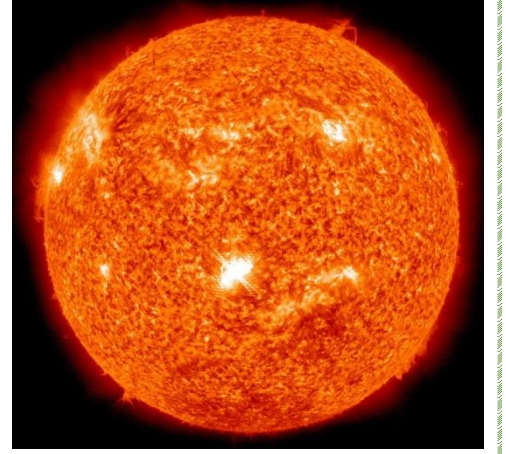


الفصل الثاني

الشمس والقمر

Sun and Moon



2-1: The Sun

٢-١: الشمس

تعدُّ الشمس أقرب نجم إلينا، وهي إحدى النجوم النموذجية المتوسطة في الحجم والعمر بين ما يقدر بـ (100 ← 400) مليار نجم في مجرتنا المسماة مجرة درب التبانة Milky Way Galaxy، وتدور الشمس حول مركز المجرة بمدة تُقدَّر بما يقارب 220 مليون سنة بسرعة 220 km/s تقريباً، وكتلتها أكبر من كتلة الأرض بأكثر من 300,000 مرة، وحجمها أكبر من حجم الأرض بما يقارب 1.3 مليون مرة، وتنتج طاقة في الثانية الواحدة أكبر مما يمكن أن تنتجها جميع محطات الطاقة الكهربائية على الأرض في نصف مليون سنة، وقد تشكلت الشمس حسب الدراسات منذ 4.6 مليار سنة تقريباً نتيجة انهيار جزء من سحابة جزيئية عملاقة تتكون في معظمها من الهيدروجين والهيليوم. وربما ولدت هذه السحابة أيضاً العديد من النجوم الأخرى.

ودراسة الشمس مهمة لعلم الفلك لأن العديد من الظواهر التي لا يمكن دراستها بشكل مباشر في النجوم الأخرى يمكن ملاحظتها مباشرة في الشمس (مثل الدوران النجمي والبقع النجمية وتركيب السطح النجمي). وتمثل شمسنا مع أجرام ومواد أخرى المنظومة الشمسية التي تتكون من: (١) الشمس، (٢) الكواكب planets، عطارد والزهرة والأرض والمريخ والمشتري وزحل وأورانوس ونبتون، (٣) الكواكب القزمة dwarf planets، (٤) الأقمار أو التوابع satellites، (٥) الكويكبات minor plants، (٦) الشهب meteors، (٧) المذنبات comets، (٨) الغازات والأتربة الكونية التي تتخلل فضاء ما بين أجرام المنظومة الشمسية.

وتشكل كتلة الشمس 99.86% من كتلة المنظومة الشمسية. وفي الجدول ٢-١ بعض الخصائص

الأساسية للشمس.

الجدول ٢-١: بعض الخصائص الأساسية للشمس

الصفة	قيمتها
معدل البعد	$1AU = 149,597,870 \text{ km}$
أقصى بعد عن الأرض (الأوج) maximum distance from Earth (aphelion)	$1.521 \times 10^8 \text{ km}$
أدنى بعد عن الأرض (الحضيض) minimum distance from Earth (perihelion)	$1.471 \times 10^8 \text{ km}$
الكتلة	$M_{\odot} = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$ (~ 333,400 كتلة أرضية)
معدل القطر الزاوي	0.533°
قطر الغلاف الضوئي	$D = 1.391 \times 10^6 \text{ km}$ (109.3 قطر أرضي)
معدل الكثافة	$\bar{\rho} = 1.41 \text{ g/cm}^3$
الكثافة المركزية	$\rho_c = 160 \text{ g/cm}^3$
تسجيل الجاذبية في الغلاف الضوئي (الجاذبية السطحية) gravitational acceleration at photosphere (surface gravity)	$g = 273 \text{ m/s}^2$ (27.9 × الجاذبية الأرضية)
سرعة الإفلات من سطح الشمس escape speed from the surface of Sun	$v_{esc} = 618 \text{ km/s}$
الثابت الشمسي	$S_{\odot} = 1370 \text{ W/m}^2$
اللمعان	$L_{\odot} = 3.85 \times 10^{26} \text{ W}$
الطبقة الطيفية	G2V
درجة الحرارة الفعالة	$T_e = 5800 \text{ K}$
درجة الحرارة المركزية	$T_c = 1.5 \times 10^7 \text{ K}$
فترة الدوران عند خط الاستواء rotation period at equator	24 يوماً و 16 ساعة
الزاوية بين دائرة الاستواء الشمسي ودائرة البروج angle between solar equator and ecliptic	$i = 7.2^{\circ}$
التركيب الكيميائي	~73% هيدروجين و ~25% هيليوم و ~2% بقية العناصر

2-2: Basic Properties of Sun

٢-٢: الخصائص الأساسية للشمس

2-2-1: Diameter of the Sun

٢-٢-١: قطر الشمس

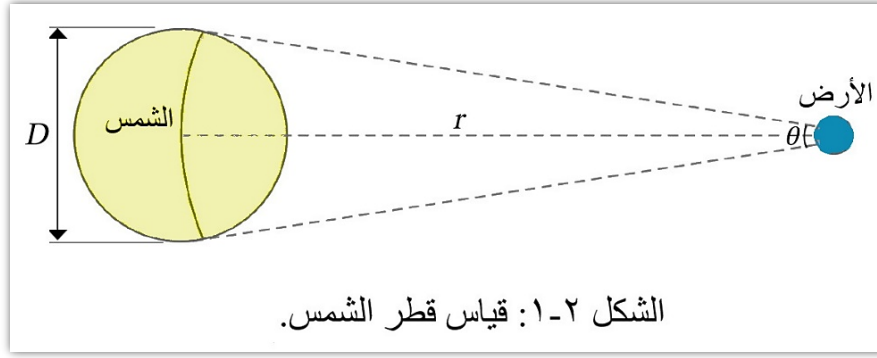
يمكن حساب قطر الشمس بعد معرفة القطر الزاوي لها θ ، والذي يبلغ 0.533° باستعمال العلاقة:

$$\frac{D}{\theta} = \frac{2\pi r}{360^{\circ}} \quad \dots \dots 2.1$$

حيث r : معدل بعد الأرض عن الشمس، و D : قطر الشمس.

$$D = \frac{0.533 \times 2\pi \times 149.6 \times 10^6}{360} = 1391670 \text{ km}$$





2-2-2: Solar Mass

٢-٢-٢: كتلة الشمس

يُمكن حساب كتلة الشمس من الصيغة الدقيقة لقانون كبلر الثالث

$$m_s + m_p = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} \quad \dots \dots 2.2$$

حيث أن m_s : كتلة الشمس، و m_p : كتلة الكوكب، والكوكب هنا هو الأرض. و r : معدل بعد الأرض عن الشمس $= (1.496 \times 10^{11} \text{ m})$ ، و T : زمن دوران الأرض حول الشمس $= (3.156 \times 10^7 \text{ s})$ ، و G : ثابت الجذب العام $= (6.674 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)$.

وعند التعويض في المعادلة 2.2 بعد إهمال كتلة الأرض لصغرها مقارنة بكتلة الشمس ينتج أن كتلة الشمس $= (1.99 \times 10^{30} \text{ kg})$ تقريباً.

2-2-3: Surface Temperature

٢-٢-٣: درجة الحرارة السطحية

يمكن حساب درجة حرارة النجوم (كالشمس) من خلال مقارنتها مع الجسم الأسود، وهو الجسم الذي يمتص كل الإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط عليه ولا يعكس منه شيئاً، وقد يعيد إشعاعه بالكامل. والجسم الأسود هو نوع من المشع المثالي، ولا يوجد في الطبيعة من الناحية العملية، لكن الشمس والنجوم المماثلة يمكن اعتبارها مشابهة للجسم الأسود.

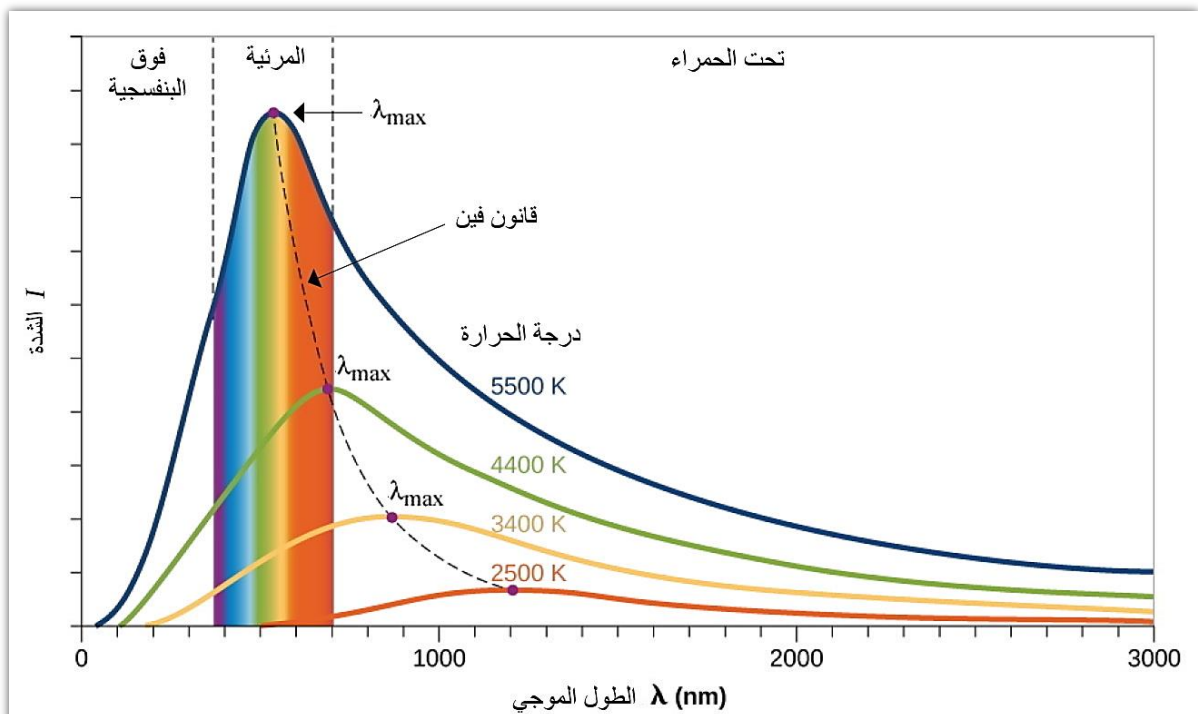
توصف درجة حرارة سطح النجم بدرجة الحرارة الفعالة T_e effective temperature، وهي درجة حرارة الجسم الأسود الذي يبعث نفس المعدل من الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي يبعثه النجم خلال وحدة الزمن. ويبين الشكل ٢-٢ النتائج التجريبية للعلاقة بين شدة إشعاع الجسم الأسود والطول الموجي في درجات حرارة مختلفة.

وتوجد عدة طرق لحساب درجة الحرارة السطحية للشمس بواسطة بعض قوانين الديناميك الحراري thermodynamics، منها:

١- قانون ستيفان- بولتزمان Stefan-Boltzmann law: ينص هذا القانون على أن الطاقة التي يشعها الجسم في وحدة الزمن لوحدة المساحة السطحية تتناسب مع المساحة تحت المنحنى في الشكل ٢-٢. وقد وجد ستيفان تجريبياً أن هذه المساحة تتناسب طردياً مع القوة الرابعة لدرجة الحرارة المطلقة للجسم الأسود المشع، أي إن القدرة الكلية للإشعاع المنبعث تزداد بزيادة درجة الحرارة. وتمت صياغة ما يُعرف بقانون ستيفان أو ستيفان- بولتزمان كما يلي:

$$R = \sigma T_e^4 \quad \dots \dots 2.3$$

حيث R : القدرة التي يشعها جسم أسود لوحدة المساحة عند الدرجة المطلقة T ، و T_e درجة الحرارة الفعالة، و σ : ثابت ستيفان- بولتزمان $(5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4)$.



الشكل ٢-٢: علاقة شدة اشعاع الجسم الأسود مع الطول الموجي لأربع درجات حرارية.

ويمكن حساب القدرة الكلية المنبعثة من الشمس خلال وحدة الزمن بواسطة قياس الثابت الشمسي^١ solar constant والذي يساوي $1370 W/m^2$ تقريباً. وعند حساب هذا الثابت ومعرفة بعد الشمس تُستنتج القدرة الكلية التي تشعها الشمس $(3.85 \times 10^{26} W)$.^٢ وبما أن المساحة السطحية للشمس تعادل $(6.1 \times 10^{18} m^2)$ تقريباً وبافتراض أن الشمس تشبه الجسم الأسود فإنه:

- (١) الثابت الشمسي هو كمية الطاقة الشمسية الواقعة عمودياً على وحدة المساحة الأفقية خلال وحدة الزمن خارج الغلاف الجوي الأرضي على مسافة من الشمس تساوي معدل بعد الأرض عنها.
- (٢) كيف حصلنا على هذا الرقم؟

$$R = \frac{3.85 \times 10^{26} W}{6.1 \times 10^{18} m^2} = 6.31 \times 10^7 W/m^2$$

$$T = \left(\frac{R}{\sigma}\right)^{1/4} = \left[\frac{6.31 \times 10^7 W/m^2}{(5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4)}\right]^{1/4} = 5776 K$$

ودرجة الحرارة بهذه الطريقة تمثل المعدل على السطح الكلي.

٢- قانون بلانك Planck's Law: يفسر هذا القانون النتائج التجريبية في الشكل ٢-٢ لشدة إشعاع الجسم الأسود وتوزيع الأطوال الموجية للإشعاع الكهرومغناطيسي من سطوح الأجسام ذات درجات الحرارة المختلفة. وبعد مقارنة الأشعة المنبعثة من الشمس وبعض النجوم بمنحنيات بلانك في درجات حرارية معينة يمكن حساب درجة حرارة الشمس. وقد لوحظ أن الدرجة المناسبة للطاقة المنبعثة من الشمس هي $6000 K$.

٣- قانون فين Wien's Law: وجد فين أنه عند تغيير درجة حرارة أي جسم أسود فإن المنحنى يحتفظ بشكله العام، وأن الطول الموجي للإشعاع الأكثر شدة يحدث في أطوال موجية أقصر. وهذا يعني أن شدة الإشعاع I تكون بأعلى قيمة عند طول موجي معين λ_{max} لدرجة حرارة محدّدة للإشعاع كما في الشكل ٢-٢، وتزاح λ_{max} نحو قيم أدنى بزيادة درجة حرارة الإشعاع. وعليه لو استمرت زيادة درجة حرارة سطح انبعاثي (كالنجم) فإن ذروة الانبعاث تتحرك في الطيف المرئي من اللون الأحمر إلى البرتقالي فالأصفر فالأخضر فالأزرق فالبنفسجي ثم إلى الطيف فوق البنفسجي. لذا فإن لون النجم يعتمد على درجة حرارته. أي إن λ_{max} تتناسب عكسياً مع درجة الحرارة. وهذا السلوك يوصف بالعلاقة التالية التي تدعى بقانون إزاحة فين:

$$\lambda_{max} T = \text{const.} = 2.898 \times 10^{-3} m \cdot K \quad \dots \dots 2.4$$

$$\text{or } \lambda_{max_1} T_1 = \lambda_{max_2} T_2 = \lambda_{max_3} T_3 = \text{constant} = 2.898 \times 10^{-3} m \cdot K$$

حيث T : درجة الحرارة المطلقة لسطح الجسم الباعث للإشعاع.

