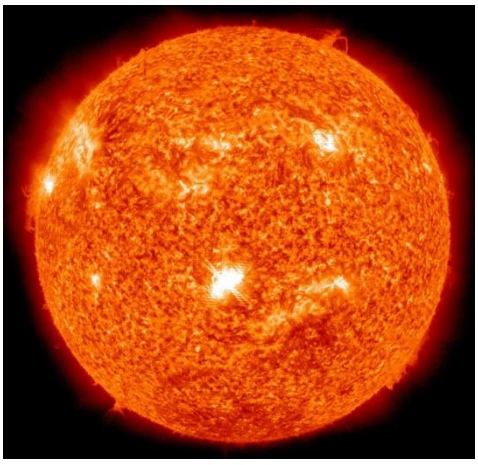
د. مُظفر جاسم
٢٠٢٣-٢٠٢٤

الفصل الثاني

الشَّمسُ والقَمَر

Sun and Moon



٢-١: الشمس 2-1: The Sun

تُعدُّ الشمس أقرب نجم إلينا، وهي إحدى النجوم النموذجية المتوسطة في الحجم والعمر بين ما يقدر بـــ (100 – 400) مليار نجم في مجرتنا (درب التبّانة Milky Way)، وتدور حول مركز المجرة بمدة تُقدّر بما يقارب 220 مليون سنة بسرعة تقارب $220\ km/s$، وكتلتها أكبر من كتلة الأرض بأكثر من 300,000 مرة، وحجمها أكبر من حجم الأرض بما يقارب 1.3 مليون مرة، وتُنتج طاقة في الثانية الواحدة أكبر مما يمكن أن تنتجه 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، والتي ربما أدت إلى ولادة 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: الشمس، والكواكب plants (عطارد والزهرة والأرض والمريخ والمشتري وزحل وأورانوس ونبتون)، والكواكب الأقزام dwarf planets، والأقمار أو التوابع satellites، والكويكبات minor plants، والشهب meteors، والمذنبات comets، والغازات 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

الخاصية	قيمتها
معدل البعد mean distance	$1AU = 149{,}597{,}870\ km$
أقصى بعد عن الأرض (الأوج) maximum distance from Earth (aphelion)	$1.521 \times 10^8\ km$
أدنى بعد عن الأرض (الحضيض) minimum distance from Earth (perihelion)	$1.471 \times 10^8\ km$
الكتلة mass	$M_\odot = 1.99 \times 10^{30}\ kg$ (~333,400 كتلة أرضية)
معدل القطر الزاوي mean angular diameter	$0.533°$
قطر الغلاف الضوئي diameter of photosphere	$D = 1.391 \times 10^6\ km$ (109.3 قطر أرضي)
معدل الكثافة mean density	$\bar{\rho} = 1.41\ g/cm^3$
الكثافة المركزية central density	$\rho_c = 160\ g/cm^3$
تعجيل الجاذبية في الغلاف الضوئي (الجاذبية السطحية) gravitational acceleration at photosphere (surface gravity)	$g = 273\ m/s^2$ (27.9 × الجاذبية الأرضية)
سرعة الإفلات من سطح الشمس escape speed from the surface of Sun	$v_{esc} = 618\ km/s$
الثابت الشمسي solar constant	$S_\odot = 1370\ W/m^2$
اللمعان luminosity	$L_\odot = 3.85 \times 10^{26}\ W$
الطبقة الطيفية spectral class	G2V
درجة الحرارة الفعالة effective temperature	$T_e = 5800\ K$
درجة الحرارة المركزية central temperature	$T_c = 1.5 \times 10^7\ K$
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	$i = 7.2°$
التركيب الكيميائي chemical composition	~73% هيدروجين و ~7.8% هيليوم و ~2% بقية العناصر

٢-٢: الخصائص الأساسية للشمس 2-2: Basic Properties of Sun

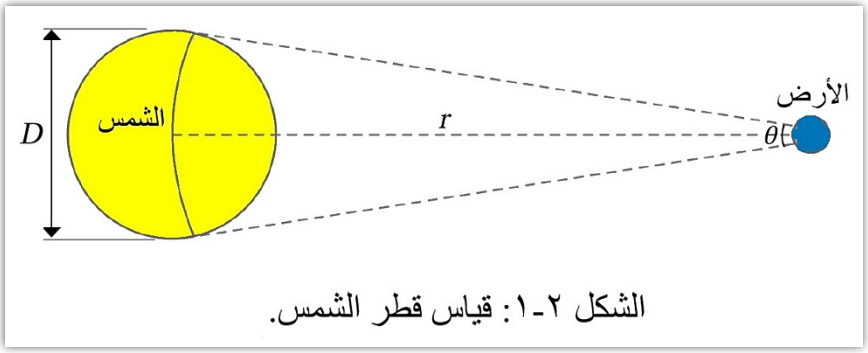
٢-٢-١: قطر الشمس 2-2-1: Diameter of the Sun

يمكن حساب قطر الشمس بعد معرفة القطر الزاوي لها θ والذي يبلغ $0.533°$ باستخدام العلاقة التالية:

$$\frac{D}{\theta} = \frac{2\pi r}{360°} \qquad \dots\dots 2.1$$

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

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



الشكل ٢-١: قياس قطر الشمس.

٢-٢-٢: كتلة الشمس 2-2-2: Solar Mass

يُمكن حساب كتلة الشمس من الصيغة الدقيقة لقانون كبلر الثالث

$$m_S + m_p = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} \qquad \ldots\ldots 2.2$$

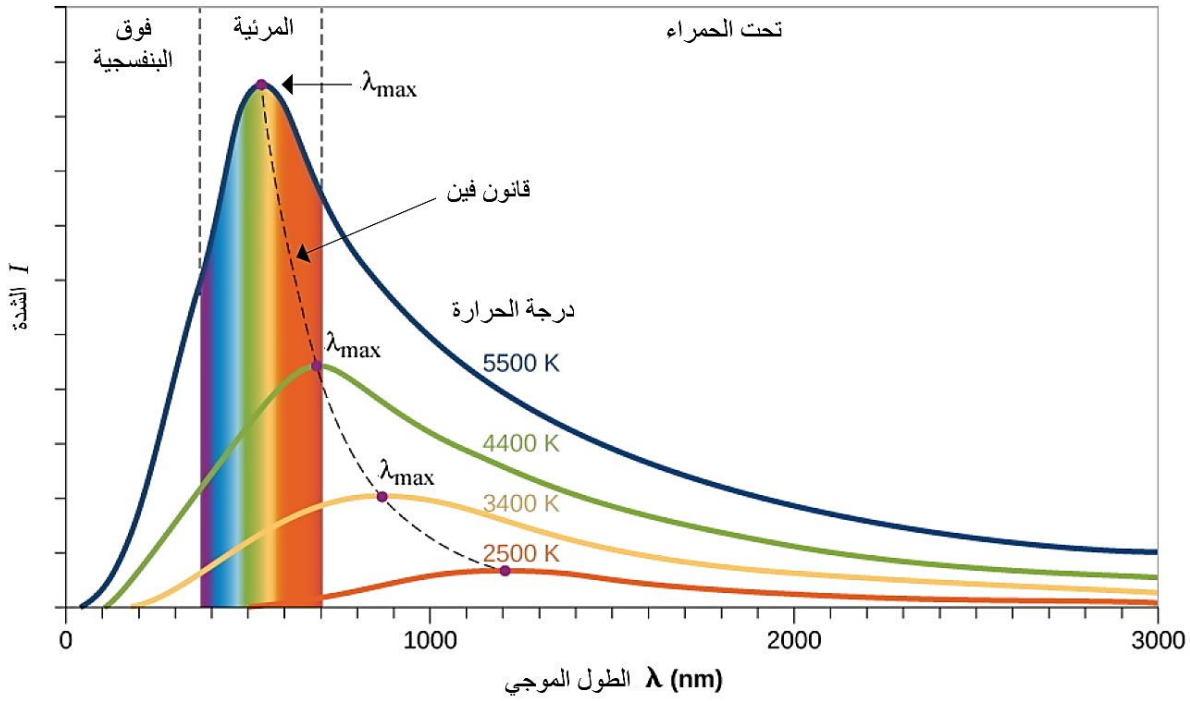
حيث أن m_S: كتلة الشمس، و m_p: كتلة الكوكب، والكوكب هنا هو الأرض. و r: معدل بعد الأرض عن الشمس $(1.496 \times 10^{11}\ m)$، و T: الزمن الدوراني للأرض حول الشمس $(3.156 \times 10^7\ s)$، و G: ثابت الجذب العام $(6.674 \times 10^{-11}\ N.m^2/kg^2)$.

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

٢-٢-٣: درجة الحرارة السطحية 2-2-3: Surface Temperature

يمكن حساب درجة حرارة النجوم (كالشمس) من خلال مقارنتها مع الجسم الأسود، وهو النظام المثالي الذي يمتص كل الإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط عليه بغض النظر عن تردده ولا يعكس شيئاً منه. ولا يوجد مثل هذا الجسم في الطبيعة من الناحية العملية، لكن الشمس والنجوم المماثلة لها يطبق عليها هذا القانون بصورة تقريبية. ولهذا يمكن اعتبارها مشابهة للجسم الأسود المثالي.

توصف درجة حرارة سطح النجم بدرجة الحرارة الفعالة effective temperature T_e، وتُعرّف بأنها درجة حرارة الجسم الأسود الذي يبعث نفس كمية الإشعاع الكهرومغناطيسي مثل الجسم. ويبين الشكل ٢-٢ النتائج التجريبية للعلاقة بين شدة إشعاع الجسم الأسود والطول الموجي في درجات حرارة مختلفة.



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

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

١- **قانون ستيفان- بولتزمان** Stefan-Boltzmann law: تتناسب الطاقة المشَعة في وحدة الزمن لوحدة المساحة السطحية من الجسم المُشِع 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:

$$R = \sigma T_e^4 \qquad \ldots\ldots 2.3$$

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

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

١) وهو 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.

