مفاهيم في علم الفلك و الفيزياء الفلكية :

(3) النّظام الشّمسي و الميكانيكا السّماويّة

Notion d'Astronomie et Astro-Physique:

(3) Système Solaire et Mécanique Céleste

L2 Physique, Département de Physique, Université de Jijel

M.S. ZIDI

mohamed.sadek.zidi@gmail.com

Semestre 2: 2019/2020

مخطّط المحاضرة

1. **التّفاعلات الأساسيّة في الطّبيعة**
2. **الميكانيكا السّماويّة**
   - ميكانيكا نيوتن
   - قوانين كبلر
   - البرهان على قوانين كبلر
   - تحديد كتلة الشّمس و الكواكب
3. **النّظام الشّمسي**
   - النّظام الشّمسي
   - مكوّنات النّظام الشّمسي
   - فرضيّة السّديم العظيم
4. **الشّمس**
   - بنية الشّمس
   - طبقات الشّمس

المراجع (*references*)

هذه المحاظرة تعتمد أساسا على المرجع التّالي:

INTRODUCTION A L'ASTRONOMIE, Jean-Pierre Rivet

التّفاعلات الأساسيّة في الطّبيعة

التّفاعلات الأساسيّة الأربع

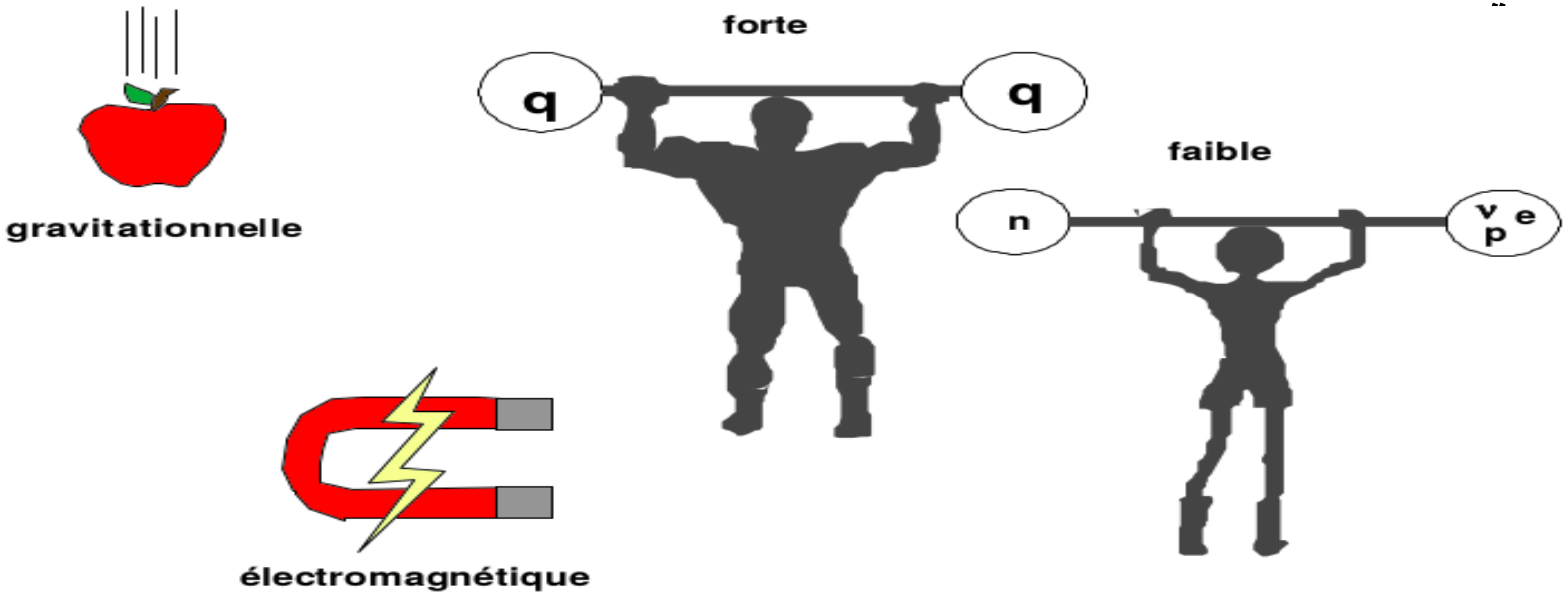
التّفاعلات الأساسيّة في الطّبيعة (أو القوى الأساسيّة) هي التّفاعلات المسؤولة عن كل الظواهر الموجودة في الكون (تماسك الأجرام، طاقتها، ... إلخ)، و هي:

(1) الجاذبيّة

(2) الكهرومغناطيسيّة

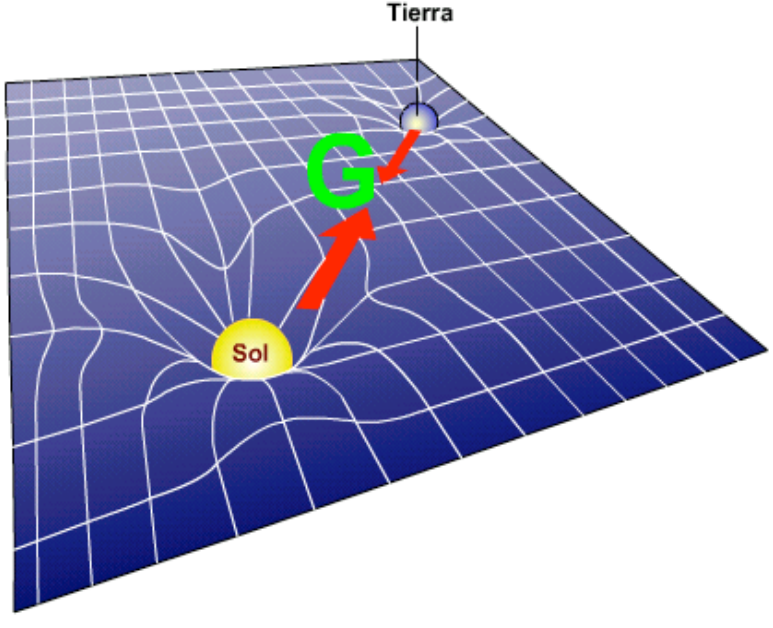
(3) التّفاعلات القويّة

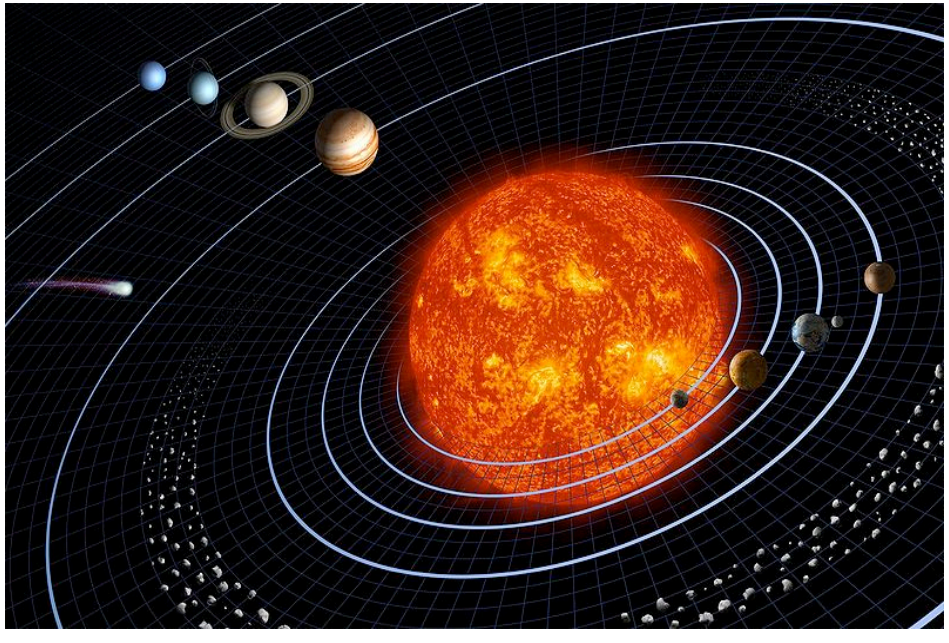
(4) التّفاعلات الضّعيفة



قوّة الجاذبيّة

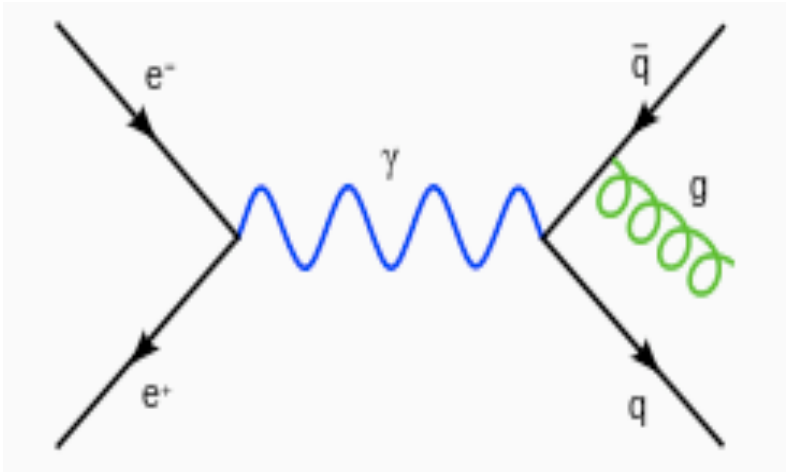
- مداها غـير منتهي و تؤثّر على كـل الأجسام ذات الكـتلة
- مـهملة على المستوى الميـكروسكوبي (الذّرّي مثلا) أمام القوّة الكهرومغناطيسيّة
- هي المسؤولة عـن ربطنا بالأرض
- مسؤلة عـن تماسك النّظام الشّمسي و الكون





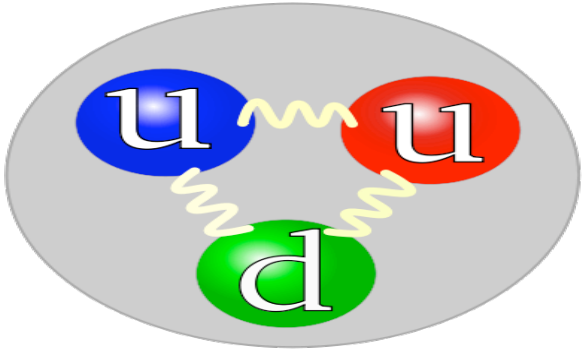
القوّة الكهرومغناطيسيّة

- مسؤولة عـن تماسك الذّرّات (النّواة ذات شحنة موجبة و الالكترونات سالبة)
- مسؤولة عـن تماسك الجزيئات (قوّة فاندارفولس)
- مداها غير متهي
- الفوتون هو وسيط التّفاعـــل الكهرومغناطيسي



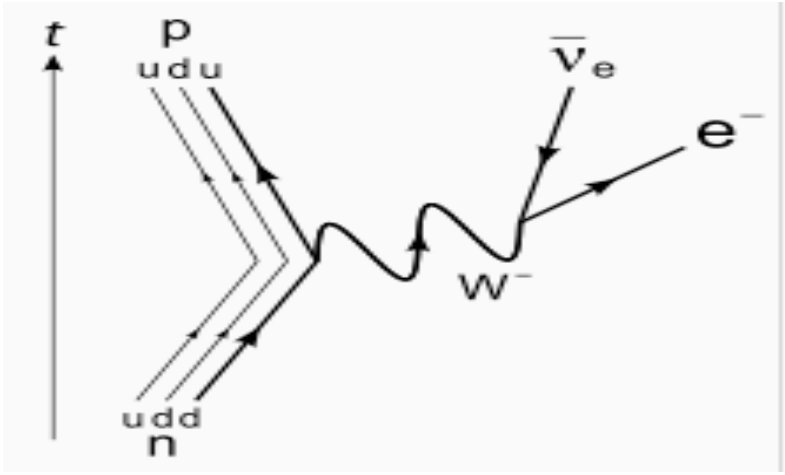
التّفاعلات القويّة

- مسؤولة عــن تماسك النّواة الذرّيّة
- تـمنع التّنافر الكهربائي بـين البروتونات مـن داخل النّواة
- تؤثّر على مسافات قريبة (مداها قريب)
- تربــط الكواركات داخل البروتون و النّوترون
- الغليون هو وسيـط التّفاعـل القوي