مثال ٢-١: كتقريب جيد، يمكن اعتبار سطح الشمس كجسم أسود بدرجة حرارة سطحية $5800 K$.

(أ) ما هو الطول الموجي الذي تبعث عنده الشمس أعلى شدة؟

(ب) ما هي القدرة المشعة الكلية لوحدة المساحة السطحية؟

(ج) هل تبقى القدرة في الفرع "ب" نفسها عند وصول الأشعة الشمسية للأرض وكيف؟



الحل: (أ)

$$\lambda_{max} = \frac{2.898 \times 10^{-3} \text{ m.K}}{T} = \frac{2.898 \times 10^{-3} \text{ m.K}}{5800 \text{ K}} = 5 \times 10^{-7} \text{ m} = 500 \text{ nm}$$

$$R = \sigma T^4 = (5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(5800 \text{ K})^4 = 6.42 \times 10^7 \text{ W/m}^2 \quad (\text{ب})$$

(ج) هذه القدرة الهائلة ($R = 6.42 \times 10^7 \text{ W/m}^2 = 64.2 \text{ MW/m}^2$) التي حصلنا عليها في الفرع "ب" هي الشدة عند سطح الشمس، التي هي كرة نصف قطرها ($6.96 \times 10^8 \text{ m}$). وعندما تصل هذه الطاقة الاشعاعية إلى الأرض التي تبعد ($1.5 \times 10^{11} \text{ m}$) تقريباً فإن الشدة تقل بمقدار المعامل $\left[\left(\frac{6.96 \times 10^8 \text{ m}}{1.5 \times 10^{11} \text{ m}} \right)^2 = 2.15 \times 10^{-5} \right]$ لتصبح 1.4 kW/m^2 تقريباً.

مثال ٢-٢: إذا كان الإشعاع المنبعث من نجم قزم أحمر ذي طول موجي أقصى مقداره 1200 nm فاحسب درجة حرارة هذا النجم بافتراض أنه جسم أسود. ثم قارن النتائج مع نتائج المثال السابق للشمس.

$$T = \frac{2.898 \times 10^{-3} \text{ m.K}}{\lambda_{max}} = \frac{2.898 \times 10^{-3} \text{ m.K}}{1200 \times 10^{-9} \text{ m}} = 2415 \text{ K} \quad \text{الحل :}$$

٢-٢-٤: الدوران الشمسي

استنتج من رصد البقع الشمسية sunspots منذ فترة طويلة أن سرعة دوران قرص الشمس المرئي تختلف باختلاف خطوط العرض الشمسية، حيث يدور عند خط الاستواء الشمسي ($\phi = 0^\circ$) بمعدل أسرع مما عند خطوط العرض الأعلى، فتقل السرعة كلما زاد خط العرض. ويُعرف هذا بالدوران التفاضلي (أو الاختلافي) differential rotation. وهو يدل على أن الشمس ليست صلبة، لأنها سوف تتمزق بالدوران التفاضلي إذا كانت صلبة، وإنما معظم الشمس هو بلازما غازية. ويبلغ الزمن الدوراني ما يقارب 25 يوماً عند خط الاستواء، و 28 يوماً عند خط العرض 40° ، و 36 يوماً عند خط العرض 80° . وربما يكون سبب هذه الظاهرة هو تأثيرات تيارات الحمل السطحية على الدوران الشمسي.

بما أن الأرض تدور حول الشمس في نفس الاتجاه الذي تدور فيه الشمس، فإن فترة دوران الشمس المرصودة من الأرض تبلغ 27 يوماً تقريباً وليست 25 يوماً، وفترة الدوران الأقصر هي فترة

(١) لماذا تقل بهذا المقدار؟

(٢) في أي منطقة من الطيف الكهرومغناطيسي يقع هذا الطول الموجي؟



الدوران الحقيقية للنجم، وتعرف تقنياً بفترة الدوران الفلكي أو النجمي sidereal rotation period من نجم ثابت إلى نجم ثابت. ويمكن استنتاج سرعة دوران الغلاف الضوئي photosphere للقرص الشمسي من تأثير دوبلر Doppler effect لخط الامتصاص الناشئ هناك. وتبلغ سرعة الدوران عند خط الاستواء الشمسي 2 km/s أو ما يقارب 7200 km/h ^١.

2-3: Components of the Sun

٢-٣: مكونات الشمس

2-3-1: Chemical Elements

٢-٣-١: العناصر الكيميائية

يمكن استخدام أطياف الامتصاص للنجم لتحديد العناصر الموجودة فيه. وقد تبين أن الشمس تحتوي على نفس العناصر الموجودة في الأرض ولكن ليس بنفس النسب. فما يقارب 73% من كتلة الشمس عبارة عن هيدروجين، والذي يمثل عدد ذراته 92% من عدد الذرات الموجودة في الشمس، و 25% أخرى عبارة عن هيليوم (7.8% من عدد ذرات الشمس). وبقية العناصر الكيميائية (كالأوكسجين والنيتروجين والكربون والمغنيسيوم والحديد وغيرها) تشكل كتلتها 2% فقط من كتلة الشمس (0.2% من عدد ذرات الشمس) ^٢. ويختلف تكوين الطبقة الخارجية للشمس عن قشرة الأرض (التي تكون العناصر الثلاثة الأكثر وفرة فيها هي الأوكسجين والسيليكون والألمنيوم). وعلى الرغم من أن تركيب الشمس ليس مثل الأرض، إلا أنه نموذجي للنجوم بشكل عام.

إن معظم العناصر الموجودة في الشمس تكون على شكل ذرات، مع عدد قليل من الجزيئات، وكلها على شكل غازات، فالشمس شديدة الحرارة بحيث لا يمكن لأي مادة أن تبقى سائلة أو صلبة. بل إن الكثير من الذرات الموجودة فيها تتأين بسبب الحرارة العالية، أي يتم تجريدها من واحد أو أكثر من إلكتروناتها، وهذا يؤدي إلى توفر كمية كبيرة من الإلكترونات

(١) احسب الزمن الدوراني عند خط الاستواء الشمسي.

(٢) إن حقيقة أن الشمس وبقية النجوم لها تراكيب مماثلة وتتكون معظمها من الهيدروجين والهيليوم تم عرضها لأول مرة في أطروحة في عام 1925 من قبل سيسيليا باين غابوشكين Cecilia Payne-Gaposchkin، وهي أول امرأة تحصل على درجة الدكتوراه في علم الفلك في الولايات المتحدة. ومع ذلك، فإن فكرة أن الغازات الأخف - الهيدروجين والهيليوم - تمثل أكثر العناصر وفرة في النجوم كانت غير متوقعة للغاية ومثيرة للصدمة لدرجة أن سيسيليا افترضت أن تحليلها للبيانات يجب أن يكون خاطئاً. وفي ذلك الوقت، كتبت: "الوفرة الهائلة لهذه العناصر في الجو النجمي من المؤكد تقريباً أنها ليست حقيقية". وهذا يعني أن العلماء يجدون أحياناً صعوبة في قبول الأفكار الجديدة التي لا تتفق مع ما يعتقدون أنه هو الحق. ورغم إنجاز سيسيليا الكبير فإنها - لكونها امرأة - لم تحصل على تعيين رسمي في جامعة هارفارد التي كانت تعمل فيها إلا في عام 1938 ولم يتم تعيينها كأستاذة حتى عام 1956.



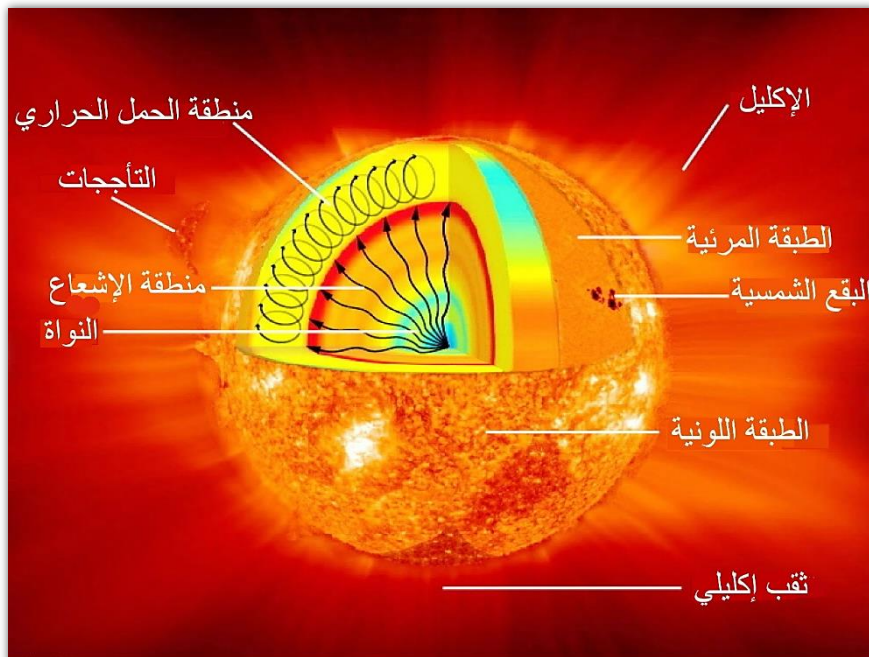
الحررة والأيونات الموجبة الشحنة في الشمس، مما يجعلها بيئة مشحونة كهربائياً. ويطلق العلماء على مثل هذا الغاز المتأين الساخن اسم البلازما plasma، والتي تعتبر الحالة الرابعة للمادة.

٢-٣-٢: الطبقات الداخلية للشمس

يوضح الشكل ٢-٣ كيف تبدو الشمس إذا تمكنا من رؤية جميع أجزاءها من المركز إلى غلافها الخارجي. وتختلف طبقات الشمس عن بعضها البعض، ولكل منها دور في إنتاج الطاقة التي تبعثها الشمس في نهاية المطاف. وسنبدأ بالنواة أو القلب core. وهي ذات كثافة عالية جداً، ومن داخلها تنطلق الطاقة النووية الاندماجية. ويبلغ حجم النواة 20% تقريباً من حجم الطبقات الداخلية الشمسية، ويُعتقد أن درجة حرارتها تبلغ 15 مليون درجة تقريباً، مما يجعلها الجزء الأكثر سخونة في الشمس.

توجد فوق النواة منطقة تُعرف باسم منطقة الإشعاع radiative zone، أي إشعاع الطاقة. وتمتد إلى 70% تقريباً من الطريق إلى السطح. ويتم نقل الضوء الناتج في النواة عبر المنطقة الإشعاعية ببطء شديد، لأن الكثافة العالية للمادة في هذه المنطقة تعني أن الفوتون لا يمكن أن ينتقل بعيداً جداً دون الاصطدام بجسيم، مما يسبب تغييراً في اتجاهه وفقداناً لبعض لطافته.

تُعد منطقة الحمل الحراري convective zone الطبقة العليا للطبقات الداخلية الشمسية. وهي طبقة سميكة على عمق 200,000 km تقريباً، وتنقل الطاقة من حافة المنطقة الإشعاعية إلى السطح من خلال



الشكل ٢-٣: الأجزاء المختلفة للشمس.

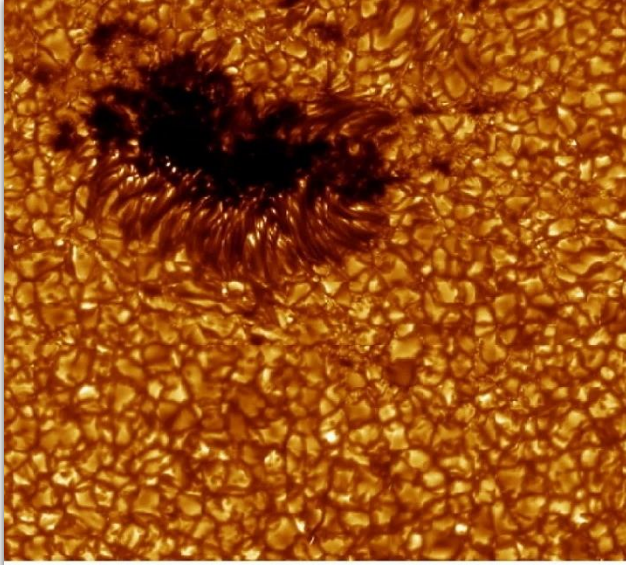
خلايا الحمل الحراري العملاقة. وتكون البلازما الموجودة في أسفل منطقة الحمل الحراري ساخنة جداً، وتطفح إلى السطح، حيث تنتقل حرارتها إلى الفضاء. وبمجرد أن تبرد البلازما تعود إلى أسفل منطقة الحمل الحراري.

٢-٣-٣: الغلاف الجوي الشمسي

2-3-3: Solar Atmosphere

إن الأجزاء الوحيدة للشمس التي يمكن رصدها بصورة مباشرة هي الطبقات الخارجية التي تعرف بالجو الشمسي، والذي يتألف من ثلاث طبقات أساسية هي:

١- **الطبقة الضوئية photosphere**: تمثل هذه الطبقة السطح البراق لكرة الشمس الغازية المتوهجة، وتدعى أيضاً بالكرة الضوئية أو الطبقة المرئية، حيث يكون الغاز غير شفاف ويمنع رؤية ما تحت الفوتوسفير من طبقات الشمس. ويبلغ سمكها 300 إلى 500 كيلومتر تقريباً. وتتفاوت درجة حرارة الطبقة الضوئية حسب العمق، ويبلغ معدلها 5800 K تقريباً. ومعدل كثافتها من مرتبة 10^{-8} g/cm^3 . إن الطاقة التي تنبثق من الطبقة الضوئية قد تم توليدها في الأصل داخل نواة الشمس. وتكون هذه الطاقة على شكل فوتونات تشق طريقها ببطء نحو سطح الشمس. وخارج الشمس يمكن رصد الفوتونات المنبعثة من الطبقة الضوئية فقط، حيث تكون كثافة الذرات منخفضة بما فيه الكفاية لهروب الفوتونات أخيراً من الشمس دون الاصطدام بذرة أو أيون آخر.



الشكل ٢-٤: بقع شمسية وحببيات على سطح الشمس.

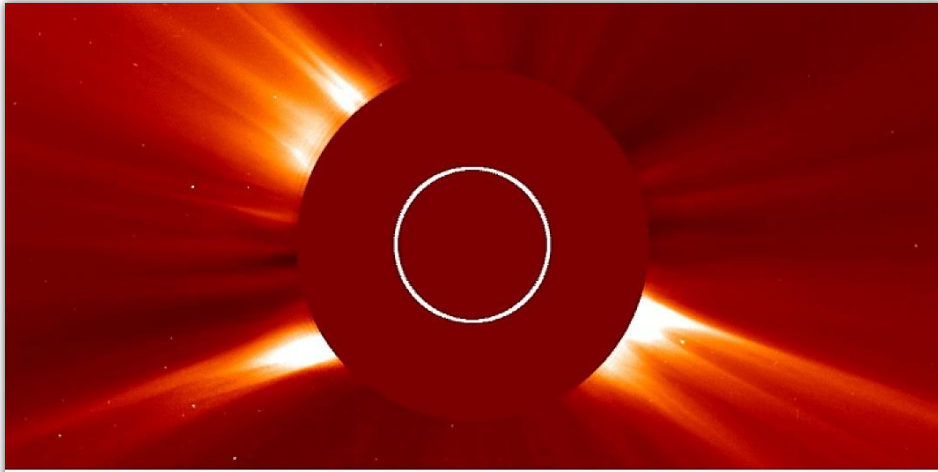
تُظهر الأرصاد باستخدام المراصد الفلكية telescopes أن الغلاف الضوئي له مظهر الحبيبات granules بسبب الحمل الحراري الشمسي على السطح (لاحظ الشكل ٢-٤)، ويبلغ قطر الحبيبة عادةً ما بين 700 إلى 1000 كيلومتر، وتبدو كمناطق مضيئة محاطة بمناطق ضيقة أكثر عتمة منها (أكثر برودة). وعمر الحبيبة المنفردة هو (5 ← 10) دقائق فقط. والأكبر من ذلك هي

الحبيبات الفائقة، التي يبلغ عرضها 35000 كيلومتر تقريباً وتستمر 24 ساعة تقريباً.

