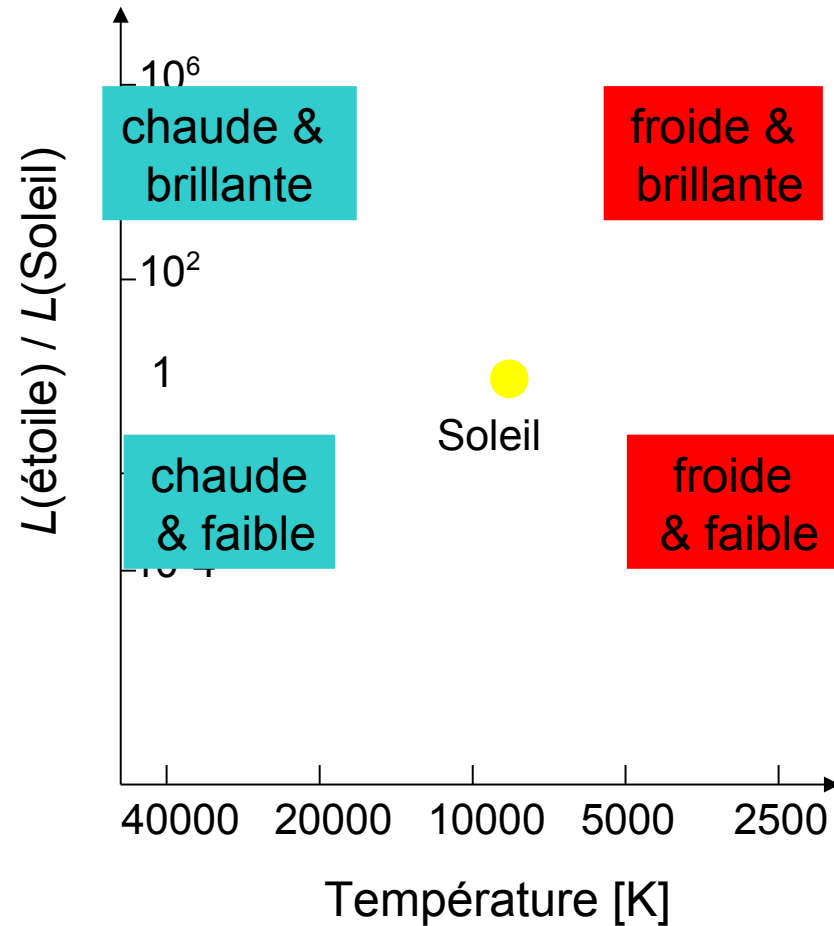
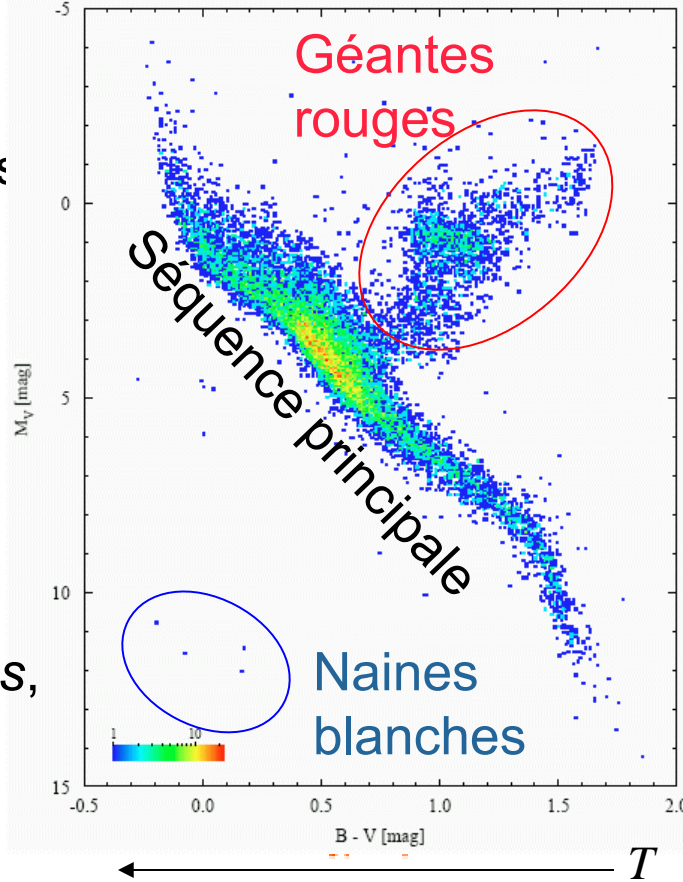
HD 21291
 HD 35600
 γ Lyr
 α Del
 α Peg

