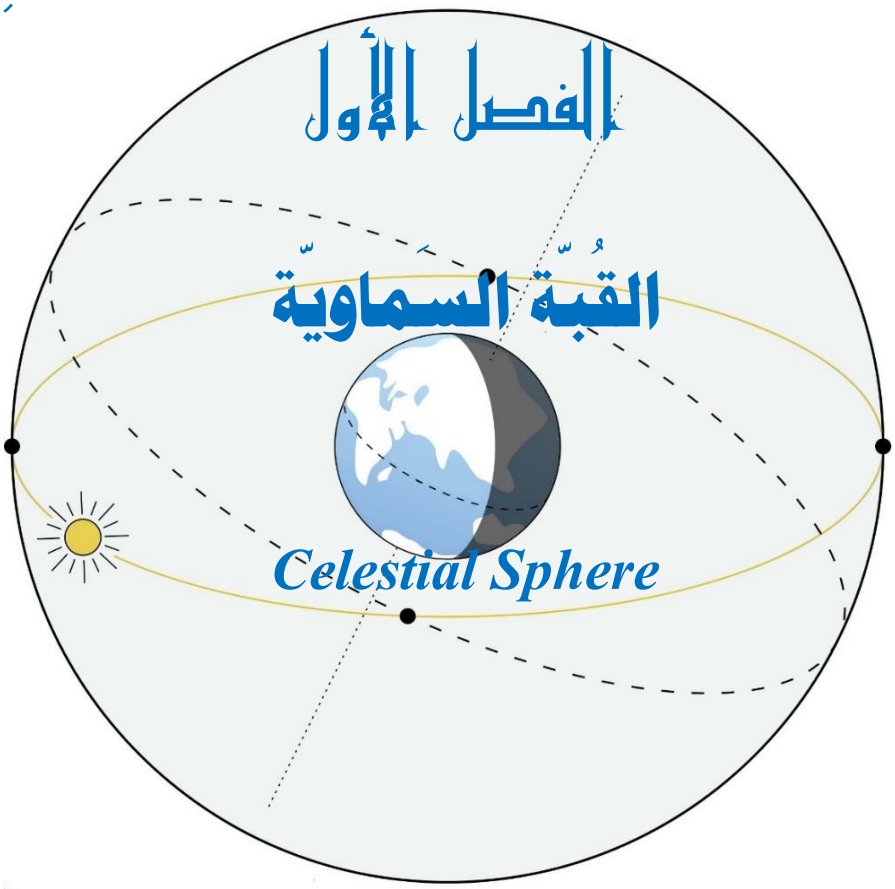
د. مُظفر جاسم
٢٠٢٣-٢٠٢٤

الفصل الأول

القُبّة السماويّة



المقدمة

يُعرّف علم الفلك Astronomy بأنه العلم الذي يدرس الظواهر والأجرام التي تقع خارج كوكب الأرض والعمليات التي تتفاعل بها مع بعضها البعض، ويستخدم الرياضيات والفيزياء والكيمياء لشرح أصلها وتطورها.

ويعالج علم الفلك الكثير من الأسئلة، مثل كيف تؤثر الأجرام السماوية على الأرض؟ وكيف يستفيد الإنسان منها ومن تناسق حركتها لأجل حياته كحساب السنين والشهور والاهتداء بها في حركته في البر والبحر وغير هذا؟ وكيف بدأ الكون؟ وكيف وصل إلى صورته الحالية؟ وكيف ينتهي؟ وما هو موقع الإنسان في الكون؟ وهل الإنسان وحده أم هناك مخلوقات حية أخرى في أماكن أخرى منه؟ وغير هذا من الأسئلة.

يُعدّ علم الفلك من أقدم العلوم الطبيعية للبشرية، وقد اهتمت مختلف الحضارات بدراسة الأجرام السماوية وحركتها، ومن هؤلاء البابليون والمصريون واليونانيون والهنود والصينيون.

وعلم الكونيات cosmology هو فرع من فروع علم الفلك يدرس الكون ككل.

ينقسم علم الفلك التخصصي إلى فرعين رصدي ونظري. ويركز علم الفلك الرصدي على الحصول على البيانات من رصد الأجرام الفلكية. ثم يتم تحليل هذه البيانات باستخدام المبادئ الأساسية للفيزياء. وعلم الفلك النظري موجه نحو تطوير نماذج حاسوبية أو تحليلية لوصف الظواهر والأجرام الفلكية. وهذان المجالان يكملان بعضهما البعض. ويسعى علم الفلك النظري إلى شرح نتائج الرصد، وتستخدم الأرصاد لتأكيد النتائج النظرية.

يُعد علم الفلك أحد العلوم القليلة التي يلعب فيها الهواة دوراً نشطاً، وخاصة في اكتشاف ورصد الأحداث العابرة. وقد ساعد الفلكيون الهواة في العديد من الاكتشافات المهمة، مثل العثور على مذنّبات جديدة.

١-١: قوانين كبلر 1-1: Kepler's Laws

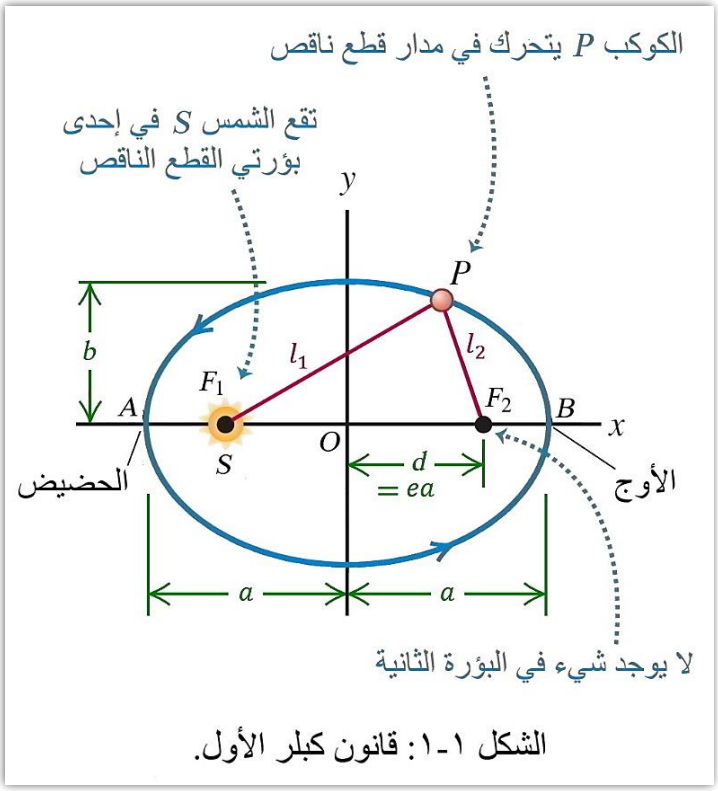
اهتم البشر بتحركات الكواكب والنجوم والأجرام السماوية الأخرى منذ آلاف السنين، وقادت ملاحظاتهم حولها إلى تصميم نموذج هيكلي من قبل العلماء القدامى اعتبروا فيه الأرض مركز الكون. وتم تطوير هذا النموذج وإضفاء الطابع الرسمي عليه من قبل عالم الفلك اليوناني بطليموس Ptolemy في القرن الثاني الميلادي، وتم قبوله لمدة 1400 عام التالية إلى أن قدّم كوبرنيكوس Copernicus (1473-1543) نموذجاً هيكلياً آخر للنظام الشمسي اقترح فيه أن الشمس يجب أن تكون في مركز الكون، وأن الأرض والكواكب تتحرك في مدارات دائرية حول الشمس. (كان يُعتقد في القرن السادس عشر أن الأرض والقمر والشمس والكواكب تمثل الكون بأكمله. ولم يكونوا يعرفون ماهية النجوم، فضلاً عن كيفية توزيعها في جميع أنحاء الفضاء). ولم يفهم كوبرنيكوس سبب تحرك الكواكب حول الشمس، لكنه أدرك أن نموذج مركزية الشمس قدم وصفاً أبسط بكثير لحركات الكواكب المرصودة من نموذج مركزية الأرض. وكان عمل كوبرنيكوس ثورياً، لأنه كان قادراً على مخالفة الرأي السائد في عصره حول مركزية الأرض، ثم الاعتقاد بأن الأرض مجرد كوكب واحد من بين العديد من الكواكب مثل عطارد أو الزهرة أو المريخ. لكنه لم يستطع إثبات نظريته بما يرضي السلطات الحاكمة في وقته. وتساءل المشككون: إذا كانت الأرض تتحرك فلماذا لا نشعر برياح الفضاء؟ وما القوة التي يمكن أن تدفع الأرض؟ ولماذا يجب أن توجد مثل هذه القوة؟

أجرى تيكو براه Tycho Brahe (1546-1601) مزيداً من الأرصاد مع تسجيل دقيق ومستمر لمواقع النجوم والكواكب لأجل عمل خرائط لها. وتم إجراء تلك الأرصاد للكواكب ولـ 777 نجماً مرئياً بالعين

المجردة باستخدام آلة سدس[1] كبيرة وبوصلة فقط، ولم يكن التلسكوب قد اختُرع بعد. وكان لديه قبل وفاته بفترة قصيرة مساعد يُدعى كبلر Kepler (1571-1630) الذي حصل بعد ذلك على البيانات الفلكية لأستاذه، وقضى 16 عاماً في محاولة لاستنتاج نموذج رياضي لحركة الكواكب. ويصعب فرز مثل هذه البيانات لأن الكواكب المتحركة تُلاحظ من الأرض المتحركة. وبعد العديد من الحسابات الشاقة وجد كبلر أن بيانات تيكو براه حول دورة المريخ حول الشمس أدت إلى نموذج ناجح. وهذا أدّى إلى صياغة القواعد الأساسية الثلاثة لحركة الكواكب، والمعروفة باسم قوانين كبلر. وقد استفاد نيوتن (1642–1727) من هذه الأفكار وتغيّرَ التفكير السائد آنذاك حول مركزية الأرض، وحلت محلها الشمس.