٢- **الطبقة اللونية chromosphere**، أو الكرة اللونية: هي الطبقة الموجودة مباشرة فوق الطبقة المرئية، وعادةً لا تكون مرئية لأن كثافة إشعاعها أقل بكثير من إشعاع الطبقة المرئية، ولكن يمكن مشاهدتها على شكل حلقة ملونة أثناء الكسوف الشمسي. وتظهر الأرصاد التي تمت أثناء الكسوف أن سمك الطبقة اللونية يبلغ (2000 ← 3000) كيلومتر تقريباً، وهي ذات كثافة أقل من كثافة الطبقة الضوئية. وتزداد درجة

حرارتها من 5000 K تقريباً عند قاعدتها إلى عشرات آلاف الدرجات. وهذا يعني أن الطبقة اللونية التي هي أبعد عن مركز الشمس أكثر سخونة من الطبقة الضوئية الأقرب منها لمركز الشمس، وهو ما قد يبدو غريباً. لأنه في الحالات التي نعرفها تنخفض درجات الحرارة كلما ابتعدنا عن مصدر الحرارة، وتوجد تفسيرات مختلفة لهذه الظاهرة. وتوجد منطقة انتقالية transition region تمتد بضعة آلاف من الكيلومترات أعلى من الطبقة اللونية.

٣- طبقة الإكليل (الهالة) corona: هي الطبقة الجوية الخارجية الأبعد عن مركز الشمس، وتبدأ عند نهاية الطبقة اللونية، حيث تنتقل الطبقة اللونية تدريجياً إلى الإكليل. وتمتد إلى ارتفاعات هائلة تصل إلى بضعة ملايين من الكيلومترات. ويمكن ملاحظة الإكليل أثناء الكسوف الكلي أو من خلال المركبات



الشكل ٥-٢: الإكليل الشمسي. تم التقاط هذه الصورة للشمس بتاريخ 2016-3-2 بواسطة جهاز الكوروناجراف. والدائرة المظلمة الأكبر في المركز هي القرص الذي يحجب وهج الشمس، مما يسمح برؤية الإكليل، والدائرة الداخلية الأصغر هي المكان الذي ستكون فيه الشمس لو كانت مرئية في هذه الصورة.

الفضائية المدارية أو استعمال أداة خاصة تسمى الكوروناجراف coronagraph تزيل وهج الشمس من الصورة باستخدام قطعة دائرية من المادة تحجب قرص الشمس، (لاحظ الشكل ٥-٢). ويقارب

سطوع الإكليل سطوع البدر، لذا من الصعب رؤيته بجانب الغلاف الضوئي الساطع إلا أثناء الكسوف. وتُظهر دراسات طيفية أن كثافة الإكليل منخفضة جداً. وتقل كثافته بصورة كبيرة عند الارتفاعات العالية. إن غازات الإكليل ساخنة جداً وتامة التأين، أي إن كل ذرة فقدت إلكترونات واحداً على الأقل. وبعض هذه الذرات شديدة التأين، مثل الحديد المتأين ثلاث عشرة مرة. وهذا يعني وجود طاقة كبيرة أزلت هذا العدد الكبير من الإلكترونات من الذرة. وتبلغ درجة حرارة الهالة بأكملها مليون درجة تقريباً، وتحتاج إلى إمدادات مستمرة من الطاقة من أجل الحفاظ على درجة الحرارة المرتفعة. ومصدر هذه الطاقة وفقاً لما تم اقتراحه حديثاً هو التسخين الحادث بواسطة التيارات الكهربائية الناتجة عن تغير المجالات المغناطيسية، وستتولد حينئذ الحرارة في الإكليل كما هو الحال في المصباح الكهربائي الاعتيادي.

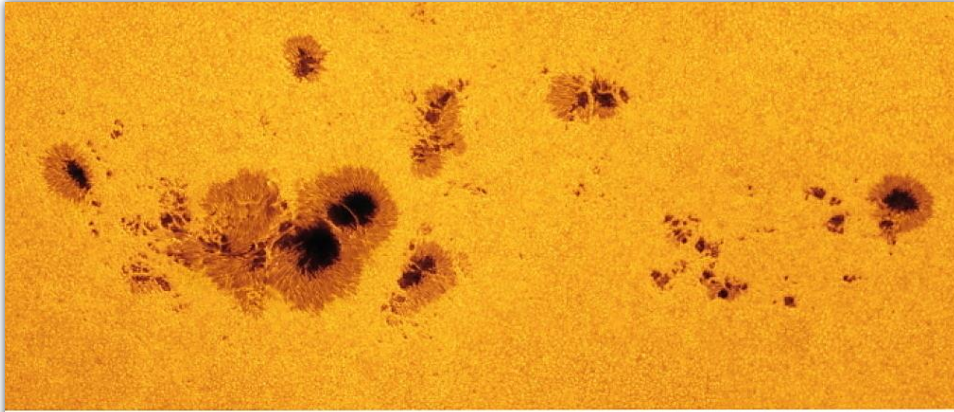
2-4: Solar Activity

٢-٤: النشاط الشمسي

2-4-1: Sunspots

٢-٤-١: البقع الشمسية

وتسمى أيضاً (الكلف الشمسي)، وهي مناطق داكنة تظهر بأحجام مختلفة على سطح الشمس بسبب زيادة النشاط المغناطيسي. ويكون لها عادة شكل محدد بوضوح يتألف من منطقة مركزية داكنة تدعى



الشكل ٢-٦: البقع الشمسية. تم التقاط هذه الصورة في شهر تموز 2012. وأكبر بقعة تُرى هنا يبلغ عرضها حوالي 11 كرة أرضية. والمظهر المرقط لسطح الشمس هنا هو الحبيبات.

منطقة الظل محاطة بمنطقة أكثر إضاءة تدعى منطقة شبه الظل كما في الشكل ٢-٦.

إن وجود البقع الشمسية معروف منذ فترة طويلة، حيث يمكن رؤية أكبرها

بالعين المجردة من خلال النظر إلى الشمس من خلال طبقة كثيفة مناسبة من الضباب أو من خلال السحب. ولها مجالات مغناطيسية قوية تقوم بحبس المواد المنتقلة إلى السطح من منطقة الحمل الحراري، ثم تبرد هذه المادة المحبوسة مسببة البقع الشمسية التي تبلغ درجة حرارتها 3800 K تقريباً، بينما تبلغ درجة حرارة المناطق المضيفة التي تحيط بها من الغلاف الضوئي 5800 K تقريباً. وهو ما يفسر اللون الداكن للبقع. وبينما تبدو البقع الشمسية أكثر قتامة لأنها أكثر برودة، إلا أنها مع ذلك أكثر سخونة من أسطح العديد من النجوم.

إن عدد البقع الشمسية يتغير بتغير الوقت، فيزداد بالتدريج إلى أن يصل أقصى قيمة له ثم يهبط بالتدريج إلى أقل قيمة، وبعدها يعود للزيادة مرة أخرى، وهكذا. وتستمر هذه الدورة ما يقارب 11 سنة. يبلغ قطر البقعة الشمسية النموذجية $10,000\text{ km}$ تقريباً (قارنه مع قطر الأرض)، ويتراوح عمرها من بضع ساعات إلى بضعة أشهر حسب حجمها. ومن المرجح أن تكون البقع الأكبر طويلة العمر. وتصبح العديد من البقع أكبر بكثير من الأرض، وقد يصل قطر بعضها إلى أكثر من $140,000\text{ km}$. ومن خلال متابعة حركات البقع يمكن تحديد فترة دوران الشمس المحورية.

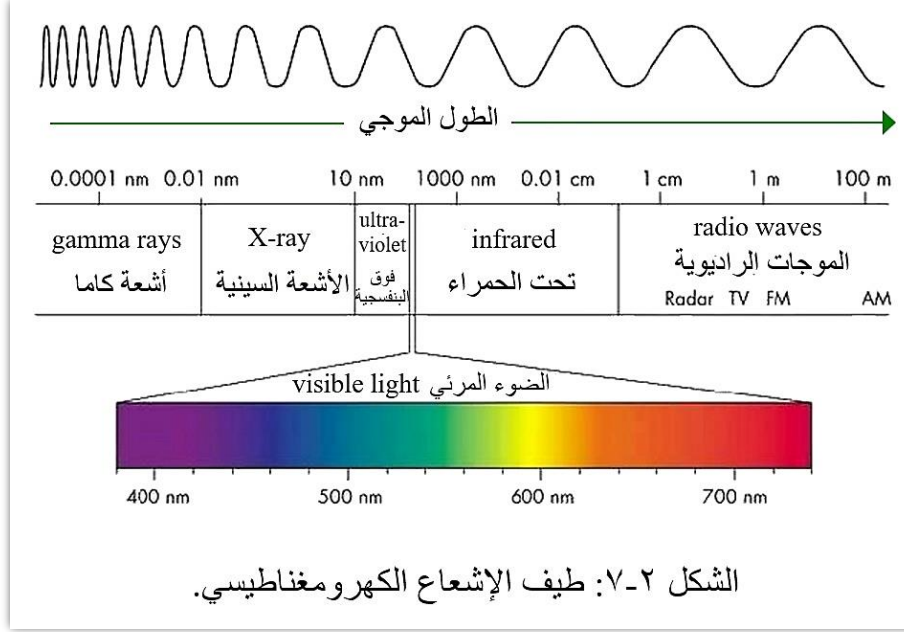


٢-٤-٢: الإشعاع الشمسي

2-4-2: Solar Radiation

تشع الشمس بمختلف الأطوال الموجية للإشعاع الكهرومغناطيسي (الأشعة الراديوية وتحت الحمراء والضوء المرئي وفوق البنفسجية والسينية وگاما)، (لاحظ الشكل ٧-٢). ومن ميزات هذا الإشعاع (خاصة ما يتعلق بتأثيره على الأرض) أنه يسير في خطوط مستقيمة وبسرعة الضوء ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$). والجزء الذي

يصل منه إلى الأرض يؤثر على نصف الكرة الأرضية المواجه للشمس لأنه يسير بخطوط مستقيمة. والدليل على ذلك هو أنه أثناء الكسوف الكلي للشمس يتوقف وصول مختلف أنواع الإشعاع إلى الأرض في اللحظة التي يتوقف فيها وصول الإشعاع المرئي.



تُعد المناطق النشطة في الشمس مصدراً لمعظم انبعاثات الأشعة السينية وفوق البنفسجية الشمسية. حيث تنبعث الأشعة السينية من طبقة الإكليل، وتنبعث الأشعة فوق البنفسجية من مناطق الاضطرابات الشمسية. ويمكن للأشعة السينية والأشعة فوق البنفسجية أن تؤين الذرات الموجودة في الغلاف الجوي العلوي للأرض upper atmosphere وتسبب تغيرات في الغلاف الأيوني للأرض ionosphere، مما يؤثر على الاتصالات اللاسلكية الراديوية ذات الموجات القصيرة. ويمكن للإلكترونات المحررة من الذرات المتأينة أن تولد شحنة كهربائية على سطوح المركبات الفضائية، وعندما يتم تفريغ هذه الشحنة الساكنة يمكن أن تؤدي إلى تلف الأجهزة الإلكترونية في المركبة الفضائية.

تعد الأشعة الشمسية أكبر مصدر للطاقة تتلقاه الأرض، ولكن كثافتها على سطح الأرض منخفضة جداً. ويرجع ذلك أساساً إلى الانتشار الشعاعي الهائل للإشعاع من الشمس البعيدة. وترجع الخسارة الإضافية الطفيفة نسبياً إلى الغلاف الجوي للأرض والسحب، التي تمتص أو تبعثر ما يصل إلى 54% من الإشعاع الشمسي الوارد. ويتكون الإشعاع الشمسي الواصل إلى الأرض من 50% تقريباً من الضوء

المرئي و 45% من الأشعة تحت الحمراء وكميات أقل من الأشعة فوق البنفسجية وغيرها من أشكال الإشعاع الكهرومغناطيسي. ويمكن استغلال الأشعة الشمسية لإنتاج الحرارة والتسبب في تفاعلات كيميائية وتوليد الكهرباء.

2-4-3: Solar Wind

٢-٤-٣: الرياح الشمسية

هي تدفق من الجسيمات المشحونة التي يكون معظمها من الإلكترونات والبروتونات، وينتج من الغلاف الجوي العلوي للشمس، أي من طبقة الإكليل. وتبلغ سرعة هذه الرياح 400 km/s تقريباً (ما يقارب مليون ونصف المليون كيلومتر في الساعة)^١ عند مسافة بقدر بعد الأرض عن الشمس، وكثافتها $10 \text{ particles/cm}^3$. ولكن هاتين القيمتين يمكن أن تتغيرا بشكل كبير تبعاً للنشاط الشمسي. وقد تمكنت هذه الجسيمات من الإفلات من جاذبية الشمس القوية بسبب طاقتها العالية الناتجة عن الحرارة العالية في الإكليل. وتنخفض درجة الحرارة تدريجياً كلما ابتعدت الجسيمات عن الشمس، وتصل إلى ما بين $120,000 \text{ K}$ و $140,000 \text{ K}$ على مدار الأرض.

على الرغم من أن مادة الرياح الشمسية قليلة جداً (أي منخفضة الكثافة للغاية)، إلا أن لدى الشمس مساحة سطحية هائلة. ويقدر علماء الفلك أن الشمس تفقد 10 ملايين طن تقريباً من المواد كل عام بسبب هذه الرياح. وهذه الكمية تعتبر قليلة جداً بالنسبة لكتلة الشمس.

وقد يتبادر إلى الذهن السؤال التالي: لماذا كانت الرياح الشمسية ذات درجات حرارة عالية جداً فلماذا لا تحرقنا بعد اصطدامها بالأرض؟

والجواب هو إن هذه الرياح لا تصاحبها كمية كبيرة من الطاقة الحرارية، فعدد السرعات منخفض لأن الكتلة الكلية للجسيمات الساخنة التي تصطدم بالأرض صغيرة جداً، إضافة إلى أن الكثير منها تقل طاقته عند اصطدامه بالجسيمات الموجودة في الغلاف الجوي الأرضي فيتعرض للاستطارة حينئذ ولا يصل إلى سطح الأرض نهائياً أو يصل بطاقة أقل، كما إن المجال المغناطيسي الأرضي يجعل الدقائق المشحونة كهربائياً في الرياح الشمسية تنحرف عن مسارها عند وصولها جو الأرض.