La classification des spectres des étoiles

Diagramme Hertzsprung-Russell

H.N. Russell
1914

Hipparcos,
1995



Classification des étoiles selon leur spectre: pour un gaz en équilibre thermodynamique $L=4 \pi R^2 \sigma T^4$ (loi de Stefan);
une étoile est brillante parce qu'elle est (1) chaude ou (2) grande.

Mesurer le Soleil

Luminosité et masse

Une nouvelle notion : l'évolution du Soleil

- **Abandon de la séparation** supra-lunaire/incorruptible - sublunaire/transitoire
- Notion de **la durée de vie finie du soleil** :
 - réservoir de combustible (Kant),
 - formation du Soleil (Laplace),
 - spéculations sur l'évolution (Herschel...)

Une nouvelle notion : l'évolution du Soleil

- **Abandon de la séparation** supra-lunaire/incorruptible - sublunaire/transitoire
- Notion de **la durée de vie finie du soleil** :
 - réservoir de combustible (Kant),
 - formation du Soleil (Laplace),
 - spéculations sur l'évolution (Herschel...)

Mais il manque :

- la compréhension de l'origine et du transport de la chaleur,
 - la mesure des paramètres du Soleil (masse, température, composition chimique ...)
- ⇒ mieux comprendre sa nature et son budget d'énergie
(combien de temps le Soleil peut-il briller pour un processus donné de génération d'énergie ?)

La masse du Soleil

- **Loi de gravitation (Newton)** : on sait décrire quantitativement l'attraction entre Soleil et Terre et entre Terre et Lune.

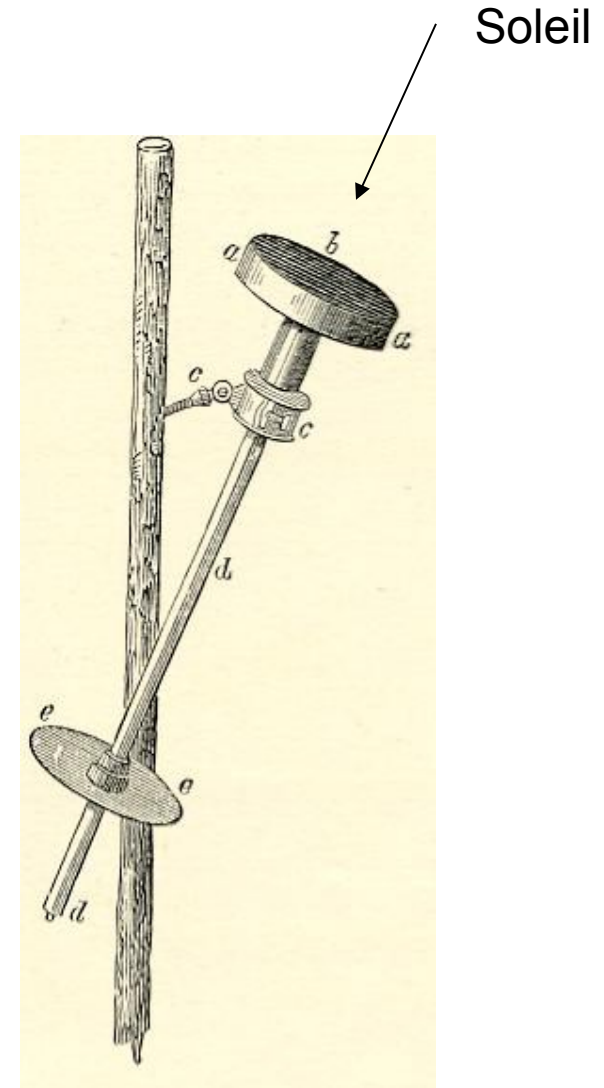
⇒ **Possibilité de déterminer les masses des astres.**