وفيما يلي قوانين كبلر الثلاثة:

القانون الأول: تدور جميع الكواكب السيارة حول الشمس في مدارات بشكل قطع ناقص (إهليلجية) elliptical orbit تقع الشمس في إحدى بؤرتيه.



الشكل ١-١: قانون كبلر الأول.

في البداية نبين هندسة القطع الناقص والمدارات الإهليلجية الموصوفة في قانون كبلر الأول كما موضح في الشكل ١-١، ويُلاحظ أن المحور الأطول الذي يمر بالبؤرتين (F_1 و F_2) والمركز O باتجاه المحور x هو المحور الرئيسي major axis، ونصف طوله a يسمى المحور شبه الرئيسي semi-major axis، والمحور الأقصر الذي يمر عبر المركز باتجاه y هو المحور الثانوي minor axis، ونصف طوله b. وتقع كل من البؤرتين على مسافة d من مركز القطع الناقص، حيث ($a^2 = b^2 + d^2$). ومجموع المسافتين من F_1 إلى P ومن P إلى F_2 (أي: $l_1 + l_2$) هو نفسه لجميع النقاط على المنحنى. وتقع الشمس في البؤرة F_1 والكوكب في النقطة P، ولا يوجد شيء في البؤرة الأخرى F_2. وعندما يكون الكوكب في أقرب نقطة من

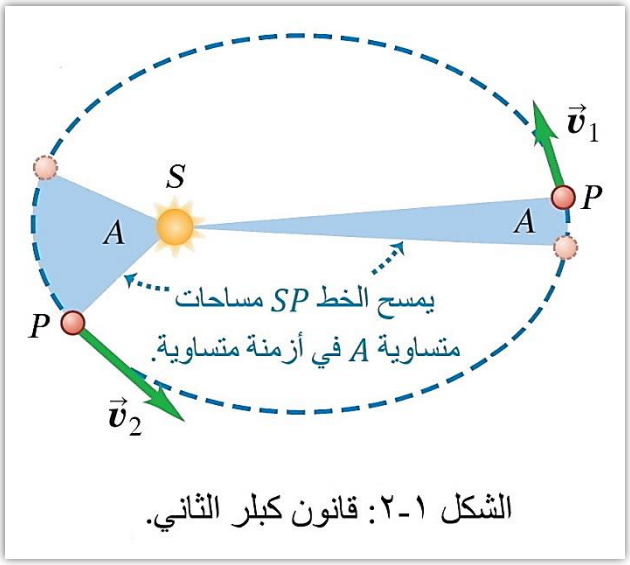
---

١) آلة السدس هي أداة ملاحة عاكسة مزدوجة تقيس المسافة الزاوية بين جسمين مرئيين. والاستخدام الأساسي لها هو قياس الزاوية بين الجرم الفلكي والأفق.

الشمس A فإن هذا يُدعى حضيض الكوكب perihelion. وعندما يكون في أبعد نقطة B يُدعى أوج الكوكب aphelion.

يُعرف الانحراف المركزي eccentricity للقطع الناقص على أنه $(e = d/a)$، وهو رقم بلا وحدات، وقيمته للقطع الناقص هي $(0 < e < 1)$، وهو يصف الشكل العام للقطع الناقص. وبالنسبة للدائرة فإن $(d = 0)$، أي $(e = 0)$. ومن الشكل ١-١ نستنتج أن مسافة الحضيض= $(a - ea)$.

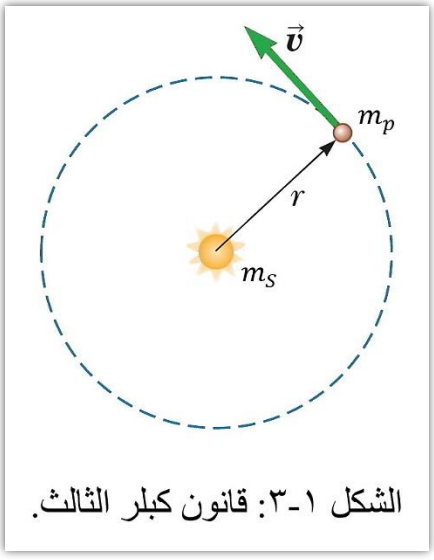
القانون الثاني: الخط الواصل بين الشمس وأي من كواكبها يمسح أثناء دورانه مساحات متساوية في أزمنة متساوية. (أي أن المساحات الممسوحة في الثانية الواحدة تساوي كمية ثابتة).



الشكل ١-٢: قانون كبلر الثاني.

وهذا يعني أن سرعة الكوكب تتغير بحيث أن الخط SP في الشكل ١-٢ يمسح نفس المساحة A في زمن محدّد t بغض النظر عن موقع الكوكب في مداره.

القانون الثالث: مربع زمن دوران كل كوكب حول الشمس يتناسب مع مكعب المحور شبه الرئيسي للمدار الإهليلجي للكوكب. أي $(T^2 \propto r^3)$.



الشكل ١-٣: قانون كبلر الثالث.

نفترض أن أحد الكواكب كتلته m_p يتحرك حول الشمس (كتلتها m_S) بمسار دائري كما في الشكل ١-٣. وبسبب أن قوة الجاذبية توفر تعجيلاً مركزياً للكوكب أثناء تحركه في دائرة، فإنه سيكون متأثراً بمحصلة قوة وفي حركة دائرية منتظمة. ووفق قانون نيوتن للجاذبية،

$$F_g = m_p a \quad \rightarrow \quad \frac{G m_S m_p}{r^2} = m_p \left(\frac{v^2}{r}\right)$$

السرعة المدارية orbital speed للكوكب هي $(2\pi r/T)$، حيث T هي الفترة الزمنية period اللازمة لإكمال دورة واحدة، ولذلك تصبح العلاقة السابقة:

$$\frac{Gm_S}{r^2} = \frac{(2\pi r/T)^2}{r} \quad \rightarrow \quad T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{Gm_S}\right) r^3 = \sigma r^3$$

حيث أن σ ثابت مقداره :

$$\sigma = \frac{4\pi^2}{Gm_S} = 2.97 \times 10^{-19}\ s^2/m^3$$

وهو يعادل $\left[1\ \frac{(year)^2}{(AU)^3}\right]$ لنظامنا الشمسي عندما تقاس T بالسنوات و r بالوحدات الفلكية[٢].

وقد أثبت نيوتن أن هذه المعادلة صالحة أيضاً للمدارات الإهليلجية لأن نصف المحور الرئيسي للمدار الدائري هو نصف قطرها:

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{Gm_S}\right) a^3 = \sigma a^3 \qquad \ldots\ldots 1.1$$

تمثل المعادلة 1.1 قانون كبلر الثالث حيث أن T: زمن دوران الكوكب دورة واحدة حول الشمس، و a: نصف المحور الكبير لمدار الكوكب ذي القطع الناقص. ويُلاحظ أن زمن دوران الكوكب لا يعتمد على الانحراف المركزي e. والكويكب الموجود في مدار إهليلجي ممدود نصف محوره الكبير a سيكون له نفس الفترة المدارية لكوكب في مدار دائري نصف قطره a، والفرق الرئيسي هو أن الكويكب يتحرك بسرعات مختلفة في نقاط مختلفة في مداره الإهليلجي (الشكل ١-٢)، بينما تكون سرعة الكوكب ثابتة حول مداره الدائري. وإذا افترضنا مدار تابع كالقمر حول الأرض فإن قيمة الثابت σ ستتغير، وتُستبدل كتلة الشمس m_S بكتلة الأرض m_E بحيث $(\sigma = 4\pi^2/Gm_E)$.

مثال ١-١: في أي نقطة في مدار إهليلجي الشكل يتحرك الكوكب بشكل أسرع؟ أبطأ؟

الحل: تُعتبر الطاقة الميكانيكية محفوظة عند تحرك الكوكب في مداره. وتكون الطاقة الحركية للكوكب $\left(E_k = \frac{1}{2}mv^2\right)$ بقيمتها العظمى عندما تكون الطاقة الكامنة $(U = -Gm_Sm/r)$ بأدنى قيمة (أي الأكثر سلبية)، وهذا يحدث عندما تصبح المسافة بين الشمس والكوكب r أقل ما يمكن. ولذلك فإن السرعة v تكون الأكبر عند الحضيض. وأيضاً فإن E_k تكون بقيمتها الأقل عندما r بأكبر قيمة، ولذا فإن السرعة ستكون الأبطأ عند الأوج.