(١) لو افترضنا أن معدل سرعة الرياح الشمسية من الشمس إلى الأرض هو 600 km/s ، فكم ساعة ستستغرق للوصول إلى الأرض؟

إن الدقائق المشحونة هذه لا يتوقف وصولها إلى الأرض أثناء الكسوف الكلي للشمس، إذ أنها تنحرف عن مسارها المستقيم بسبب تأثيرها بالمجال المغناطيسي الأرضي. وتأثيرها على جو الأرض قصير، لأنها تحدث فقط عندما تصدر من مواقع معينة من قرص الشمس بحيث يتلاءم مع الوضع المناسب للأرض. ونحن محميون إلى حد ما من الرياح الشمسية بواسطة غلافنا الجوي والمجال المغناطيسي للأرض. ومع ذلك، فإنه يمكن للجسيمات المشحونة هذه أن تتسبب في حدوث ظاهرة الشفق القطبي aurora، التي هي عبارة عن ظاهرة منيرة متغيرة الشكل تحدث قرب القطبين المغناطيسيين الأرضيين. والسبب هو عندما تنبعث الدقائق المشحونة من الشمس إلى الأرض تتوجه بحكم المجال المغناطيسي الأرضي إلى مركزي القطبين المغناطيسيين الشمالي والجنوبي للأرض، وأثناء ذلك تصطدم بذرات العناصر الموجودة في أعالي الجو مثل الأوكسجين والهيدروجين، وتتسبب في توهجها منتجة ستائر جميلة من الضوء تسمى الشفق القطبي، أو الأضواء الشمالية والجنوبية.

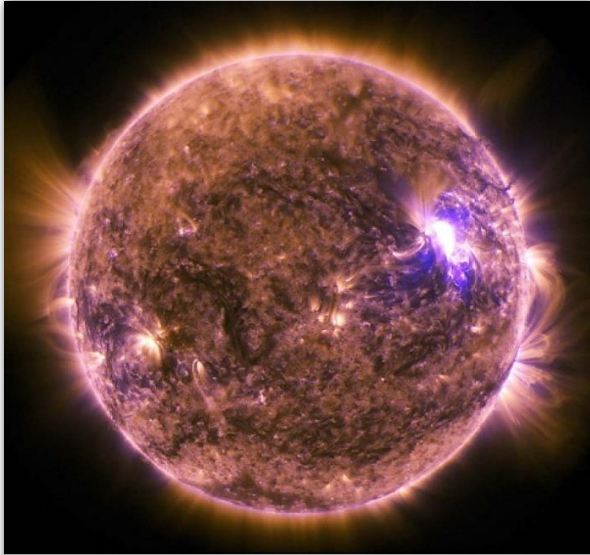
2-4-4: Other Solar Phenomena

٢-٤-٤: ظواهر شمسية أخرى



١- التاجات اللامعة prominences: تنشأ عادة بالقرب من البقع الشمسية. وهي عبارة عن فورانات غازية متوهجة في الإكليل مدعومة مغناطيسياً وترتفع عالياً، ويمكن رؤيتها بسهولة بالقرب من حافة الشمس. وغالباً ما يراها راصدو الكسوف حمراء مرتفعة فوق الشمس المنكسفة وتصل إلى أعلى الإكليل. ولها عدة أنواع، بعضها قد يرتفع مسافة تزيد عن مليون كيلومتر فوق الغلاف الضوئي، وهي ذات حجم كبير مقارنة بالأرض كما في الشكل ٢-٨

٢- الشواظ الشمسي solar flare: ويسمى أيضاً (التوهج الشمسي)، وهو الحدث الأكثر عنفاً على سطح الشمس، (الشكل ٢-٩). ويظهر على شكل ومضات ساطعة، وهو عبارة عن انفجارات عنيفة تنبعث من مجموعة البقع الشمسية، يتم فيها إطلاق كميات هائلة من الطاقة المغناطيسية على مدار بضع دقائق إلى بضع



الشكل ٢-٩: الشواظ الشمسي، وهو المنطقة البيضاء الساطعة التي تظهر على الجانب الأيمن من الشمس حسب تصوير المركبة الفضائية (مراقب ديناميكيات الطاقة الشمسية Solar Dynamics Observer) بتاريخ 25 حزيران 2015.

ساعات. وقد تعادل كمية الطاقة المتحررة مليون قنبلة هيدروجينية. وتبعث أكبر هذه الانفجارات طاقة كافية لتزويد الولايات المتحدة بأكملها بالطاقة بمعدل استهلاكها الحالي للكهرباء لمدة 100,000 عام.

٣- الانبعاثات الكتلية الإكليلية coronal mass ejections (CME): هي عبارة عن فقاعات شمسية متفجرة مكونة من كميات هائلة من المواد الإكليلية (البروتونات والإلكترونات بشكل أساسي) تُقدَّر بعشرات الملايين من الأطنان، تُقذف إلى الفضاء بين الكواكب بسرعات عالية ($500 \rightarrow 1000 \text{ km/s}$). وهي تؤثر بعدة طرق عندما تصل إلى الأرض مثل ظهور

شفق قوي عندما تدخل المجال المغناطيسي للأرض بعد أيام قليلة من الانفجار، وتسخين الغلاف الأيوني الذي يتوسع ويصل إلى مسافة أبعد في الفضاء فيزداد الاحتكاك بين الغلاف الجوي والمركبات الفضائية.

إضافة إلى ما ذكر من ظواهر شمسية توجد عدة أنواع أخرى من النشاط السطحي كالشعيرات الشمسية أو الصياخد faculae، واللطخات الضوئية plagues، والفتائل السوداء filaments.

2-5: Solar Energy

٢-٥: الطاقة الشمسية

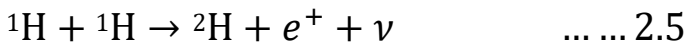
يكون مصدر الطاقة المنبعثة في الشمس وفي النجوم الأخرى ذوات الكتل المنخفضة هو الطاقة النووية المتحررة من تفاعلات الاندماج النووي nuclear fusion في النواة، إذ تحدث سلسلة من التفاعلات النووية تسمى سلسلة بروتون-بروتون proton-proton chain، حيث تتم عملية مكونة من ثلاث خطوات تمثل 85% تقريباً من الطاقة الشمسية، والبقية تتولد من تفاعلات اندماجية لعناصر أثقل. وفي هذه العملية تندمج أربع نوى هيدروجين ^1H معاً لتؤلف نواة ذرة هيليوم واحدة ^4He (جسيم ألفا). وتكون كتلة نواة الهيليوم أقل بمقدار 0.71% تقريباً من مجموع كتل نوى الهيدروجين الأربعة التي تتحد لتشكيلها. فإذا تم تحويل 1 kg من الهيدروجين إلى هيليوم فإن كتلة الهيليوم تصبح 0.9929 kg فقط، ويتم تحويل 0.0071 kg من المادة إلى طاقة يُحسب مقدارها وفق معادلة آينشتاين ($E = mc^2$) كما يلي:

$$E = mc^2 = 0.0071 \text{ kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 6.39 \times 10^{14} \text{ J}$$

وستوفر هذه الطاقة المتحررة عندما يخضع كيلوغرام واحد فقط من الهيدروجين للاندماج كل الكهرباء المستخدمة في الولايات المتحدة لمدة أسبوعين تقريباً.

ولإنتاج القدرة الكلية التي تشعها الشمس ($3.85 \times 10^{26} W$) يتحول ما يقارب 600 مليون طن من الهيدروجين إلى هيليوم في كل ثانية ($6 \times 10^{11} kg/s$)، يتحول منها 4 ملايين طن تقريباً إلى طاقة. إن طاقة النجوم الأكثر سخونة من الشمس تتولد من سلسلة أخرى من التفاعلات تسمى دورة الكربون carbon cycle يتحول فيها الهيدروجين إلى هيليوم، وتدخل في هذه التفاعلات أيضاً ذرات الكربون والنيتروجين والأوكسجين.

عند درجات الحرارة المرتفعة داخل نواة الشمس التي تصل إلى 15 مليون درجة أو أكثر، تكون الجسيمات الذرية ذات طاقة عالية جداً بحيث تستطيع أن تتفاعل مع الجسيمات الأخرى بسبب تصادمها، وتنتقل الطاقة المتولدة إلى سطح الشمس وتنبعث إلى الفضاء الخارجي على شكل اشعاع ينتقل بسرعة الضوء. في الخطوة الأولى لهذا التفاعل، تندمج نواتا هيدروجين (أي بروتونان اثنان)، حيث يتحول أحد البروتونين إلى نيوترون عن طريق انبعاث بوزترون^١ (e^+) ونيوترينو^٢ (ν) بعملية تسمى تحلل بيتا beta decay. وتبقى الشحنة الكهربائية محفوظة في هذا التفاعل. والنواة الجديدة المتكونة من بروتون ونيوترون التي تشكلت في هذه الخطوة هي نواة نظير الهيدروجين isotope of hydrogen المسمى الدوتيريوم deuterium أو 2H ، (لاحظ الشكل ٢-١٠).



للإلكترون شحنة كهربائية مضادة لشحنة البوزترون، لذا فهما يجذبان لبعض. ونتيجة لذلك، فإن البوزترون المنبعث سوف يصطدم قريباً بأحد الإلكترونات (e^-) الكثيرة التي تتحرك بحرية في أرجاء مركز الشمس، ثم يفنى كلاهما، وتتحول كل كتلتهما إلى طاقة. وهكذا فإن فناء الإلكترونات والبوزترونات في نواة الشمس يُنتج طاقة على شكل فوتونات أشعة غاما (γ) gamma-ray photons، والتي سوف تصطدم بجسيمات المادة وتنقل طاقتها لها. وبعد هذا يبعث الجسيم الذي امتص فوتون غاما فوتوناً آخر من أشعة غاما، لكن غالباً ما يكون للفوتون المنبعث طاقة أقل قليلاً من الفوتون الذي تم

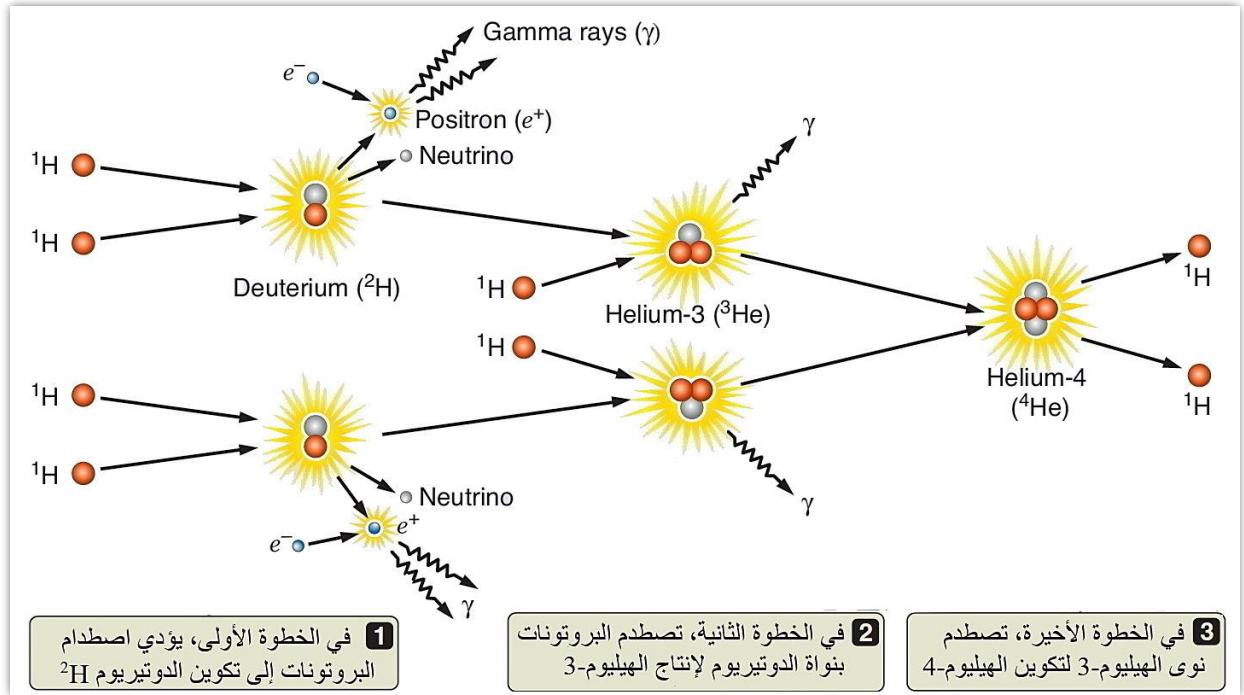
(١) البوزترون: جسيم أولي، وهو ضديد الإلكترون، وله نفس كتلته ونفس مقدار شحنته ولكنها موجبة.
(٢) النيوترينو هو جسيم أولي قليل الكتلة جداً وغير مشحون، ينطلق في الفراغ بسرعة قريبة من سرعة الضوء.



امتصاصه. ومن ناحية أخرى، فإن تفاعل النيوتريو مع المادة ضعيف للغاية لدرجة أن مصيره الأرجح هو الهروب من الشمس في جميع اتجاهات الفضاء دون مزيد من التفاعلات مع أي جسيمات أخرى.

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma \quad \dots \dots 2.6$$

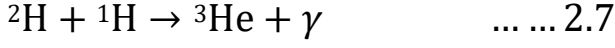
تحدث مثل هذه التفاعلات لأشعة غاما مراراً وتكراراً وهي تشق طريقها ببطء نحو الطبقات الخارجية للشمس حتى تنخفض طاقتها لدرجة أنها لم تعد أشعة غاما بل أشعة سينية X-rays. ولاحقاً عندما تفقد الفوتونات المزيد من الطاقة من خلال الاصطدامات في مركز الشمس المزدحم بالنوى والإلكترونات فإنها تصبح فوتونات فوق بنفسجية ultraviolet photons.



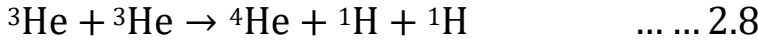
الشكل ٢-١٠: سلسلة بروتون - بروتون لتوليد الطاقة داخل الشمس.

إن الضوء المنبعث من الشمس كان أصله أشعة غاما تنتجها التفاعلات النووية في نواة الشمس. ويعتمد طول الوقت الذي تستغرقه الفوتونات للوصول إلى السطح على معدل المسافة التي يقطعها الفوتون بين الاصطدامات، وعلى النموذج المعقد الذي يتبناه العلماء للجزء الداخلي من الشمس. والتقديرات غير مؤكدة، ولكنها تشير إلى أن الطاقة المنبعثة من سطح الشمس يمكن أن يتأخر إنتاجها في الداخل بمقدار مائة ألف إلى مليون سنة. ويعتمد المعدل الذي يحدث به تفاعل سلسلة بروتون - بروتون على كل من درجة الحرارة والضغط، فعند درجة الحرارة والضغط الموجودين داخل نواة الشمس يكون معدل التفاعل بطيئاً نسبياً. وهذا البطء في الاحتراق النووي داخل الشمس هو أمر مهم جداً، فلو كان سريعاً فإن الشمس ستستنفد إمداداتها من الهيدروجين بسرعة ولا تعمّر طويلاً.

في الخطوة الثانية من سلسلة بروتون-بروتون، يصطدم بروتون آخر بنواة الدوتيريوم، ويندمج معها ليشكل نواة النظير الخفيف للهيليوم ^3He الذي يتكون من بروتونين ونيوترون. وفي هذه العملية، يتم فقدان بعض الكتلة مرة أخرى وتتحرق طاقة على شكل فوتون أشعة غاما. والنواة الناتجة هنا هي نواة الهيليوم، لأن العنصر يتم تعريفه بعدد البروتونات الموجودة فيه، فأني نواة تحتوي على بروتونين هي نواة هيليوم.