- Raisonnement simplifié : la Terre (masse m) tourne sur orbite circulaire autour du Soleil (masse M) immobile

$$\left. \begin{array}{l} m \frac{v^2}{r} = \frac{GmM}{r^2} \\ v = \frac{2\pi r}{P} \end{array} \right\} \left(\frac{2\pi r}{P} \right)^2 \frac{1}{r} = \frac{GM}{r^2} \Rightarrow M = \frac{4\pi^2}{G} \frac{r^3}{P^2} \approx 2 \times 10^{30} \text{ kg}$$

Mesurer le Soleil : la luminosité (1)

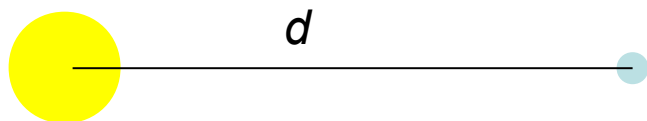
- **Claude Pouillet (1790-1868),
John Herschel (1792-1871)**
 - **Principe** : mesurer le flux d'énergie en exposant, pendant une durée précise, une quantité connue d'eau (*a*) à la chaleur du Soleil, puis mesurer l'augmentation de T (thermomètre *d*)
 - **Résultats** : environ la moitié de la valeur actuelle de $1,4 \text{ kW/m}^2$ (absorption atmosphère Terre) : « constante solaire »
- ⇒ **Estimation de la température à la surface du Soleil : env $1700 \text{ }^\circ\text{C}$**



La luminosité du Soleil (2)

Un m^2 à la Terre n'intercepte qu'une petite fraction de l'énergie du Soleil. Quelle est la puissance émise par le Soleil ?

À la distance de la Terre (d), l'énergie émise par le Soleil est répartie sur une sphère de rayon d , donc de surface $4 \pi d^2$ ($d = 150 \times 10^9 \text{ m}$).



La puissance émise par le Soleil (L) est le produit de la *constante solaire* par cette surface.

La puissance émise par le Soleil (luminosité) vaut

$$L = 4\pi (150 \times 10^9)^2 \times 1400 \text{ W} \approx 4 \times 10^{26} \text{ W.}$$

Soleil : durée de vie et source d'énergie

Source d'énergie et durée de vie du Soleil

Quel âge ont le Soleil et la Terre ?

- Renaissance (XVIIème siècle) : tjrs **interprétation littérale de la bible**
 - James Ussher (1650), évêque anglican d'Armagh : création au soir précédant le 23 Oct 4004 av JC
 - Halley (1715) propose d'utiliser la salinité des océans comme chronomètre de l'érosion pour mesurer l'âge de la Terre
 - conflit Eglise - science, p. ex. Buffon (1770) et le refroidissement de sphères de métal ~ 75000 ans (**EXTRAIT**)
- **Début de réflexions physiques** au XVIIIème siècle (Lumières) : Kant, Laplace, ...
- **Discussion physique/géologie** XIXème siècle :
 - Thermodynamique; conservation de l'énergie
 - le Soleil ne peut être plus jeune que la Terre ;
 - combien de temps le Soleil peut-il maintenir son rayonnement avec un processus donné de génération d'énergie ?
- **Réponse définitive : physique nucléaire**, XXème siècle

La conservation de l'énergie (1)

- **Conservation de la masse** (Lavoisier, réactions chimiques : « rien ne se crée, rien ne se perd, tout se transforme »)

- **Mécanique :**

inertie

⇒ vitesse = cste, si pas de force (Galilée, Newton ...)

chute libre (Huygens 1665) :

⇒ transformation d'énergie gravitationnelle en énergie cinétique

$$\left. \begin{array}{l} \ddot{z} = -g \\ \dot{z} = -gt \\ z = h_0 - \frac{1}{2}gt^2 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dot{z}^2 = g^2t^2 \\ h_0 - z = \frac{1}{2}gt^2 \end{array} \right\} \Rightarrow \dot{z}^2 = 2g(h_0 - z)$$
$$\Rightarrow \frac{\dot{z}^2}{2} + gz = gh_0$$

(première notion de la conservation de l'énergie mécanique)

La conservation de l'énergie (2)

- **Transformation travail en chaleur** (frottements, courants électriques) **et de chaleur en travail** (machine à vapeur, fin XVIIIème). Absorption de nourriture et maintien de la température du corps chez les animaux.
- **J.R. Mayer, H. von Helmholtz, J.P. Joule (vers 1845) :**
l'énergie ne peut être créée ou détruite - c'est une grandeur « conservée » (1er principe de la thermodynamique).
« Au cours d'une transformation quelconque d'un système fermé, la variation de son énergie est égale à la quantité d'énergie échangée avec le milieu extérieur, par transfert thermique (chaleur) et transfert mécanique (travail). » (wikipédia)
- Conclusion : **le Soleil rayonne (donc perd) de l'énergie**
⇒ Tentative d'explication par l'énergie chimique : comment / pendant combien de temps peut-il maintenir son rayonnement par la combustion (Kant, ...) ?