مثال ١-٢: الكويكب بالاس Pallas لديه فترة مدارية تبلغ 4.62 سنة وانحراف مركزي 0.233. جد قيمة المحور شبه الرئيسي لمداره.

---

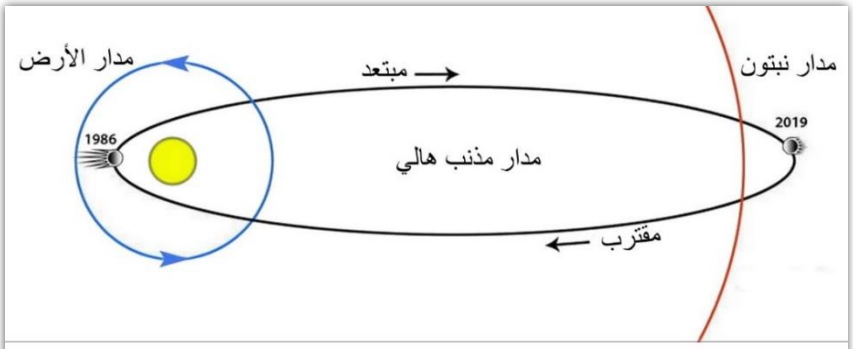
٢) أثبت أن $\left[\frac{4\pi^2}{Gm_S} = 1\ \frac{(year)^2}{(AU)^3}\right]$.

الحل : نستعمل قانون كبلر الثالث،

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{Gm_S}\right)a^3 = \sigma a^3$$

$$a = \left(\frac{T^2}{\sigma}\right)^{1/3} = \left[\frac{(4.62 \times 3.156 \times 10^7\ s)^2}{2.97 \times 10^{-19}\ s^2/m^3}\right]^{1/3} = 4.15 \times 10^{11}\ m = 4.15 \times 10^8\ km$$

مثال ١-٣: يتحرك مذنّب هالي Comet Halley (الشكل ١-٤) في مدار إهليلجي طويل حول الشمس. ويبلغ بعده عن الشمس عند الحضيض $(8.80 \times 10^7\ km)$ وعند الأوج $(5.25 \times 10^9\ km)$. جد المحور شبه الرئيسي المداري a والانحراف المركزي e والفترة الزمنية المدارية T بالسنوات.



الشكل ١-٤: مدار مذنب هالي.

الحل: نستعمل الشكل ١-١ لإيجاد a و e من مسافتي الأوج والحضيض المعطاة في السؤال. وإذا علمنا قيمة a أمكن إيجاد T من قانون كبلر الثالث.

الطول $2a$ في الشكل ١-١ للمحور الرئيسي يساوي مجموع المسافة بين المذنّب والشمس عند الحضيض وعند الأوج. ولذلك

$$a = \frac{(8.80 \times 10^7\ km) + (5.25 \times 10^9\ km)}{2} = 2.67 \times 10^9\ km$$

ويبين الشكل ١-١ أيضاً أن المسافة بين المذنّب والشمس عند الحضيض هي:

$$a - ea = a(1 - e) = 8.80 \times 10^7\ km$$

$$e = 1 - \frac{8.80 \times 10^7\ km}{a} = 1 - \frac{8.80 \times 10^7\ km}{2.67 \times 10^9\ km} = 0.967$$

تُحسب الفترة الزمنية من المعادلة 1.1،

$$T = \frac{2\pi a^{3/2}}{\sqrt{Gm_S}}$$

$$= \frac{2\pi(2.67 \times 10^{12}\ m)^{3/2}}{\sqrt{(6.67 \times 10^{-11}\ N.m^2/kg^2)(1.99 \times 10^{30}\ kg)}} = 2.38 \times 10^9\ s = 75.3\ y$$

يُلاحظ هنا أن الانحراف المركزي لمذنّب هالي قريب من 1، وبالتالي فإن المدار ممدود جداً كما في الشكل ١-٤. وكان المذنّب هالي قد شوهد من الأرض عام 1986 عندما كان في الحضيض، وموعد حضيضه القادم بعد فترة زمنية واحدة في عام 2061.

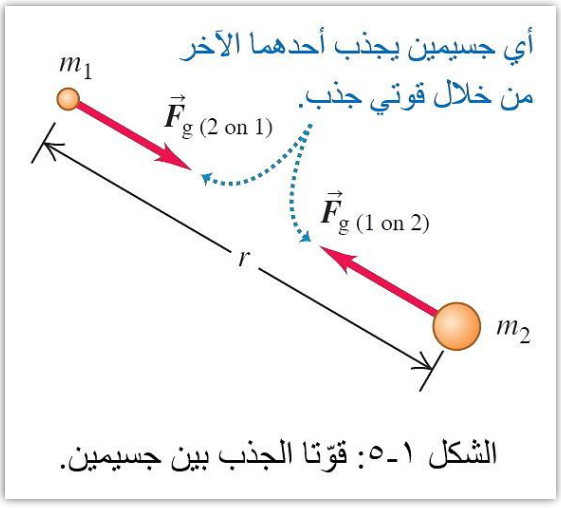
١-٢: قانون نيوتن للجاذبية 1-2: Newton's Law of Gravitation

بعد دراسة تأثيرات حركات الكواكب حول الشمس والقمر حول الأرض والاستفادة من قانون كبلر الثالث اكتشف نيوتن قانون الجاذبية الذي يصف التجاذب بين أي جسمين ونشره عام 1687، وينص على ما يلي: (كل جسيم في الكون يجذب كل جسيم آخر بقوة تتناسب طردياً مع حاصل ضرب الكتلتين وعكسياً مع مربع المسافة بينهما).

إذا كان للجسيمين الكتلتان m_1 و m_2 ويبعدان عن بعض بالمسافة r فإن قيمة قوة الجاذبية بينهما هي:

$$F_g = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad \ldots\ldots 1.2$$

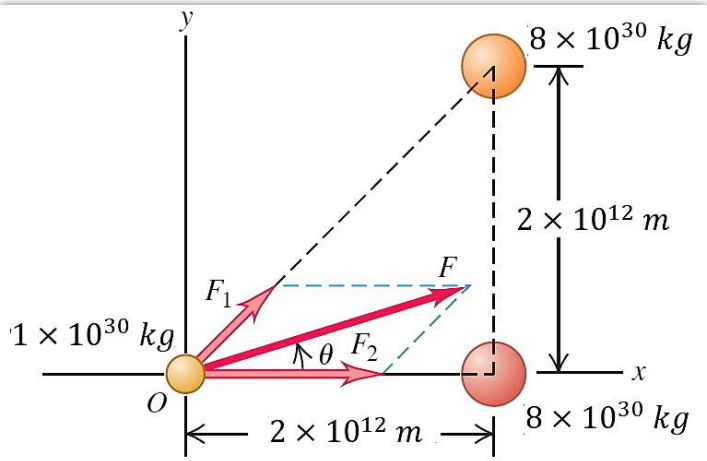
حيث G: ثابت يُدعى ثابت الجذب العام universal gravitational constant، وهو ثابت فيزيائي أساسي له نفس القيمة لأي جسيمين، وقيمته: $(6.674 \times 10^{-11}\ N.m^2/kg^2)$. وقد حُسب لأول مرة في أواخر القرن التاسع عشر. ولم يعبر نيوتن عن قانون الجاذبية وفق شكل المعادلة 1.2، ولم يذكر ثابتاً مثل G.



الشكل ١-٥: قوّتا الجذب بين جسيمين.

تعمل قوى الجاذبية دائماً على طول الخط الذي يربط بين الجسيمين وتشكل زوجاً من الفعل ورد الفعل. وحتى عندما تكون كتلتا الجسيمين مختلفتين، فإن قوتي التفاعل بينهما لهما نفس المقدار بحيث: $\left(\vec{F}_{g\ (1\ on\ 2)} = \vec{F}_{g\ (2\ on\ 1)}\right)$ كما في الشكل ١-٥. وكمثال على هذا فإن القوة الجاذبة التي يمارسها جسمك على الأرض لها نفس القوة التي تمارسها الأرض عليك، وعندما يسقط شخص من لوح غطس إلى حمام سباحة ترتفع الأرض كلها لمقابلته! (لا يلاحَظ هذا لأن كتلة الأرض أكبر من كتلة الشخص بما يقارب 10^{23}. ومن ثم فإن تعجيل الأرض هو 10^{-23} فقط بقدر تعجيل الشخص).

مثـــال ١-٤: تنتمي العديد من النجوم إلى أنظمة مكونة من نجمين أو أكثر مرتبطة ببعضها البعض من خلال جاذبيتها المتبادلة. ويوضح الشكل ١-٦ نظاماً ثلاثي النجوم في لحظة عندما تكون النجوم عند رؤوس مثلث قائم الزاوية، والزاويتان الأخريان قياس كل منهما 45°. جد إجمالي قوة الجاذبية المؤثرة على النجم الصغير بواسطة النجمين الكبيرين.



الشكل ١-٦: نظام ثلاثي النجوم.