بعد الشمس تُستنتج القدرة الكلية المشَعة ($3.85 \times 10^{26}\ W$). وبما أن المساحة السطحية للشمس تعادل ($6.1 \times 10^{18}\ m^2$) تقريباً فإنه:

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

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

ودرجة الحرارة بهذه الطريقة تمثل المعدل على السطح الكلي.

٢- قانون بلانك Planck's Law: يفسِّر 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 ڤين Wien's Law: وَجد ڤين 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 محدَّدة للإشعاع كما في الشكل ٢-٢، وتزاح λ_{max} نحو قيم أدنى بزيادة درجة حرارة الإشعاع. وعليه لو زادت درجة حرارة سطح انبعاثي (كالنجم) فإن ذروة الانبعاث تتحرك في الطيف المرئي من اللون الأحمر إلى البرتقالي إلى الأصفر إلى الأخضر إلى الأزرق إلى البنفسجي ثم إلى الطيف فوق البنفسجي. وعليه فإن لون النجم يعتمد على درجة حرارته. أي إن λ_{max} تتناسب عكسياً مع درجة الحرارة. وهذا السلوك يوصف بالعلاقة التالية التي تُدعى بقانون إزاحة ڤين:

$$\lambda_{max}\,T = \text{const.} = 2.898 \times 10^{-3}\ m.K \qquad \ldots\ldots 2.4$$

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

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 المشَعة الكلية لوحدة المساحة السطحية؟ (ج) هل تبقى القدرة في الفرع "ب" نفسها عند وصول الأشعة الشمسية للأرض وكيف؟

الحل: (أ)

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

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

(ج) هذه القدرة الهائلة $(R = 6.42 \times 10^7\ W/m^2 = 64.2\ MW/m^2)$ التي حصلنا عليها في الفرع "ب" هي الشدة عند سطح الشمس، التي هي كرة نصف قطرها $(6.96 \times 10^8\ m)$. وعندما تصل هذه الطاقة المشَعة إلى الأرض التي تبعد $(1.5 \times 10^{11}\ m)$ تقريباً فإن الشدة تقل بمقدار المعامل[١] $\left[\left(\frac{6.96\times10^8\ m}{1.5\times10^{11}\ m}\right)^2 = 2.15 \times 10^{-5}\right]$ لتصبح $1.4\ kW/m^2$ تقريباً.

مثال ٢-٢: إذا كان الإشعاع المنبعث من نجم قزم أحمر ذي طول موجي أقصى $1200\ nm$،[٢] فما هي درجة حرارة هذا النجم بافتراض أنه جسم أسود؟

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

٢-٢-٤: الدوران الشمسي 2-2-4: The Solar Rotation

استُنتج 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 $(\phi = 0°)$ 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

---

١) لماذا تقل بهذا المقدار؟

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

40°، و 36 يوماً عند خط العرض 80°. وربما يكون سبب هذه الظاهرة هو تأثيرات تيارات الحمل السطحية على الدوران الشمسي مما يؤكد على أن الشمس جرم غازي.

بما أن الأرض تدور حول الشمس في نفس الاتجاه الذي تدور فيه الشمس، فإن فترة دوران الشمس المرصودة من الأرض تبلغ 27 يوماً تقريباً وليس 25 يوماً، وفترة الدوران الأقصر هي فترة 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 $7200\ km/h$.[1]

٢-٣: مكونات الشمس 2-3: Components of the Sun

٢-٣-١: العناصر الكيميائية 2-3-1: Chemical Elements

يمكن استخدام طيف خط امتصاص النجم 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 والنتروجين والكربون والمغنيسيوم والحديد وغيرها) تشكل كتلها 2% فقط من كتلة الشمس (0.2% من عدد ذرات الشمس)[2]. 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 تماماً للنجوم بشكل عام.

---

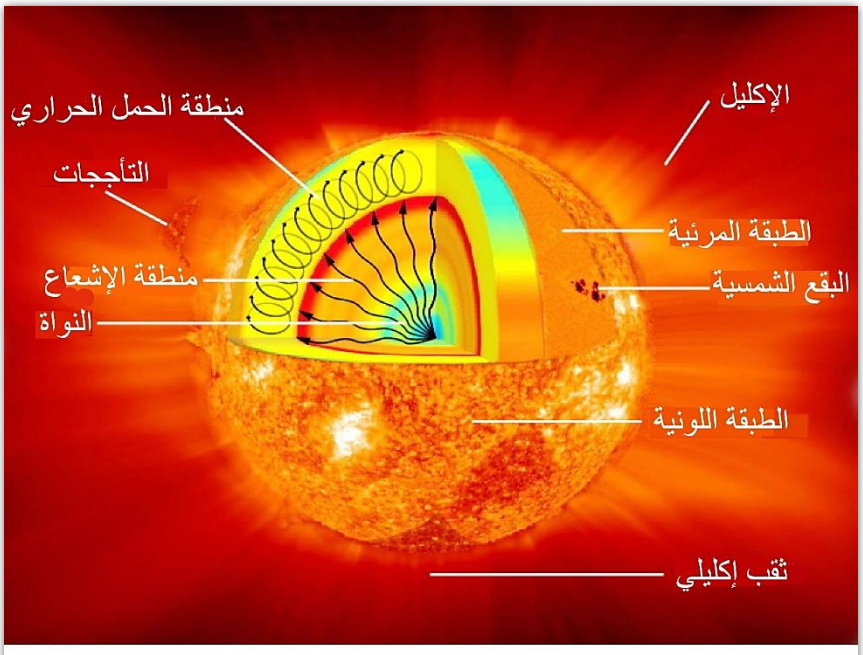
١) احسب الزمن الدوراني عند خط الاستواء الشمسي.

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 أحياناً يجدون صعوبة في قبول الأفكار الجديدة التي لا تتفق مع ما يعتقدون أنه هو الحق.
رغم 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.

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. وفي الواقع، إن الشمس شديدة الحرارة لدرجة أن العديد من الذرات الموجودة فيها تتأين، أي يتم تجريدها من واحد أو أكثر من إلكتروناتها. وتعني إزالة الإلكترونات من ذراتها أن هناك كمية كبيرة من الإلكترونات الحرة 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 2-3-2: The Inner Layers of the Sun

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.



الشكل ٢-٣: الأجزاء المختلفة للشمس.

توجد فوق النواة منطقة تُعرف باسم منطقة الإشعاع radiative zone، أي اشعاع 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 لطاقته.

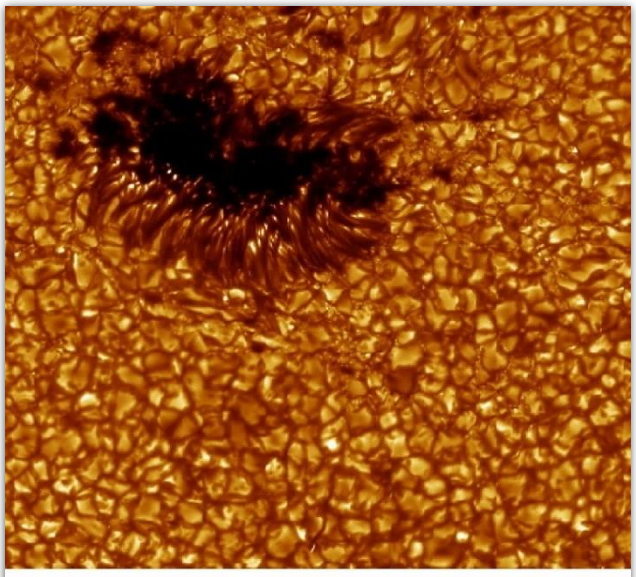
تُعد منطقة الحمل الحراري convective zone الطبقة العليا للطبقات الداخلية الشمسية. وهي طبقة سميكة على عمق 200,000 km تقريباً، وتنقل الطاقة من حافة المنطقة الإشعاعية إلى السطح من خلال خلايا الحمل الحراري العملاقة. وتكون البلازما الموجودة في أسفل منطقة الحمل الحراري ساخنة جداً، وتطفح إلى السطح، حيث تنتقل 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 السطح البراق لكرة الشمس الغازية المتوهجة، وتدعى أيضاً بالكرة الضوئية أو الطبقة المرئية، حيث يكون الغاز غير شفاف بحيث لا نرى 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 قلب 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، ويمكن للفوتونات أخيراً الهروب من الشمس دون الاصطدام بذرة أو أيون آخر.



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

تُظهر الأرصاد باستخدام المراقب الفلكية telescopes أن الغلاف الضوئي له مظهر الحبيبات granules بسبب الحمل الحراري الشمسي solar convection على السطح (لاحظ الشكل ٢-٤)، والتي يبلغ قطرها عادةً ما بين 700 إلى 1000 كيلومتر، وتبدو كمناطق مضيئة محاطة بمناطق ضيقة وأكثر عتمة (أكثر برودة). وعمر

الحبيبة المنفردة هو 5 إلى 10 دقائق فقط. والأكبر من ذلك هي الحبيبات الفائقة، التي يبلغ عرضها 35000 كيلومتر تقريباً وتستمر 24 ساعة تقريباً.