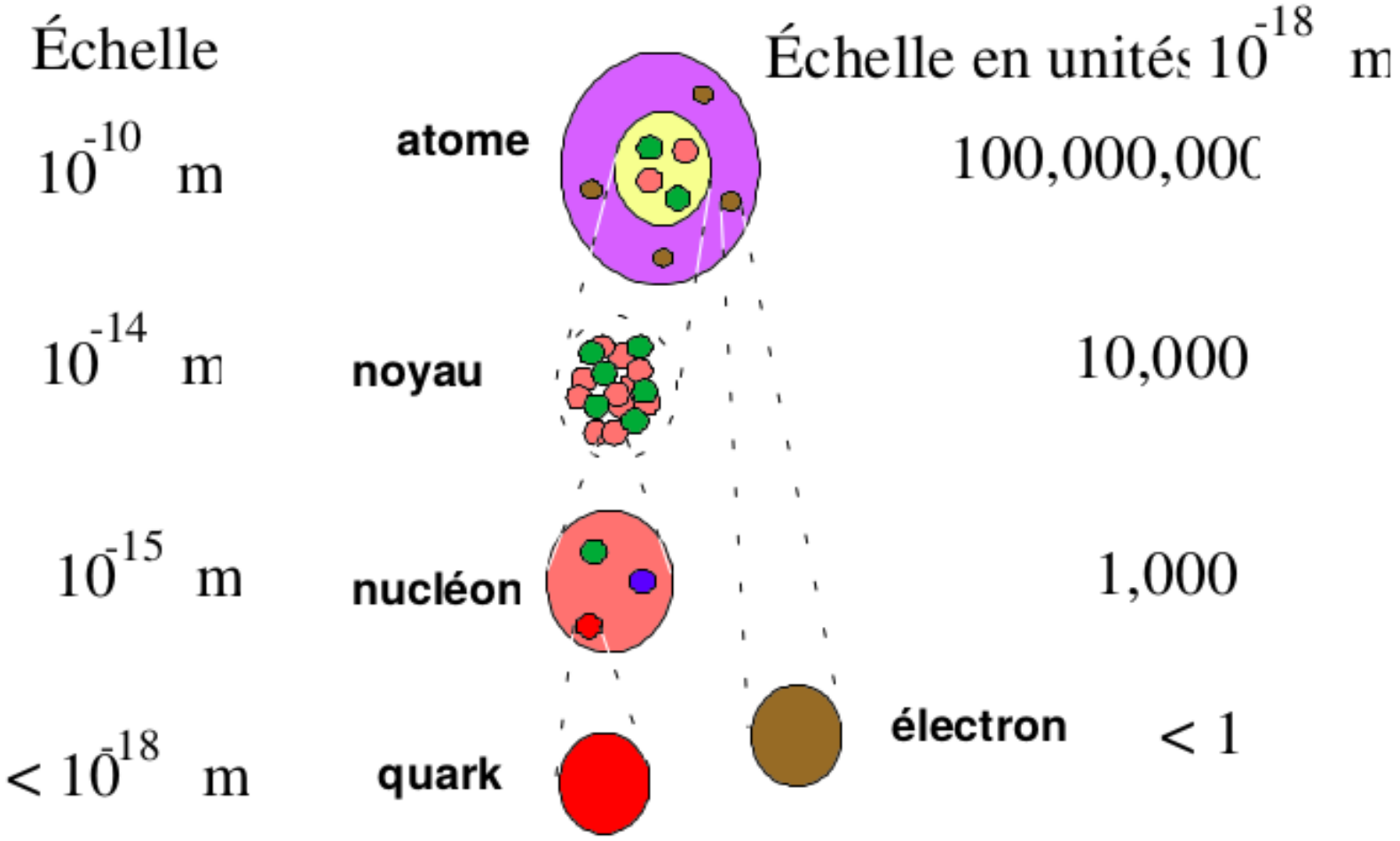


التّفاعلات الضعيفة

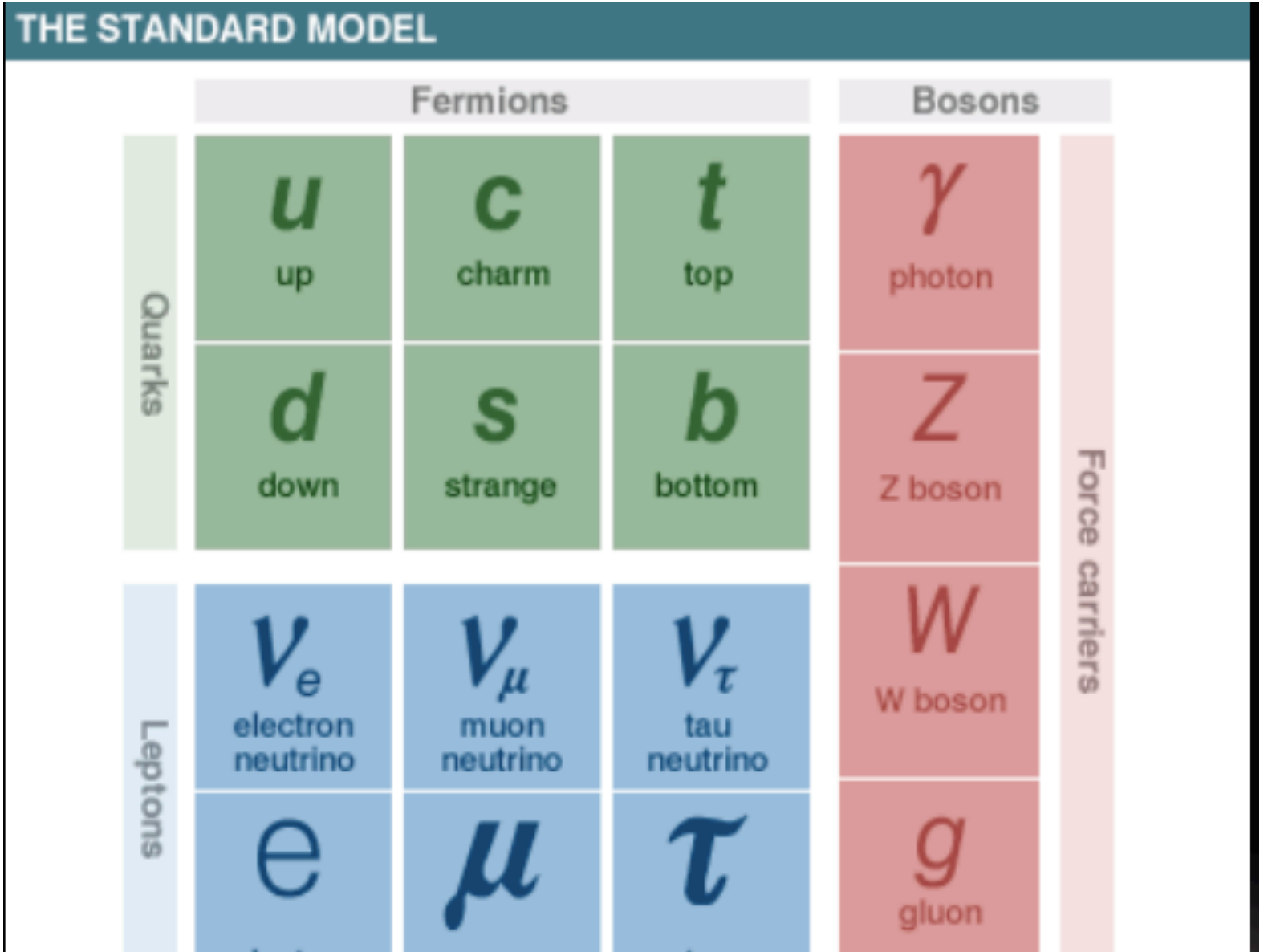
- مسؤولة عـــن الاشعاعات β : $n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$
- شدّتها أضعـف بكثير مـن التّفاعـل القوي (مداها متهي)
- البوزونات Z_0 ، W^+ و W^- هي وسائط هذا التّفاعــل



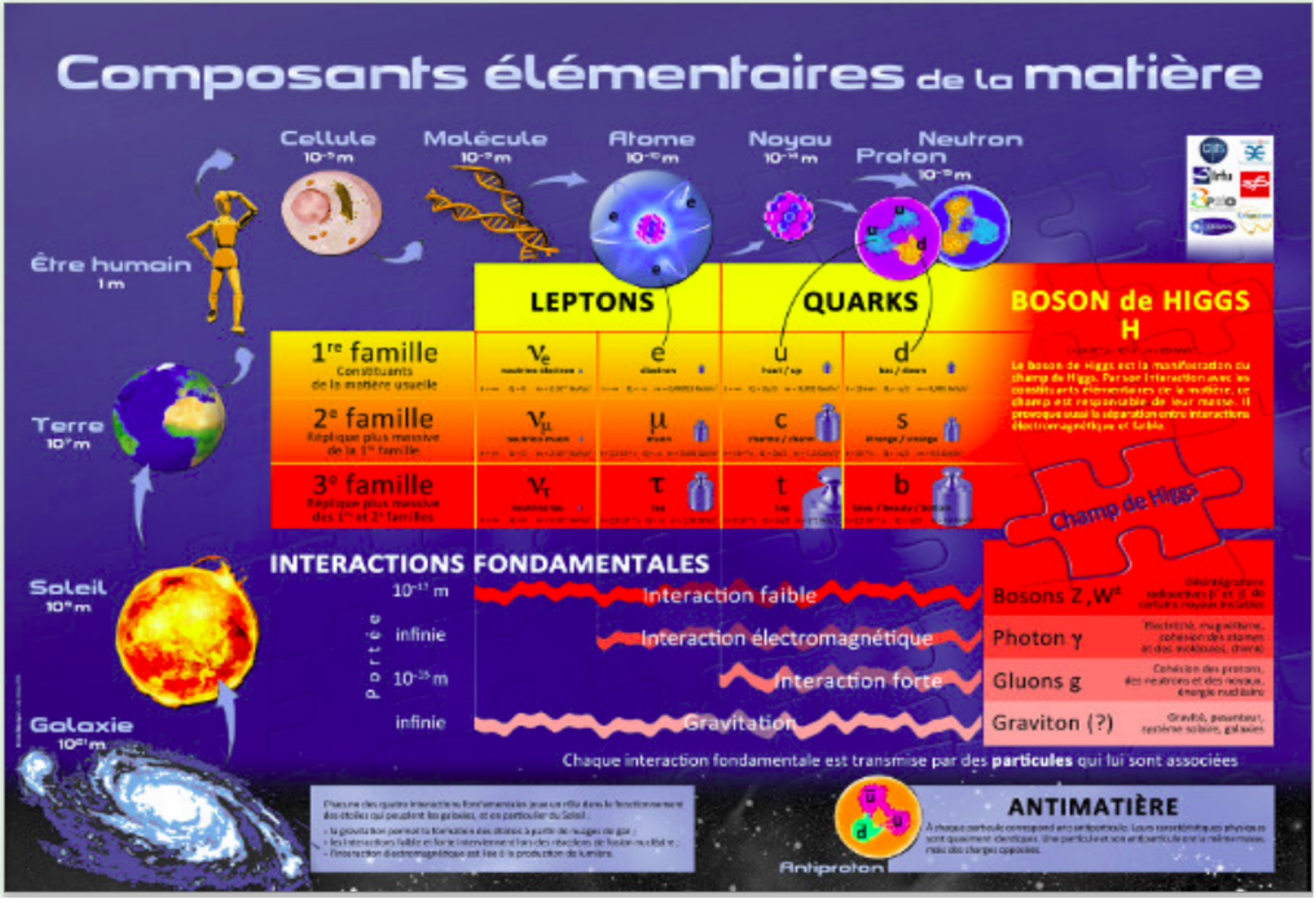
المادّة العـــاديّة



الجسيمات العنصريّة



الكون، الجسيمات الأساسيّة و التّفاعلات الأساسيّة



Mécanique Céleste

الميكانيكا السّماويّة

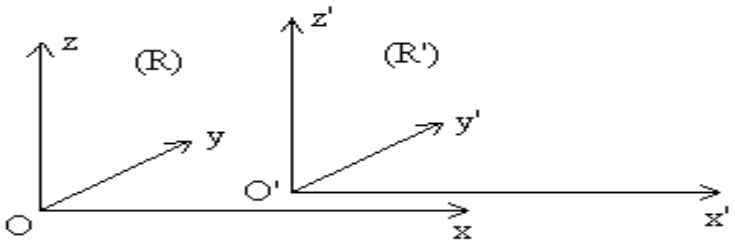
تعريف الميكانيكا السّماويّة

الميكانيكا السّماويّة هي دراسة و وصف حركة الأجسام الفلكيّة مثل النّجوم و الكواكب (الأفلاك بصفة عامّة) تحت تأثير قوي الجاذبيّة بالآستعانة بالنّظريّاة الفيزيائيّة و الرّياضيات.