الحل: القوة الكلية $\vec{F}$ على النجم الصغير هي المجموع الاتجاهي للقوتين $\vec{F}_1$ و $\vec{F}_2$ الناتجتين بسبب النجمين الكبيرين كما مبين في الشكل ١-٦. ونفترض أن النجوم كرات، ونحسب أولاً المقدارين F_1 و F_2 من المعادلة 1.2 ثم نحسب المجموع الاتجاهي باستعمال المركبات:

$$F_1 = (6.67 \times 10^{-11}\ N.m^2/kg^2)\frac{(8 \times 10^{30}\ kg)(1 \times 10^{30}\ kg)}{(2 \times 10^{12}\ m)^2 + (2 \times 10^{12}\ m)^2} = 6.67 \times 10^{25}\ N$$

$$F_2 = (6.67 \times 10^{-11}\ N.m^2/kg^2)\frac{(8 \times 10^{30}\ kg)(1 \times 10^{30}\ kg)}{(2 \times 10^{12}\ m)^2} = 1.33 \times 10^{26}\ N$$

مركبات x و y لهذه القوى هي:

$$F_{1x} = (6.67 \times 10^{25}\ N)\cos 45° = 4.72 \times 10^{25}\ N$$
$$F_{1y} = (6.67 \times 10^{25}\ N)\sin 45° = 4.72 \times 10^{25}\ N$$
$$F_{2x} = 1.33 \times 10^{26}\ N$$
$$F_{2y} = 0$$

مركبتا القوة الكلية $\vec{F}$ على النجم الصغير هما:

$$F_x = F_{1x} + F_{2x} = 4.72 \times 10^{25}\ N + 1.33 \times 10^{26}\ N = 1.8 \times 10^{26}\ N$$
$$F_y = F_{1y} + F_{2y} = 4.72 \times 10^{25}\ N$$

تُحسب قيمة $\vec{F}$ وزاويتها كما يلي:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(1.8 \times 10^{26}\ N)^2 + (4.72 \times 10^{25}\ N)^2} = 1.86 \times 10^{26}\ N$$

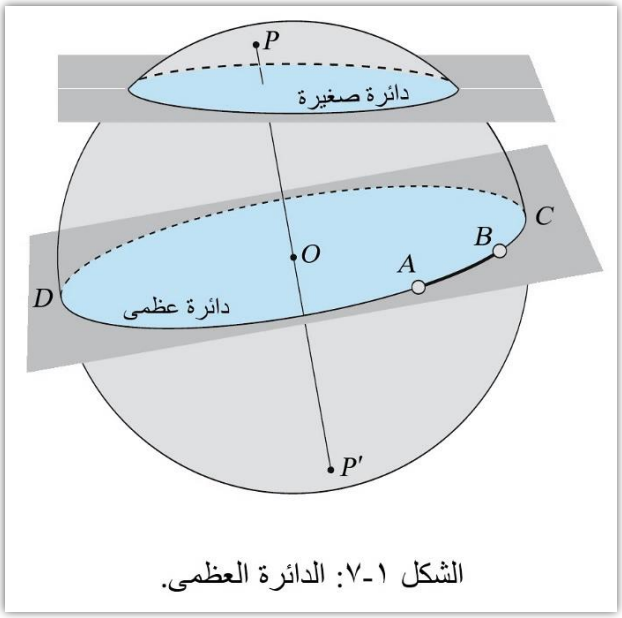
$$\theta = \tan^{-1}\frac{F_y}{F_x} = \tan^{-1}\frac{4.72 \times 10^{25}}{1.8 \times 10^{26}} = 14.69°$$

١-٣: هندسة الكرة 1-3: Spherical Geometry

من مهام علم الفلك هو إيجاد الاتجاهات النسبية للأجرام السماوية كما يراها الراصد، فتظهر له هذه الأجرام وكأنها واقعة على سطح كرة هائلة تسمى الكرة أو القبّة السماوية celestial sphere، وهو واقف في مركزها. لذلك سوف ندرس بعض خواص هذه الكرة لأهميتها في تعيين مواقع الأجرام السماوية.

الدائرة العظمى Great Circle

تُعرّف الكرة بأنها سطح مغلق يبعد عن نقطة تسمى المركز بأبعاد متساوية، ويسمى الخط المستقيم الواصل بين السطح والمركز بنصف القطر. وإذا مرّ مستوٍ عبر مركز الكرة فإنه سيقسم الكرة إلى نصفين متطابقين مولداً دائرة تسمى الدائرة العظمى great circle. ففي الشكل ١-٧ تكون الدائرة العظمى هي $(ABCD)$، ولو كان قطر الكرة POP' عمودياً على هذه الدائرة سميت النقطتان P و P' قطبي الدائرة. وإذا تقاطعت الكرة مع مستوى لا يمر بالمركز فإن منحنى التقاطع يكون دائرة صغيرة small circle.



الشكل ١-٧: الدائرة العظمى.

المثلثات الكروية Spherical Trigonometry

المثلث الكروي spherical triangle هو المثلث الذي تشكل أضلاعه أقواساً من دوائر كبرى، وليس أي زاوية ثلاثية في الكرة. وبمعنى آخر لو رسمنا ثلاث نقاط على سطح كرة وأوصلنا بينها بأقواس من دوائر كبرى لأصبح الشكل مثلثاً كروياً. ففي الشكل ١-٨ نرى المثلث الكروي ABC الذي تكون أضلاعه AB, BC, AC أقواساً من دوائر كبرى، وتقاس هذه الأضلاع بالدرجات التي تقابلها في مركز الكرة. وإذا كان r نصف قطر الكرة فإن طول القوس AB هو

$$|AB| = rc, \qquad [c] = \text{rad}$$

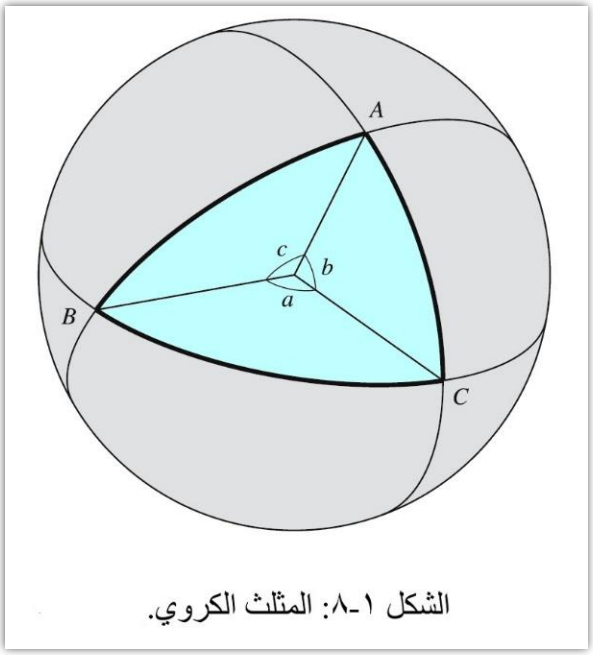
حيث c هي الزاوية المقابلة للقوس AB كما تُرى من المركز. وهذه الزاوية تسمى الزاوية المركزية للضلع AB. ونظراً لأن أطوال الأضلاع والزوايا المركزية تتوافق مع بعضها البعض فمن المعتاد التعامل

بالزوايا المركزية بدلاً من الأضلاع. وبهذه الطريقة لا يدخل نصف قطر الكرة في معادلات المثلثات الكروية. ويشار إلى زوايا المثلث الكروي بأحرف كبيرة (A, B, C)، وإلى الزوايا المركزية المقابلة أو الأضلاع المقابلة بأحرف صغيرة (a, b, c)، أي:

$\measuredangle CAB = A$ ، والضلع المقابل لها a (مقاساً بالدرجات)،

$\measuredangle ABC = B$ ، والضلع المقابل لها b (مقاساً بالدرجات)،

$\measuredangle BCA = C$ ، والضلع المقابل لها c (مقاساً بالدرجات).



الشكل ١-٨: المثلث الكروي.

ومن خواص المثلث الكروي:

١- مجموع أي ضلعين فيه أكبر من الضلع الثالث (مقاسة بالزوايا التي تقابلها).

٢- مجموع الزوايا الثلاث للمثلث الكروي أكثر من $180°$.

٣- أي زاوية منه تقل عن $180°$.