Pourquoi le Soleil brille-t-il ? (1)

- **Combustion (énergie chimique - voir Kant).** J.R. Mayer (1846) :
« en 1 h, 1 cm² de la surface du Soleil émet la chaleur dégagée par la combustion d'1 tonne de charbon. Le Soleil mettrait < 5000 ans à se consumer. »
- **Un petit exercice numérique**
supposons que le Soleil fonctionne comme un moteur à essence :
combien de temps le Soleil pourrait-il briller étant donnée sa puissance actuelle (4×10^{26} W) ?

Moteur à essence : puissance 40 kW

consomme 8 l / 100 km, vitesse 100 km/h

⇒ réservoir 8 l (~ 8 kg) pour 1 heure,

Soleil: puissance (consommation) 4×10^{23} kW / 40 kW = 10^{22} fois supérieur

réservoir 2×10^{30} kg / 8 kg = $2,5 \times 10^{29}$ fois supérieur

⇒ fonctionne $(2,5 \times 10^{29} / 10^{22}) \times 1$ heure = 3 000 ans. **Bien trop court !**

Pourquoi le Soleil brille-t-il ? (2)

Kepler :

« il y a plus de comètes dans les cieux que de poissons dans l'océan »

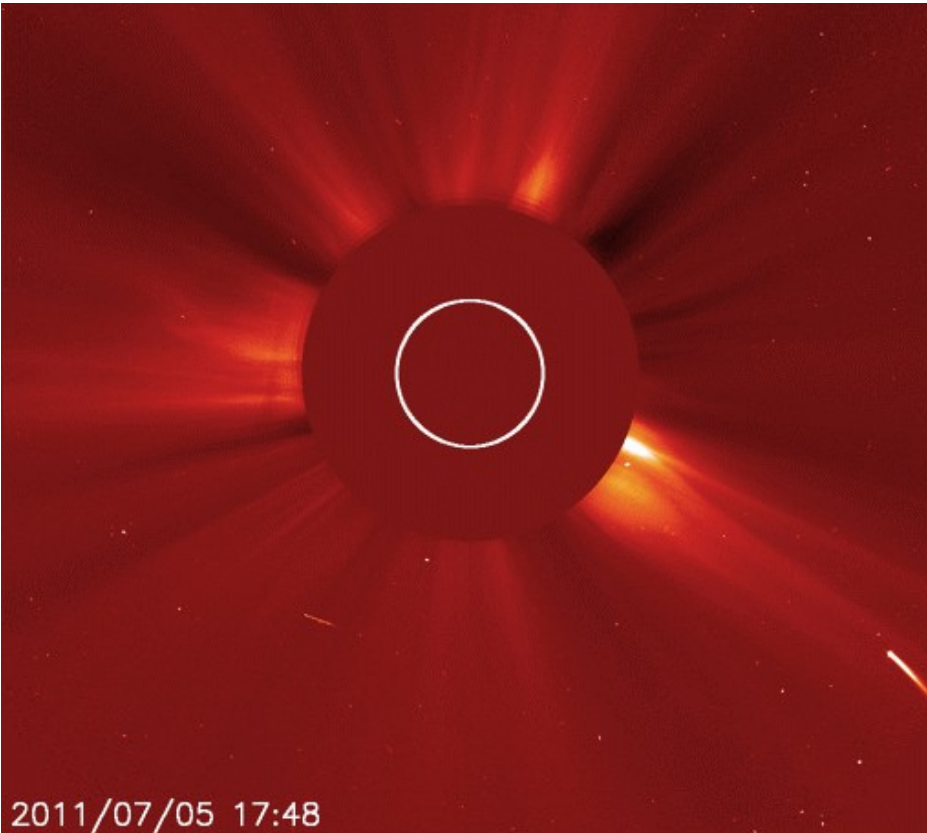
• J.R. Mayer (1846):

flux de comètes / astéroïdes
s'écrasant sur le Soleil

= transformation d'énergie
gravitationnelle en chaleur

→ la chute d'un astéroïde produit de
4000-9000 fois plus de chaleur que la
combustion d'une masse égale de
charbon

• Taches solaires = marques du
flux des comètes/astéroïdes ?