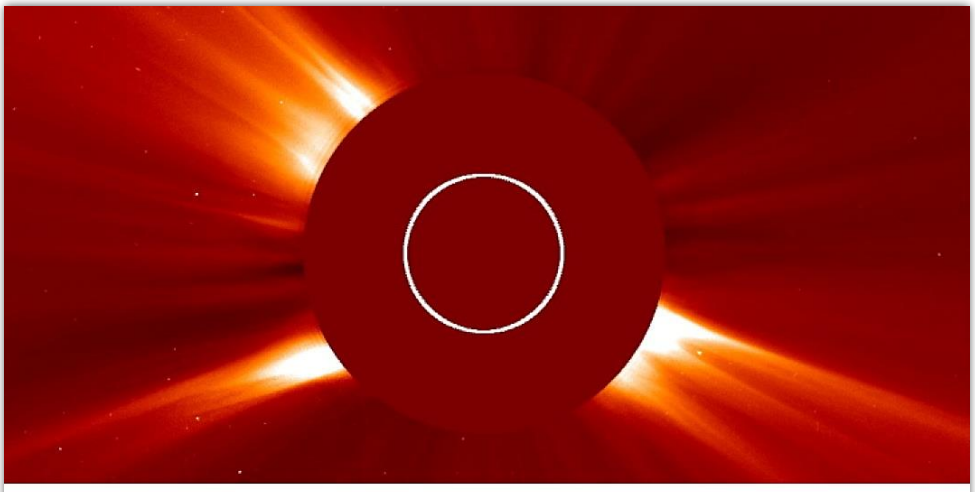
٢- الطبقة اللونية chromosphere، أو الكرة اللونية: هي الطبقة الموجودة مباشرة فوق الطبقة المرئية، وعادةً لا تكون الطبقة اللونية مرئية لأن إشعاعها أضعف بكثير من إشعاع الطبقة الضوئية. ولكن يمكن مشاهدتها على شكل حلقة ملونة أثناء الكسوف الشمسي، وتظهر الأرصاد التي تمت أثناء الكسوف أن سُمك الطبقة اللونية يبلغ 2000 إلى 3000 كيلومتر تقريباً، وهي ذات كثافة أقل من كثافة الطبقة الضوئية. وتزداد درجة حرارتها من K 5000 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 للشمس، والتي تبدأ 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 الفضائية المدارية أو استعمال أداة خاصة تسمى الكوروناغراف coronagraph تزيل وهج الشمس من الصورة باستخدام قطعة دائرية من المادة تحجب قرص الشمس، (لاحظ الشكل ٢-٥). ويقارب سطوع الإكليل سطوع البدر، لذا من الصعب رؤيته بجانب الغلاف الضوئي الساطع إلا أثناء الكسوف. وتظهر 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 إلكتروناً واحداً على الأقل. ويسمى الغاز في هذه الحالة بالبلازما plasma. وبعض هذه الذرات شديدة التأين، مثل الحديد المتأين ثلاث عشرة مرة. وهذا يعني وجود طاقة كبيرة أزالت هذا العدد الكبير من الإلكترونات من الذرة. وتبلغ درجة حرارة الهالة بأكملها مليون درجة تقريباً. وتوجد حاجة إلى إمدادات مستمرة من الطاقة من أجل الحفاظ على درجة حرارة الإكليل المرتفعة. ووفقاً للنظريات المطروحة في الماضي فإن مصدر الطاقة هو موجات صدمية صوتية أو هيدروديناميكية مغناطيسية acoustic or magnetohydrodynamic shock waves متولدة

على سطح الشمس عن طريق الحمل الحراري. وفي الآونة الأخيرة تم اقتراح فكرة التسخين بواسطة التيارات الكهربائية الناتجة عن تغير المجالات المغناطيسية، وستتولد حينئذ الحرارة في الإكليل كما هو الحال في المصباح الكهربائي الاعتيادي.

ينتشر الغاز الإكليلي بصورة واسعة جداً بحيث يكون إجمالي الطاقة المخزنة فيه صغيراً. وهي تتدفق باستمرار إلى الخارج، وتتحول تدريجياً إلى رياح شمسية تحمل تدفقاً من الجسيمات بعيداً عن الشمس بسبب الانخفاض النسبي للجذب الثاقلي عند هذه المسافات البعيدة نسبياً عن الشمس. ويُستبدل الغاز المفقود بهذه الطريقة بمواد جديدة من الغلاف اللوني.



الشكل ٢-٥: الإكليل الشمسي. تم التقاط هذه الصورة للشمس بتاريخ 2016-3-2 بواسطة جهاز الكوروناغراف. 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.

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

والجواب هو إن هذه الرياح لا تصاحبها كمية كبيرة من الطاقة الحرارية، فعدد السعرات 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 جوّ الأرض.

٢-٤: النشاط الشمسي 2-4: Solar Activity

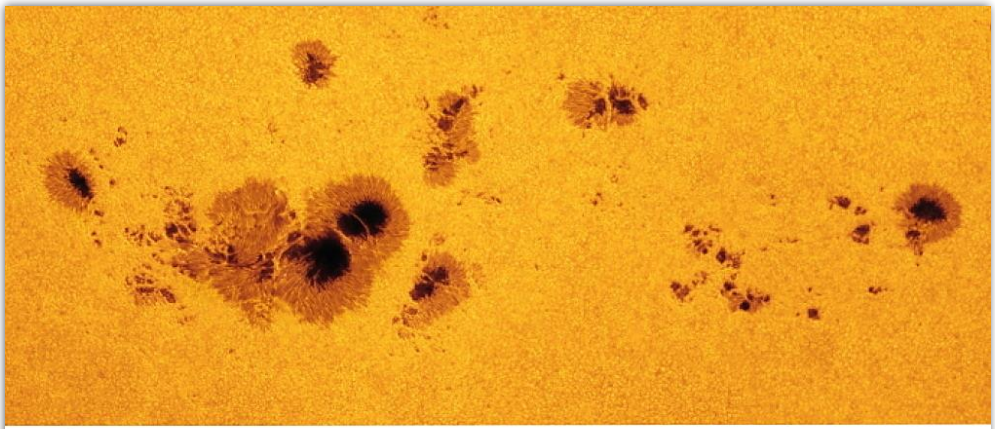
٢-٤-١: البقع الشمسية 2-4-1: Sunspots

وتسمى أيضاً (الكلف الشمسي)، وهي مناطق داكنة تظهر بأحجام مختلفة على سطح الشمس بسبب زيادة النشاط المغناطيسي. ويكون لها عادة شكل واضح التحديد يتألف من منطقة مركزية داكنة تدعى 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 السُحُب. ولها مجالات مغناطيسية قوية تقوم بحبس المواد التي تم نقلها 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 المضيئة التي تحيط بها $5800\ K$ 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. وهي تظهر داكنة على النقيض من الغلاف الضوئي الأكثر سخونة وسطوعاً من حولها.

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.

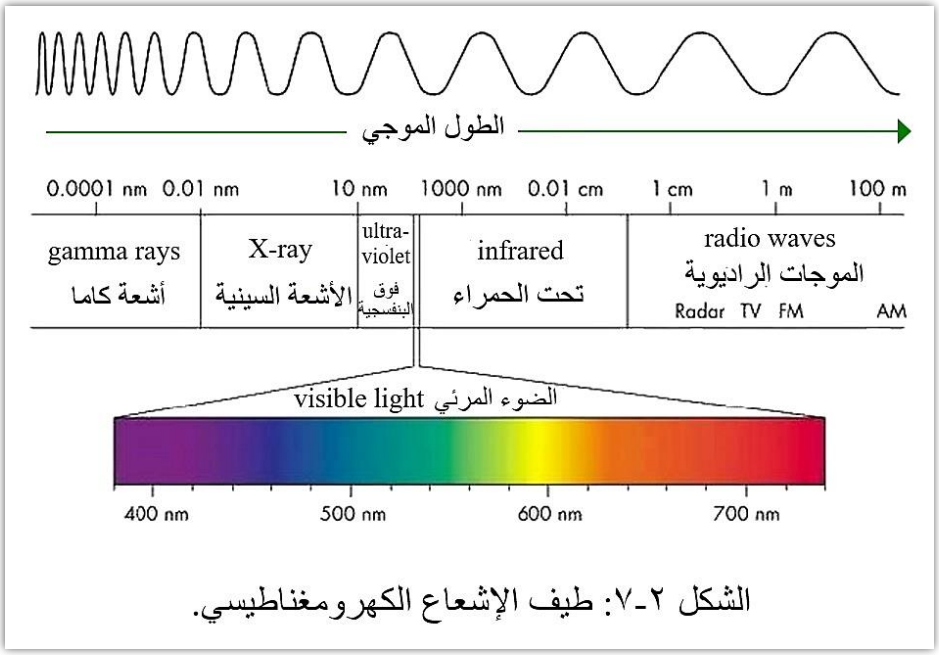
يبلغ قطر البقعة الشمسية النموذجية $10{,}000\ km$ تقريباً، ويتراوح عمرها من بضع ساعات إلى بضعة أشهر حسب حجمها. ومن المرجح أن تكون البقع الأكبر طويلة العمر. وتصبح العديد من البقع أكبر بكثير من الأرض، وقد يصل قطر بعضها إلى أكثر من $140{,}000\ km$. ومن خلال متابعة حركات البقع يمكن تحديد فترة دوران الشمس المحورية.



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.

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 ٢-٧). ومن ميزات هذا الإشعاع (خاصة ما يتعلق بتأثيره على الأرض) أنه يسير في خطوط مستقيمة وبسرعة الضوء ($3 \times 10^8\ m/s$). 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.



الشكل ٢-٧: طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي.

تُعد المناطق النشطة في الشمس مصدراً لمعظم انبعاث 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 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 ضوء الشمس الوارد. ويتكون ضوء الشمس الذي يصل 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.

٢-٤-٣: الرياح الشمسية 2-4-3: Solar Wind

هي تدفق من الجسيمات المشحونة، معظمها من الإلكترونات والبروتونات، ينتج من الغلاف الجوي العلوي للشمس، أي من طبقة الإكليل. وتبلغ سرعة الرياح $400\ km/s$ تقريباً (ما يقارب مليون ونصف المليون كيلومتر في الساعة)[١] عند مسافة بقدر بعد الأرض عن الشمس، وكثافتها $10\ particles/cm^3$. ولكن كلا 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 $120{,}000\ K$ و $140{,}000\ K$ 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.