مـيكانيكا غاليلي و نيوتن

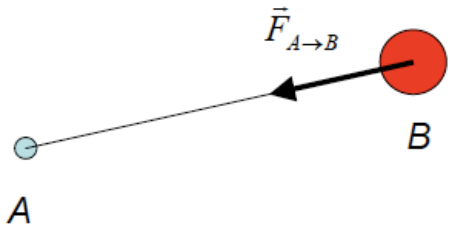
المـعلم الغاليلي

- **المعلم**: هي جملة فيزيائيّة مكوّنة مـن ساعة (إتّجاه الزّمن) و ثلاث اتّجاهات مـرتبطة و مـتزامنة
- **المعـلم الغاليلي و العطالي**: هو معـلم تكون حركة الجسم الحر (لا توجد أي قوّة خارجيّة مطبّقة عليه) مستقيمة منتظمة
- إذا كان المعـلم R' يتحرّك حركة مستقيمة منتظمة بالنّسبة لـلمعلم R ، إذن المعـلم R' غاليلي.
- **مبدأ غاليلي**: قوانين الفيزياء تحافظ علي نفس الشّكل في كل المعالم الغاليليّة



قانون الجذب العام (نيوتن 1684)

- جسمين A و B ذوي كتلتين m_A ات m_B ، على التّرتيب، يتجاذبان بقوّة متناسبة طردا مع كتلتيهما و عكسا مع مربع المسافة بينهما.
- قوّة الجاذبيّة الّتي يؤثّر بها A على B هي: $\vec{F}_{A\to B} = -G\frac{m_A m_B}{r^2}\vec{u}_{A\to B}$.



- ثابت الجذب العام: $G = 6.672\,10^{-11}\,kg^{-1}m^3s^{-2}$
- شعاع الوحدة موجّه من A نحو B: $\vec{u}_{A\to B}$
- المسافة بين A و B: $r = ||\vec{AB}||$
- كتل الأجسام: m_A **et** m_B.

قـــوانين الحركة لـنيوتن

- **القانون الأوّل:** فـــــي مـعلم غاليلي $\vec{F} = m\vec{\gamma}$
  - m : الكتلة العطاليّة لـلجسم
  - $\vec{\gamma}$: التّسارع
- **القانون الثّاني:** مـبدء الفعـل و رد الفعـل $\vec{F}_{A\to B} = -\vec{F}_{A\to B}$
  - $\vec{F}_{A\to B}$: القوّة المطبّقة من A على B
  - $\vec{F}_{B\to A}$: القوّة المطبّقة من b على A
- **القانون الثّالث:** الكتلة العطاليّة مساويّة لكتلة الجذب

مـثال: السقوط الحر

لـنعتبر جـسم ذو كـتلة $m1\,kg$ فـي حالة سقوط حـر.

- أحـسب تسارعه γ بدلالة M كتلة الأرض، الارتفاع h ، نصف قطر الارض R و G
- أحسب القيم العدّيّة لـ γ إذا كان $h = 10\ m$ ، $h = 100\ m$ و $h = 1000$

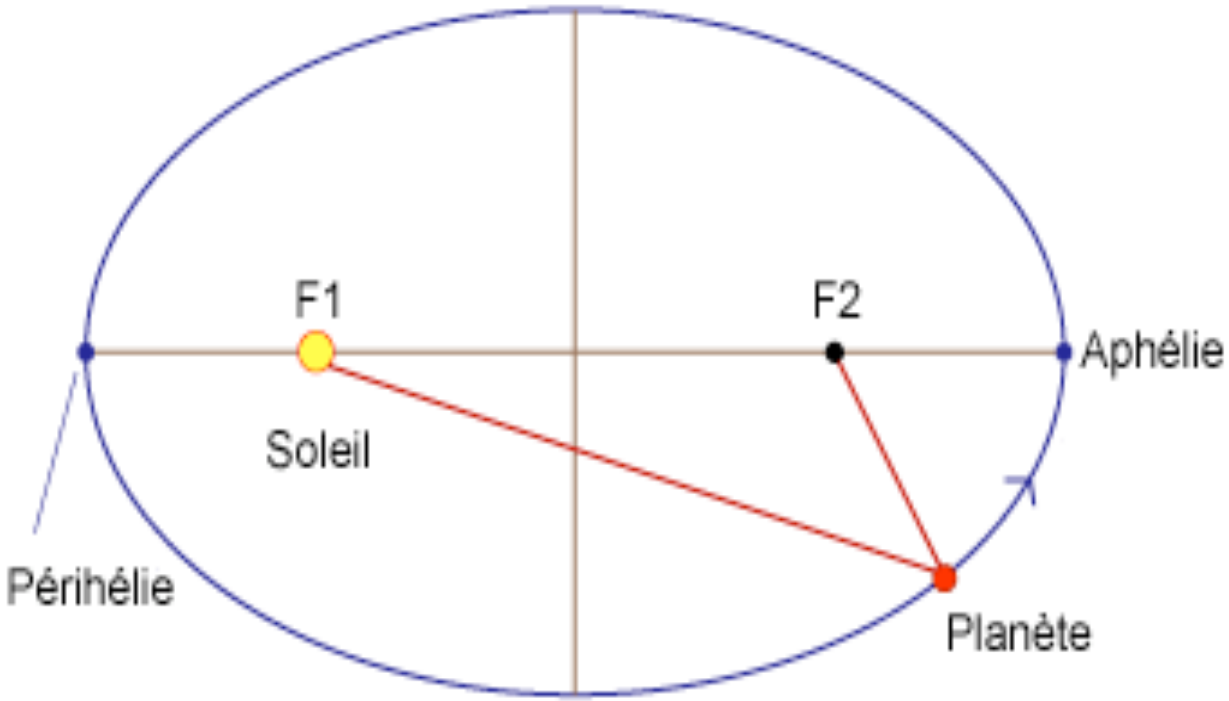
الحـل :

Lois de Kepler

قوانين كپلر

القانون الأوّل لـكپلر (1609) : الطّبيعة الاهليجيّة لمسارات الكواكب

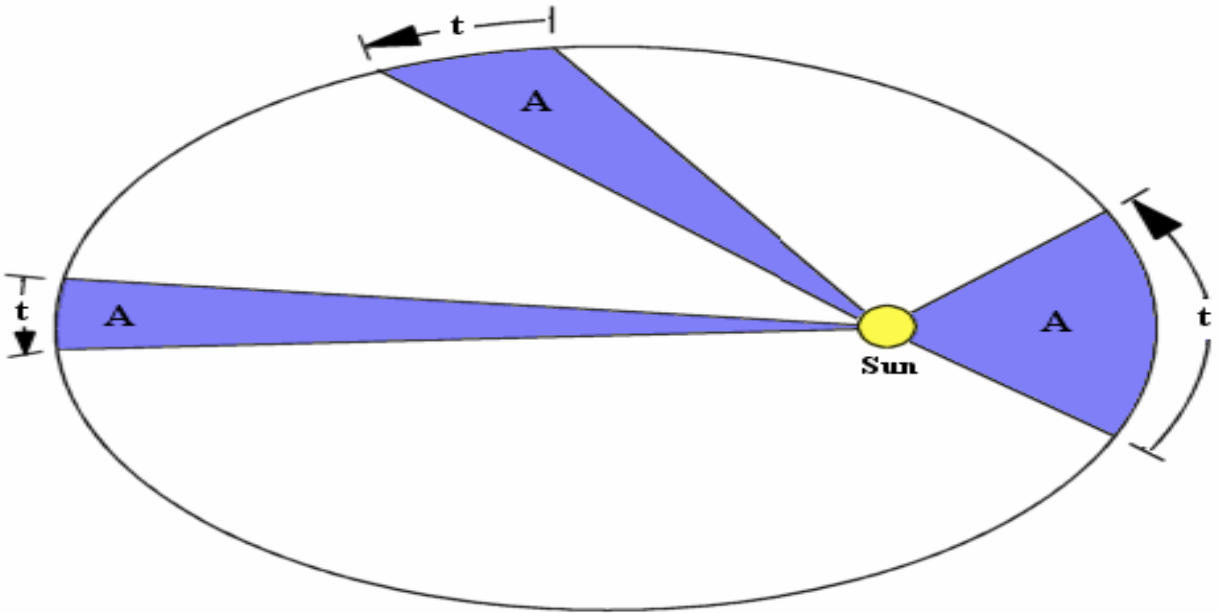
مسارات الكواكب حول الشّمس اهليجيّة



- الأوج **(Aphélie)**
- الحضيض **(Périhélie)**

القانون الثّاني لكبلر (1609) : قانون المساحات

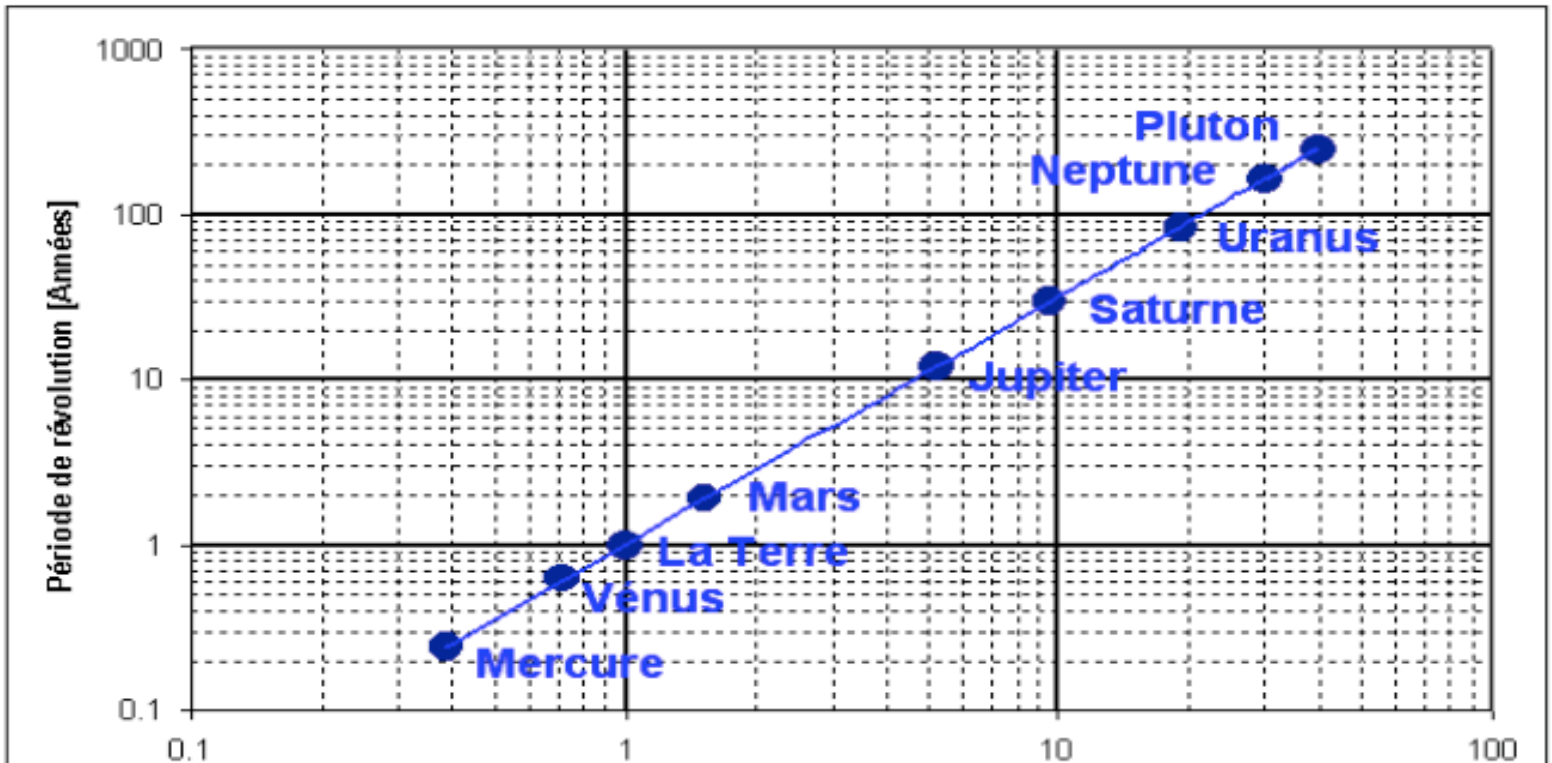
- القطعة المستقيمة الرّابطة بين الشّمس و الكوكب تمسح مساحات متساويّة في أزمنة متساويّة (المساحات الممسوحة في آزمنة متساويّة تكون متساويّة)
- سرعة الكوب تصبح أكبر عندما يقترب الكوكب من الشّمس ($v = \sqrt{\frac{GM_s}{r}}$)