Une comète chute sur le Soleil (juillet 2011,
observation du satellite SoHO, ESA/NASA)

W. Thomson (Lord Kelvin, 1862)

Hésitations

« A considérer toutes les circonstances, l'hypothèse est peu probable que le rayonnement solaire soit actuellement compensé de façon appréciable par un apport de chaleur engendrée par des météores chutant au Soleil ; et, comme on peut montrer qu'aucune théorie chimique n'est tenable, on aboutit à la conclusion la plus probable que le Soleil n'est à présent qu'une masse liquide incandescente qui se refroidit. »

« La forme de la théorie météorique qui nous paraît maintenant la plus probable ... consiste à supposer que le Soleil et sa chaleur ont leur origine dans une agglomération de petits corps qui chutent à cause de leur gravitation mutuelle et engendrent, comme ils doivent le faire selon la grande loi démontrée par Joule, une quantité de chaleur exactement équivalente du mouvement perdu lors de la collision. ... Il n'y a pas de difficulté à rendre compte, par cette théorie, de 20 millions d'années [d'âge du Soleil]».

La « grande loi démontrée par Joule » : loi de conservation de l'énergie.

Pourquoi le Soleil brille-t-il (3) ?

- **Problème de l'hypothèse de la chute des astéroïdes / comètes :**
soit le Soleil devrait grossir (et la Terre devrait accélérer son mvt orbital - non observé), soit il manque de matière pour maintenir son rayonnement. L'hypothèse se révèle donc intenable.
- **Alternative :** formation du système solaire à partir de la **contraction d'une nébuleuse primitive** (Laplace, Kant) \Rightarrow toute la matière du Soleil chute vers son centre, transformant son énergie gravitationnelle en chaleur (Waterston, von Helmholtz, Kelvin - milieu XIXème siècle).
Quelle durée de vie ?
- Une estimation simple \rightarrow environ 20 millions d'années.

Energie gravitationnelle
d'une sphère uniforme :

$$E = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R_s} \approx 2,3 \times 10^{41} \text{ J}$$

$$\tau = \frac{2,3 \times 10^{41} \text{ J}}{4 \times 10^{26} \text{ J/s}} = 5,75 \times 10^{14} \text{ s} \approx 18 \times 10^6 \text{ ans}$$

Pourquoi le Soleil brille-t-il (4) ?

- **Est-ce suffisant ?**
- **Deuxième moitié XIXème siècle:**
 - oui (d'après les physiciens);
 - **conflit avec idées sur évolution de la Terre**, déduites de réflexions sur la formation des structures à la surface de la Terre ou sur l'évolution des espèces ($> 100 \times 10^6$ années, d'après certains géologues + Darwin)
 - Kelvin a une telle autorité que Darwin retire son estimation de l'âge de la Terre. À tort !
- **Datation des roches par la radioactivité**, fin XIXème/début XXème siècle : âge de la Terre $\geq 10^9$ ans
 - ⇒ comme le Soleil ne peut être plus jeune que la Terre, l'énergie gravitationnelle se révèle insuffisante pour alimenter son rayonnement !!!

Résumé

- L'idée aristotélicienne que le Soleil est constitué d'une matière différente de celle de la Terre est abandonnée aux XVIIème/XVIIIème siècles.
 - Essentiel : taches en tant que phénomène solaire.
 - Fin XIXème : Soleil, étoiles = sphères de gaz chaud.
- Le constat que le Soleil est une source de chaleur entraîne des comparaisons avec la combustion et la notion d'une durée finie de la vie du Soleil.
- La loi de la conservation de l'énergie et la mesure du flux d'énergie du Soleil permettent de tester quantitativement différents mécanismes de génération d'énergie. Incertitude : âge du Soleil (ou de la Terre).
- L'énergie solaire se révèle beaucoup trop importante pour être expliquée par l'un des mécanismes connus de la physique « classique » (du XIXème siècle), combustion ou gravitation.
- Premières idées sur la composition chimique du Soleil au XIXème siècle (voir citation Kelvin & cours naissance de l'astrophysique).