إن الدقائق المشحونة هذه لا يتوقف وصولها إلى الأرض أثناء الكسوف الكلي للشمس، إذ أنها تنحرف عن مسارها المستقيم بسبب تأثرها 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، والتي هي عبارة عن ظاهرة منيرة متغيرة الشكل تحدث قرب القطبين المغناطيسيين الأرضيين. والسبب هو عندما تنبعث الدقائق المشحونة من الشمس الى الأرض تتوجه بحكم المجال المغناطيسي الأرضي إلى مركزي القطبين المغناطيسيين الشمالي والجنوبي للأرض،

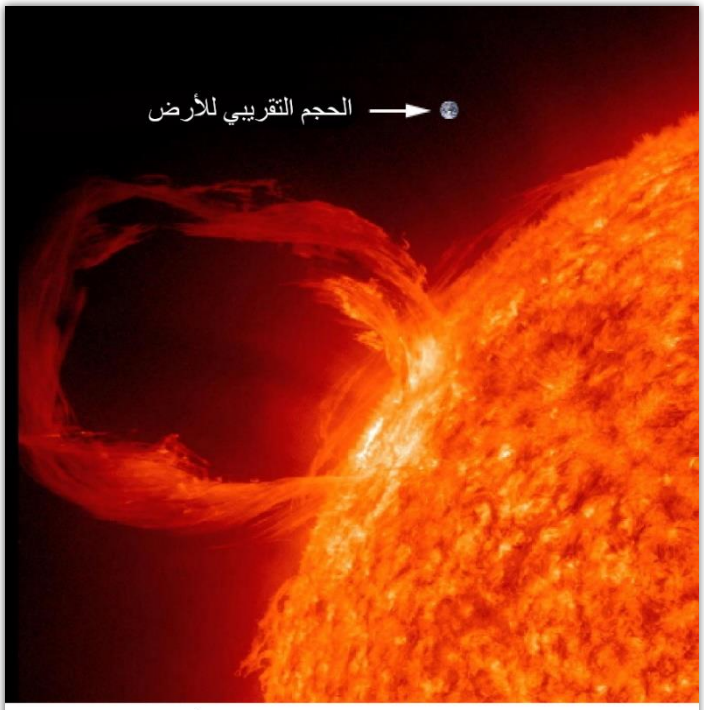
---

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

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.

٢-٤-٤: ظواهر شمسية أخرى 2-4-4: Other Solar Phenomena

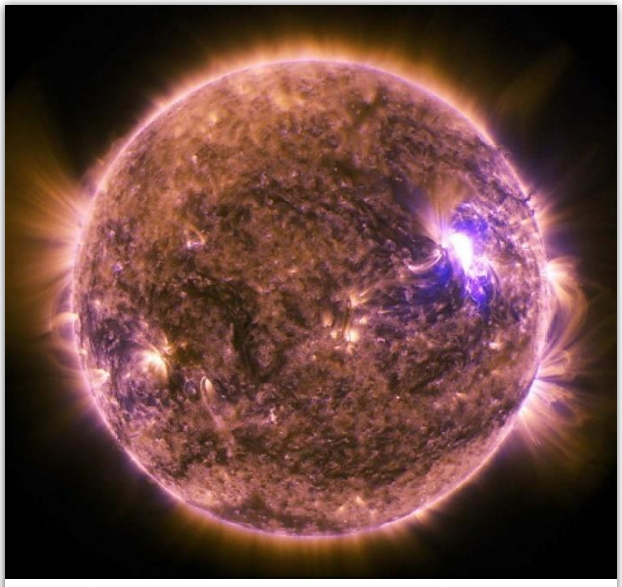
١- **التأججات اللامعة** prominences: تنشأ عادة بالقرب من البقع الشمسية. وهي عبارة عن فورانات غازية متوهجة في الإكليل مدعومة مغناطيسياً وترتفع عالياً، ويمكن رؤيتها بسهولة بالقرب من حافة الشمس. وغالباً ما يراها راصدو الكسوف حمراء مرتفعة فوق الشمس المنكسفة وتصل إلى أعلى الإكليل. ولها عدة أنواع، بعضها قد يرتفع مسافة تزيد عن مليون كيلومتر فوق الغلاف الضوئي، وهي ذات حجم كبير مقارنة بالأرض كما في الشكل ٢-٨ وتكون الغازات أو السحب التي تكوّن هذه التأججات أكثر كثافة وأقل سخونة من الغازات الأخرى الموجودة في الإكليل الشمسي.



الشكل ٢-٨: التأججات الشمسية، وتُلاحَظ صورة للأرض بنفس المقياس للمقارنة.

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 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.

يمكن للشواظ الشمسي أن يسخن الغاز إلى درجات حرارة تصل إلى 20 مليون درجة، وهو مصدر لأشعة گاما والأشعة السينية والأشعة فوق البنفسجية. ولا يمثل الانبعاث المرئي سوى جزء صغير من الطاقة المنبعثة.



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.

ويحدث الشواظ عندما تُطلَق كمية كبيرة من الطاقة المخزنة في المجال المغناطيسي فجأة، وربما يكون السبب المباشر هو إطلاق المجالات المغناطيسية المتعاكسة الاتجاهات للطاقة عن طريق التفاعل مع بعضها البعض وتدمير بعضها البعض. وتغطي التفاعلات المغناطيسية حجماً كبيراً من الإكليل الشمسي وتطلق كمية هائلة من الإشعاع الكهرومغناطيسي.

٣- الانبعاثات الكتلية الإكليلية

coronal mass ejections (CME)

هي عبارة عن فقاعات شمسية متفجرة مكونة من كميات هائلة من المواد الإكليلية (البروتونات والإلكترونات بشكل أساس) تُقدّر بعشرات الملايين من الأطنان، تُقذَف إلى الفضاء بين الكواكب بسرعات عالية ($500 - 1000\ km/s$). 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 ذُكر من ظواهر شمسية توجد عدة أنواع أخرى من النشاط السطحي كالشعيلات الشمسية أو الصياخد faculae، واللطخات الضوئية plages، والفتائل السوداء filaments.

٢-٥: الطاقة الشمسية 2-5: Solar Energy

يكون مصدر الطاقة المنبعثة في الشمس وفي النجوم الأخرى ذوات الكتل المنخفضة هو الطاقة النووية المتحررة من تفاعلات الاندماج النووي nuclear fusion. ففي المناطق العميقة داخل الشمس 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 ^{1}H معاً لتؤلف نواة ذرة هيليوم

واحدة ^4_2He (جسيم ألفا). وتكون كتلة نواة الهيليوم أقل بمقدار 0.71% تقريباً من مجموع كتل نوى الهيدروجين الأربعة التي تتحد لتشكلها. 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:

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

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

ولإنتاج القدرة الكلية المشَعة للشمس $(3.85 \times 10^{26}\ W)$ يتحول ما يقارب 600 مليون طن من الهيدروجين إلى هيليوم في كل ثانية $(\sim 6 \times 10^{11}\ kg/s)$، 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 والنتروجين والأوكسجين.

عند درجات الحرارة المرتفعة داخل قلب 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.

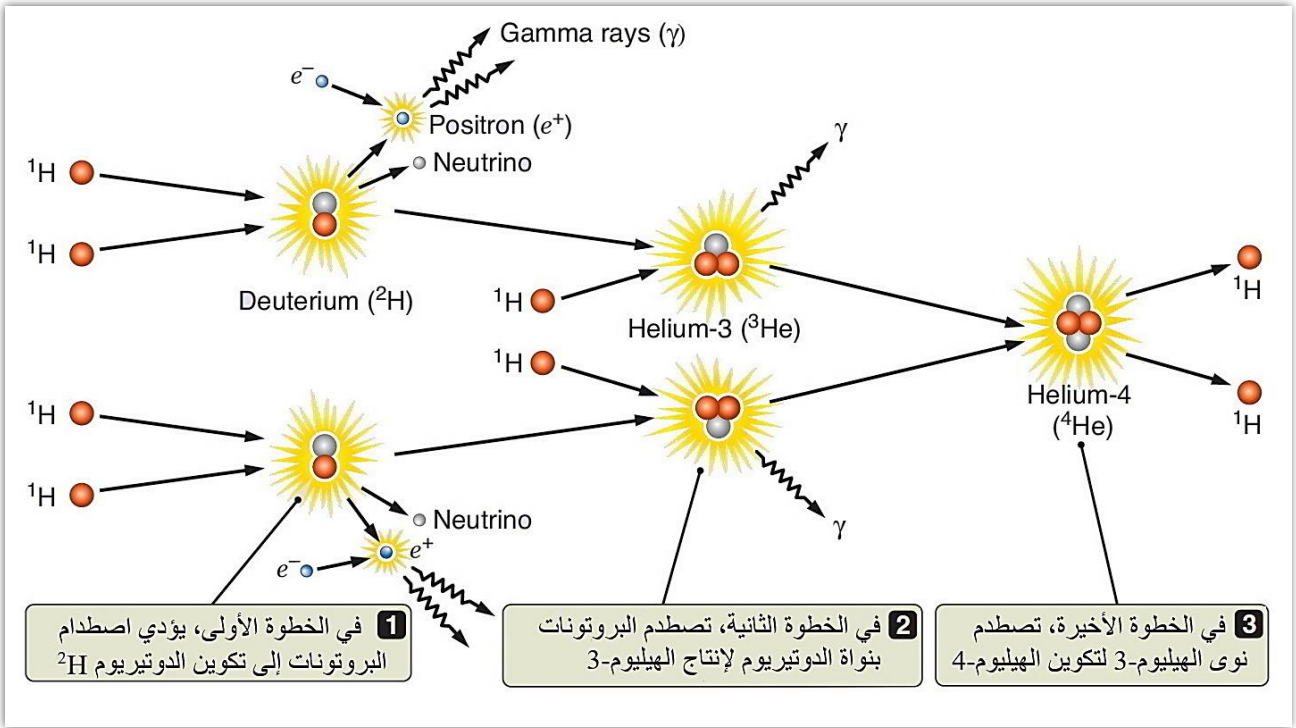
في الخطوة الأولى لهذا التفاعل، تندمج نواتا هيدروجين (أي بروتونان). حيث يتحول أحد البروتونات إلى نيوترون عن طريق انبعاث بوزترون[1] (e^+) positron ونيوترينو[2] (ν) neutrino بعملية تُسمى تحلل بيتا beta decay. وتبقى الشحنة الكهربائية محفوظة في هذا التفاعل. والنواة الجديدة المتكونة من بروتون ونيوترون التي تشكلت في هذه الخطوة هي نواة نظير ثقيل للهيدروجين heavy isotope of hydrogen يسمى الدوتيريوم deuterium أو ^2H، (لاحظ الشكل ٢-١٠).

$$^1H + {}^1H \rightarrow {}^2H + e^+ + \nu \qquad \ldots\ldots 2.5$$

---

١) البوزترون: جسيم أولي، وهو ضديد الإلكترون، وله نفس كتلته ونفس شحنته ولكنها موجبة.