وتصح العلاقات التالية للمثلث الكروي:

* قانون الجيوب law of sines:

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C} \qquad \dots\dots 1.3$$

* قانون الجيوب تمام للأضلاع law of cosines for sides:

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A \qquad \dots\dots 1.4$$

وبالمثل يمكن الحصول على علاقات الجيب تمام للأضلاع المتبقية للمثلث، وهي:

$$\cos b = \cos c \cos a + \sin c \sin a \cos B \qquad \dots\dots 1.4'$$

$$\cos c = \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos C \qquad \dots\dots 1.4''$$

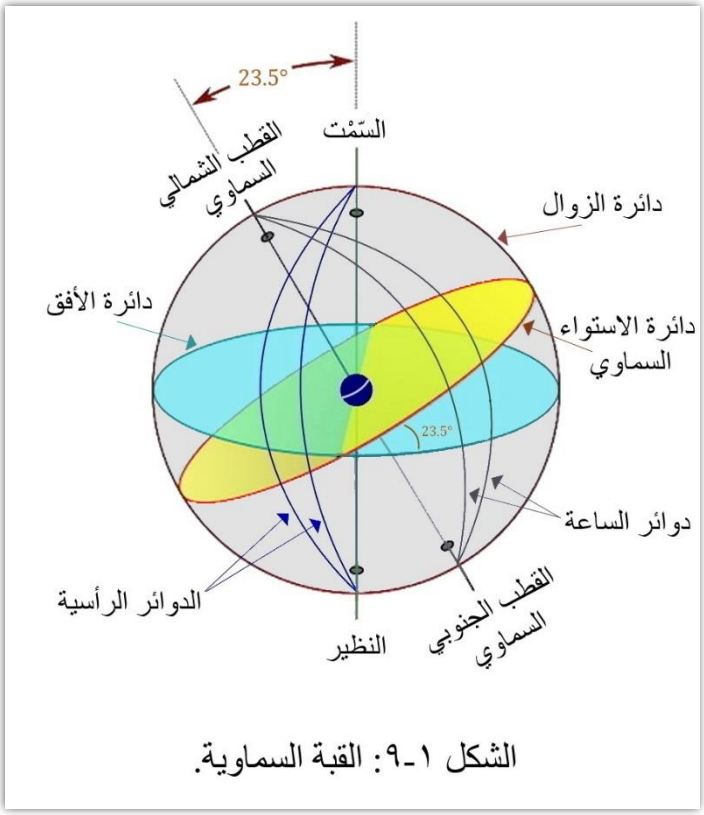
أي يمكن حساب قيمة أي ضلع في المثلث الكروي إذا كان الضلعان الباقيان والزاوية المحصورة بينهما معلومة.

* قانون الجيوب تمام للزوايا law of cosines for angles:

$$\cos A = -\cos B \cos C + \sin B \sin C \cos a \quad \ldots\ldots 1.5$$
$$\cos B = -\cos C \cos A + \sin C \sin A \cos b \quad \ldots\ldots 1.5'$$
$$\cos C = -\cos A \cos B + \sin A \sin B \cos c \quad \ldots\ldots 1.5''$$

١-٤: القبة السماوية 1-4: Celestial Sphere

تُلاحظ السماء وكأنها كرة واسعة الأطراف محيطة بنا. وهذه الكرة الوهمية تسمى القبة السماوية، والتي يمكن تصورها على أنها كرة مجوفة تقع الأرض في مركزها وتنتشر الأجرام السماوية على سطحها الداخلي. وهذا الشكل الكروي للسماء إنما هو ناتج من الانحناء الكروي للأرض. أما الحركة الظاهرية للأجرام السماوية من الشرق إلى الغرب فهو لا يمثل حركتها الحقيقية لأن الأرض هي التي تدور حول محورها من الغرب إلى الشرق. ولذلك يتغير وجه السماء بين حين وآخر بالنسبة لأي راصد على سطح الأرض. ويمكن التعرف على أجزاء القبة السماوية عند ملاحظة الشكل ١-٩ وكما سيأتي تفصيله.



الشكل ١-٩: القبة السماوية.

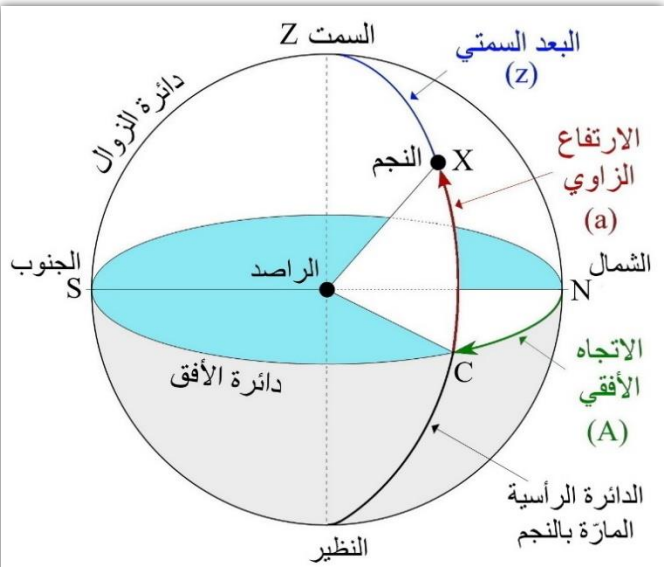
١-٥: نُظُم الإحداثيات على القبة السماوية
1-5: Coordinate Systems on the Celestial Sphere

إن الإحداثيات الأساسية اللازمة لتعيين مكان ما على سطح الأرض هي خطوط الطول longitude وخطوط العرض latitude. أما بالنسبة للأجرام السماوية المراد تعيين موقعها في السماء فيُستعمل أكثر من نظام لهذا، وكما يلي:

١-٥-١: نظام الأفق 1-5-1: Horizontal System

النظام الإحداثي الأكثر طبيعية من وجهة نظر المراقب هو النظام الأفقي (الشكل ١-١٠). والمستوى الأساسي له هو المستوى المماس للأرض (الذي تحيط به دائرة الأفق horizon) ويمر عبر الراصد، ويتقاطع هذا المستوى الأفقي مع الكرة السماوية على امتداد الأفق. والنقطة التي تقع فوق الراصد مباشرة تسمى السَّمْت zenith، والنقطة المقابلة أسفل الراصد تسمى النظير nadir. وتبعد دائرة الأفق 90° عن كل من سمت الرأس والنظير. وتسمى الدوائر الكبيرة التي تمر عبر السمت بالدوائر الرأسية vertical circles، وهي الدوائر العظمى الوهمية المارة بالسمت والنظير، وكل الدوائر الرأسية عمودية على دائرة الأفق. وجميع الخطوط العمودية تتقاطع مع الأفق بشكل عمودي.

وهنالك أيضاً دائرة الزوال meridian circle، وهي الدائرة العظمى الوهمية التي تمر بسمت الرأس والنظير والقطبين السماويين والنقطتين الشمالية والجنوبية من الأفق. وهي تحيط القبة السماوية بصورة كاملة. ومع ذلك فإن الراصد يتصور وكأنه يشاهد نصف دائرة في أي وقت، حيث إنها دائرة رأسية لأنها عمودية على الأفق في نقطتي الشمال والجنوب. والجزء الذي يراه الراصد فوق الأفق يدعى منحنى الزوال، وهذا المنحنى يقسم سماء الراصد دائماً إلى قسمين هما الشرقي والغربي. أما التأثير الملاحظ من قبل الراصد فهو أن دائرة الزوال بالنسبة له ثابتة دائماً في حالة حركة الكرة السماوية خلال 24 ساعة. والوقت الذي تمر عنده الشمس في دائرة الزوال خلال النهار يدعى وقت زوال الشمس أو وقت الظهيرة، وبعد 12 ساعة تمر الشمس مرة أخرى خلال دائرة الزوال ولكن أسفل دائرة الأفق، وهذا يدعى منتصف الليل فلكياً.



الشكل ١-١٠: نظام الأفق.

إن الإحداثيين الأساسيين في نظام الأفق هما:

أ- **الارتفاع الزاوي** altitude (a): وهو ارتفاع الجرم السماوي عن الأفق مقيساً بالدرجات وأجزائها. ويقع ضمن النطاق $[-90°, +90°]$، فهو موجب للأجرام الموجودة فوق الأفق، وتكون قيمته حينئذ محصورة بين 0° عندما يكون الجرم عند الأفق و 90° عندما يكون مباشرة عند السمت، وسالب للأجرام

الموجودة تحت الأفق. لذا فإن الارتفاع الزاوي للقطب السماوي عن الأفق يساوي خط عرض الراصد. ويلاحظ من الشكل ١-١٠ أننا لو رسمنا الدائرة الرأسية CXZ المارة بالنجم X فإن الارتفاع الزاوي a يعادل:

$$a = 90° - z \qquad \ldots\ldots 1.6$$

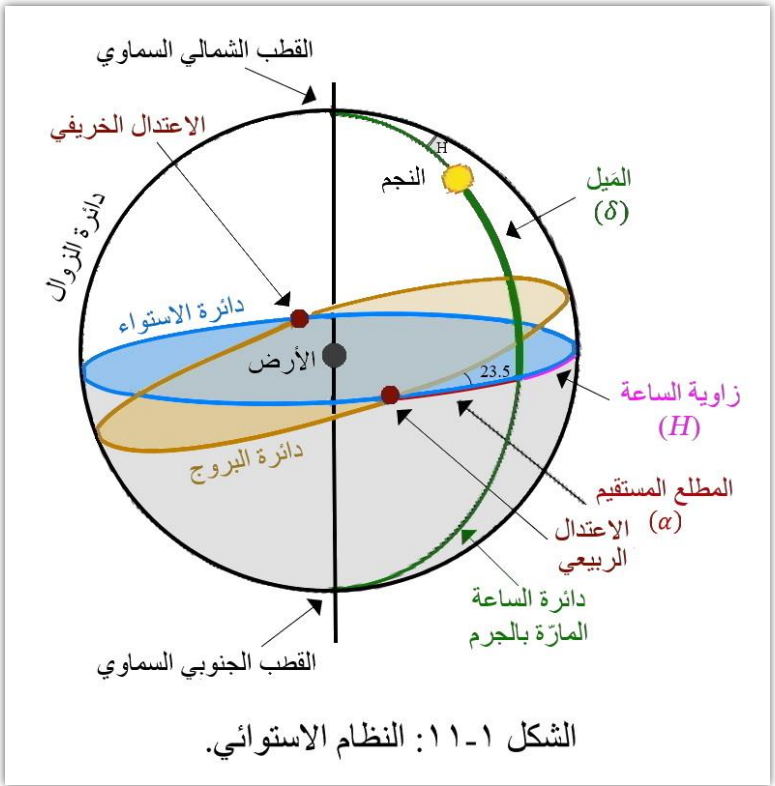
حيث z هو البعد السمتي zenith distance، وهو البعد الزاوي للجرم السماوي عن سمت الرأس.