في الخطوة الثالثة والأخيرة تتصادم نواتان من نوع ^3He وتندمجان، مما يؤدي إلى إنتاج نواة هيليوم ^4He وبروتونين حُرَّين نشطين جاهزين للاصطدام ببروتونات أخرى وبدء الخطوة الأولى في سلسلة التفاعلات من جديد. وتظهر الطاقة المتحررة في هذه الخطوة على شكل طاقة حركية لكل من نواة الهيليوم والبروتونين المتحررين.

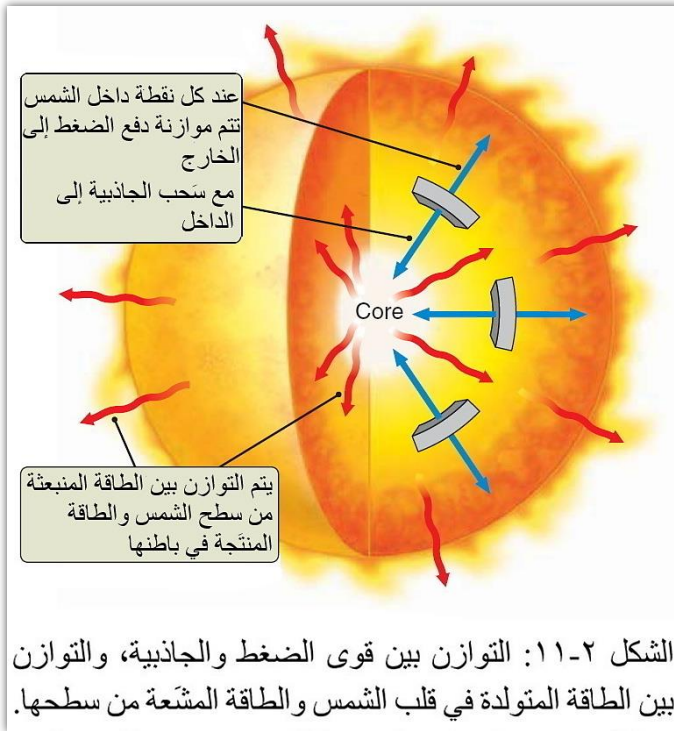


إن ما يصل إلى الأرض من الطاقة المنبعثة من الشمس لا يمثل إلا جزءاً بسيطاً جداً من هذه الطاقة بسبب بعد الأرض وصغر حجمها نسبة إلى الشمس.

2-6: The Balance inside the Sun

٢-٦: التوازن داخل الشمس

النموذج الحالي للجزء الداخلي من الشمس هو تنويع لعقود من العمل من قبل الآلاف من علماء



الفيزياء والفلك. وتكون الشمس ونجوم النسق الأساسي^١ في حالة مستقرة أغلب حياتها، وهناك توازنان أساسيان داخل الشمس كما موضح في الشكل ٢-١١، هما:

١- التوازن بين الضغط والجاذبية: إن الشمس عبارة عن كرة ضخمة من الغاز الساخن. ولو كان تأثير الجاذبية المتجه من الطبقات العليا إلى الداخل أقوى من الضغط المتجه من النواة إلى الخارج لانهارت الشمس.

(١) يراجع الفصل الرابع لمعرفة هذا الصنف من النجوم.

وعلى العكس من ذلك، إذا كان الضغط أقوى من الجاذبية فإن الشمس سوف تنتفخ أو تنفجر. ويدعى هذا التوازن بالتوازن الهيدروستاتيكي hydrostatic equilibrium. وبموجب هذا التوازن فإن الضغط عند أية نقطة داخل باطن الشمس يجب أن يكون كافياً لحمل وزن جميع الطبقات الموجودة فوق تلك النقطة. وإذا لم تكن الشمس في حالة توازن هيدروستاتيكي فلن تكون القوى داخل الشمس متوازنة، وهذا يؤثر على سطح الشمس الذي لن يثبت في مكانه حينئذ. والشمس اليوم هي نفسها كما كانت سابقاً. لذا فإن التفاعلات النووية في باطن الشمس تؤدي إلى ارتفاع الضغط الإشعاعي المركزي بحيث يتعادل مع قوة الجذب الثقالي. لذلك تكون الشمس في حالة مستقرة.

٢- توازن الطاقة: إن النجوم مثل الشمس هي أجسام مستقرة. وتُظهر السجلات الجيولوجية أن سطوع الشمس ظل ثابتاً تقريباً لمليارات السنين^١. وفي الواقع، فإن وجود نجوم النسق الأساسي نفسه يشير إلى أن النجوم لا تتغير كثيراً خلال الجزء الرئيسي من حياتها. ولكي تظل الشمس في حالة توازن يجب أن تنتج ما يكفي من الطاقة في باطنها لتحل محل الطاقة التي يشعها سطحها كل ثانية.

2-7: The Moon

٢-٧: القمر

هو أقرب الأجرام السماوية إلى الأرض وأولها دراسة من قبل المهتمين، وهو الجرم الأكثر سطوعاً والأكثر وضوحاً في السماء بعد الشمس، وهو التابع الوحيد للأرض. وتعتبر جاذبية القمر - وبدرجة أقل جاذبية الشمس - المحرك الرئيسي للمد والجزر. وهو جسم معتم لا يشع الضوء، بل يتوهج بسبب ضوء الشمس المنعكس.

2-8: Basic Properties of Moon

٢-٨: الخصائص الأساسية للقمر

2-8-1: Diameter

٢-٨-١: القطر

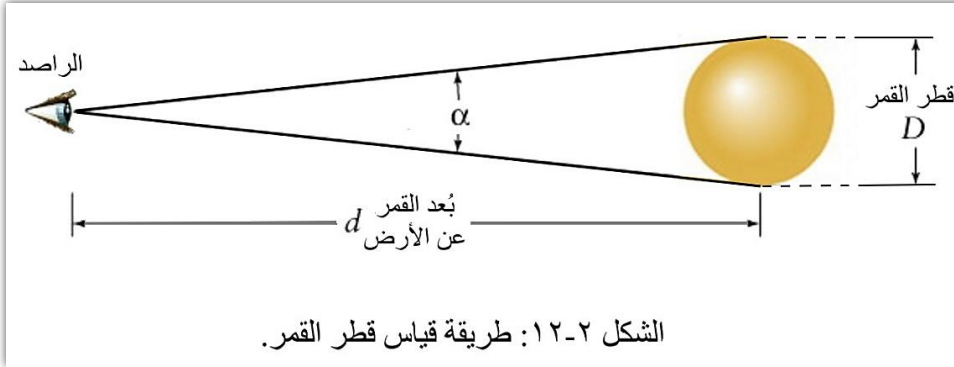
يمكن قياس معدل قطر القمر باستعمال الطريقة الهندسية التالية: نفترض أن الأرض في مركز دائرة نصف قطرها يساوي معدل بعد القمر عن الأرض الذي يساوي $384,400 \text{ km}$ ، ويكون القوس المار بالقمر صغيراً جداً مقارنة بمحيط هذه الدائرة، لذلك يمكن اعتباره خطاً مستقيماً ويعادل القطر الزاوي للقمر. ومن الشكل ٢-١٢ يمكن وضع العلاقة:

(١) يعتقد علماء الفيزياء الفلكية أن الشمس تزيد من لمعانها بنسبة 5% كل مليار سنة.

$$\frac{D}{\alpha} = \frac{2\pi d}{360^\circ} \quad \dots \dots 2.9$$

$$D = \frac{2\pi d \alpha}{360^\circ} = \frac{2 \times 3.14159 \times 384400 \text{ km} \times 0.518^\circ}{360^\circ} = 3475.28 \text{ km}$$

حيث α : معدل القطر الزاوي للقمر (كما يشاهد من الأرض) $= 31'5'' = 0.518^\circ$ ، و $2\pi d$: محيط الدائرة التي نصف قطرها هو معدل بعد القمر عن الأرض d ، و D : قطر القمر (~ 0.27 قطر أرضي).



وتعتبر الطريقة أعلاه عامة لقياس الكواكب القريبة إذا علم بعدها عن الأرض وقطرها الزاوي.

الجدول ٢-٢: بعض الخصائص الأساسية للقمر

الصفة	قيمتها
معدل البعد عن الأرض	mean distance from Earth
384,400 km	
الانحراف المركزي (e)	eccentricity
0.0549	
أقصى بعد عن الأرض (الأوج)	maximum distance from Earth (apogee)
405,410 km	
أدنى بعد عن الأرض (الحضيض)	minimum distance from Earth (perigee)
362,570 km	
الكتلة	mass
$7.348 \times 10^{22} \text{ kg}$	
معدل القطر الزاوي	mean angular diameter
0.518°	
ميل المدار عن دائرة البروج	inclination of the orbit from the ecliptic
5.15°	
القطر (D)	diameter
3476 km	
معدل الكثافة (ρ)	mean density
3.346 g/cm^3	
الجاذبية السطحية (g_M)	surface gravity
1.622 m/s^2	
سرعة الإفلات من سطح القمر (v_{esc})	escape speed from the surface of Moon
2.38 km/s	
فترة الدوران المحوري (اليوم القمري)	axial rotation period (lunar day)
27.3217 days	
الفترة المدارية (النجمية)	orbital period (sidereal)
27.3217 days	
الفترة المدارية (الاقترانية)	orbital period (synodic)
29.530589 days	
معدل السرعة المدارية	average orbital speed
1.022 km/s	
مدى درجات الحرارة عند خط الاستواء القمري	temperature range at lunar equator
103 to 403 K (-170 to 130 °C)	

٢-٨-٢: الكتلة

2-8-2: Mass

قبل بعثات أبولو، كانت قياسات كتلة القمر تؤخذ بشكل غير مباشر، وكانت إحدى الطرق هي الاستفادة من حقيقة أن نظام الأرض والقمر يدور حول مركز الكتلة المشترك، لأنه هو الذي يكمل دورة كاملة حول الشمس سنوياً بمدار إهليلجي. لذا فلو كان d_1 هو المسافة بين مركز الثقل المشترك ومركز الأرض ومقداره 4670.7 km ، و d_2 هو البعد بين مركز الثقل المشترك ومركز القمر ومقداره 379733.3 km و m_E كتلة الأرض و m_M كتلة القمر فإنه بتطبيق قانون العزوم ينتج:

$$\frac{m_M}{m_E} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{4670.7 \text{ km}}{379733.3 \text{ km}} = \frac{1}{81.3} \quad \dots \dots 2.10$$

وهذا يعني أن كتلة القمر تعادل $\frac{1}{81.3}$ من كتلة الأرض. وبما أن كتلة الأرض $(5.98 \times 10^{24} \text{ kg})$ فإن كتلة القمر $(7.35 \times 10^{22} \text{ kg})$.

ويمكن أيضاً حساب كتلة القمر عن طريق قانون كبلر الثالث، وكذلك عن طريق حساب التعجيل القمري المؤثر على المركبات الفضائية التي ترسل إلى القمر أو التي تمر بالقرب منه في طريقها إلى الكواكب.

٢-٨-٣: الجاذبية السطحية

2-8-3: Surface Gravity

استناداً إلى قانون نيوتن في الجاذبية فإن معدل التعجيل لأي جسم يتناسب طردياً مع كتلته وعكسياً مع مربع نصف القطر. لذا فجاذبية القمر ستكون:

$$g_M = \frac{Gm_M}{R^2} \quad \dots \dots 2.11$$

حيث G : ثابت الجذب العام، و m_M : كتلة القمر، و R : نصف قطر القمر (1737 km) ، و g_M : الجاذبية السطحية للقمر، وتعني تعجيل الجسم الساقط على سطح القمر.

$$g_M = \frac{(6.674 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(7.348 \times 10^{22} \text{ kg})}{(1.738 \times 10^6 \text{ m})^2} = 1.623 \text{ m/s}^2$$

وبما أن التعجيل الأرضي $(g_E = 9.8 \text{ m/s}^2)$ ، فإنه

$$\frac{g_M}{g_E} = \frac{1.623 \text{ m/s}^2}{9.8 \text{ m/s}^2} = 0.1656$$

(١) هل يقع مركز الثقل المشترك داخل الأرض أم خارجها؟



أي أن التعجيل القمري يعادل $\frac{1}{6}$ التعجيل الأرضي. ولهذا فإن وزن الإنسان على سطح القمر يعادل سدس وزنه على سطح الأرض. أما كتلته فهي باقية بنفس مقدارها على الأرض.

2-8-4: Escape Speed

٢-٨-٤: سرعة الإفلات

هي أقل سرعة مطلوبة للجسم المتواجد على جرم ما للتغلب على قوة جاذبية الجرم، حيث يمكن للجسم بعد ذلك الهروب إلى الفضاء المحيط. ويمكن استنتاج سرعة الإفلات (التي يُشار لها بـ v_{esc}) اللازمة لجسم صغير كتلته m لتحرر من سحب جاذبية كتلة أكبر M عن طريق مساواة الطاقة الحركية kinetic energy E_k للكتلة الصغيرة مع الطاقة الكامنة الجاذبية^١ gravitational potential energy التي تمسكها، والتي تساوي $(U = -GmM/D)$ ، حيث D هي المسافة بين مركزي الكتلة الأكبر والأصغر، وستكون الطاقة الكلية E total energy:

$$E = E_k + U = \frac{1}{2}mv_{esc}^2 - \frac{GmM}{D} = 0 \quad \dots \dots 2.12$$

$$\frac{1}{2}mv_{esc}^2 = \frac{GmM}{D} \quad \dots \dots 2.13$$

وعندما يكون القمر هو الكتلة الأكبر والجسم الصغير موجود على سطحه فإن $(M = m_M)$ و $(D = R)$. لذا:

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2Gm_M}{R}} = \sqrt{\frac{2(6.674 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(7.348 \times 10^{22} \text{ kg})}{(1.738 \times 10^6 \text{ m})}}$$

$$= 2376 \text{ m/s} \approx 2.38 \text{ km/s}$$

إن سرعة الإفلات لا تعتمد على الكتلة الصغيرة m ، وتعتمد فقط على بعد الجسم الصغير وقيمة الكتلة الكبيرة. وفي المسافات الأكبر تصبح سرعة الإفلات أصغر لأن شدة قوة الجاذبية التي تمارسها الكتلة الكبيرة تكون أقل.

إن أي جسم - من الذرة إلى الصاروخ - يجب أن يتحرك بسرعة أكبر من سرعة الإفلات على سطح الكوكب إذا كان سينتقل إلى الفضاء المحيط به. وكمثال فإن سبب عدم وجود الهيدروجين في الغلاف الجوي للأرض هو أنه على ارتفاعات كبيرة - في طبقة الأيونوسفير ionosphere - تكون درجة الحرارة مرتفعة لدرجة أن ذرات الهيدروجين تتحرك بسرعات أكبر من سرعة الهروب

(١) هي الطاقة المرتبطة بنظام من الأجسام التي تتفاعل مع بعض عبر قوة الجاذبية.

من كو كينا وتبخر إلى الفضاء. وجدير بالذكر أن سرعة إفلات أي جسم من سطح الأرض هي (11.2 km/s) تقريباً، وسرعة الإفلات من سطح الشمس تعادل (618 km/s) .

٢-٩: سطح القمر وغلافه الجوي

2-9: The Moon's Surface and its Atmosphere

يملك القمر $\frac{1}{81}$ من كتلة الأرض وسدس جاذبية سطحها، وهي نسبة منخفضة جداً تجعله لا يحتفظ بغلاف جوي لأن جزيئات الغاز المتحركة تهرب منه بسهولة.