القانون الثّالث لـكپلر (1618) : قانون الأدوار

النّسبة بـين مكعّب نصف القطر الأعظم و مـربّع دور الـكواكب (زمن دورة كاملة) يساوي ثابت:

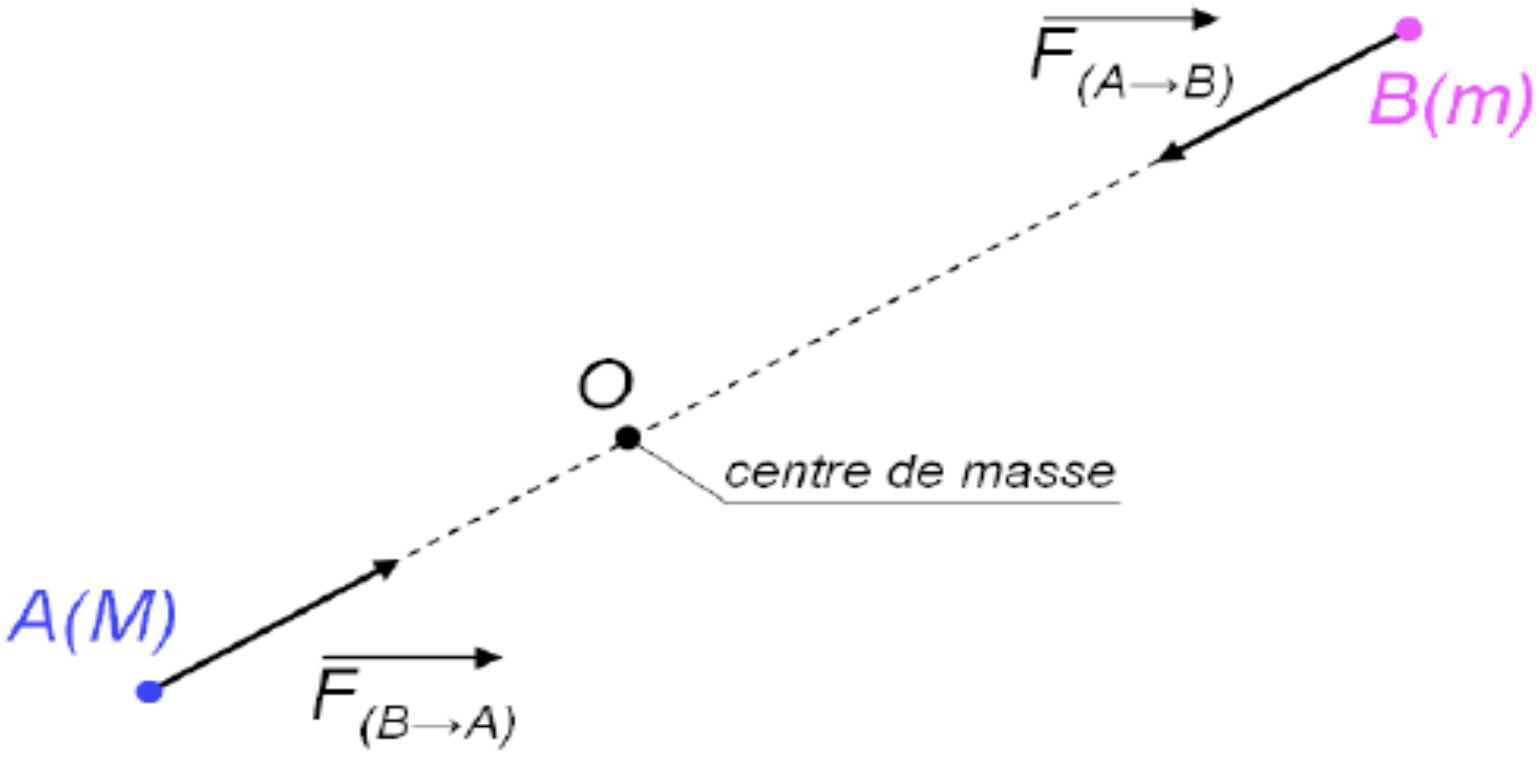
$$\frac{a^3}{T^2} = k = cste \qquad (1)$$



البرهان على قوانين كـــپلر

حالة كوكب واحد

جسم نقطي ذو كتلة m (كوكب)، تحت تأثير جاذبية جسم نقطي آخر ذو كتلة M (الشّمس). لنعتبر أنّ الكتلة M موجودة في مبدء المعلم الغاليلي R .



تـطبيق المبدء الأساسي لـلتّحريك

- مـعادلة الـحركة:

$$m\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -\frac{mMG}{r^2}\frac{\vec{r}}{r}. \tag{2}$$

- إنحفاظ العزم الحركي $||\vec{\sigma}|| = cste$ يعني أنّ الكوكب يتحرّك على المستوي العمودي على العزم الحركي

$$\vec{\sigma} = m\vec{r} \wedge \frac{\vec{dr}}{dt}, \qquad \frac{d\vec{\sigma}}{dt} = m\vec{r} \wedge \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = 0.. \tag{3}$$

إذن $\sigma = cste$ و $\vec{r}$ و $\vec{v}$ هم دوما على المستوي المعامد لـ: $\vec{\sigma}$

يـمكن أن نبرهن بسهولة أنّ طويلة $\vec{\sigma}$ تعطى بـ:

$$|\vec{\sigma}| = r^2\frac{d\theta}{dt}. \tag{4}$$

البرهان على إهليجيّة المسارات

نسقط معالدلة الحركة على المحور النّاظمي، و نستعمل الاحداثيّات القطبيّة. نبرهن أنّ:

$$r(\theta) = \frac{p}{1 + e\cos(\theta - \theta_0)}.$$

مع

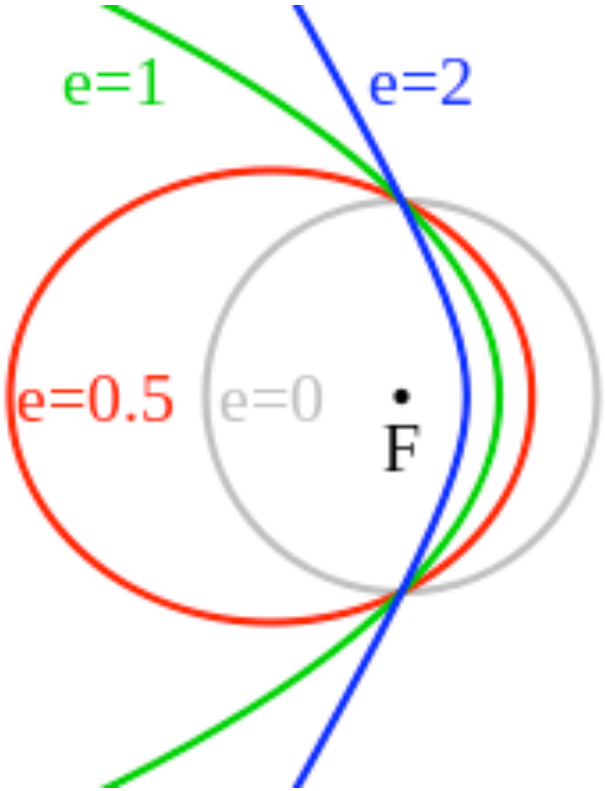
$$p = \frac{\sigma^2}{MG}$$

و

$$e = \frac{\epsilon\sigma^2}{MG}$$

حيث أنّ p يسمّى الشكل المخروطي، و e هو الانحراف المداري.

الانحراف المداري و تحديد شكل المدار



- $e = 0$: فالمسار دائرة
- $0 < e < 1$: فالمسار إهليجي
- $e = 1$: فالمسار قطع مكافيء
- $e > 1$: فالمسار قطع زائد

البرهان على القانونين الثّاني و الثّالث

(2) **قانون المساحات:**

$$\frac{1}{2}r^2 d\theta = \frac{\sigma}{2}dt,$$

l'élément de surface: $\frac{1}{2}r^2 d\theta$

$$\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} \frac{1}{2}r^2 d\theta = \frac{\sigma}{2}\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} dt = \frac{\sigma}{2}\Delta t$$

$$\int_{t_2}^{t_2+\Delta t} \frac{1}{2}r^2 d\theta = \frac{\sigma}{2}\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} dt = \frac{\sigma}{2}\Delta t$$

(3) **القانون الثّالث** ($a^3/T^2 = k$?):

$$S = \pi a^2\sqrt{1-e^2}, \qquad T = 2S/\sigma, \qquad a = \frac{p}{1-e^2}$$

donc

$$\frac{T^2}{A^3} = \frac{4\pi^2}{MG}.$$

تـمرين: تحـديد كـتلة الشّـمس

باستعمال قانون كـبلر الثّالث، حـدّد كـتلة الشّـمس فـي الحالات التّاليّة:

الكوكـب	الدّور $T(j)$	نـصف القطر $A(\times 10^6 km)$	الكتلة $M(\times 10^{30} kg)$
عـطارد	87.969	57.91	
الـزّهرة	224.70	108.2	
الأرض	365.26	149.6	
الـمريـخ	686.98	227.94	
الـمشتري	4332.71	778.33	
زحـــل	10759.50	1427.0	
يـورانوس	30688.5	2869.6	
نـيبتون	60182.3	4496.6	

الحـــــل

باستعمال قانون كـــپلر الثّالث عـلى المّلة كـوكب عـطارد و الشّـــمس:

$$M = \frac{4\pi^2 A^3}{GT^2} = \frac{4 \times (3.14)^2 \times (57.91 \times 10^6 \times 10^3)^3}{6.672 \times 10^{-11} \times (87.969 \times 24 \times 3600)^2}$$
$$= 1.98718 \times 10^{30}\ kg$$

الكوكب	الدّور $T(j)$	نـصف القطر $A(\times 10^6 km)$	الكتلة $M(\times 10^{30} kg)$
عـــطارد	87.969	57.91	1.98718
الـزّهرة	224.70	108.2	1.98844
الأرض	365.26	149.6	1.98897
الـمريـــخ	686.98	227.94	1.98889
الـمشتري	4332.71	778.33	1.99072
زحـــــل	10759.50	1427.0	1.98942
يـــورانوس	30688.5	2869.6	1.98861
نـيبتون	60182.3	4496.6	1.98954

تمرين: قوّة الجاذبيّة المطبّقة على شخس من طرف الأرض و المشتري

أثبت أنّ قوى الجاذبيّة المطبّقة على شخص كتلته $65\,kg$ موجود على سطح الأرض:

$$F_T = 636\,N$$

$$F_J = 2.2 \times 10^{-5}\,N.$$

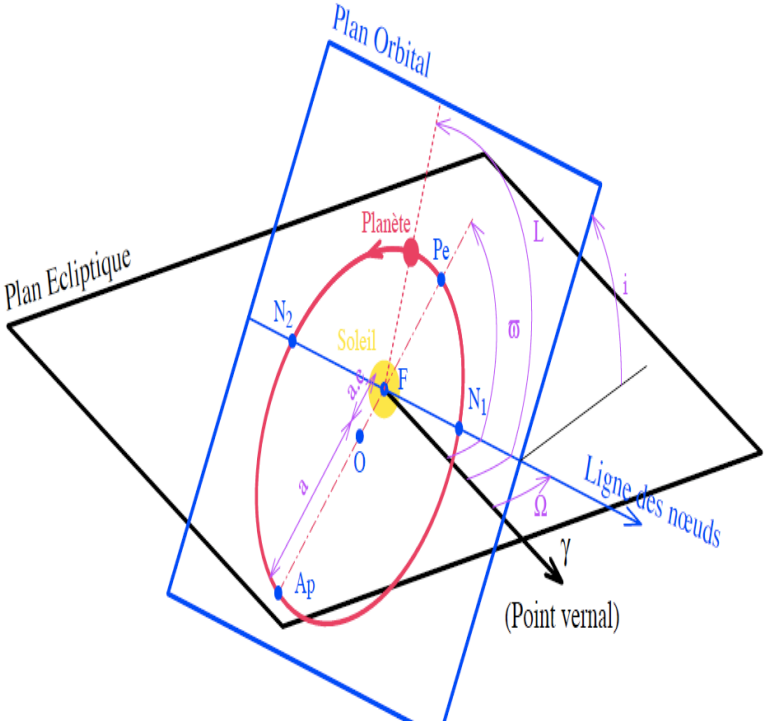
حيث أنّ F_T هي القوّة المطبّقة من طرف الأرض و F_J هي القوّة المطبّقة من طرف المشتري.