٢) النيوترينو هو جسيم أولي قليل الكتلة جداً وغير مشحون، ينطلق في الفراغ بسرعة قريبة من سرعة الضوء.



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

للإلكترون شحنة كهربائية مضادة لشحنة البوزترون، لذا فهما ينجذبان 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 قلب الشمس يُنتج طاقة على شكل فوتونات أشعة گاما (γ) gamma-ray photons، والتي سوف تصطدم بجسيمات المادة وتنقل طاقتها لها. وبعد هذا يبعث الجسيم الذي امتص فوتون گاما فوتوناً آخر من أشعة گاما، لكن غالباً ما يكون للفوتون المنبعث طاقة أقل قليلاً من الفوتون الذي تم امتصاصه. ومن ناحية أخرى، فإن تفاعلات النيوترينو مع المادة ضعيفة للغاية لدرجة أن مصيره الأرجح هو الهروب من الشمس في جميع اتجاهات الفضاء دون مزيد من التفاعلات مع أي جسيمات أخرى.

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma \qquad \ldots\ldots 2.6$$

تحدث مثل هذه التفاعلات لأشعة گاما مراراً وتكراراً وهي تشق طريقها ببطء نحو الطبقات الخارجية للشمس حتى تنخفض طاقتها لدرجة أنها لم تعد أشعة گاما 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.

إن الضوء المنبعث من الشمس اليوم كان أصله أشعة گاما تنتجها التفاعلات النووية العميقة في قلب الشمس. ويعتمد طول الوقت الذي تستغرقه الفوتونات للوصول إلى السطح على معدل المسافة التي يقطعها الفوتون بين الاصطدامات، وعلى نموذج الجزء الداخلي المعقد من الشمس الذي يتم تبنيه. والتقديرات غير مؤكدة، ولكنها تشير إلى أن انبعاث الطاقة 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 قلب 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 تعمِّر 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 وتتحرر طاقة على شكل فوتون أشعة گاما. والنواة الناتجة هنا هي نواة الهيليوم، لأن العنصر يتم تعريفه بعدد البروتونات الموجودة فيه، فأي نواة تحتوي على بروتونين تسمى هيليوم.

$$^2H + {}^1H \rightarrow {}^3He + \gamma \qquad \ldots\ldots 2.7$$

في الخطوة الثالثة والأخيرة تتصادم نواتان من نوع ^3He وتندمجان، مما يؤدي إلى إنتاج نواة هليوم اعتيادية ^4He وبروتونين حُرَّين نشطَين جاهزَين للاصطدام ببروتونات أخرى وبدء الخطوة الأولى في سلسلة التفاعلات من جديد. وتَظهر الطاقة المتحررة في هذه الخطوة على شكل طاقة حركية لكل من نواة الهيليوم والبروتونين المتحررَين.

$$^3He + {}^3He \rightarrow {}^4He + {}^1H + {}^1H \qquad \ldots\ldots 2.8$$

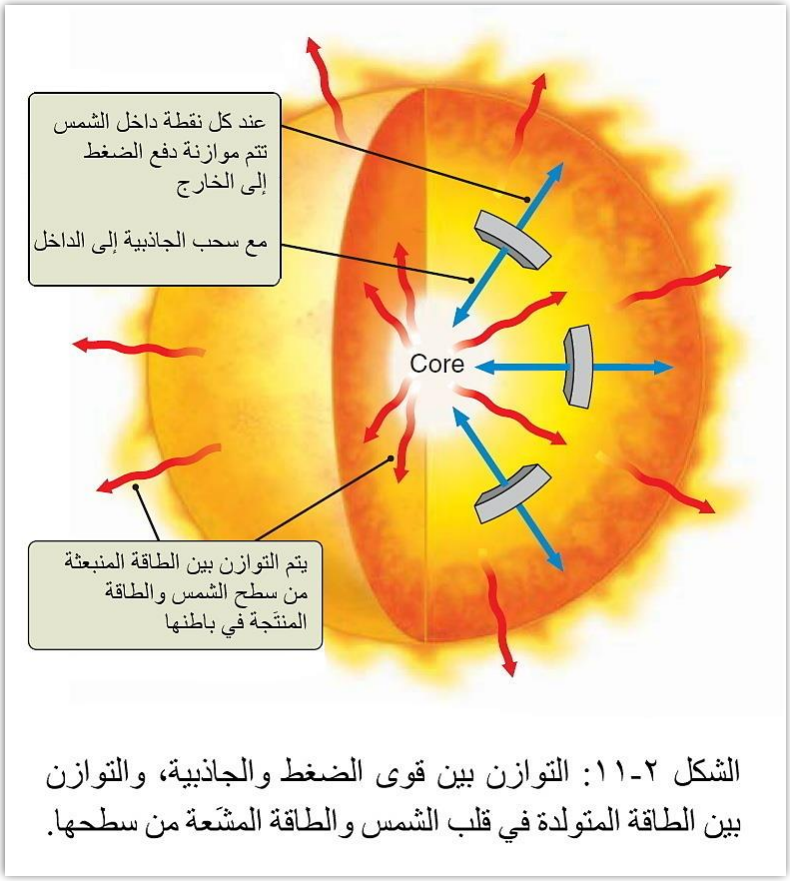
إن ما يصل إلى الأرض من الطاقة المنبعثة من الشمس لا يمثل إلا جزءاً بسيطاً جداً من هذه الطاقة، وذلك لبعد الأرض وصغر حجمها نسبة إلى الشمس.

٢-٦: التوازن داخل الشمس 2-6: The Balance inside the Sun

النموذج الحالي للجزء الداخلي من الشمس هو تتويج لعقود من العمل من قبل الآلاف من علماء الفيزياء والفلك. وتكون الشمس ونجوم التتابع الرئيسي[١] في حالة مستقرة أغلب حياتها، وهنالك توازنان أساسيان داخل الشمس كما موضح في الشكل ٢-١١ هما:

١) يراجع الفصل الرابع لمعرفة هذا الصنف من النجوم.

١- **التوازن بين الضغط والجاذبية:** إن الشمس عبارة عن كرة ضخمة من الغاز الساخن. ولو كان سَحب الجاذبية المتجه من الطبقات العليا إلى الداخل أقوى من الضغط المتجه من النواة إلى الخارج لانهارت الشمس. وعلى العكس من ذلك، إذا كان الضغط أقوى من الجاذبية فإن الشمس سوف تنتفخ أو تنفجر. ويُدعى 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، مما 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 التثاقلي. لذلك تكون الشمس في حالة مستقرة.



الشكل ٢-١١: التوازن بين قوى الضغط والجاذبية، والتوازن بين الطاقة المتولدة في قلب الشمس والطاقة المشَعة من سطحها.

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 التتابع الرئيسي 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.

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

٢-٧: القمر 2-7: The Moon

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. وتُعتبر جاذبية القمر – وبدرجة أقل جاذبية الشمس – المحرك الرئيسي للمد والجزر. وهو جسم معتم لا يشع الضوء، بل يتوهج بسبب ضوء الشمس المنعكس.

الجدول ٢-٢: بعض الخصائص الأساسية للقمر

الخاصية	قيمتها
معدل البعد عن الأرض mean distance from Earth	384,400 km
الاختلاف المركزي eccentricity	$e = 0.0549$
أقصى بعد عن الأرض (الأوج) maximum distance from Earth (apogee)	$1 + e = 405{,}410\ km$
أدنى بعد عن الأرض (الحضيض) minimum distance from Earth (perigee)	$1 - e = 362{,}570\ km$
الكتلة mass	$7.348 \times 10^{22}\ kg$ (~0.0123 كتلة أرضية)
معدل القطر الزاوي mean angular diameter	0.518°
ميل المدار عن مدار الأرض حول الشمس (عن دائرة البروج) inclination of the orbit from Earth's orbit around the Sun (from the ecliptic)	5.15°
القطر diameter	$D = 3476\ km$ (~0.27 قطر أرضي)
معدل الكثافة mean density	$\bar{\rho} = 3.346\ g/cm^3$
الجاذبية السطحية surface gravity	$g_M = 1.622\ m/s^2$ سدس الجاذبية الأرضية
سرعة الإفلات من سطح القمر escape speed from the surface of Moon	$v_{esc} = 2.38\ km/s$
فترة الدوران (اليوم القمري) 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 درجة الحرارة عند خط الاستواء القمري temperature range at lunar equator	103 to $403\ K$ (-170 to 130 °C)

٢-٨: الخصائص الأساسية للقمر 2-8: Basic Properties of Moon

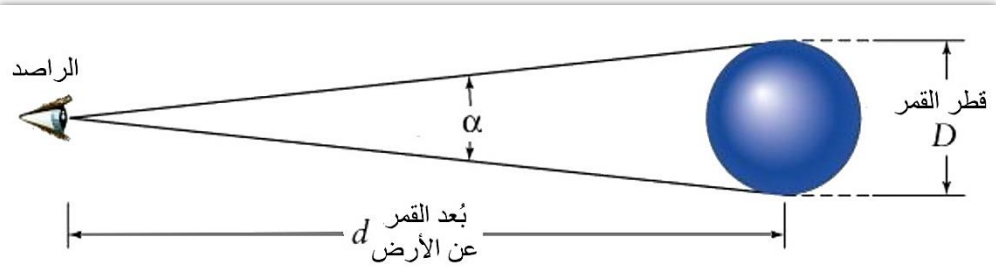
٢-٨-١: القطر 2-8-1: Diameter

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

$$\frac{D}{\alpha} = \frac{2\pi d}{360°} \qquad \dots\dots 2.9$$

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

$$D = \frac{2 \times\ 3.14159 \times 384400\ km \times 0.518°}{360°} =\ 3475.28\ km$$



الشكل ٢-١٢: طريقة قياس قطر القمر.