يعلو سطح القمر تربة مسامية ذات حبيبات دقيقة مكونة من شظايا صخرية صغيرة ومحطمة. وبسبب هذه التربة المسامية الخفيفة تغوص أحذية رواد الفضاء فيه عدة سنتيمترات. وهذا الغبار القمري، مثل الكثير من الأشياء الأخرى الموجودة على القمر هو نتاج الاصطدامات، التي تولد الفوهات وتفتت الصخور وتثر شظاياها. وفي نهاية المطاف، أدت مليارات السنين من الاصطدامات إلى تحويل جزء كبير من الطبقة السطحية إلى جسيمات بحجم دقائق الغبار أو حبات الرمل.

ويُشاهد على سطح القمر (حتى بالعين المجردة) مناطق داكنة (تسمى البحار seas أو ماريا maria) ومناطق فاتحة هي المرتفعات. ولكن البحار ليس لديها شيء مشترك مع البحار الأرضية، حيث لا يوجد ماء على سطح القمر. ويمكن رؤية العديد من الحفر، وجميعها ناتجة عن اصطدامات نيزكية.

وفي غياب الهواء، يتعرض سطح القمر لدرجات حرارة متطرفة أكبر بكثير من سطح الأرض رغم أنه يبعد بنفس بعد الأرض عن الشمس. وفي وقت الظهيرة، عندما تكون الشمس في أعلى مستوياتها في السماء، ترتفع درجة حرارة التربة القمرية الداكنة فوق نقطة غليان الماء (ما يقارب 130°C). وخلال الليل القمري الطويل (الذي يستمر أسبوعين أرضيين، مثل النهار القمري) تنخفض درجة الحرارة إلى ما يقارب (-173°C) . وهذه البرودة الشديدة ليست نتيجة لغياب الهواء فقط، بل أيضاً بسبب الطبيعة المسامية لتربة القمر الخفيفة، والتي تبرد بسرعة أكبر من الصخور الصلبة. ويلاحظ الانخفاض الكبير في درجات الحرارة من أعلى قيمة إلى أوطأ قيمة عند حدوث الخسوف الكلي، أي عندما يقع القمر في منطقة ظل الأرض، حيث وُجد أن درجة الحرارة تقل بمقدار 150°C خلال ساعة واحدة فقط.

تم اكتشاف الجليد المائي في الحفر المظلمة بشكل دائم بالقرب من القطبين الشمالي والجنوبي للقمر في بعض المناطق شديدة البرودة مثل قاع الحفر العميقة حيث لا تشرق عليها الشمس. ومن المفترض أن هذه المياه القطبية قد نُقلت إلى القمر عن طريق المذنبات والكويكبات التي ضربت سطحه.

إن عدم وجود الغلاف الجوي وعدم وجود الرياح أو الغيوم والأمطار والثلوج كل هذا يؤدي إلى توقع عدم زوال آثار أقدام رواد الفضاء من سطح القمر لآلاف السنين.

يُطلق على الجزء المنعكس عن الكوكب من ضوء الشمس الساقط عليه اسم الانعكاسية أو بياض الكوكب albedo. وقد وُجد أن انعكاسية سطح القمر تقارب 7% من الأشعة الكلية الساقطة عليه من الشمس. أي أنه جرم معتم يمتص 93% تقريباً من الأشعة الكلية الساقطة عليه، فتؤدي إلى تسخين سطحه إلى أن يصبح جسماً مشعاً للأشعة تحت الحمراء.

لا يمتلك القمر مجالاً مغناطيسياً magnetic field شاملاً. وإنما لبعض صخوره مغناطيسية ثابتة. وبدون الغلاف الجوي والمجال المغناطيسي، يمكن للرياح الشمسية أن تصل إلى سطح القمر مباشرة.

٢-١٠: حركات القمر المدارية والمحورية

2-10: Orbital and Axial Movements of the Moon

2-10-1: Moon Orbit

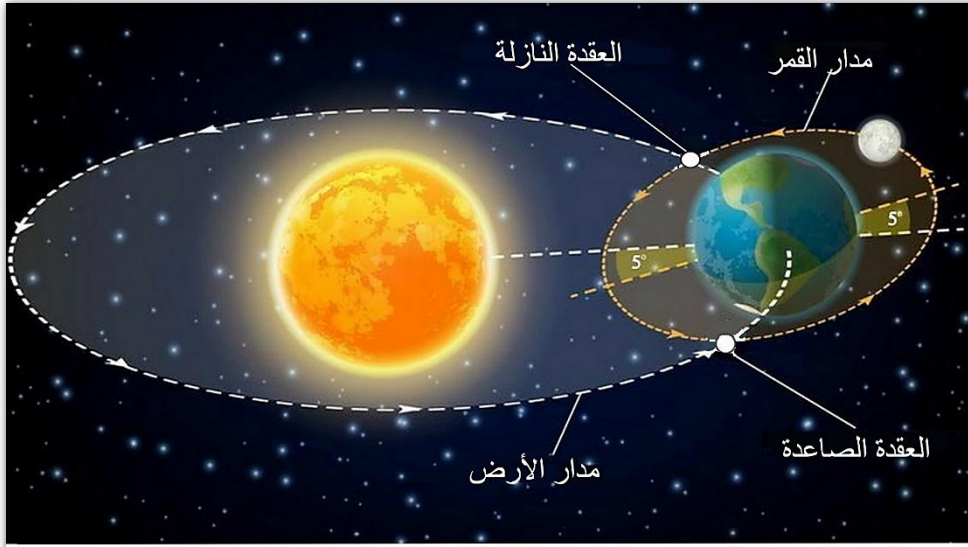
٢-١٠-١: مدار القمر

يدور القمر حول الأرض عكس اتجاه عقارب الساعة بالنسبة للراصد الأرضي. ويتخذ مداره شكل قطع ناقص ذي انحراف مركزي صغير ومتغير يبلغ معدله 0.055 تقريباً. ويكون هذا المدار غير منتظم بسبب تأثيرات جاذبية الشمس والأرض بصورة أساسية وكذلك جاذبية بعض الكواكب الأخرى. ويبلغ معدل بعد القمر عن الأرض 384,400 km، وأدنى مسافة له من مركز الأرض هي 362,570 km، أي في الحضيض perigee. وبعد أسبوعين تقريباً من حركته يكون عند أقصى مسافة 405,410 km، أي في الأوج apogee. وقطره الزاوي الظاهر من الأرض هو ضمن المدى (29.4' ← 33.5'). وتختلف السرعة المدارية orbital speed للقمر حول الأرض حسب قانون كبلر الثاني. ومع ذلك، تظل الفترة الدورانية المحورية ثابتة. وعندما يقترب القمر من الحضيض، تكون سرعته أكبر من المعدل.

والواقع هو أن القمر لا يدور حول مركز الأرض، وإنما يدور كل من الأرض والقمر حول مركز ثقلهما المشترك، ويدوران معاً حول الشمس، وبكلام أدق فإن المنظومة الشمسية كلها تدور حول مركز الثقل المشترك لها وليس حول مركز الشمس، ولكنه بسبب فرق الكتلة الكبير بين الشمس من جهة وبقية مكونات المنظومة الشمسية من جهة أخرى فإنه يبدو كأن هذه المكونات جميعاً (الكواكب وغيرها) تدور حول الشمس. ويتغير مركز ثقل المنظومة الشمسية باستمرار، ويعتمد موقعه على أماكن تواجد الكواكب

وبقية أجرام المنظومة في مداراتها، ويقع قريباً من الشمس أو ربما داخلها على بُعد ما من مركزها. وهكذا الحال لكل المجاميع الكتلية في الكون سواء كانت مجرات أو نجومًا أو كواكب أو غيرها، فإنها تدور حول مركز ثقل المجموعة التي تنتمي إليها.

يميل مستوى مدار القمر حول الأرض عن مستوى مدار الأرض حول الشمس (دائرة البروج) بزاوية تتغير بسبب تأثير جاذبية الشمس والأرض، ويبلغ معدلها 5.15° تقريباً. لذا يمكن أن يصل القمر إلى 5.15° شمال أو جنوب دائرة البروج. ويتقاطع مستويا المدارين في نقطتين تُدعى بالعقدة الصاعدة ascending node والعقدة النازلة descending node استناداً إلى حركة القمر شمالاً أو جنوباً نسبة إلى مدار الأرض كما في الشكل ٢-١٣. ويسمى الخط الواصل بين هاتين العقدتين خط العقدتين line of nodes. وعليه فإن ميل القمر عن خط الاستواء الأرضي يتغير أيضاً، ومقدار هذا التغير يتراوح بين 18.35° و



الشكل ٢-١٣: العقدتان الصاعدة والنازلة في مدار القمر.

28.65° . والسبب في ذلك هو أن القمر يميل عن مدار الأرض بـ 5.15° تقريباً كما ذكرنا وأن مدار الأرض يميل عن خط الاستواء بمقدار 23.5° . وعندما تكون العقدة الصاعدة للمدار

القمرية قريبة من الاعتدال الربيعي يكون القمر ضمن المدى ($28.65^\circ = 23.5^\circ + 5.15^\circ$) شمال أو جنوب خط الاستواء. وعندما تكون العقدة الهابطة قريبة من الاعتدال الربيعي فإن منطقة تواجد القمر هي ($18.35^\circ = 23.5^\circ - 5.15^\circ$) شمال أو جنوب خط الاستواء.

إن خط العقدتين لا يبقى ثابتاً دائماً، بل يتراجع أو يتقهقر ويكمل 360° في تراجه كل 18.6 سنة بسبب تأثير جاذبية الشمس والأرض وبعض الكواكب أحياناً على القمر. وهذه نفس فترة التمايد. وفي كل 9.3 سنة تأخذ كل من العقدتين موضع الأخرى. وتسمى دورة تراجع العقدتين والتي أمدها 18.6 سنة بدورة الساروس Saros التي كانت معروفة في الحضارة البابلية القديمة.

٢-١٠-٢: الشهور القمرية

2-10-2: Lunar Months

١- الشهر النجمي sidereal month: وهو فترة دورة القمر حول الأرض بالنسبة إلى نجم ثابت، وتعادل 27.3217 يوماً ($27^d 7^h 43^m 11.6^s$). وفي نفس هذه الفترة يكون القمر قد أكمل دورة واحدة حول محوره (الدورة المحورية)، ولهذا فإن نفس الجانب من القمر يواجه الأرض دائماً. ويعد هذا الدوران المتزامن أمراً شائعاً بين أقمار النظام الشمسي، حيث تدور جميع الأقمار الكبيرة تقريباً بشكل متزامن. وخلال هذه الفترة يقطع كل من الأرض والقمر $\frac{1}{13}$ تقريباً من مدارهما حول الشمس، أي 27.32° تقريباً. ويلاحظ وكأنما تحركت الشمس شرقاً 27.32° على القبة السماوية، أي بمعدل درجة واحدة تقريباً في اليوم.

٢- الشهر الاقتراني synodic month: تقاس هذه الدورة نسبة إلى نقطة الاقتران بالأرض أي المحاق، والتي عندها يكون القمر بين الأرض والشمس وعلى الخط الواصل بين مركزيهما، ويمكن تعريفه أيضاً بأنه الفترة الزمنية التي تتكرر فيها الأطوار القمرية، مثلاً من بدر إلى بدر. ويستغرق القمر خلال هذه الفترة 29.5306 يوماً ($29^d 12^h 44^m 2.9^s$) بالنسبة إلى الشمس. وتمثل هذه الدورة الشهر القمري حسب

التقويم الهجري.

وسبب

الاختلاف

الحاصل بين

مدتي الشهر

النجمي والشهر

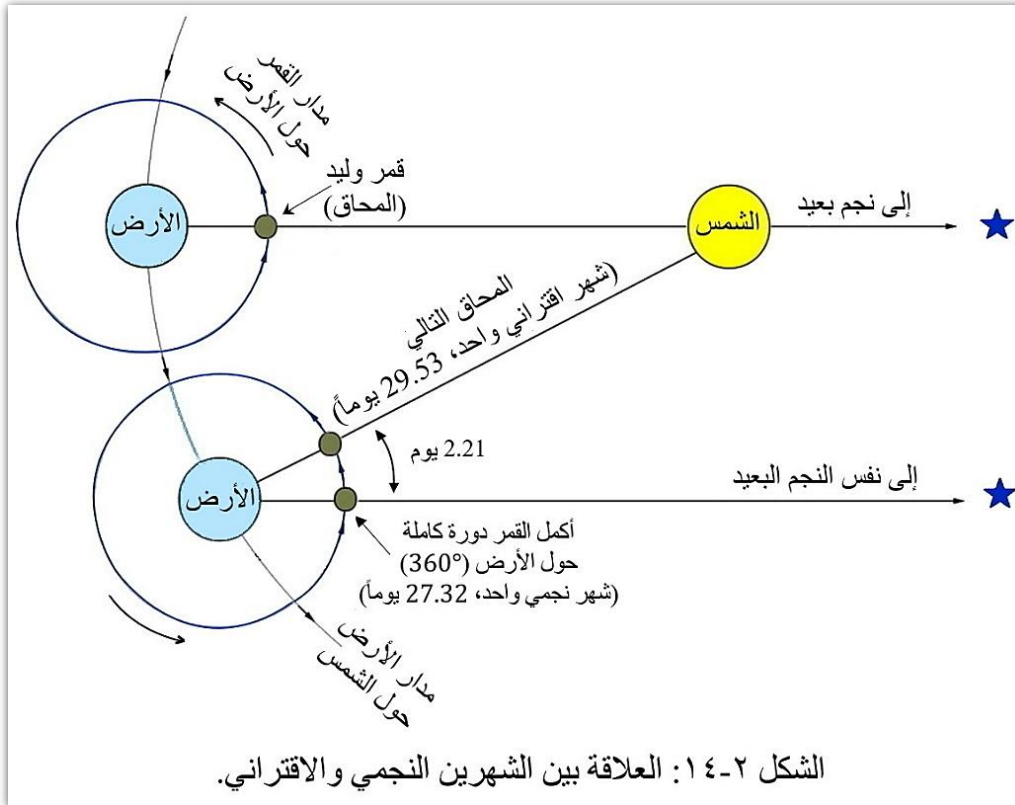
الاقتراني هو أنه

خلال مدة الدورة

النجمية للقمر

(27.32 يوماً)

تكون الأرض قد



قطعت في مدارها حول الشمس 27.32° تقريباً، أي بمعدل درجة واحدة يومياً، ولكن في نهاية هذه المدة نلاحظ بأن القمر لم يكن واقعاً في موضع المحاق (أي الخط الواصل بين الأرض والشمس)،

أي لم يكمل دورته نسبة إلى الشمس. ولكي يصل إلى وضع المحاق يستلزم أن يقطع 29.53° تقريباً كما هو موضح في الشكل ٢-١٤. وبما أنه يتحرك 13° يومياً تقريباً فلهذا يحتاج إلى يومين تقريباً لتكملة دورته الاقترانية.

وهناك أيضاً من الشهور القمرية: الشهر المداري والشهر الحضيضي والشهر العقدي.