مع العلم أنّ:

- $R_T = 6378\,km$
- $M_T = 5.97 \times 10^{24}\,kg$
- $d_{T-J} = 4.2\,UA$

العناصر المداريّة السّتّة المحدّدة للّمدار الكبلري

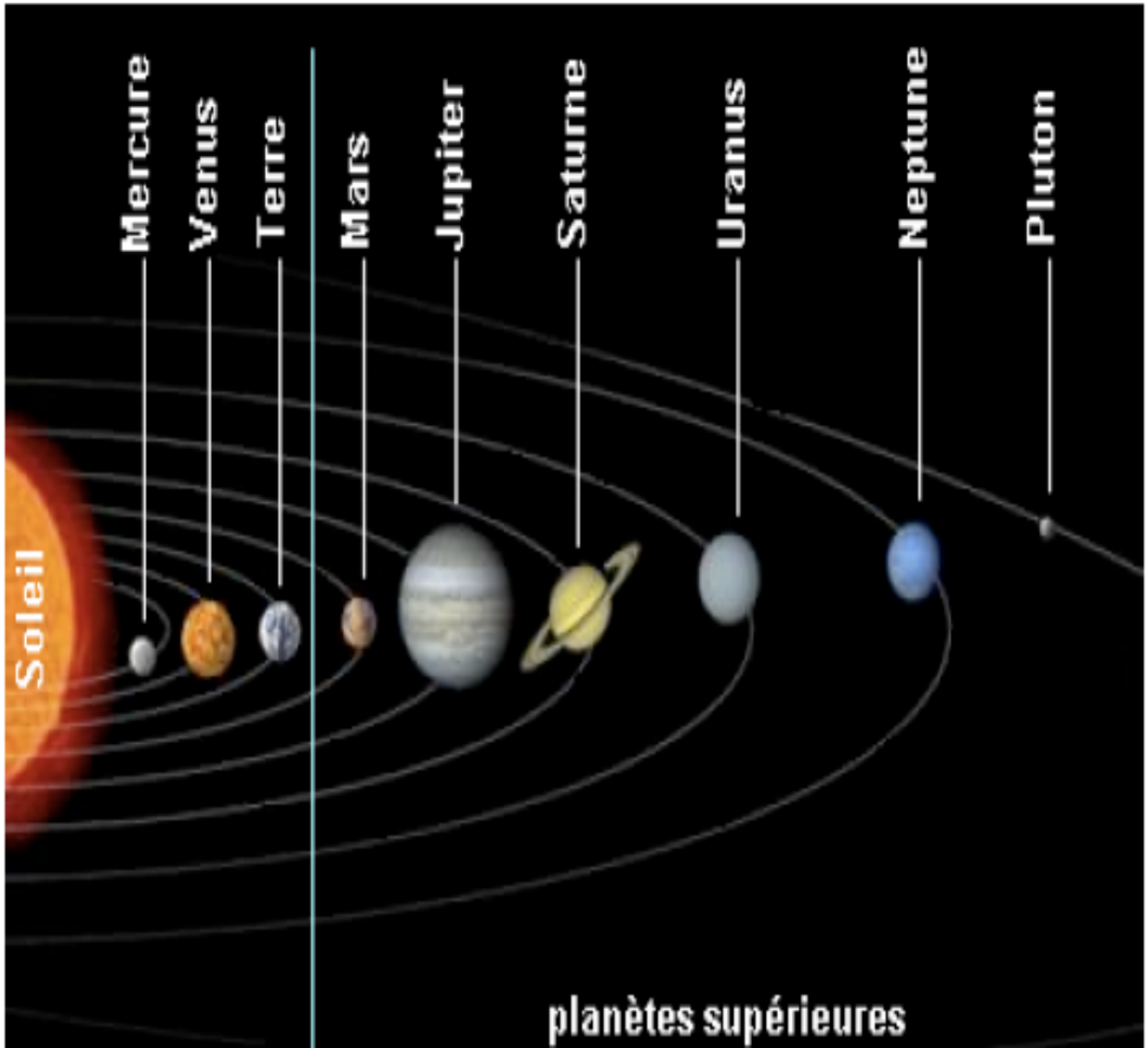
- يوجد عدد غير متهي من المدارات الكبلريّة حول مركز جذب (مثل الشّمس في حالة الكواكب، أو الأرض بانسبة للقمر أو الأقمار الصّناعيّة)
- يحدّد أي مدار كبلري بطريقة مثاليّة بستّة عناصر تسمّى العناصر المداريّة السّتّة، أنظر الشّكل أدناه



- i : ميلان المستوي المداري.
- Ω : خط طول العقدة الصّاعدة (N_1).
- ω خط الطّول المركّب للحضيض
- L : خط الطّول المركّب المتوسّط للجسم
- a : نصف القطر الأعظم.
- e : النحراف المخروطي

الـنّظام الـشّـمسي

الـنّظام الـشّـمسي



مكوّنات النّظام الشّمسي

النّظام الشّمسي هو نظام كوكبي مكوّن من الشّمس (في مركزه) و أجرام سماويّة تدور حولها. يتكوّن من:

- الشّمس في مركزه
- الكواكب السّيّارة الثّمانيّة (عطارد، الزّهرة، ....، نپتون)
- أقمار الكواكب الطبيعيّة و هي 175 (مثل القمر، ....)
- الكوكب القزمة الخمس (بلوتو، ...)
- الكويكبات و الكواكب الفتيّة
- و الملايير من الأجسام الصّغيرة (مثل المذنّبات و الغبار الكوني، ...)

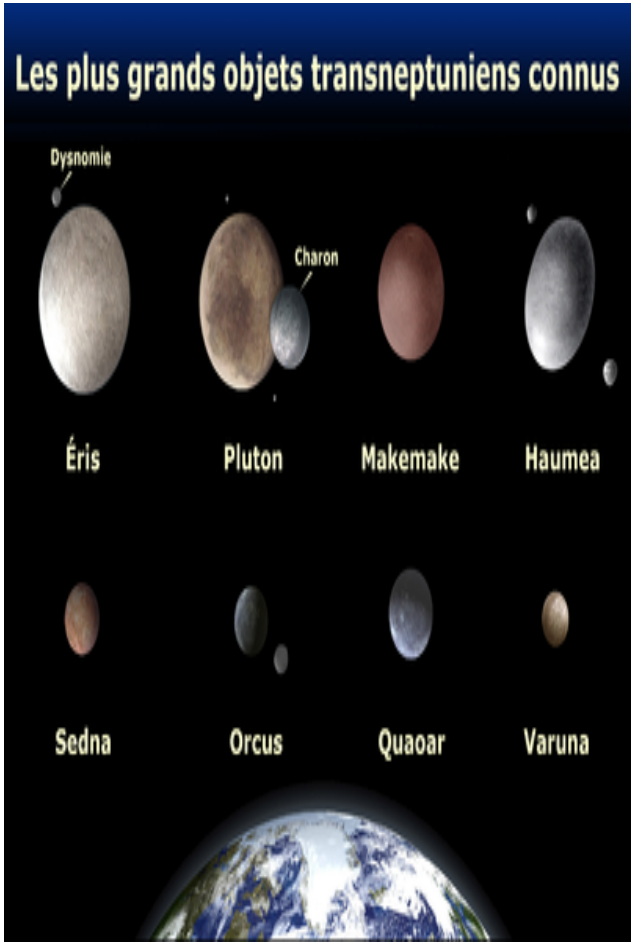


Figure: كـويكبات و كـواكب فتيّة

الكـواكب

تنقسم الكواكب إلى نوعين:

- **الكواكب الصخريّة:**
  - كـتلها و أبعادها صـغيرة نـسبيّا
  - كـثافة عـاليّة
  - قـريبة مـن الشّـمس
  - مثل الأرض و عطارد
- **الكواكب الغازيّة العملاقة:**
  - كـتلها و أبعادها كـبيرة
  - كـثافة مـنخفضة
  - بعـيدة عـن الشّـمس
  - مثل المشتري و زحل

خصائص الكواكب الصخريّة

	Mercury	Venus	Earth	Mars
Mass (kg)	0.328×10^{24}	4.87×10^{24}	5.97×10^{24}	0.639×10^{24}
Radius (m)	0.244×10^{7}	6.052×10^{7}	6.378×10^{7}	0.339×10^{7}
Density (kg/m^3)	5,400	5,200	5,500	3,900
Avg. surface temp. (K)	400	730	280	210
Albedo	0.06	0.65	0.37	0.15
Orbital radius (m)	57.9×10^{9}	108×10^{9}	150×10^{9}	228×10^{9}
Orbital period (days)	87.97	224.7	365.3	687.0
Orbital inclination (°)	7.00	3.39	0.00	1.85
Orbital eccentricity	0.206	0.007	0.017	0.093
Rotation period (days)	58.65	243.02	1.00	1.03
Tilt of rotation axis (°)	2	177	23.5	25.2

سطح الكواكب الصّخريّة

هنالك 4 عوامل يعتقد انّها تساهم في تغيير سطح الكواكب الصّخريّة:

- الفوّهات النّاتجة عن التّصادماة **(Cratères d'impact)**
- البراكين **(Volcans)**
- الحركة التّكتونيّة **(Tectoniques des plaques)**
- الحت أو النجراف بسبب الرّياح، المياه، ... **(Erosions)**

كيف نفسّر كرويّة الكواكب الصّخريّة؟ : يعود ذلك الى قوى الجاذبيّة، الّتي تدفع المادّة نحو المركز

الغلاف الجوّي للكواكب الصّخريّة

يعتقد أنّ الغلاف الجوّي للكواكب الصّخريّة أصله الغازات المنبعثة من البراكين.

- المريخ : لديه غلاف جوّي
- الأرض: لديه غلاف جوّي
- الزّهرة: : لديه غلاف جوّي
- عطارد: ليس لديه غلاف جوّي لأنّه صغير و قريب من الشّمس، فالجسيمات القريبة منه لها سرعة حراريّة عاليّة. أضف الى ذلك أنّ سرعة التّحرّر منه صغيرة $v_l = \sqrt{\frac{2GM}{d}}$.

كيف نفسّر وجود فوّهات ناتجة عن التّصادمات على القمر و ليس على الأرض؟ : لأنّ الأرض لها غلاف الجوّي، و كذلك معظم سطحها مياه.

المرّيخ ليس له براكين نشطة كثيرا لآنّه صغير (1/10 عشر كوكب الأرض) و بارد لأنّه بعيد نسبيّا عن الشّمس)

الـكواكب القزمة

هـي أجرام سماويّة تـحقّـق الشّـروط التّاليّة:

- تـدور حول الشّمس
- كـتلتها صغيرة نسبيّا لـكن كافيّة لكي تحافظ على توازنها الهيدروستاتيكي
- لديها شـكل شـبه كروي
- توجد أجسام أخرى تـتحرّك بمدارها
- و لـيست قـمرا طبيعيا لـكوكب ما

Objet	Type	Diamètre (km)	Masse (kg)
Éris	Epars	2 326± 12	~ $1{,}67\times10^{22}$
Pluton	Plutino	2 306± 20	~ $1{,}305\times10^{22}$
Makémaké	Cubewano	de 1 300 à 1 900	?