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

٢-٨-٢: الكتلة 2-8-2: Mass

قبل بعثات أبولو، كان لا بد من أخذ قياسات كتلة القمر بشكل غير مباشر، وكانت إحدى الطرق هي استخدام 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، وقيمته $4670.7\ km$[١]، و d_2 هو البعد بين مركز الثقل المشترك ومركز القمر، وقيمته $379733.3\ km$، و m_E كتلة الأرض، و m_M كتلة القمر. وبتطبيق قانون العزوم:

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

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

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

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:

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

حيث G: ثابت الجذب العام = $(6.674 \times 10^{-11}\ N.m^2/kg^2)$، و m_M: كتلة القمر = $(7.348 \times 10^{22}\ kg)$، و R: نصف قطر القمر = $(1737\ km)$ ، و g_M: الجاذبية السطحية للقمر، وتعني تعجيل الجسم الساقط على سطح القمر.

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

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

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

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.

٢-٨-٤: سرعة الإفلات 2-8-4: Escape Speed

هي السرعة الدنيا المطلوبة لمواجهة قوة الجاذبية على جسم ما والتغلب عليها، حيث يمكن للجسم بعد ذلك الهروب إلى الفضاء المحيط. ويتم الحصول على سرعة الإفلات، التي يُشار إليها بـ v_{esc}، اللازمة لجسم صغير كتلته m للتحرر من سحب جاذبية كتلة أكبر M، عن طريق مساواة الطاقة

الحركية E_k kinetic energy للكتلة الصغيرة مع الطاقة الكامنة الجذبية[1] 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:

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

$$\frac{1}{2}m{v_{esc}}^2 = \frac{GmM}{D} \qquad \dots\dots 2.13$$

وعندما يكون القمر هو الكتلة الأكبر ويوجد الجسم الصغير على سطحه فإن $(M = m_M)$ و $(D = R)$. وهذا يُنتج أن:

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

$$= 2376\, m/s \approx 2.38\, km/s$$

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 من كوكبنا وتتبخر إلى الفضاء. وجدير بالذكر أن سرعة إفلات أي جسم من سطح الأرض هي $(\sim 11.2\ km/s)$، وسرعة الإفلات من سطح الشمس تعادل $(618\ km/s)$.

---

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

٢-٩: سطح القمر وغلافه الجوي

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

يمتلك 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 وتنثر شظاياها. وفي نهاية المطاف، أدت مليارات السنين من الاصطدامات إلى تحويل جزء كبير من الطبقة السطحية إلى جسيمات بحجم دقائق الغبار أو حبات الرمل.

ويُشاهَد على سطح القمر (حتى بالعين المجردة) مناطق داكنة (تسمى البحار seas أو ماريا maria) ومناطق فاتحة هي المرتفعات. ولكن البحار ليس لديها أي 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 من 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 فحسب، بل أيضاً بسبب الطبيعة المسامية لتربة القمر الخفيفة، والتي تبرد بسرعة أكبر من الصخور الصلبة. ويلاحَظ 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 150 °C بمقدار خلال ساعة واحدة فقط.

تم اكتشاف الجليد المائي في الحفر المظللة 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 توقُّع عدم زوال آثار أقدام رواد الفضاء من على سطح القمر لآلاف السنين.

يُطلق على جزء ضوء الشمس المنعكس عن الكوكب 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 مشعا 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

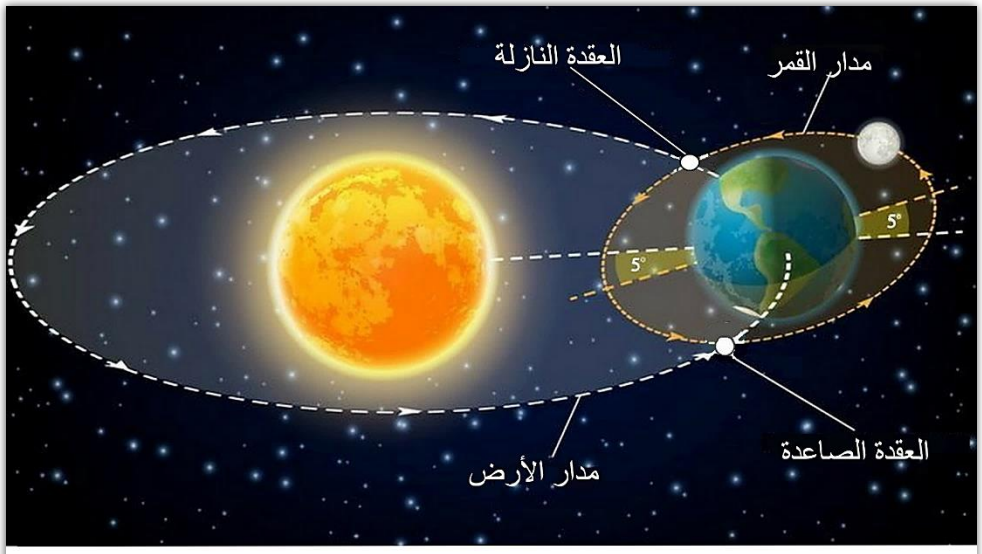
2-10: Orbital and Axial Movements of the Moon

٢-١٠-١: مدار القمر 2-10-1: Moon Orbit

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 356,400 km، أي في الحضيض perigee. وبعد أسبوعين تقريباً من حركته يكون عند أقصى مسافة 406,700 km، أي في الأوج apogee. والقطر الزاوي الظاهر من الأرض هو ضمن المدى ($33.5' - 29.4'$). وتختلف السرعة المدارية orbital speed للقمر حسب قانون كبلر الثاني. ومع ذلك، تظل الفترة الدورانية 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 والتوابع 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 بُعدٍ ما من مركزها. وهكذا الحال لكل المجاميع الكتلية في الكون سواء كانت نجوماً أو كواكب أو غيرها، فإنها تدور حول مركز ثقل المجموعة التي تنتمي لها.

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 المداران في نقطتين تُدعيان 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.



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

وعليه فإن ميل القمر عن خط الاستواء الأرضي يتغير أيضاً، ومقدار هذا التغير يتراوح بين 18.35° و 28.65°. والسبب في ذلك هو أن القمر يميل عن مدار الأرض بـ 5.15° تقريباً وأن مدار الأرض يميل عن خط الاستواء بمقدار 23.5°. وعندما تكون العقدة الصاعدة للمدار القمري قريبة من الاعتدال الربيعي يكون القمر ضمن المدى (23.5° + 5.15° = 28.65°) شمال أو جنوب خط الاستواء. وعندما تكون العقدة الهابطة قريبة من الاعتدال الربيعي فإن منطقة تواجد القمر هي (23.5° − 5.15° = 18.35°) شمال أو جنوب خط الاستواء.

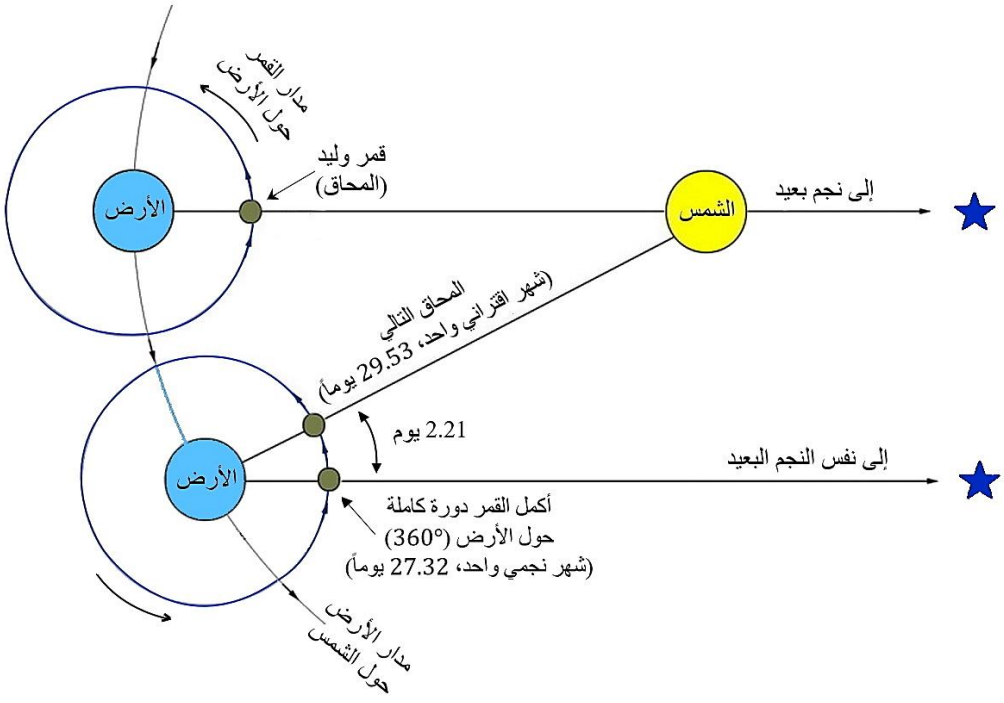
إن خط العقدتين لا يبقى ثابتاً دائماً، بل يتراجع أو يتقهقر ويكمل 360° في تراجعه كل 18.6 سنة بسبب تأثير جاذبية الشمس والأرض وبعض الكواكب أحياناً على القمر. وهذه نفس فترة التمايد. وفي كل 9.3 سنة تأخذ كل من العقدتين موضع الأخرى. وتسمى دورة تراجع العقدتين والتي أمدها 18.6 سنة بدورة الساروس Saros التي كانت 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. ويتحرك القمر في اليوم الواحد $13°$ شرقاً تقريباً حول الأرض نسبة إلى النجوم البعيدة.

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 البدر إلى البدر، 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.

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



الشكل ٢-١٤: العلاقة بين الشهرين النجمي والاقتراني.

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 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 من القمر الذي نراه يتغير باستمرار، وفي أكثر الأحيان لا يمكن رؤية سوى جزء من القسم المضيء. وقد نسمع أحياناً أن الجهة الخلفية للقمر (الجهة التي لا نراها من الأرض) تسمى "الجهة المظلمة". وهذا غير صحيح لأن الشمس تشرق وتغرب على جميع جوانب القمر. ويوضح الشكل ٢-١٥ المراحل المتغيرة للقمر.