Pourquoi le Soleil brille-t-il ?

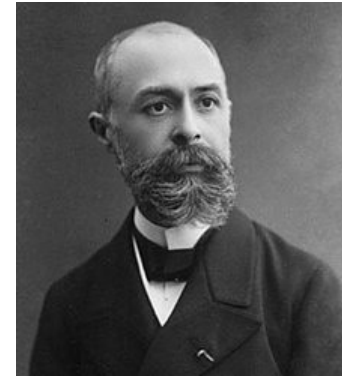
Une nouvelle forme
d'énergie : l'énergie nucléaire

Source d'énergie et durée de vie du Soleil

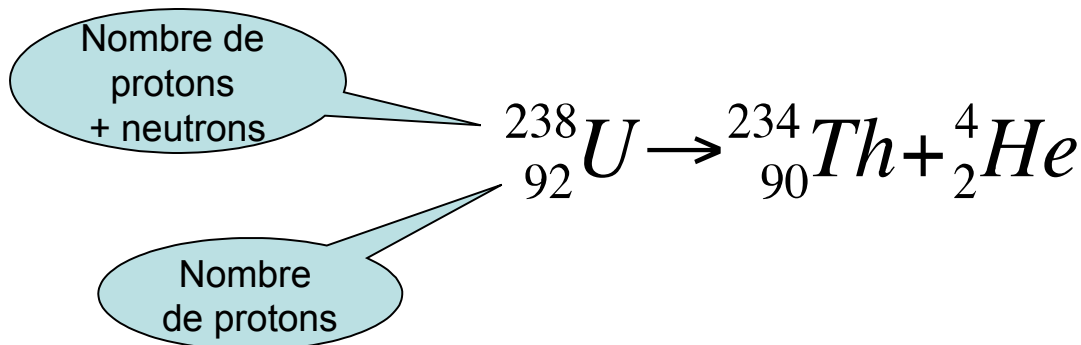
Quel âge ont le Soleil et la Terre ?

- Renaissance (XVIIème siècle) : tjrs **interprétation littérale de la bible**
 - James Ussher (1650), évêque anglican d'Armagh : création au soir précédant le 23 Oct 4004 av JC
 - Halley (1715) propose d'utiliser la salinité des océans comme chronomètre de l'érosion pour mesurer l'âge de la Terre
 - conflit Eglise - science, p. ex. Buffon (1770) et le refroidissement de sphères de métal ~ 75000 ans (**EXTRAIT**)
- **Début de réflexions physiques** au XVIIIème siècle (Lumières) : Kant, Laplace, ...
- **Discussion physique/géologie** XIXème siècle :
 - Thermodynamique; conservation de l'énergie
 - le Soleil ne peut être plus jeune que la Terre ;
 - combien de temps le Soleil peut-il maintenir son rayonnement avec un processus donné de génération d'énergie ?
- **Réponse définitive : physique nucléaire**, XXème siècle

Une nouvelle source d'énergie: la radioactivité

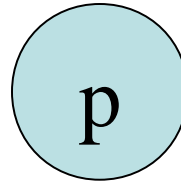


- **H. Becquerel 1896 :**
l'uranium altère des plaques photographiques.
- **Curie et Laborde 1903 :** des sels de radium libèrent de la chaleur sans se refroidir à la température ambiante.
- **Rutherford 1904 :** découverte de l'émission de « particules alpha » (=noyaux atomiques d'hélium) ; exemple : noyau d'uranium se transforme en noyau thorium, en émettant une 'particule alpha' (= noyau d'hélium)

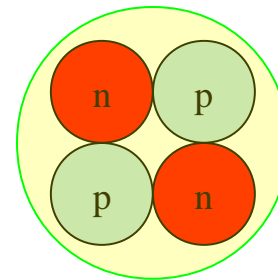


Energie nucléaire (1)

- Le noyau d'atome le plus simple : hydrogène (H) = 1 proton



- Le noyau d'un atome plus lourd que l'H est composé de protons et neutrons (découverte neutron : 1932). Exemple : hélium (He) 2 protons + 2 neutrons.