الكويكبات (astéroïdes)

المذنّبات عبارة عن أجسام صغيرة (مقارنة بالكواكب) تتكوّن من نواة جليديّة و غبار، شكلها ليس كروي مثل الكواكب. لكنّها تدور حول نجم ما مثلها

Figure: Astéroïde

الـكواكب الفتيّة و المذنّبات

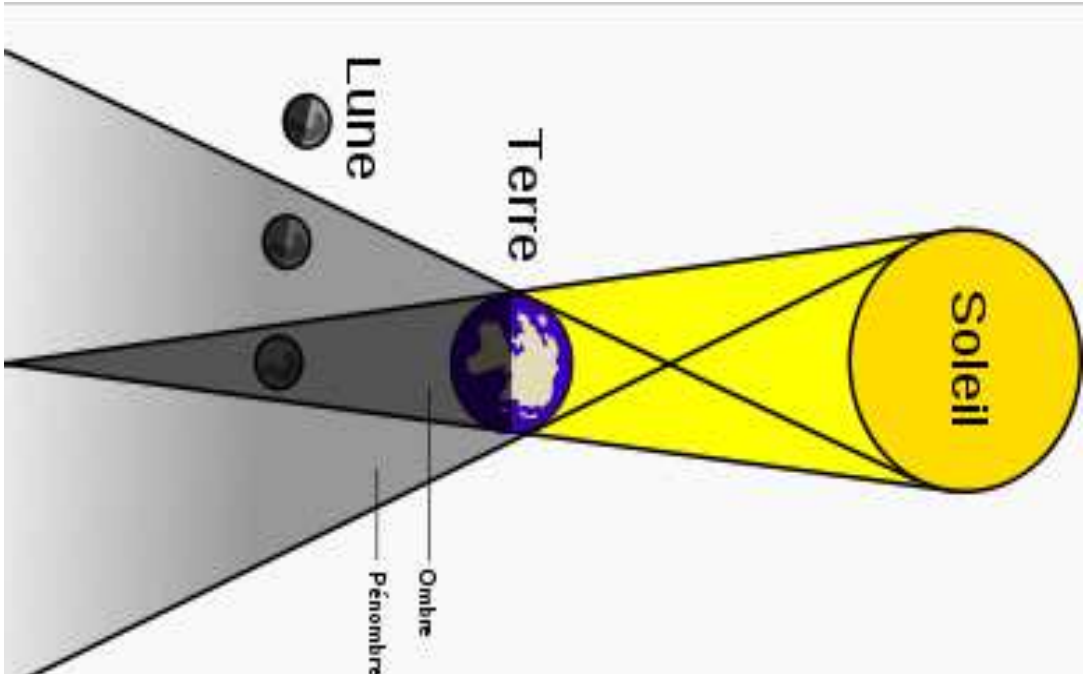
- **الـكواكب الفتيّة:** (*planetoides*) هـي أجرام تـشبه الكواكب الفتيّة و لـكن أصغر مـنها
- **الـمذنّبات:** هي أجرام صغيرة مـكوّن مـن نواة جـليديّة و يدور حــول نجم ما مـثل الشّمس.

الفرق بين الكواكب و النّجوم

الكواكب هي أجرام سماويّة تدور حول نجم معيّن. شكلها كروي (أو شبه كروي)، و هي بذاتها مظلمة تستمدّ نورها من الشّمس (مثل الأرض). أمّا النّجوم فهي مصدر الطّاقة و النّور. و بصفة عامّة حجمها و كتلتها أعظم من حجم و كتلة الكواكب (مثل الشّمس).

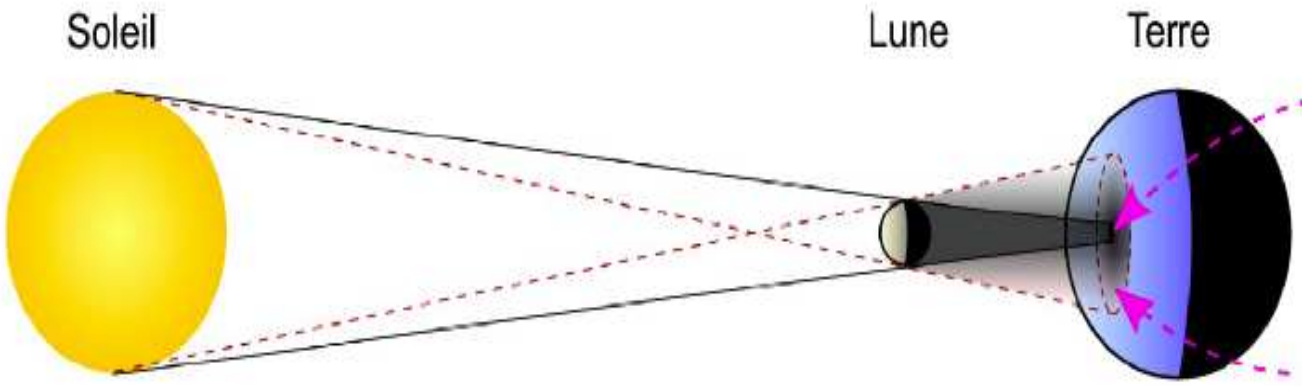
ظاهرة خسوف القـــمر

تـحدث ظاهرة خسوف القمر عندما تكون الجملة شمس–أرض–قمر بـهدا التّرتيب على إستقامة واحدة (تقريبا!)، و يكون القمر (كليّا أو جزئيّا) داخل مخروط ظل الأرض، أنظر الشّكل:



ظاهرة كسوف الشّمس

تحدث ظاهرة كسوف الشّمس عندما تكون الجملة أرض–قمر–شمس بهدا التّرتيب على إستقامة واحدة (تقريبا!)، و يكون الملاحظ من على سطح الأرض موجود في مخروط ظل القمر، أنظر الشّكل:



عبـــور كوكـــــب الزّهـــــرة

هي من الظـــــــــــواهر النّادرة، حيث يرى كوكب الزّهرة (كبقعة صغيرة مظلمة) و هو يـــــــمرّ بجوار قرص الشّمس. تستمرّ هذه الظاهرة لزمــن قصيــر.

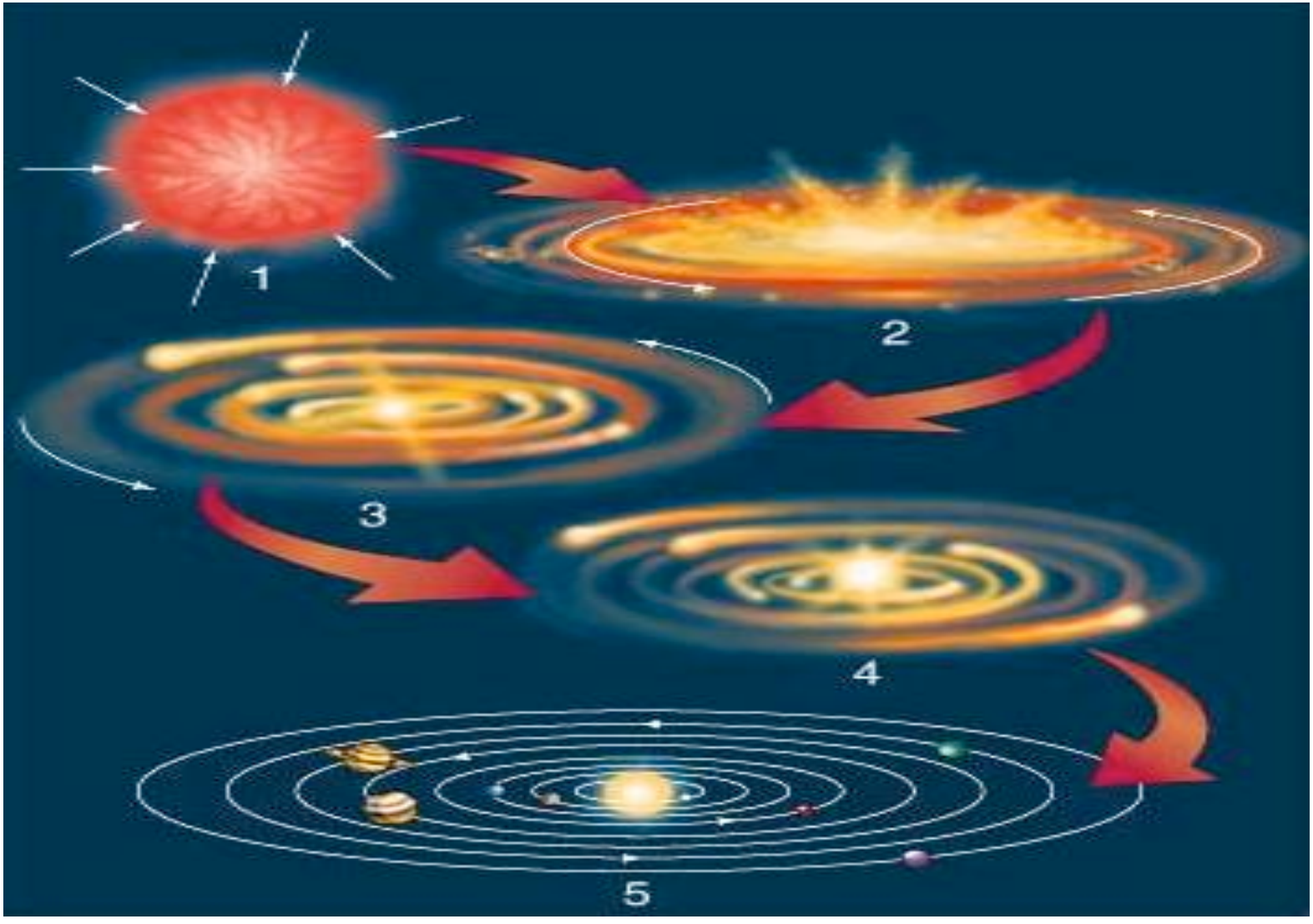
Phénomène de passage de Venus:

فرضيّة السّديم الشّمسي

تنص هذه الفرضيّة على أنّ النّظام الشمسي كان في البدء عبارة عن سديم (دخان) عظيم ، أغلب مادّته مكوّنة من الهيدروجين. أدّت قوى الجاذبيّة بين عناصره إلى إنظغاطه، و من ثمّ إرتفاع درجة حرارته و زيادة سرعته الدّورانيّة و كذلك تسطيح شكله. بمرور الزّمن (ملايين السّنين!) و تحت تأثير هذه العوامل، إنفصل مركز هذا الأخير عن أطرافه ليتكوّن لدينا الشّمس (النّجم) و الكواكب الإبتدائيّة حولها. عند وصول درجة حرارة نواة الشّمس الإبتدائية إلى بعض ملايين الدرجات المئويّة، إنطلقت تفاعلات الإنصهار النّلوّي مؤدّية إلى توازن هذه الأخيرة هيدروليكيّا، و مشكّلة مصدر طاقتها الأساسي. يمكن تلخيص مراحل تشكّلها بـــــ:

مراحـــل تشكّل النّظام الشّمســي

(1) ذوبان السّديم الأصلي و إنقسامه إلى نجم و كواكب إبتدائيّةداءيّية.
(2) بفعل الإنضغاط النّاتج عن الجاذبيّة تنطلق التّفاعلات النّوويّة في هذا النّجم (الشّمس).
(3) بفعل الضّغط النّاتج عن قوى الجاذبيّة و الضّغط النّاتج عن الإنصهار النّووي، تـتوازن الشّمس هيدروليكيّا.
(4) بمرور الزّمن، تـتحوّل الكواكب الإبتدائيّية إلى كواكب سيّارة... الـخ.