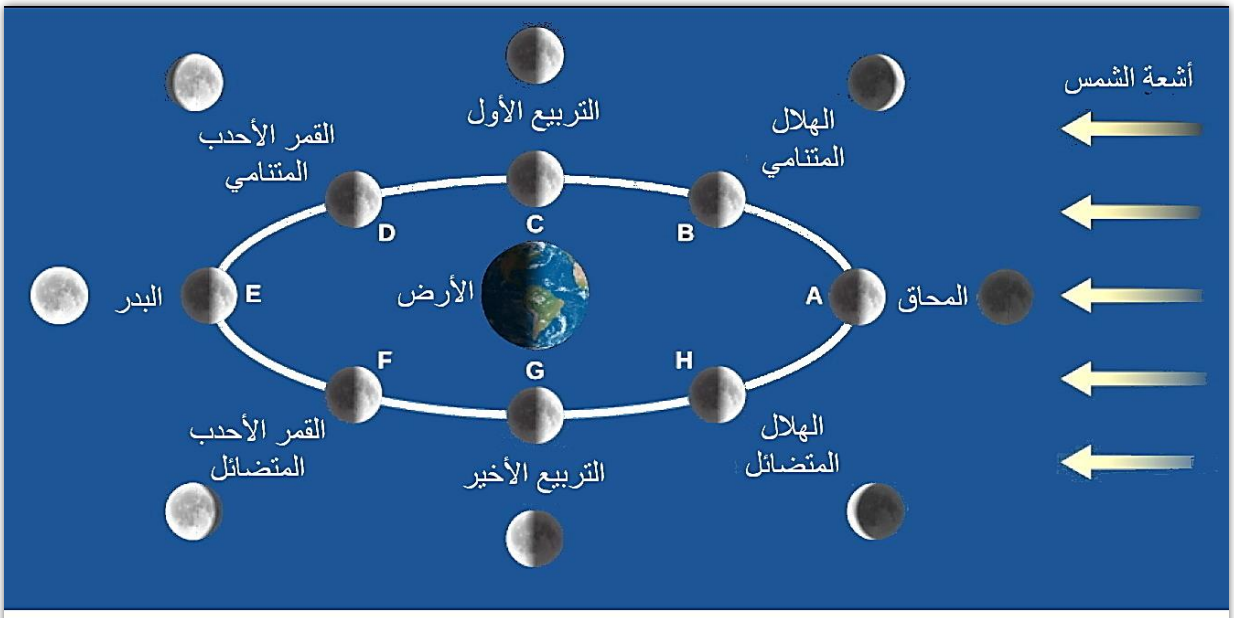
في فترة المحاق (القمر الجديد new Moon) يكون موضع القمر بين الأرض والشمس ويكون وجهه المظلم مواجهاً للأرض، ووجهه المضيء في الجهة الأخرى. فلهذا لا يمكن رؤيته.

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 يُرى النصف الأيمن فقط مضاءً (النصف الأيسر هو المضاء عند رؤيته من نصف الكرة الأرضية الجنوبي). 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".

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.

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.

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 (النصف الأيمن هو المضاء عند رؤيته من نصف الكرة الأرضية الجنوبي)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.

٢-١١: الخسوف والكسوف 2-11: Eclipse

الكسوف eclipse هو حدث يمر فيه جسم في ظل جسم آخر. ويحدث هذا بين الشمس والقمر، وبين الكواكب وأقمارها، ويحدث فيما بين النجوم فيكسف نجم نجماً آخر، وبين النجوم وتوابعها.

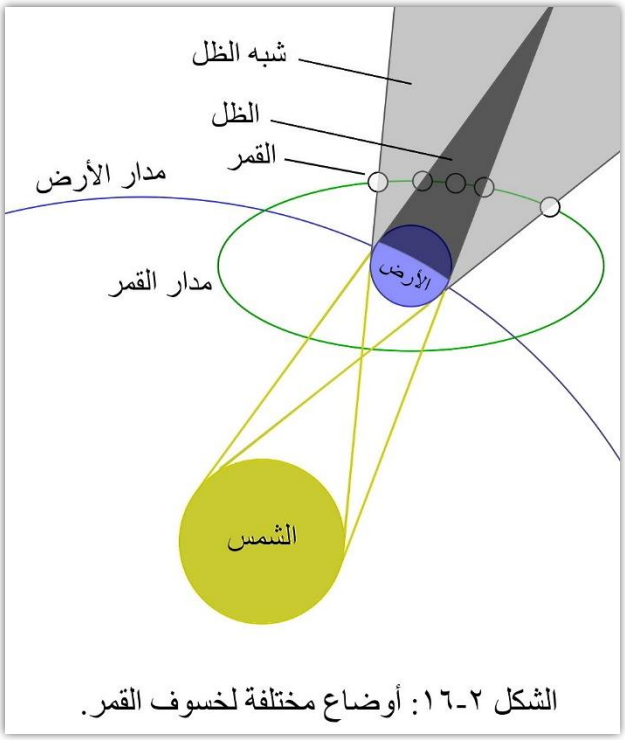
إن للشمس والقمر نفس الحجم الظاهري في السماء تقريباً. ورغم أن قطر الشمس أكبر بما يقارب 400 مرة من قطر القمر، إلا أنها أيضاً أبعد بـ 400 مرة تقريباً، لذا فإن كلاً من الشمس والقمر لهما نفس القطر الزاوي تقريباً (°0.5~). ونتيجة لذلك يمكن للقمر – كما يُرى من الأرض – أن يغطي قرص الشمس.

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 ممكنَين.

يتكون ظل الأرض والقمر من جزأين: مخروط cone حيث يكون الظل حالكاً، ويسمى الظل umbra، ومنطقة ظلام أخف وأكثر انتشاراً تسمى شبه الظل penumbra.

٢-١١-١: خسوف القمر 2-11-1: Lunar Eclipse

يحدث الخسوف عندما يقع القمر في منطقة ظل الأرض (أي تكون الأرض على خط مستقيم بين الشمس والقمر) كما في الشكل ٢-١٦. وهذا يحدث عندما يكون القمر بدراً 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°.



الشكل ٢-١٦: أوضاع مختلفة لخسوف القمر.

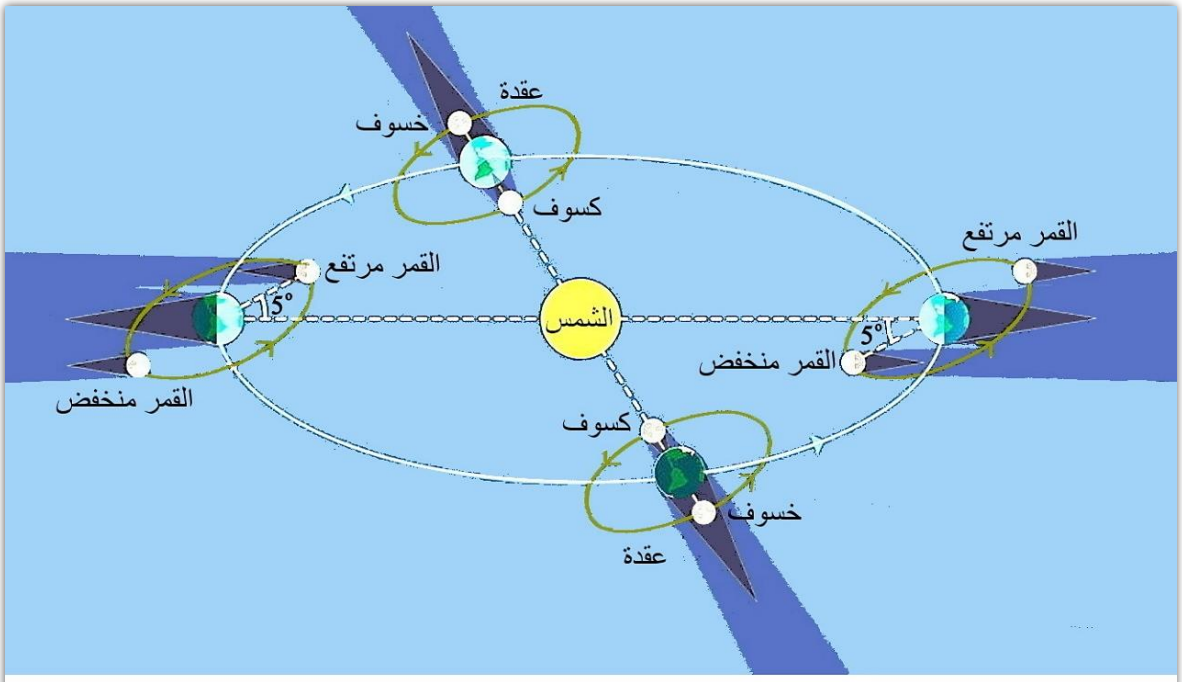
وكما ذكرنا سابقاً فإن هذين المدارين يتقاطعان في عقدتين. فلهذا تحدث هذه الظاهرة فيما لو اتفق وأن أصبح القمر بدراً بالقرب من إحدى هاتين العقدتين، وهذا يعني أن مستوى مدار القمر المائل بـ 5.15° سيجعل القمر في أكثر الأحيان إما فوق الخط الواصل بينه وبين الأرض والشمس أو أسفل منه، وإذا صادف أنه ضمن هذا الخط وكان بدراً فهنا يحدث الخسوف كما في الشكل ٢-١٧. وهذا لا يتفق إلا مرتين في السنة تقريباً.

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.



الشكل ٢-١٧: احتمالات حدوث الكسوفين.

إذن لكي يحدث الخسوف الكلي فإنه لا بد أن يحدث الخسوفان السابقان. 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.

٢-١١-٢: كسوف الشمس 2-11-2: Solar Eclipse

يحدث كسوف الشمس عندما يكون القمر بين الشمس والأرض بشرط أن يكون في المحاق وقريباً من إحدى العقدتين. وعندها يمتد خلف القمر ظل قائم مخروطي الشكل مولداً بقعة مظلمة على سطح الأرض كما في الشكل ٢-١٨.