٢-١٠-٣: أوجه القمر خلال دورته الاقترانية

2-10-3: Phases of the Moon During its Synodic Period

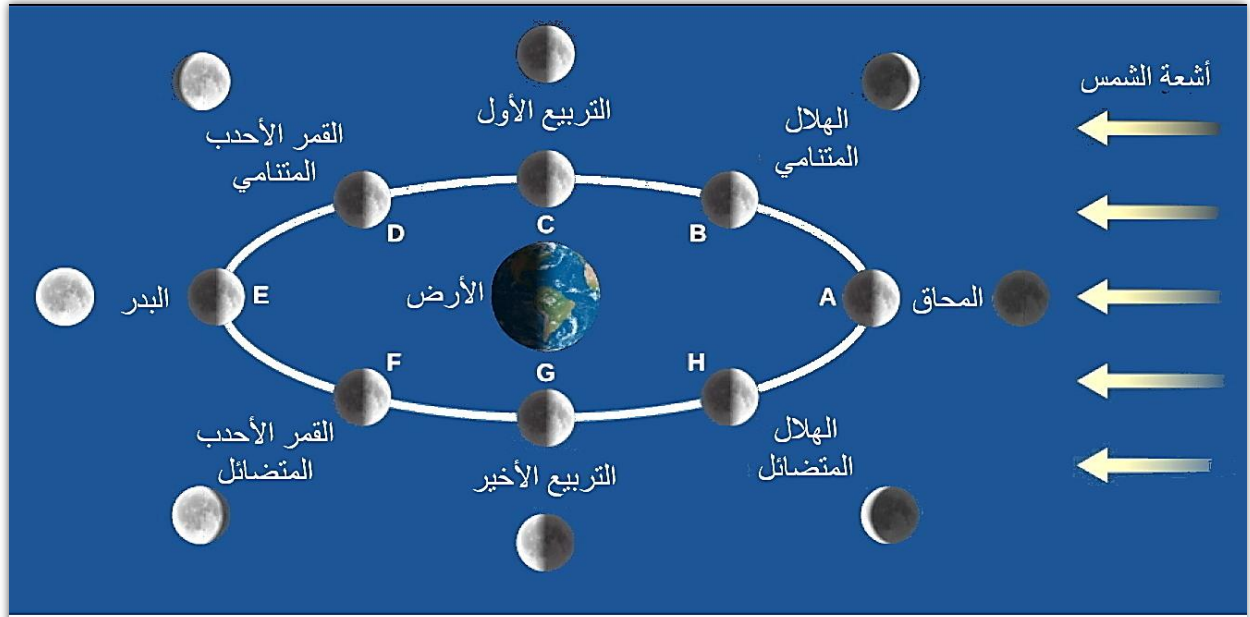
إن أشعة الشمس الساقطة على القمر تضيء نصف سطحه كما هو الحال على الأرض، وتنتج الأطوار المختلفة للقمر بسبب أن الجزء المضيء منه الذي نراه يتغير باستمرار، وفي أكثر الأحيان لا يمكن رؤية سوى جزء من القسم المضيء. وقد تُسمى الجهة الخلفية للقمر (الجهة التي لا نراها من الأرض) بـ "الجهة المظلمة". وهذا غير صحيح لأن الشمس تشرق وتغرب على جميع جوانب القمر. ويوضح الشكل ٢-١٥ المراحل المتغيرة للقمر.

في فترة المحاق (القمر الوليد أو الجديد new Moon) يكون موضع القمر بين الأرض والشمس ويكون وجهه المظلم مواجهاً للأرض، ووجهه المضيء في الجهة الأخرى. فلهذا لا يمكن رؤيته. ومع استمرار القمر في دورانه حول الأرض بمعدل 13.2° يومياً، يصبح جزء صغير من نصف الكرة المضاء مرئياً. ويُسمى هذا الشكل بالهلال crescent. ويمكن رؤية الهلال المتنامي ^١ waxing crescent Moon في السماء الغربية في المساء، بالقرب من غروب الشمس، ويبقى فوق الأفق بعد غروب الشمس. مع تحرك القمر أبعد في مداره، يصبح المزيد من جانبه المضيء مرئياً كل ليلة، أي يستمر الهلال في النمو. وفي الوقت نفسه يبتعد عن الشمس. وبعد أسبوع تقريباً بعد أن تحرك القمر ربع المسافة حول الأرض يصنع مع الأرض والشمس زاوية قائمة (90°)، ويكون على هيئة نصف دائرة، حيث يرى النصف الأيمن فقط مضاءً. ويسمى هذا الطور بالتربيع الأول (أو الربع الأول) first quarter. ومع تحرك القمر إلى ما بعد الربع الأول، يمكننا رؤية أكثر من نصف جانبه المضيء. وتُسمى هذه المرحلة "القمر الأحدب المتنامي waxing gibbous Moon".

ثم تزداد نسبة إنارة القمر الأحدب كل ليلة حتى تصبح الأرض بين الشمس والقمر بعد أسبوعين تقريباً من المحاق، ونرى الجانب المشرق بالكامل من القمر الذي يسمى البدر full Moon.

(١) يُسمى متنامياً لأنه سيكبر في الأيام التالية بخلاف أطوار القمر في النصف الثاني من الشهر، فإنها تتضاءل.





الشكل ٢-١٥: تُظهر الدائرة الداخلية للصور القمر أثناء دورانه حول الأرض كما يراه الراصد من الفضاء بعيداً عن القطب الشمالي للأرض. وتُظهر الحلقة الخارجية للصور أطوار القمر كما تُرى من الأرض.

ويكون النصف الثاني من مدار القمر (أي في النصف الثاني من الشهر) مثل النصف الأول تماماً، ولكن في الاتجاه المعاكس. فيصبح على هيئة نصف دائرة مرة أخرى بعد أسبوع من طور البدر، حيث يُرى النصف الأيسر فقط مضاءً، ويدعى هذا الطور بالتربيع (أو الربع) الثالث أو الأخير last quarter. ثم تستمر إضاءته بالتضاؤل إلى أن يصبح هلالاً مرة أخرى ويظهر قبل شروق الشمس ثم يختفي ويعود إلى موقعه الأول (المحاق). وبعدها يكون الهلال الرفيع الذي نشاهده غرباً عند غروب الشمس، والذي يشير إلى بداية شهر اقتراني آخر.

2-11: Eclipse

٢-١١: الخسوف والكسوف

الكسوف eclipse هو حدث فلكي يقع عندما يُحجب جسم سماوي مؤقتاً نتيجة مروره في ظل جسم آخر، أو عند مرور جسم آخر بينه وبين الراصد. ويحدث هذا بين الشمس والأرض والقمر، وبين الكواكب وأقمارها، ويحدث فيما بين النجوم فيكسف نجمٌ نجماً آخر، وبين النجوم وتوابعها. إن للشمس والقمر نفس الحجم الظاهري في السماء تقريباً. ورغم أن قطر الشمس أكبر بما يقارب 400 مرة من قطر القمر، إلا أنها أيضاً أبعد بـ 400 مرة تقريباً، لذا فإن كلاً من الشمس والقمر لهما نفس القطر الزاوي تقريباً ($\sim 0.5^\circ$). ونتيجة لذلك يمكن للقمر - كما يُرى من الأرض - أن يغطي تمام قرص الشمس. إذا كان مسار القمر في السماء مطابقاً لمسار الشمس (دائرة البروج)، فقد يحدث كسوف للشمس أو خسوف للقمر كل شهر كلما أصبح القمر أمام الشمس أو في ظل الأرض. ولكن مدار القمر يميل

بالنسبة إلى مستوى مدار الأرض حول الشمس بنحو 5.15° . ونتيجة لذلك يكون القمر أعلى أو أسفل مستوى دائرة البروج بدرجة كافية لتجنب حدوث الكسوف والخسوف خلال معظم الشهور. ولكن عندما يتقاطع المساران عند العقدتين يكون الكسوف والخسوف ممكنين. يتكون ظل الأرض والقمر من جزأين: مخروط cone حيث يكون الظل حالكاً، ويسمى الظل أو الظل التام umbra or full shadow، ومنطقة ظلام أخف وأكثر انتشاراً تسمى شبه الظل أو الظل الجزئي penumbra or partial shadow كما في الشكل ١٦-٢.

2-11-1: Lunar Eclipse

٢-١١-١: خسوف القمر

يحدث الخسوف إذا وقع القمر في منطقة ظل الأرض بالنسبة للراصد الأرضي وكان بدرجة كما في الشكلين ١٦-٢ و ١٧-٢. وهذا يحدث عندما يكون القمر بدرجة وقريباً من إحدى العقدتين. ولكن هذا لا يحدث في كل شهر ما لم يقع مركز كل من هذه الأجرام الثلاثة على خط مستقيم واحد، وذلك بسبب ميلان مستوى مدار القمر عن دائرة البروج بزاوية معدلها 5.15° كما ذكرنا سابقاً. هنالك ثلاثة أنواع من الخسوف:

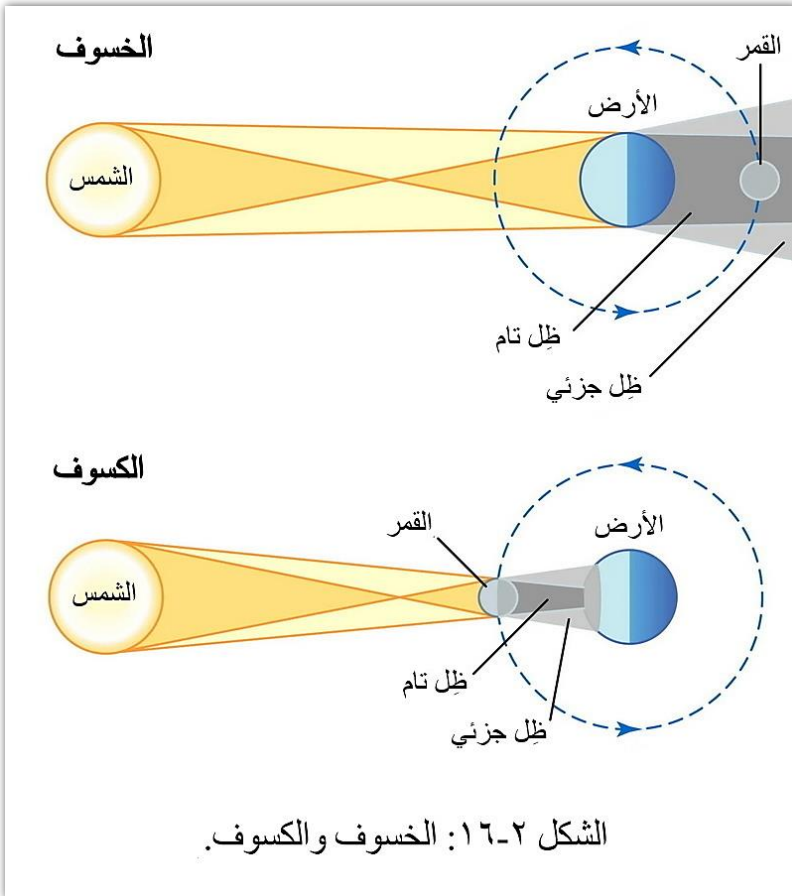
(١) خسوف كلي total eclipse: يحدث عندما يدخل قرص القمر بتمامه منطقة ظل الأرض. وفي هذه الحالة

ينخسف كامل قرص القمر.

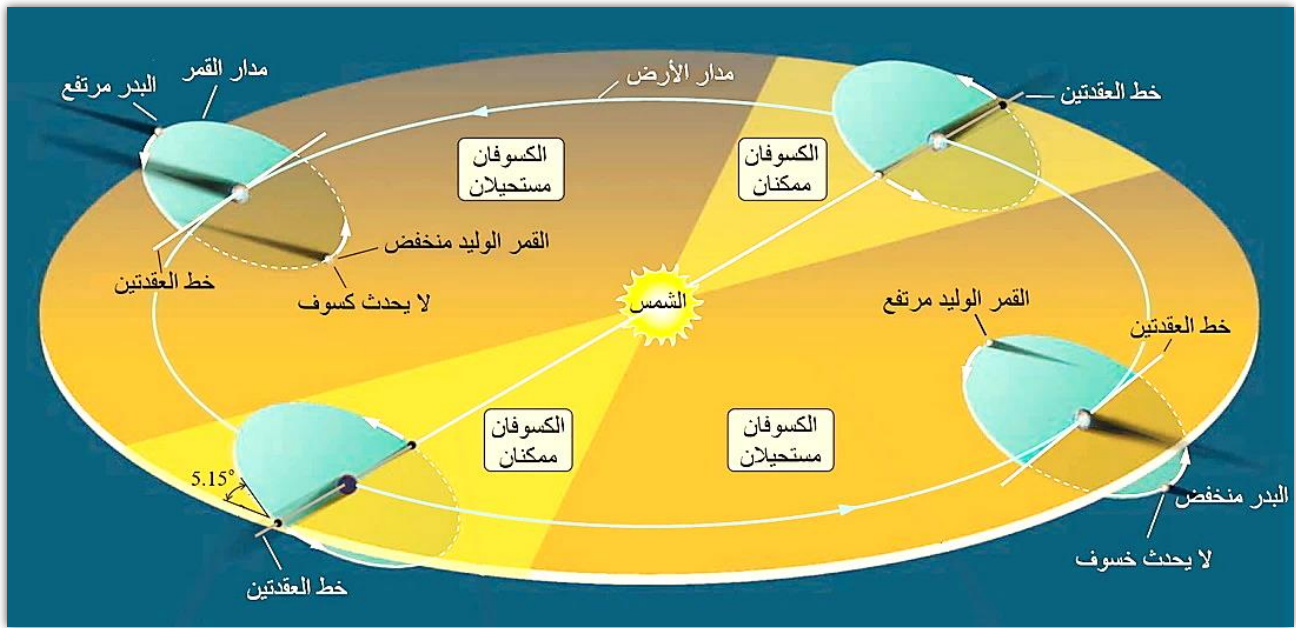
(٢) خسوف جزئي partial eclipse:

يحدث عندما يدخل جزء من القمر منطقة ظل الأرض، وفي هذه الحالة ينخسف جزء من قرص القمر، ويبدو ظل الأرض على وجه القمر.

(٣) خسوف شبه الظل penumbral eclipse: ويحدث عندما يدخل القمر منطقة شبه الظل فقط، وفي هذه الحالة يصبح ضوء القمر باهتاً من دون أن ينخسف.



إذن لكي يحدث الخسوف الكلي فلا بد أن يحدث قبله الخسوفان الجزئي وشبه الظل. وخلال الخسوف الكلي لا يختفي القمر كلياً بل يبقى سطحه باهتاً ذا لون برتقالي تقريباً بسبب انكسار الأشعة الحمراء من ضوء الشمس عند اختراقها للغلاف الجوي الأرضي بسبب الجسيمات الترابية العالقة في الطبقات الجوية. وذلك لأن الأطوال الموجية القصيرة في الطيف المرئي (مثل اللون البنفسجي والأزرق) تُستطار بشكل أكبر وتشتت في الفضاء، بينما تُستطار الأطوال الموجية الأطول (مثل الأحمر والبرتقالي) بمقدار أصغر وتمر عبر الغلاف الجوي وتصل إلى سطح القمر، مما يعطيه توهجاً برتقالياً مائلاً للحمرة.



الشكل ٢-١٧: احتمالات حدوث الخسوف والكسوف.

2-11-2: Solar Eclipse

٢-١١-٢: كسوف الشمس

يحدث كسوف الشمس عندما يكون القمر بين الشمس والأرض بشرط أن يكون في المحاق وقريباً من إحدى العقدين. وعندها يمتد خلف القمر ظل قائم مخروطي الشكل مولداً بقعة مظلمة على سطح الأرض.