ب- الاتجاه الأفقي Azimuth (A): وهو الإزاحة الزاوية المحصورة بين دائرة الزوال والدائرة الرأسية المارة بالجرم، وتقاس هذه الزاوية على دائرة الأفق من نقطة الشمال إلى نقطة التقاء الدائرة الرأسية بالأفق شرقاً إذا كان الجرم في الجزء الشرقي من القبة السماوية أو غرباً إذا كان في الجزء الغربي.

في الشكل ١-١٠، يمكن رؤية ارتفاع النجم X واتجاهه الأفقي في لحظة ما. ومع تحرك النجم على طول مساره اليومي بالنسبة للراصد الأرضي سيتغير إحداثياه، وهذا يُصعب من عملية الرصد. وهناك صعوبة أخرى في هذا النظام وهي طابعه الموقعي. فلو تبدل مكان الراصد فإن إحداثيات نفس النجم في نفس اللحظة تختلف باختلاف المراقبين. وبما أن الإحداثيات الأفقية تعتمد على الوقت والموقع، فلا يمكن استخدامها مثلاً في النشرات المصورة catalogues للنجوم.

١-٥-٢: النظام الاستوائي
1-5-2: Equatorial System

يظل اتجاه محور دوران الأرض ثابتاً تقريباً، وكذلك المستوى الاستوائي المتعامد مع هذا المحور. ولذلك فإن المستوى الاستوائي هو مستوى مرجعي مناسب لنظام إحداثي يكون مستقلاً عن الوقت وموقع الراصد. ويعتمد هذا النظام كلياً على دوران الكرة الأرضية، فإذا افترضنا أن الأرض واقعة في مركز القبة السماوية فإن المحل الهندسي لتقاطع خطوط الطول والعرض الجغرافية بمحيط القبة السماوية هو ما



الشكل ١-١١: النظام الاستوائي.

نسميه بإحداثيات النظام الاستوائي للقبة السماوية. وتقاطع الكرة السماوية مع المستوى الاستوائي هو دائرة عظيمة تسمى دائرة الاستواء السماوي celestial equator، وهي الدائرة العظمى الوهمية الواقعة في منتصف المسافة بين القطبين الشمالي والجنوبي للقبة السماوية، أي الموازية لدائرة الاستواء الأرضي، حيث أنها تقسم الكرة السماوية إلى نصفين متساويين شمالي وجنوبي، (لاحظ الشكل ١-١١).

والقطبان السماويان celestial poles هما نقطتان في طرفي القبة السماوية حيث يمتد محور الكرة الأرضية عند امتداده باتجاهين متعاكسين إلى أعماق الفضاء الخارجي. وتدعى النقطة التي تقع عمودياً فوق القطب الشمالي الجغرافي بالقطب الشمالي السماوي، والتي تقع عمودياً أسفل القطب الجنوبي الجغرافي الأرضي بالقطب الجنوبي السماوي. وتدور الكرة السماوية حول هذين القطبين كما هو الحال عند دوران الأرض حول محورها.

ومن المفيد أن نذكر بأن نجم الجدي أو النجم القطبي Polaris يُعدّ حالياً الدليل الرئيسي للسماء الشمالية، ويبعد بأقل من درجة واحدة عن القطب السماوي الشمالي، ويبدو كأنه ثابت بسبب حركته الطفيفة في موقعه.

أما إحداثيات النظام الاستوائي فهي:

أ- المَيل (δ) declination: هو البعد الزاوي للجرم السماوي عن دائرة الاستواء السماوي، وهو يقابل خط العرض الجغرافي ويقاس بالدرجات وأجزائها (درجة، دقيقة قوسية، ثانية قوسية). ويكون ذا إشارة موجبة إذا كان الجرم السماوي شمال دائرة الاستواء، وذا إشارة سالبة إذا كان الجرم السماوي جنوب دائرة الاستواء. ويُعتبر الميل ثابت المقدار خلال الحركة اليومية للسماء، حيث يبدو أن النجوم تدور حول القطب السماوي مرة واحدة كل يوم فترسم على السماء دوائر وهمية صغيرة موازية لخط الاستواء.

ب- زاوية الساعة (H) hour angle: هي الإزاحة الزاوية المحصورة بين مستوى زوال الراصد ومستوى موقع الجرم السماوي. وتقاس عادة بوحدات الساعة الزمنية وأجزائها (ساعة، دقيقة، ثانية) وحسب اتجاه حركة الجرم حول القبة السماوية. وعندما يكون مستوى الجرم السماوي ماراً بنقطة الاعتدال الربيعي فإن زاويته الساعية تعادل الزمن النجمي sidereal time S_t.

ج- **المطلع المستقيم** (α) right ascension: هو الإزاحة الزاوية المقاسة باتجاه الشرق على امتداد دائرة الاستواء السماوي من نقطة الاعتدال الربيعي إلى دائرة الساعة المارة بالجرم السماوي باتجاه عكس عقرب الساعة، وهو يقابل خط الطول الجغرافي الأرضي، ولكنه يختلف عنه بطريقة القياس لأن خط الطول الجغرافي يمكن أن يقاس باتجاهين بالنسبة لخط گرينتش Greenwich. ويقاس المطلع المستقيم بالساعات والدقائق والثواني بحيث أن كل 24 ساعة من المطلع المستقيم تعادل 360°. ودوائر الساعة hour circles: هي الدوائر السماوية العظمى التي تمر بالقطبين السماويين الشمالي والجنوبي، وتكون عمودية على دائرة الاستواء السماوي.

إن المطلع المستقيم والميل لا يعتمدان على الزمن بصورة مباشرة، أي إنهما يتغيران تغيراً صغيراً جداً خلال السنة الواحدة.

نقطة الاعتدال الربيعي vernal equinox: في الربيع، تظهر الشمس متحركة من نصف الكرة السماوية الجنوبي إلى النصف الشمالي وتعبر ظاهرياً دائرة الاستواء السماوي، ونقطة التقاطع التي ترسمها في الفضاء مع دائرة البروج تسمى نقطة الاعتدال الربيعي، حيث يتقاطع المستويان الاستوائي والبروجي على امتداد خط مستقيم متجه نحو الاعتدال الربيعي، والذي يكون عنده ميل الشمس ومطلعها المستقيم صفراً. ولذلك يمكننا استخدام هذا الاتجاه كنقطة الصفر لكل من النظامين الاستوائي والبروجي، فمن هذه النقطة يبدأ حساب خطوط الطول السماوية.

والنقطة المقابلة للاعتدال الربيعي هي الاعتدال الخريفي autumnal equinox، وهي النقطة التي تعبر فيها الشمس خط الاستواء من الشمال إلى الجنوب.

الزمن النجمي أو الفلكي S_t sidereal time: هو مقدار الزمن المقضي منذ آخر مرة اجتاز فيها الاعتدال الربيعي دائرة الزوال. وهو أيضاً يكافئ زاوية الساعة لنقطة الاعتدال الربيعي. ومجموع زاوية الساعة للجرم السماوي ومطلعه المستقيم يساوي الزمن النجمي:

$$S_t = \alpha + H \qquad \ldots\ldots 1.7$$

وهو مقياس زمني يعتمد على معدل دوران الأرض المقاس بالنسبة للنجوم الثابتة. فعند النظر من نفس الموقع الأرضي فإن النجم الذي يتم رؤيته في موقع واحد في السماء سيتم رؤيته في نفس الموقع في ليلة أخرى في نفس الوقت من النهار (أو الليل)، بينما يتم حساب التوقيت الشمسي وفقاً لموقع الشمس في السماء. لذا فاليوم الفلكي أو النجمي هو ذلك الوقت الذي تستغرقه الأرض لتتم دورة كاملة حول

محورها وتعادل ($23^h56^m4.0905^s$)، وهو أقصر من اليوم الشمسي solar day بـ 3^m56^s تقريباً، ويرجع ذلك الاختلاف بين اليوم النجمي واليوم الشمسي إلى حركة الأرض الانتقالية حول الشمس. والسنة الفلكية هي الفترة المدارية الحقيقية للأرض حول الشمس. وبعد سنة فلكية واحدة، تُرى الشمس في نفس الموقع بالنسبة للنجوم.