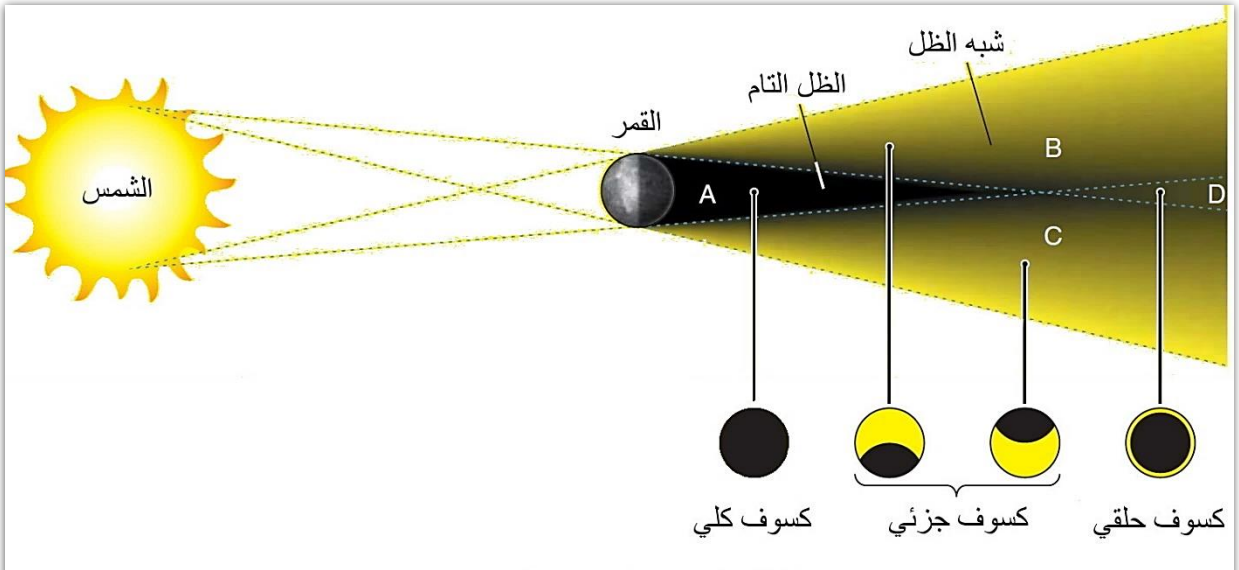
من الممكن حدوث ثلاثة أنواع مختلفة من كسوف الشمس: كلي total وجزئي partial وحلقي annular. فبملاحظة الشكل ٢-١٨ يتبين أن الراصد في المنطقة A الأكثر عتمة (منطقة الظل التام umbra) لن يتمكن من رؤية أي جزء من سطح الشمس. وهذا هو الكسوف الكلي.

وفي المنطقتين B و C يستطيع الراصد رؤية أحد جانبي قرص الشمس دون الجانب الآخر. وهذه المنطقة الأقل عتمة هي منطقة شبه الظل penumbra، حيث يحجب قرص القمر الضوء من جزء من قرص الشمس، وهذا هو الكسوف الجزئي.

ويحدث الكسوف الحلقي عندما يكون الراصد عند المنطقة D بعيداً بدرجة كافية عن القمر، أي 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.

ويمكن أن يحدث ما يسمى الكسوف الهجين hybrid eclipse (ويسمى أيضاً الكسوف الحلقي/الكلي) والذي يظهر في نقاط معينة على سطح الأرض على شكل كسوف كلي، بينما يظهر في نقاط أخرى على شكل حلقي، وهو نادر الوقوع نسبياً.

عندما يكون القمر والأرض أقرب لبعضهما البعض من المعدل، يبدو القمر أكبر في السماء من الشمس (القطر الزاوي للقمر أكبر من قطر الشمس)، والكسوف الذي يحدث حينئذ سيكون كلياً. وعندما يكون القمر والأرض متباعدين أكثر من المعدل، يبدو القمر أصغر من الشمس (القطر الزاوي للقمر أصغر)، لذا فالكسوف الذي يحدث خلال هذا الوقت سيكون حلقياً.



الشكل ٢-١٨: كسوف الشمس.

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، ويشاهَد 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 يتوقع 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 بدراً، 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 والزاوية التي يميلها مخروط الظل عن سطح الأرض.

٣- عندما نأخذ التأثيرات في الفقرة أعلاه في 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 يحدَّد بالمدة الزمنية اللازمة لدوران القمر حول الأرض بالنسبة إلى الشمس، وتقاس من محاق إلى محاق آخر وتبلغ 29.5306 يوماً ($29^d12^h44^m2.9^s$). وتحدَّد 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:

١- **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.

أسئلـة

١) إذا كانت المساحة السطحية للقمر $(3.795 \times 10^7\ km^2)$، فجد معدل بعده عن الأرض إذا كان قطره الزاوي $0.518°$.

٢) إذا كانت كتلة الأرض $(5.98 \times 10^{24}\ kg)$ وثابت الجذب العام $(6.674 \times 10^{-11}\ N.m^2/kg^2)$، 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 $(5.98 \times 10^{24}\ kg)$ وثابت الجذب العام $(6.674 \times 10^{-11}\ N.m^2/kg^2)$، وقطر الأرض $12756\ K$.

٤) يبلغ نصف قطر القمر $1737\ km$، ومعدل بعده عن سطح الأرض $(3.78 \times 10^5\ km)$. ويبلغ نصف قطر الشمس $696000\ km$، ومعدل بعدها عن الأرض $(1.496 \times 10^8\ km)$. وضح لماذا يكون الحجمان الظاهريان للقمر والشمس في سمائنا متساويين تقريباً.

٥) يبلغ معدل نصف قطر الأرض $6371\ km$. فإذا كنت واقفاً على القمر، فهل ستظهر الأرض في سماء القمر أكبر مما يبدو القمر في سمائنا أم أصغر؟ وضح مع الحسابات.

٦) ما هو سبب البقع الشمسية؟

٧) ما هي سلسلة البروتون – البروتون في الشمس؟ بيّن مع المعادلات.

٨) لماذا يظهر القمر عند الخسوف الكلي باللون الأحمر؟

٩) لماذا هذا التفاوت الكبير بين مساحة مشاهدة الكسوف والخسوف الكليين؟

١٠) أيهما يحدث أكثر: الخسوف الكلي للقمر المشاهَد من الأرض، أو الكسوف الكلي للشمس المشاهَد من القمر؟ اشرح اجابتك.

١١) عند حدوث الخسوف الكلي أو الكسوف الكلي على الأرض، ما الذي تشاهده لو كنت على سطح القمر المواجه للأرض؟

١٢) لماذا يتوقف وصول الأشعة الشمسية الكهرومغناطيسية ولا يتوقف وصول الدقائق الشمسية المشحونة كهربائياً أثناء الكسوف الكلي؟

١٣) لماذا تكون مدة تأثير الكسوف الكلي على الأرض صغيرة ومدة الخسوف الكلي طويلة؟

١٤) لماذا لا يحدث خسوف القمر في منتصف كل شهر قمري؟

١٥) 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.

١٦) اللون المحمر 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.

١٧) إن فترة دوران الشمس حول نفسها (أ) متزامنة مع مدار الأرض، (ب) أقصر عند خط الاستواء الشمسي مما عند القطبين، (ج) تختلف في دورة مدتها 11 عاماً، (د) غير محددة، لأن الشمس لا تدور على الإطلاق.

١٨) تتعرض بعض ذرات الإكليل الشمسي إلى تأيين لمرات كثيرة. ما السبب الذي أدى إلى إزالة هذا العدد الكبير من الإلكترونات من هذه الذرات؟

١٩) لماذا تتمكن الأشعة السينية والأشعة فوق البنفسجية من تأيين الذرات الموجودة في الغلاف الجوي العلوي للأرض بخلاف الأشعة المرئية؟

٢٠) 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 بيّن مدى تأثيره على كتلة الشمس الكلية.

٢١) لماذا تتحول أشعة گاما خلال الاصطدامات في مركز الشمس إلى فوتونات فوق بنفسجية؟

٢٢) لماذا بقيت الشمس مستقرة خلال مليارات السنين؟

٢٣) ما سبب حدوث ظاهرة المد والجزر على الأرض؟

٢٤) ما هو سبب الاختلاف الحاصل بين مدتي الشهر النجمي والشهر الاقتراني للقمر؟ وضح مع الرسم.

مصادر الفصل الثاني

١- فيزياء الجو والفضاء ج٢، 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
٢-١: الشمس	١
٢-٢: الخصائص الأساسية للشمس	٢
٢-٢-١: قطر الشمس	٢
٢-٢-٢: كتلة الشمس	٣
٢-٢-٣: درجة الحرارة السطحية	٣
٢-٢-٤: الدوران الشمسي	٦
٢-٣: مكونات الشمس	٧
٢-٣-١: العناصر الكيميائية	٧
٢-٣-٢: الطبقات الداخلية للشمس	٨
٢-٣-٣: الغلاف الجوي الشمسي	٩
٢-٤: النشاط الشمسي	١٢
٢-٤-١: البقع الشمسية	١٢
٢-٤-٢: الإشعاع الشمسي	١٣
٢-٤-٣: الرياح الشمسية	١٤
٢-٤-٤: ظواهر شمسية أخرى	١٥
٢-٥: الطاقة الشمسية	١٦
٢-٦: التوازن داخل الشمس	١٩
٢-٧: القمر	٢١
٢-٨: الخصائص الأساسية للقمر	٢٢
٢-٨-١: القطر	٢٢
٢-٨-٢: الكتلة	٢٢
٢-٨-٣: الجاذبية السطحية	٢٣
٢-٨-٤: سرعة الإفلات	٢٣
٢-٩: سطح القمر وغلافه الجوي	٢٥
٢-١٠: حركات القمر المدارية والمحورية	٢٦
٢-١٠-١: مدار القمر	٢٦
٢-١٠-٢: الشهور القمرية	٢٨
٢-١٠-٣: أوجه القمر خلال دورته الاقترانية	٢٩
٢-١١: الخسوف والكسوف	٣٠
٢-١١-١: خسوف القمر	٣١
٢-١١-٢: كسوف الشمس	٣٢
٢-١١-٣: عدد مرات الخسوف والكسوف السنوية	٣٤
٢-١١-٤: الفرق بين الخسوف والكسوف	٣٤
٢-١١-٥: تحديد موعد حلول الشهر القمري	٣٥
أسئلة	٣٦
مصادر الفصل الثاني	٣٧