ومن الممكن حدوث ثلاثة أنواع مختلفة من كسوف الشمس: كلي total وجزئي partial وحلقي annular. فبملاحظة الشكل ٢-١٦ يتبين أن الراصد في منطقة الظل التام لن يتمكن من رؤية أي جزء من سطح الشمس. وهذا هو الكسوف الكلي. ويحدث عندما يكون القمر والأرض أقرب لبعضهما البعض المعدل، حيث يبدو القمر أكبر في السماء من الشمس (القطر الزاوي للقمر أكبر من قطر الشمس).

وفي منطقة الظل الجزئي يستطيع الراصد رؤية جزء من قرص الشمس، حيث يحجب قرص القمر الضوء من الجزء الآخر من قرص الشمس، وهذا هو الكسوف الجزئي. ويحدث الكسوف الحلقي عندما يكون القمر بعيداً عن الأرض وقريباً من منطقة الأوج لدرجة أنه لا يحجب قرص الشمس كلياً، بل يترك حلقة رفيعة من ضوء الشمس حول أطراف القمر لأنه يبدو أصغر من الشمس (القطر الزاوي للقمر أصغر).

ويمكن أن يحدث ما يسمى بالكسوف الهجين hybrid eclipse (ويسمى أيضاً الكسوف الحلقي/الكلي)، وهو يحدث بسبب انحناء سطح الأرض، حيث يتحول الكسوف أحياناً بين الحلقي والكلي مع تحرك ظل القمر عبر الكرة الأرضية، وهو نادر الوقوع نسبياً.

٢-١١-٣: عدد مرات الخسوف والكسوف السنوية

2-11-3: The Number of Annual Lunar and Solar Eclipses

من المتوقع أن يكون الحد الأعلى لحدوث ظاهرتي الكسوف والخسوف سبعة في السنة (4 أو 5 للشمس و 3 أو 2 للقمر)، والحد الأدنى هو اثنان كلاهما شمسي.

ومع ذلك فإن عدد مرات الكسوف الذي يحدث في مكان معين على سطح الأرض أقل بكثير من عدد مرات الخسوف في نفس ذلك المكان، لأن الكسوف لا يظهر إلا في منطقة محدودة من سطح الأرض، ويشاهد الكسوف الكلي من قبل سكان الأرض الموجودين ضمن دائرة الظل التام فقط، بينما يحتل خسوف القمر الكلي عند ظهوره نصف الكرة الأرضية المقابل له.

وتسمى الفترة التي تبقى فيها الشمس في العقدتين بفترة الخسوف والكسوف، حيث تبقى في كل عقدة أكثر من شهر، وهو ما يجعل كل كسوف يرافقه على الأقل خسوف واحد، إما قبله أو بعده بنصف شهر، والعكس صحيح. وتستغرق الشمس 346.62 يوماً كي تعود إلى نفس العقدة، وتلك الفترة تسمى السنة الكسوفية. لذلك يُتوقع بعد تلك الفترة أو نصفها حدوث خسوف وكسوف ما على سطح الأرض. وبسبب الفرق بين السنة الكسوفية والسنة الشمسية فإن القمر يعود إلى نفس النقطة التي يحدث فيها الخسوف أو الكسوف بعد 18 سنة و 11.3 يوماً أو ما تسمى بدورة الساروس للقمر.

٢-١١-٤: الفرق بين الخسوف والكسوف

2-11-4: The difference between the Lunar and Solar Eclipse

توجد عدة فروقات بين خسوف القمر وكسوف الشمس نوجزها بما يلي:

(١) يحدث الخسوف عندما يكون القمر بدرًا، أما الكسوف فيحدث عندما يكون القمر في المحاق.
(٢) يمكن مشاهدة الخسوف من مناطق واسعة من الأرض التي تواجه القمر لأن الأرض أكبر بكثير من القمر، لذا فإن الظل التام للأرض على مسافة بقدر بعد القمر يبلغ قطره حوالي 9200 km أو أكثر من 2.5 مرة من قطر القمر. أما الكسوف فلا يشاهد إلا في مساحة ضيقة على سطح الأرض يقطعها مخروط الظل، إذ أن أقصى قطر لهذا الظل لا يتجاوز 270 كم. أما منطقة شبه الظل فتكون أوسع بكثير. وتعتمد سرعة حركة الظل على الأرض على خط العرض والزوايا التي يميلها مخروط الظل عن سطح الأرض.

(٣) عندما نأخذ التأثيرات في الفقرة أعلاه بعين الاعتبار، فإن النتيجة هي أن الكسوف الكلي للشمس لا يمكن أن يستمر أكثر من 7.5 دقيقة، وعادةً ما يكون أقصر بشكل ملحوظ. بينما يمكن أن يستمر خسوف القمر الكلي لمدة تصل إلى ساعة و 40 دقيقة.

(٤) إن خسوف القمر آمن للمشاهدة دون أي حماية للعين أو احتياطات خاصة على عكس كسوف الشمس، حيث يمكن أن يؤدي النظر مباشرة إلى الشمس إلى تلف دائم في العين، لذلك يلزم استخدام حماية خاصة للعين أو تقنيات المشاهدة غير المباشرة عند مشاهدة الكسوف ما عدا الدقائق القليلة من الكسوف الكلي فإنها تكون آمنة للنظر إليها دون حماية.

٢-١١-٥: تحديد موعد حلول الشهر القمري

2-11-5: Determine the Date of the Lunar Month

يستخدم الشهر الاقتراني لغرض التقويم القمري الهجري، والذي يحدّد بالمدة الزمنية اللازمة لدوران القمر حول الأرض بالنسبة إلى الشمس، وتقاس من محاق إلى محاق آخر وتبلغ 29.5306 يوماً ($29^d 12^h 44^m 2.9^s$). وتحدّد بداية الشهر الاقتراني برؤية الهلال الرفيع بعد خروجه من طور المحاق في الجهة الغربية من السماء بعد غروب الشمس.

إن عملية تحديد رؤية الهلال تعتمد على عدة عوامل، منها:



(أ) العوامل الجغرافية: التي تعتمد على اختلاف خطوط الطول والعرض من بلد إلى آخر وتأثيرها على غروب الشمس والقمر في المواقع المختلفة، وهذا يؤدي إلى سهولة رؤيته في بلد وصعوبته في بلد آخر، وربما استحالة رؤيته في بلد ثالث.

(ب) العوامل الجوية المتغيرة: كالسماء الغائمة أو درجة احمرار الأفق ومقدار ضوءه المتأثر بالجسيمات الغبارية وغيرها العالقة في الجو، والتي تسبب عملية الإستطارة scattering والانعكاس الانتشاري المسمى بالهباء الجوي atmospheric aerosol.

(ج) العوامل الفلكية: مثل درجة قرب الهلال من الشمس وارتفاعه عن الأفق وشدة إضاءته وعمره ومدة مكثه بعد غروب الشمس.

أسئلة

- (١) إذا كانت المساحة السطحية للقمر ($3.795 \times 10^7 \text{ km}^2$)، فجد معدل بعده عن الأرض إذا كان قطره الزاوي 0.518° .
- (٢) إذا كانت كتلة الأرض ($5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$) وثابت الجذب العام ($6.674 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$) وكان ضوء الشمس يصل إلى الأرض خلال 8.31 دقيقة، فاحسب كتلة الشمس.
- (٣) احسب سرعة الإفلات من سطح الأرض إذا علمت أن كتلة الأرض ($5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$) وثابت الجذب العام ($6.674 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$) وقطر الأرض 12756 Km .
- (٤) يبلغ قطر القمر 3476 km ، ومعدل بعده عن سطح الأرض ($3.78 \times 10^5 \text{ km}$). ويبلغ قطر الشمس 1391000 km ، ومعدل بعدها عن الأرض ($1.496 \times 10^8 \text{ km}$). وضِّح لماذا يكون الحجمان الظاهريان للقمر والشمس في سماننا متساويين تقريباً.
- (٥) يبلغ معدل نصف قطر الأرض 6371 km . فهل ستظهر الأرض في سماء القمر أكبر مما يبدو القمر في سماننا أم أصغر؟ ثم احسب القطر الزاوي للأرض بالنسبة لمشاهد على القمر وقارنه مع القطر الزاوي للقمر في سماننا.
- (٦) إذا تحول 4 ملايين طن من مادة الشمس كل ثانية إلى طاقة من خلال التفاعلات النووية الاندماجية، فاحسب مقدار ما تفقده الشمس من المادة بهذه التفاعلات خلال مليون سنة، ثم بيِّن مدى تأثيره على كتلة الشمس الكلية.
- (٧) ما هو سبب البقع الشمسية؟
- (٨) ما هي سلسلة البروتون – البروتون في الشمس؟ بيِّن مع المعادلات.
- (٩) لماذا تكون الطبقة اللونية في جو الشمس غير مرئية؟
- (١٠) لماذا يتوقف وصول الأشعة الشمسية الكهرومغناطيسية ولا يتوقف وصول الدقائق الشمسية المشحونة أثناء الكسوف الكلي؟
- (١١) لماذا لا تحدث ظاهرة الشفق القطبي عند خط الاستواء الأرضي؟



- (١٢) تتعرض بعض ذرات الإكليل الشمسي إلى تأيين لمرات كثيرة. ما السبب الذي أدى إلى إزالة هذا العدد الكبير من الإلكترونات من هذه الذرات؟
- (١٣) لماذا تتمكن الأشعة السينية والأشعة فوق البنفسجية من تأيين الذرات الموجودة في الغلاف الجوي العلوي للأرض بخلاف الأشعة المرئية؟
- (١٤) لماذا تتحول أشعة غاما خلال الاصطدامات في مركز الشمس إلى فوتونات فوق بنفسجية؟
- (١٥) لماذا بقيت الشمس مستقرة خلال مليارات السنين؟
- (١٦) لماذا تكون مدة تأثير الكسوف الكلي على الأرض صغيرة ومدة الخسوف الكلي طويلة؟
- (١٧) لماذا لا نرى خسوفاً للقمر في كل مرة يكون فيها القمر بدرأً أو نشهد خسوفاً للشمس في كل مرة يكون فيها القمر في المحاق؟
- (١٨) لماذا هذا التفاوت الكبير بين مساحة مشاهدة الكسوف والخسوف الكليين؟
- (١٩) عند حدوث الخسوف الكلي أو الكسوف الكلي على الأرض، ما الذي تشاهده لو كنت على سطح القمر المواجه للأرض؟
- (٢٠) لماذا لا يحصل خسوف حلقي للقمر ويحصل كسوف حلقي للشمس؟
- (٢١) لماذا نرى دائماً نفس الوجه للقمر ولا نرى الوجه الآخر؟
- (٢٢) كيف تحدث العقدتان الصاعدة والنازلة؟
- (٢٣) لماذا لا نرى القمر خلال المحاق، ونراه على شكل نصف دائرة خلال التربيع الأول، ويبدو وجهه كاملاً عندما يكون بدرأً؟
- (٢٤) لماذا تبقى آثار أقدام رواد الفضاء الذين وطئوا سطح القمر لفترات طويلة؟
- (٢٥) ما سبب حدوث ظاهرة المد والجزر على الأرض؟
- (٢٦) ما هو سبب الاختلاف الحاصل بين مدتي الشهر النجمي والشهر الاقتراني للقمر؟ وضح مع الرسم.
- (٢٧) ما هي الدورة القمرية التي يعتمد عليها التقويم الهجري؟ وما هي العوامل الرئيسية في تحديد رؤية الهلال أول الشهر القمري؟
- (٢٨) سيكون الخسوف والكسوف أكثر حدوثاً إذا كان مدار القمر (أ) أكثر ميلاً بالنسبة لمستوى دائرة البروج، (ب) في مستوى دائرة البروج، (ج) له فترة أطول، (د) أكثر استطالة.
- (٢٩) اللون الأحمر للقمر أثناء الخسوف الكلي هو بسبب (أ) مرور ضوء الشمس عبر الغلاف الجوي للأرض، (ب) انعكاس ضوء الشمس من الأرض إلى القمر، (ج) ضوء الشمس المستطار بواسطة الجسيمات في فضاء ما بين الكواكب، (د) الشواظ الشمسي، (هـ) التأججات اللامعة.
- (٣٠) إن فترة دوران الشمس حول نفسها (أ) متزامنة مع مدار الأرض، (ب) أقصر عند خط الاستواء الشمسي مما عند خطوط العرض الأعلى، (ج) تختلف في دورة مدتها 11 عاماً، (د) غير محددة، لأن الشمس لا تدور على الإطلاق.
- (٣١) سبب وجود الأضواء الشمالية (الشفق القطبي) هو (أ) المجال المغناطيسي للأرض، (ب) الجسيمات المشحونة المنبعثة من الشمس، (ج) التوهجات الشمسية، (د) أكثر من سبب مما سبق.

مصادر الفصل الثاني

- ١- فيزياء الجو والفضاء ج ٢، د. حميد مجول وفياض النجم، 1981.
- 2- 21st century astronomy, Je- Hester et al, 3rd ed, 2010.
- 3- Astronomy Demystified, Stan Giblisco, 2003.
- 4- Astronomy. Andrew Fraknoi, David Morrison and Sidney C. Wolff, 2016.
- 5- Essential Astrophysics, Kenneth R. Lang, 2013.
- 6- Fundamental Astronomy, Hannu Karttunen et al, 5th Edition-2007.
- 7- <https://www.nasa.gov/>
- 8- Theory and Problems of Astronomy, Stacy E. Palen, Schaum's Outline Series, 2002.

فهرست الفصل الثاني

الموضوع	الصفحة	٢-١٠-٣: أوجه القمر خلال دورته الاقترانية	٢٧
١-٢: الشمس	١	١١-٢: الخسوف والكسوف	٢٨
٢-٢: الخصائص الأساسية للشمس	٢	١١-٢: خسوف القمر	٢٩
١-٢-٢: قطر الشمس	٢	١١-٢: كسوف الشمس	٣٠
٢-٢-٢: كتلة الشمس	٣	١١-٢: عدد مرات الخسوف والكسوف السنوية	٣١
٣-٢-٢: درجة الحرارة السطحية	٣	١١-٢: الفرق بين الخسوف والكسوف	٣٢
٤-٢-٢: الدوران الشمسي	٦	١١-٢: تحديد موعد حلول الشهر القمري	٣٢
٣-٢: مكونات الشمس	٧	أسئلة	٣٣
١-٣-٢: العناصر الكيميائية	٧	مصادر الفصل الثاني	٣٥
٢-٣-٢: الطبقات الداخلية للشمس	٨		
٣-٣-٢: الغلاف الجوي الشمسي	٩		
٤-٢: النشاط الشمسي	١١		
١-٤-٢: البقع الشمسية	١١		
٢-٤-٢: الإشعاع الشمسي	١٢		
٣-٤-٢: الرياح الشمسية	١٣		
٤-٤-٢: ظواهر شمسية أخرى	١٤		
٥-٢: الطاقة الشمسية	١٥		
٦-٢: التوازن داخل الشمس	١٨		
٧-٢: القمر	١٩		
٨-٢: الخصائص الأساسية للقمر	١٩		
١-٨-٢: القطر	١٩		
٢-٨-٢: الكتلة	٢١		
٣-٨-٢: الجاذبية السطحية	٢١		
٤-٨-٢: سرعة الإفلات	٢٢		
٩-٢: سطح القمر وغلافه الجوي	٢٣		
١٠-٢: حركات القمر المدارية والمحورية	٢٤		
١-١٠-٢: مدار القمر	٢٤		
٢-١٠-٢: الشهور القمرية	٢٦		