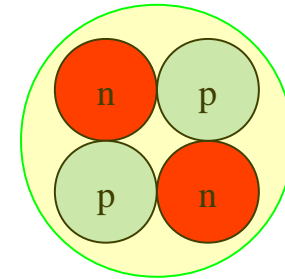


- Pourquoi les protons ne se repoussent-ils pas, bien qu'ils aient la même charge électrique ?

Energie nucléaire (2)

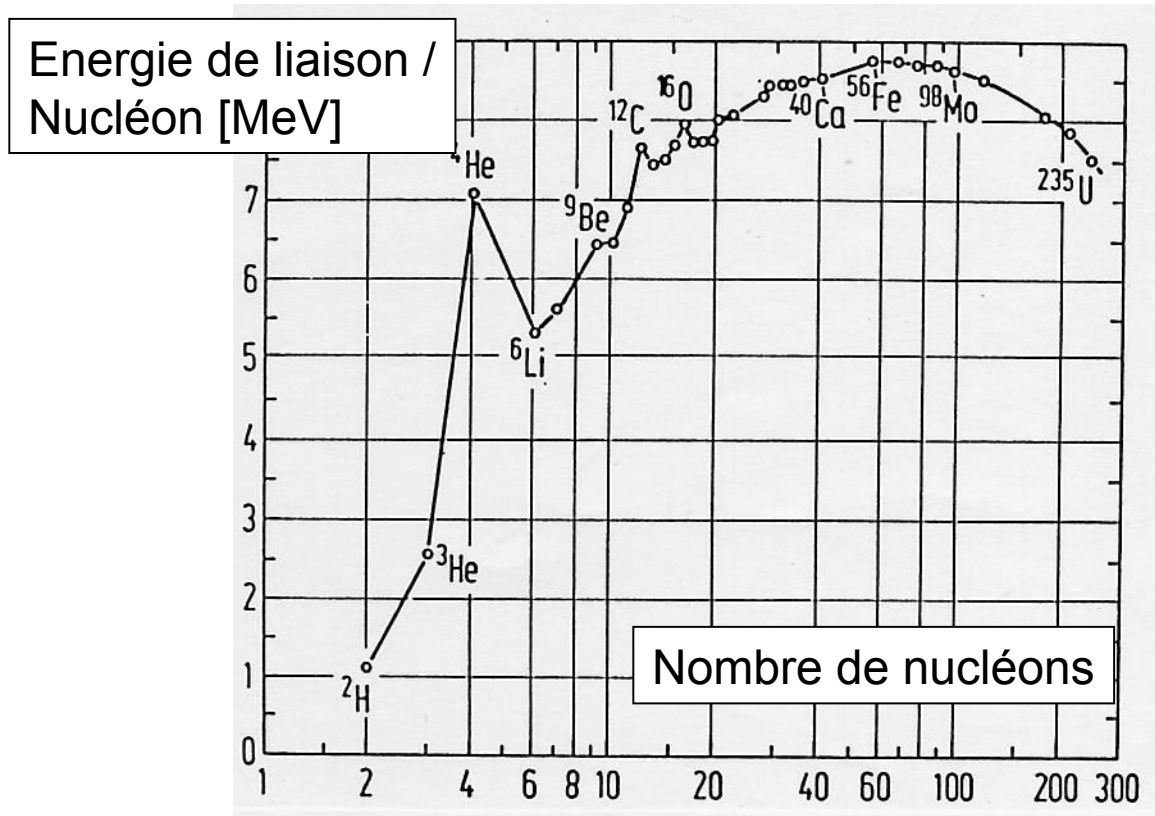
- Le noyau atomique est maintenu par une interaction spécifique (*interaction forte*) qui agit à très courte distance et dépasse, sur cette distance, la répulsion coulombienne des protons.
- Les noyaux très lourds (beaucoup de protons et de neutrons) sont radio-actifs: ils se désagrègent et libèrent ainsi de l'énergie (fission nucléaire).

- Des noyaux légers libèrent de l'énergie en s'assemblant (fusion nucléaire)



- Les noyaux d'atomes se transforment parce que l'état final a une énergie (= une masse) moindre que l'état initial: $E = mc^2$ (Einstein 1905).