1
2
3
4
5

الشّـــــــــــمس

Soleil (الشّمس)

- الشّمس هي كرة هائلة من الغاز مكوّنة أساسا من غازي الهيدروجين و الهيدروجين
- هي نجم من 200 مليار نجم من نجوم درب التّبانة
- الشّمس تبعد بحوالي $8000\,pc$ عن مركز المجرّة و هي موجودة في أحد أذرعها الحلزونيّة
- **حرارتها:** الحراريّة الفعليّة على سطح الشّمس تقدّر بـ $5500\,C$ (النّجوم الحارّة تصل حرارتها $50000\,C$ و الباردة $300\,C$)
- **عمرها:** نصف حياتها يقدّر بـ 10 مليار سنة
- **كتلتها:** تقدّر كتلتها بـ $1.989\,10^{30}\,kg$ (333000 كتلة الأرض).
- **حقلها المغناطيسي:** قوي جدا و معقّد
- **الرّيح الشّمسيّة** هو تدفّق للجسيمات من منطقة الهالة

خـــصائصها الفيزيائيّة

بـعض الخـــصائص الفيزيائيّة لـلشّـمس:

Masse	$1.989\ 10^{30}\ kg$ (soit environ 333 000 fois la Terre)
Diamètre	$1\,391\,960\ km$ (soit environ 109 fois la Terre)
Distance moyenne à la Terre	$149.6\ 10^{6}\ km$ (soit environ 8.3 minutes-lumière)
Diamètre apparent	$32'$ (c'est-à-dire une pièce de 1 centime d'Euro à 1.70 m)
Densité moyenne	$1.409\ g/cm^3$ (à peine plus que l'eau sur Terre)
Densité au centre	$151.3\ g/cm^3$ (beaucoup plus dense que du plomb)
Température de surface	5507^oC
Température du cœur	$15.57\ 10^{6}\ ^oC$
Age	environ 4.49 ± 0.05 milliards d'années
Luminosité	$3.854\ 10^{26}\ Watt$ (à comparer aux 100 $Watt$ d'une lampe)
Puissance moyenne reçue sur Terre	$1370\ Watt/m^2$
Rotation à l'équateur	$26.9\ jours$
Rotation aux pôles	$35\ jours$

مصدر طاقتها

مصدر طاقتها : هو الهيدروجين عن طريق الانصهار النّوّي پروتون–پرتون الّذي يحوّل الهيدروجين الى هيليوم، و ذلك يتمّ على مستوى النّواة.

- التّفاعلات النّوويّة تحوّل الهيدروجين إلى هيليوم بداخل الشّمس (*Eddington* 1925)
- هذا النّموذج النّووي أكمل من طرف العالم *Bthe* سنة 1938
- إذن التّفاعلات النّوويّة هي من تحوّل الهيدروجين إلى هيليوم و هي مصدر الطّاقة الهائلة الّتي تستقبلها الأرض من الشّمس
- هذا النّوع من التّفاعل يشبه ما يحدث في القنبلة النّوّيّة (*bombe H*).
- الطاقة المحرّرة تكون على شكل إشعاعات كهرومغناطيسيّة (فوتونات) و نوترينوات ν
- في الثّانيّة الواحدة حولي 600 مليار طن من الهيدروجين يحوّل إلى هيليوم في قلب الشّمس

التّفاعلات النّوويّة مصدر طاقة الشّمس

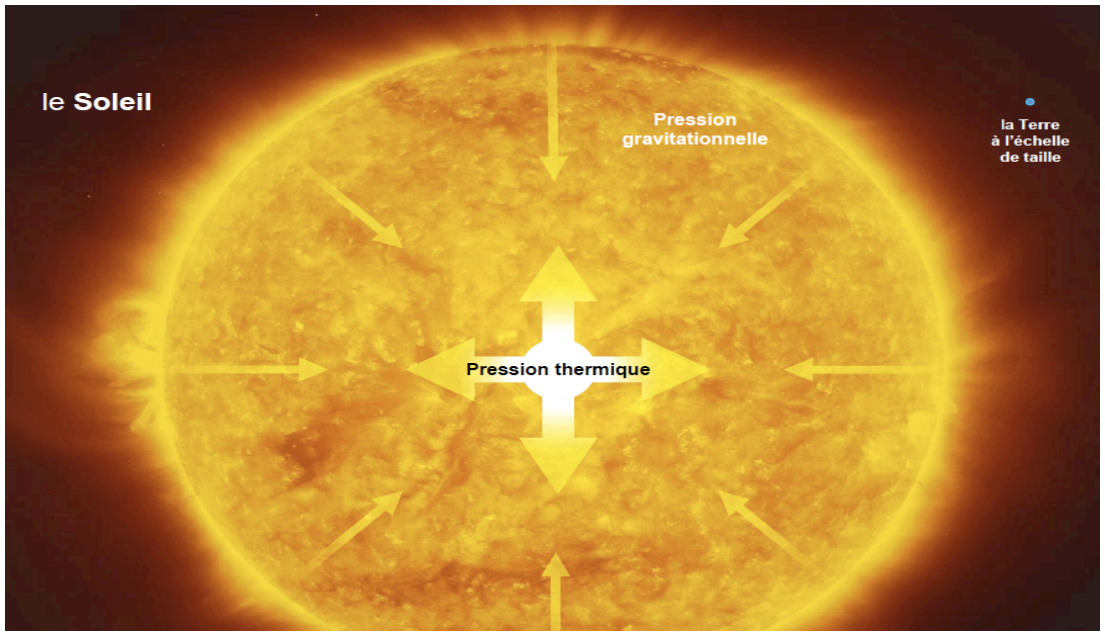
- التّفاعلات النّوويّة مصدر طاقة الشّمس:

$$\underline{\textbf{Etape1}}: \quad {}^1H + {}^1H \longrightarrow {}^2H + e^+\nu_e \quad \Longrightarrow (99.6\%)$$
$$ {}^1H + e^- + {}^1H \longrightarrow {}^2H + \nu_e \quad \Longrightarrow (0.4\%)$$
$$\underline{\textbf{Etape2}}: \quad {}^2H + {}^1H \longrightarrow {}^3He + \gamma(\textbf{photon})$$
$$\underline{\textbf{Etape3}}: \quad {}^3He + {}^3He \longrightarrow {}^4He + {}^1H + {}^1H \quad \Longrightarrow (85\%)$$
$$ {}^3He + {}^4He \longrightarrow {}^7Be + \textbf{photon}\,\gamma \quad \Longrightarrow (15\%)$$
$$\underline{\textbf{Etape4}}: \quad {}^7Be + e^- \longrightarrow {}^7Li + \nu_e(\textbf{neutrino})$$
$$\underline{\textbf{Etape5}}: \quad {}^7Li + {}^1H \longrightarrow {}^4He + {}^4He$$

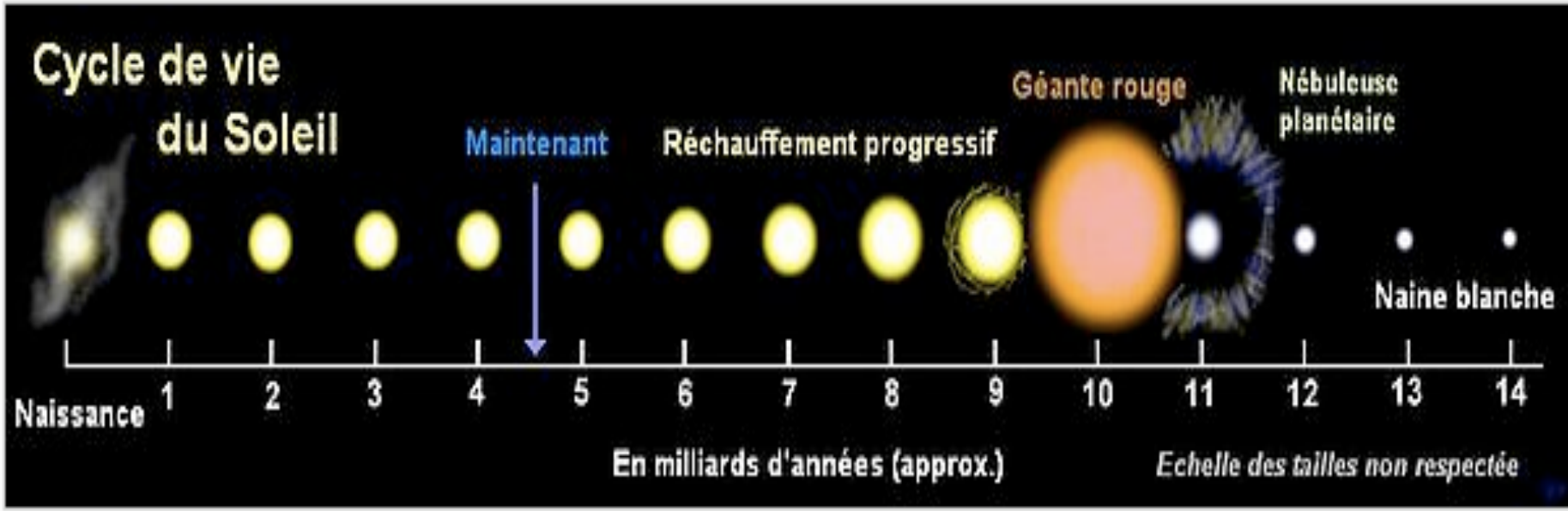
- من 600 مليون طن، حوالي 4 مليون طن يحوّل إلى طاقة نقيّة (أي ما يعادل $3.810^{26}\ W$)
- هذه الطّاقة تنتشر عبر الفضاء على شكل أموج كهرومغناطيسيّة (كل الطّيف)

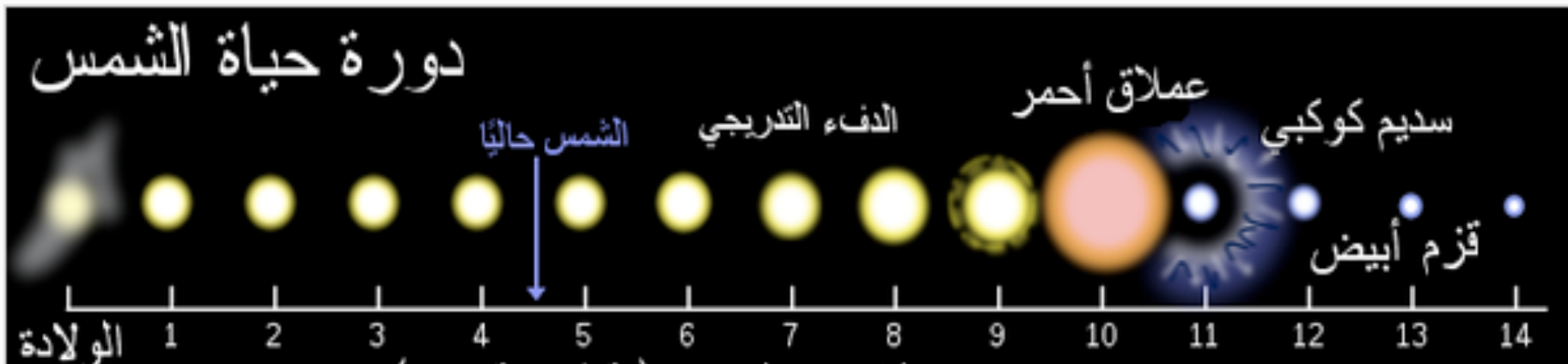
القوى المسؤولة عن التّوازن الهيدروليكي للشّمس

القوى المسؤولة عن التّوازن الهيدروليكي للشّمس: الضّغط النّاتج عن قوي الجاذبيّة (و هو موجّه من الخارج نحو طبقة النّواة) و الضّغط النّاتج عن الانصهار النّووي داخل طبقة النّواة (و هو موجّه من طبقة النّواة نحو الخارج).



تكوين و مصير الشّمس





- يعتقد أنّ! عمر الشّمس يقدّر بـ 4.65 مليار سنة
- يعتقد أنّ! الشّمس تكوّنت من سديم عظيم (هيدروجين أساسا) و غبار يسمّى السّديم الاصلي. هذه مراحل تشكّلها:

(1) **ذوبان السّديم الاصلي:** بسبب قوى الجاذبيّة، مكوّنات السّديم الاصلي (حبيبات الغبار) تتجاذب و تسقط على بعضها الواحدة تلو الاخرى لتشكّل النّجم الحديث

(2) **تسخين النّجم الحديث:** النّجم الحديث يواصل الانظغاط مما يرفع درجة حرارته حتّي تصل حرارتها إلى 15 مليون درجة لتنطلق بسبب ذلك التّفاعلات النّوّية

(3) **سن النّضج:** بعد مرور بعض الملايين من السّنين، النّجم الفتي (*proto – etoile*) يصل إلى سن النّضج. هذه المرحلة هي المرحلة الحاليّة، تتميّز بنشاطها الثّابت منذ 4.5 مليون سنة.