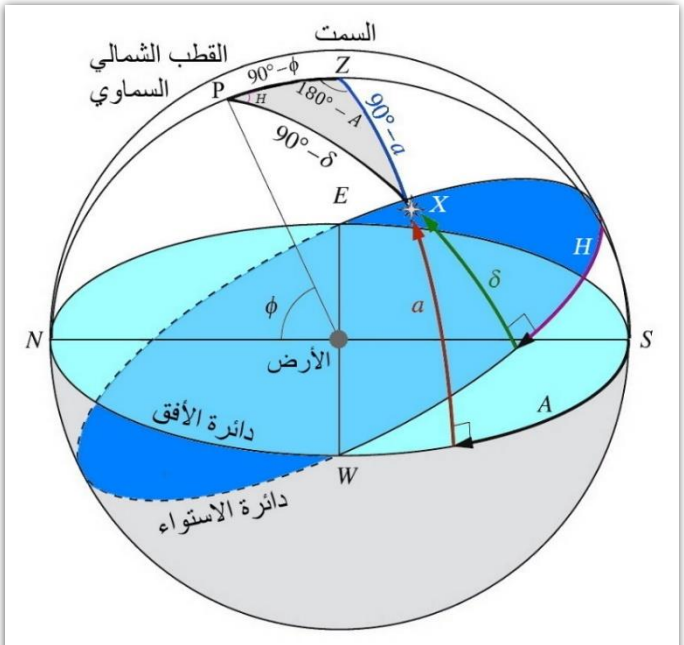
بما أن النظام الاستوائي يستند إلى دائرة الاستواء السماوي والاعتدال الربيعي وأن الميل والمطلع المستقيم مستقلان عن موضع الراصد وحركات الأرض، فإن التغييرات في خطي الطول والعرض للراصد الأرضي لن تؤثر على قيم الميل والمطلع المستقيم، لأن اتجاه محور دوران الأرض يبقى ثابتاً تقريباً، وكذلك المستوى الاستوائي المتعامد مع هذا المحور، حيث يظل اتجاه المستوى الاستوائي للأرض ثابتاً ولا يتأثر بالحركة السنوية. ولن تتأثر أيضاً قيم δ و α بالحركة السنوية للأرض حول الشمس، وعدم التأثر هذا ليس تاماً فقد يعترضه بعض الاضطرابات. وبسبب دقة الحسابات المستندة إلى δ و α فإنه يمكن استخدامهما في خرائط النجوم والنشرات المصورة.

إن إحداثيات النظام الاستوائي مهمة جداً في الأرصاد الفلكية، وتوجد عادة جداول فلكية خاصة صُنفت فيها الإحداثيات لكثير من الأجرام السماوية بمختلف أنواعها كالكواكب والنجوم والمجرات.

١-٥-٣: التحويل بين النظامين الأفقي والاستوائي

1-5-3: Transformation between the Horizontal and Equatorial Systems

من الطرق الرياضية الشائعة في الفلك الكروي هي استخراج موقع الجرم السماوي في نظام إحداثي معين من نظام إحداثي آخر. وفيما يلي ملخص لتحويل النظام الأفقي الى استوائي وبالعكس، أي استخراج كل من المَيل δ أو المطلع المستقيم α بدلالة الاتجاه الأفقي A والارتفاع الزاوي a إذا كانت زاوية العرض ϕ معلومة. ففي الشكل ١-١٢ نلاحظ المثلث الكروي المتألف من القطب السماوي



الشكل ١-١٢: التحويل بين النظامين الأفقي والاستوائي.

الشمالي P والسمت Z وموقع الجرم السماوي X، ويُلاحظ أن:

$$PZ = 90° - \phi \quad , \qquad PX = 90° - \delta$$

حيث ϕ: زاوية خط العرض الجغرافي لموقع الراصد، أو الارتفاع الزاوي للقطب الشمالي السماوي.

وإذا استخدمنا قاعدة المثلث الكروي في استخراج ضلع من ضلعين مقابلين له وزاوية محصورة بينهما كما في المعادلة 1.4 فسينتج:

$$\cos z = \cos(90° - \phi)\cos(90° - \delta) + \sin(90° - \phi)\sin(90° - \delta)\cos H$$

$$\cos z = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos H \qquad \ldots\ldots 1.8$$

وبالمثل يمكن الحصول على المعادلة التالية:

$$\sin\delta = \sin\phi \cos z + \cos\phi \cos A \sin z \qquad \ldots\ldots 1.9$$

وأيضاً يمكن الحصول على المعادلات التالية:

$$\sin H \cos\delta = \sin A \cos a \qquad \ldots\ldots 1.10$$

$$\cos H \cos\delta = \cos A \cos a \sin\phi + \sin a \cos\phi \qquad \ldots\ldots 1.11$$

$$\sin\delta = -\cos A \cos a \cos\phi + \sin a \sin\phi \qquad \ldots\ldots 1.12$$

حيث أن:

z: البعد السمتي (بالدرجات)، و $(z = 90° - a)$، و a: الارتفاع الزاوي للجرم السماوي.

A: زاوية الاتجاه الأفقي للجرم السماوي.

δ: ميل الجرم السماوي، ونحصل على قيمته من الجداول الفلكية عادة.

H: زاوية الساعة، والتي يمكن استخراج قيمتها باستخدام المعادلة 1.7 بعد معرفة الزمن النجمي S_t الذي يمكن قراءته من بعض الساعات الزمنية الخاصة التي تدعى بالساعات النجمية.

ويمكن تحويل الوحدات الزاوية إلى الوحدات الزمنية أو بالعكس كما في الجدول ١-١ الذي يلاحظ فيه أن الكميات هي ضمن المدى $[0^h, 24^h]$:

الجدول ١-١: التحويل بين الوحدات الزمنية والقوسية.

الوحدات الزمنية (ساعة، دقيقة، ثانية)	الوحدات القوسية "الزاويّة" (درجة، دقيقة، ثانية)
$24\ h$	$360°$
$1\ h$	$15°$
$4\ m$	$1°$
$1\ m$	$15'$
$4\ s$	$1'$
$1\ s$	$15''$

مثال ١-٥: تم رصد نجم مَيله $42°21'$ شمالاً في منطقة خط عرض $60°$ شمالاً في وقت كانت زاوية الساعة $8^h16^m42^s$، جد: الارتفاع الزاوي للنجم عن الأفق واتجاهه الأفقي.

الحل: $\phi = 60°\ N\ ,\ \delta = 42°21' = 42.35°\ N$

$$H = 8^h 16^m 42^s = 8.278\ h = 8.278 \times 15° = 124.17°$$

من المعادلة 1.8 يمكن استخراج قيمة الارتفاع الزاوي للنجم a بعد إيجاد البعد السمتي z،

$$\cos z = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos H$$

$$\cos z = \sin 60 \sin 42.35 + \cos 60 \cos 42.35 \cos 124.17 = 0.376$$

$$z = 67.91°$$

$$a = 90° - z = 90° - 67.91° = 22.09° = 22°\ 5'\ 24''$$

من المعادلة 1.10 يمكن استخراج قيمة الاتجاه الأفقي A: $\sin H \cos\delta = \sin A \cos a$

$$\sin A = \frac{\sin H \cos\delta}{\cos a} = \frac{\sin 124.17 \cos 42.35}{\cos 22.09} = 0.66$$

$$A = 41.29°$$

مثال ١-٦: إذا كان الارتفاع الزاوي للهلال $7°14'24''$ واتجاهه الأفقي $85°33'$، وكان الرصد في مدينة بغداد التي تقع عند خط العرض الجغرافي $33.21°$، فجد: (١) البعد السمتي للهلال، (٢) ميل الهلال عن دائرة الاستواء السماوي، (٣) زاوية الساعة للهلال.

الحل :

$$a = 7°14'24'' = 7° + \left(\frac{14}{60}\right)^{\circ} + \left(\frac{24}{60}\right)^{\circ} = 7.24°$$

$$A = 85°33' = 85° + \left(\frac{33}{60}\right)^{\circ} = 85.55°$$

$$z = 90° - a = 90 - 7.24 = 82.76° \qquad (١)$$

$$\sin\delta = \sin\phi \cos z + \cos\phi \cos A \sin z \qquad (٢)$$

$$= \sin 33.21 \cos 82.76 + \cos 33.21 \cos 85.55 \sin 82.76 = 0.1334$$

$$\delta = 7.667°$$

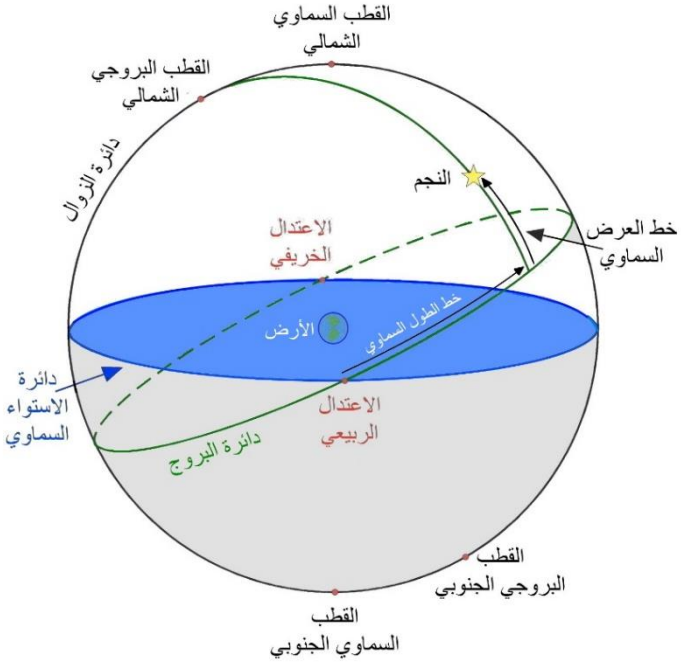
$$\cos z = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos H \qquad (٣)$$