Energie nucléaire (3)



- Les noyaux les plus stables (énergie de liaison maximale) sont ceux du fer (Fe) et du nickel (56 nucléons)
- Libération d'énergie nucléaire par (a) la fission d'un élément lourd (p. ex. U), (b) la fusion d'un élément léger (p. ex. H) 64

La fission nucléaire - source d'énergie des étoiles ?

- **Rutherford (1904)** : « *La découverte des éléments radioactifs qui, lors de leur désintégration, libèrent d'énormes quantités d'énergie, augmente donc la limite possible de la durée de vie sur cette planète, et nous permet d'envisager la durée prétendue nécessaire pour l'évolution par les biologistes et les géologues.* »
- **La fission ne peut être le mécanisme de génération d'énergie du Soleil parce que :**
 - le Soleil ne contient pas assez d'éléments lourds (fait connu au début du XXème siècle ; voir thèse de C. Payne, cours « Naissance de l'astrophysique »).
 - la fission ne dépend pas de la température de l'étoile, alors que la luminosité des étoiles en dépend (loi de Stefan).

La fusion nucléaire - source d'énergie des étoiles

- **Harkins & Wilson (1915)** : libération énorme d'énergie lors de la conversion de H en He
 - **Perrin 1919** : un scénario
 - Si nébuleuse primitive constituée de particules légères (p. ex. H, He; voir nébuleuse Orion):
 - contraction du nuage primitif augmente T ;
 - formation d'atomes plus lourds et dégagement de rayons gamma (= énergie) restant dans l'astre et contribuant à augmenter T ;
 - Soleil peut ainsi maintenir son rayonnement pendant plusieurs milliards - plusieurs dizaines de milliards d'années
- (EXTRAIT)**
- **Développement de la théorie** : Eddington ...

Fusion nucléaire au centre du Soleil :

Selon la loi de conservation de la masse (« rien ne se perd, rien ne se crée ... »), la masse du noyau d'hélium devrait être la somme des masses des 4 protons.
Mais ...

4 milliards de milliards de p : 6,690 micro-grammes

1 milliard de milliards de noyaux de He : 6,646 micro-grammes

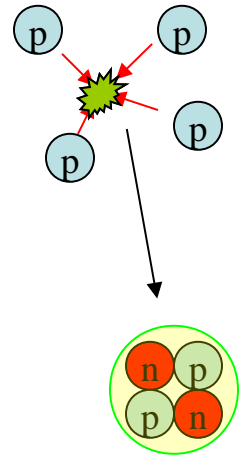
Masse « perdue » : 0,044 micro-grammes

La masse « perdue » se retrouve sous forme d'énergie (encore « rien ne se perd, rien ne se crée » !):

$E = mc^2 = 3,97$ Mega-Joule = 1,10 kWh pour 1 kg (Einstein 1905).

Son réservoir d'hydrogène permet au Soleil de briller pendant 9-10 milliards d'années.

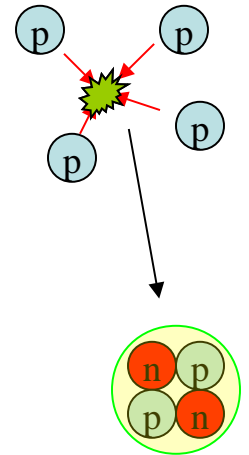
4 noyaux d'hydrogène
(protons)
↓
1 noyau d'hélium (He)
2 p se sont transformés en
neutrons (n)



Fusion nucléaire au centre du Soleil :

Selon la loi de conservation de la masse (« rien ne se perd, rien ne se crée ... »), la masse du noyau d'hélium devrait être la somme des masses des 4 protons.
Mais ...

4 noyaux d'hydrogène
(protons)
↓
1 noyau d'hélium (He)
2 p se sont transformés en
neutrons (n)



4 milliards de milliards de p : 6,690 micro-grammes

1 milliard de milliards de noyaux de He : 6,646 micro-grammes

Masse « perdue » : 0,044 micro-grammes

La masse « perdue » se retrouve sous forme d'énergie (encore « rien ne se perd, rien ne se crée » !):

$E = mc^2 = 3,97$ Mega-Joule = 1,10 kWh pour 1 kg (Einstein 1905).

Son réservoir d'hydrogène permet au Soleil de briller pendant 9-10 milliards d'années.