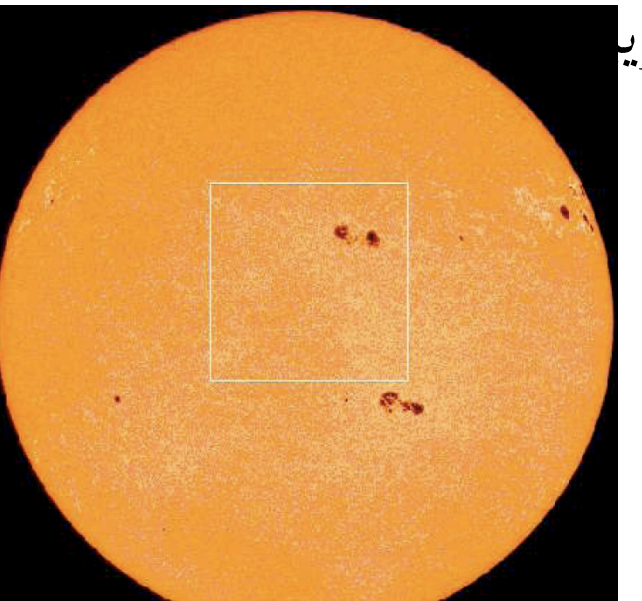
(4) **العملاقة الحمراء:** حسب هذه الفرضيّة، بعد 5 ملايير من السّنين، نواة الشّمس ستنظغط و طبقاتها الخارجيّة ستمتدّ حتّى تغطّي الكواكب الصّخريّة (حتي المرّيخ). تتحوّل الشّمس إلى عملاقة حمراء، نسبيا باردة و بنواة ذات كثافة عاليّة و درجة حرارة مرتفعة جدا.

(5) **القزمة السّوداء:** الطّبقات الخارجيّة ستكوّن سديما جديدا. نواة الشّمس تصبح قزمة بيضاء و تتوقّف عن الانظغاط و بعد ذلك تتحوّل إلى قزمة سوداء (و هي جسم صغير مظلم، كثيف جدا و بارد).

(6) **و في الأخير يتكوّن نجم آخر و كواكب أخرى**

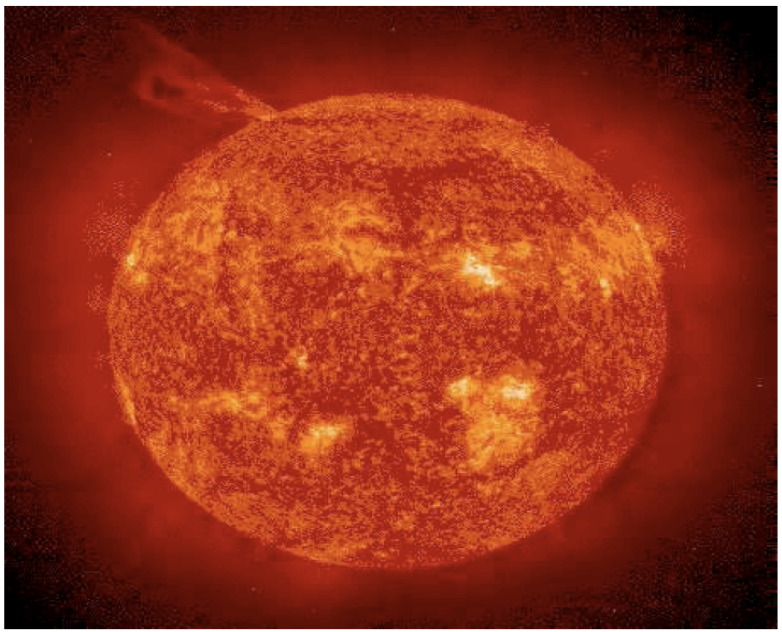
الدّوران التّفاضلي لـلشّـمس

- الشّـمس لـيست بالجسـم الصّلب، نـسمّي دورانها حول محورها بالدّوران التّفاضلي لأنّ منطقتها الاستوائيّة دورانها أسرع مـن المناطق القطبيّة
- أكـتشـف دورانها لأوّل مـرّة مـن طرف غاليلي بـرصده لـلبقع الشّـمسيّة
- الـبقـع الشّـمسيّة باردة نـوعا ما (حـولي 1000 C)، و قـطرها يقارب قـطر الأرض
- عـدد البقع الشّـمسيّة مـتغيّر، و تـتغيّر كـل 11 سـنة تـقريـ



النّشاط الشّمسي

- النّتوآت و الاقواص الشّمسيّة: رش للمادّة الشّمسيّة المؤيّنة موجّهة من طرف الحقل المغناطيسي (يمكن رؤيتها أثنء الكسوف)



- الثّورات و الانبعاثات الشّمسيّة: هي ظوهر كهرومغناطيسيّة التّي يمكن أن تكون ذات طاقة عاليّة مما يمكن أن يذبذب الاتّصالات على الأرض و يحطّم الاقمار الصّناعيّة

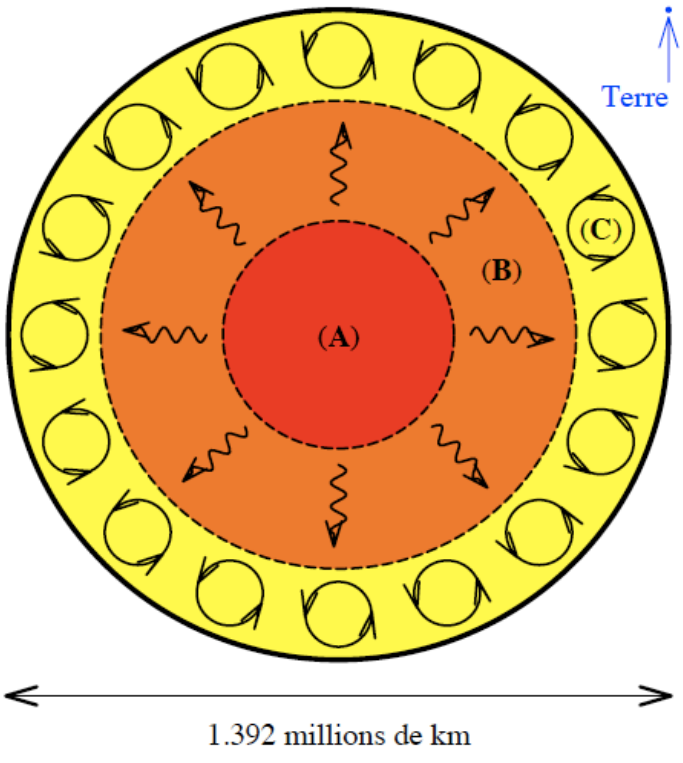
المكوّنات الكيميائيّة للشّمس

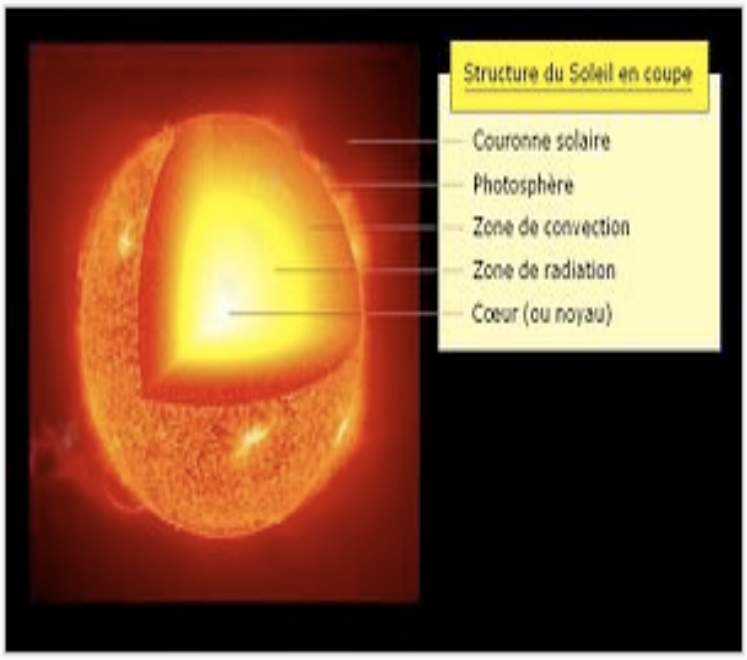
Elément	Abondance	Elément	Abondance
Hydrogène	73.46 %	Azote	0.09 %
Hélium	24.85 %	Silicium	0.07 %
Oxygène	0.77 %	Magnésium	0.05 %
Carbone	0.29 %	Soufre	0.04 %
Fer	0.16 %	Autres (Na, Ar, P, Al, Cl, ...)	0.10 %
Néon	0.12 %		

خصائص الشّـمس

- الـكتلة الحجميّة: تقدّر كـتلتها الحجميّة المتوسّطة بـ $1.4\,g/cm^3$ (ضعيـفة) و هي تـتغيّر بـشدّة في عـمقها
- الحـرارة: غيـر متجانس و يـتغيّر مـن $5507\,C$ إلى $15.57\,10^{6\,0}C$
- دورانها: : غيـر متجانسة و يتـغيّر مـع العـمق
- طبقات الشّـمس: تـتكون مـن 5 طبقات

طبقات الشّـمس

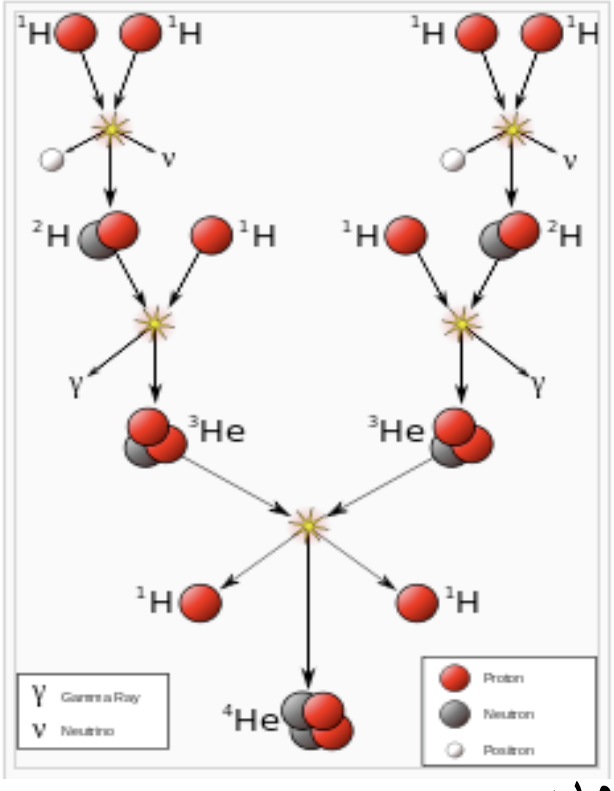




Structure du Soleil en coupe.

(1) مـنطقة النّواة

- هـي المكان الّذي تـتم فـيه التّفاعلات النّوويّة مـصدر طاقة الشّـمس؛ إذن هي مـكوّنة أساسا مـن الهيدروجين و الهيليوم
- هـي طـبقة عاتمة
- درجة حـرارتها تـقدّر بـ $10^6\,^0C$
- كـثافتها الحجميّة تـقدّر بـ $150g/c^3$
- قـطرها يـقدّر بـحوالي $25000\,km$ أي نسبة 0.35% مـن قطر الشّـمس
- التّفاعـل النّوّي الغالب هو الدّورة پروتون – پروتون



(2) المنطقة الاشعاعيّة

- نصف قطرها يقدّر بـ $500000\,km$
- الفوتونات القادمة من المنطقة الاولي تتصادم مع ذرّات هذه المنطقة (تصادم كل $1\,cm$)
- الفوتونات تستغرق 2 مليون سنة لقطع هذه المرحلة
- هي طبقة عاتمة

(3) منطقة التّحميل

- تتكوّن من كتلة هائلة من المادّة، مسخّنة من طرف منطقة التّحميل
- نصف قطرها يقدّر بـ $200000\,km$.
- المادّة و الاشعاعات تستغرق بضعة أشهر لتقطع هذه المنطقة
- درجة حرارتها لتّغيّر حسب قربها من منطقة التّحميل $15\,10^6 K$ $5700K$.
- هي طبقة عاتمة

(4) الغلاف الضّوءيي

- هـي الجزء الـمرئي مـن الشّـمس
- هـي طبقة شفّافة و يـمكن ملاحظتها مـباشرة
- سـمكها يـقدّر بـ $200km$ فـقط.
- تـسخّن مـن طرف المنطقة الاشعاعيّة
- تـقدّر حـرارتها بـ $5700k$.

(5) الغلاف الجوّي للشّمس (5)

(a) الغلاف اللّوني

- هي طبقة من الغاز، أقل كثافة حيث يتغيّر سمكها من 1000 إلى 2000 km
- تتغيّر درجة حرارتها من 4300 k 1000 k
- كثافتها الحجميّة ضعيفة جدا

(b) هالة الشّمس