$$\cos H = \frac{\cos z - \sin\phi \sin\delta}{\cos\phi \cos\delta} = \frac{\cos 82.76 - \sin 33.21 \sin 7.667}{\cos 33.21 \cos 7.667} = 0.0638$$

$$H = 86.338° = 86.338 \times \left(\frac{24}{360}\right)^{h} = 5.755^h$$

١-٥-٤: النظام البروجي 1-5-4: Ecliptic System

وهو نظام قديم وقليل الاستعمال حالياً، والدائرة الأساسية فيه هي دائرة البروج التي تمثل المستوى المداري للأرض حول الشمس، أو هي الدائرة الكبرى على القبة السماوية التي ترسمها الشمس خلال عام واحد. والنقطتان الأساسيتان في هذا النظام هما نقطتا القطبين الشمالي والجنوبي لدائرة البروج. والنقطة الصفرية اللازمة لقياس خط الطول السماوي هي نقطة الاعتدال الربيعي. ويكون الاحداثيان الأساسيان هما خط الطول السماوي وخط العرض السماوي كما مبين في الشكل ١-١٣.



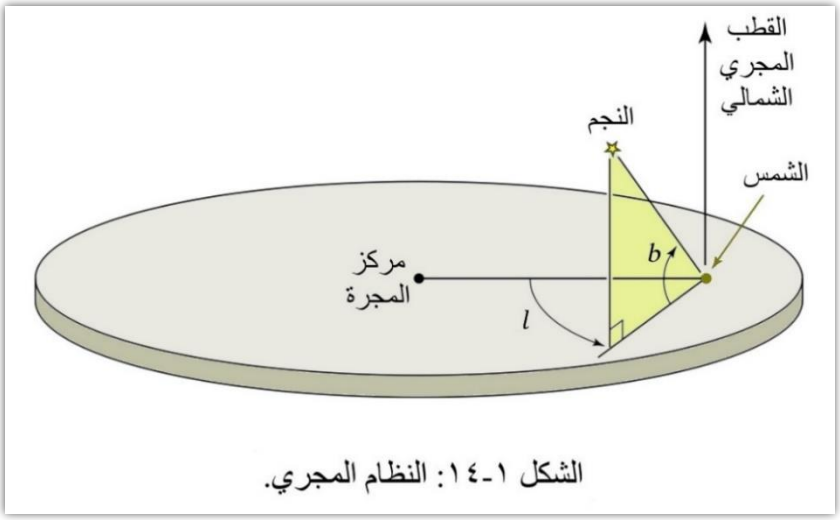
الشكل ١-١٣: النظام البروجي.

يستعمل هذا النظام بشكل أساسي للكواكب والأجرام الأخرى في النظام الشمسي لأن أغلب الكواكب لها مدارات تميل بزاوية صغيرة جداً عن مستوى مدار الكرة الأرضية ولا تخرج كثيراً عن دائرة البروج. وكذلك يُستعمل لمعرفة موقع الشمس (الذي يكون فيه خط العرض صفراً دائماً).

١-٥-٥: النظام المجري 1-5-5: Galactic System

يستخدم هذا النظام لدراسة مجرتنا درب التبانة Milky Way ومواقع الأجرام فيها. والمستوى المرجعي الأكثر طبيعية لهكذا دراسات هو مستوى المجرة (الشكل ١-١٤). وبما أن الشمس قريبة جداً من هذا المستوى، فيمكننا أن نضع نقطة الأصل عند الشمس. والإحداثيان الأساسيان هما:

أ) خط العرض المجري galactic latitude b: هو الازاحة الزاوية مقاسة بالدرجات



الشكل ١-١٤: النظام المجري.

شمال أو جنوب دائرة الاستواء المجري، ويكون موجباً شمالاً وسالباً جنوباً.

ب) خط الطول المجري l galactic longitude: هو الازاحة الزاوية مقاسة ضمن المستوى المجري عكس اتجاه عقرب الساعة من اتجاه مركز المجرة في برج القوس $(\delta = -29°, \alpha = 17^h 45.7^m)$.

١-٦: الكوكبات النجمية 1-6: Constellations

في ظل الظروف المثالية يمكن رؤية حوالي (1000 → 1500) نجم في السماء (فوق الأفق) في أي وقت ليلاً، ويمكن أن يصل عدد النجوم المرئية بالعين المجردة إلى 3000 نجم في نصف الكرة الأرضية، أو 6000 نجم إجمالاً. ويبدو أن بعض النجوم تشكل أشكالاً تشبه أشياء مألوفة للناس مما دعاهم لأن يطلقوا عليها أسماءً تناسب ثقافاتهم وموروثاتهم وتخيلاتهم بلا استناد لأي أساس علمي.

وفي عام 1928 نُظمت نجوم القبة السماوية على يد علماء الفلك بإقرار من الاتحاد الفلكي الدولي International Astronomical Union (IAU) في 88 كوكبة نجمية لتغطي جميع أجزاء السماء المرئية مع تثبيت مواقعها وتنسيق الحدود المناسبة لها تسهيلاً للأرصاد والدراسات الفلكية.

وكمثال نذكر كوكبة الجبار Orion (أو الصياد hunter)، وهي كوكبة تظهر بشكل بارز خلال أمسيات الشتاء في نصف الكرة السماوية الشمالي. وكما في الشكل ١-١٥ تُلاحَظ صورة تظهر فيها منطقة كوكبة الجبار في السماء، وفيها النجوم الزرقاء الثلاثة التي تشكل حزام الصياد. والنجمة الحمراء الساطعة فوق الحزام تشير إلى إبطه المسمّى منكب الجوزاء Betelgeuse الذي يُعد من العمالقة الحمر وأكبر من الشمس بحوالي 450 مليون مرة، ويبعد عنا بحوالي (500 → 600) سنة ضوئية. والنجم الأزرق اللامع الموجود أسفل الحزام هو قدمه ويسمى رجل (رجل الجبار) Rigel.

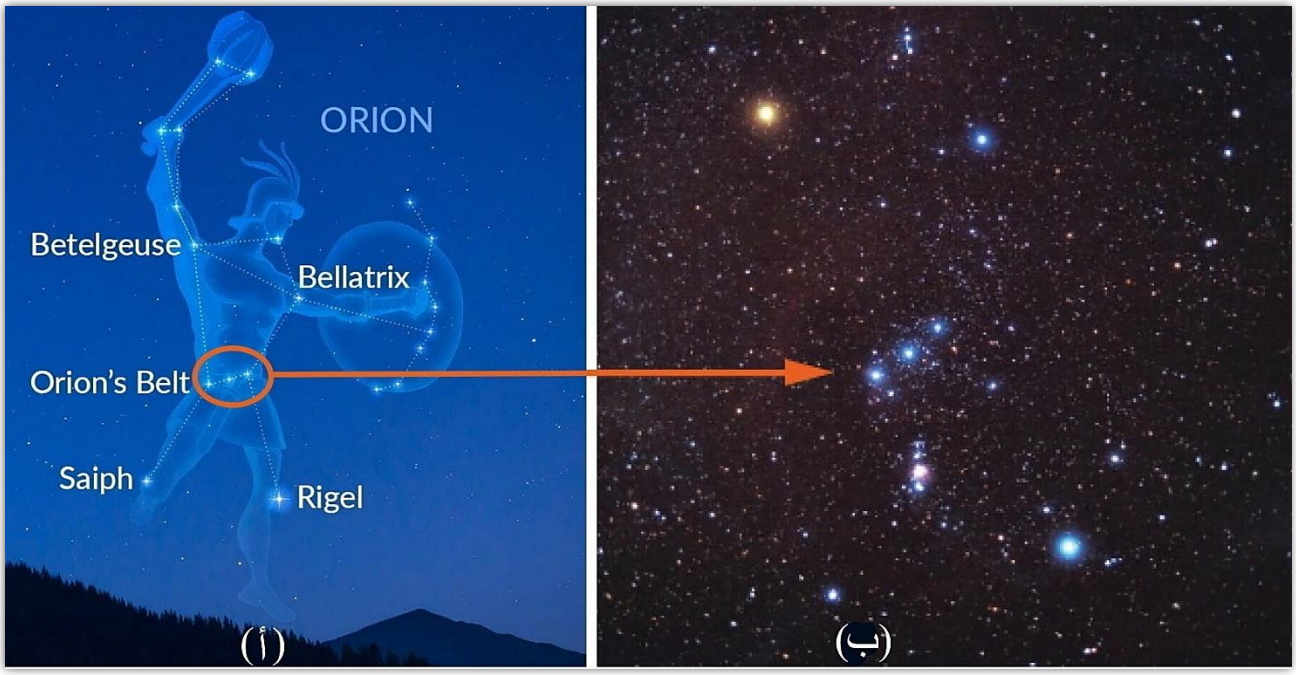
وفيما يلي أهم الكوكبات النجمية التي تظهر في سماء النصف الشمالي للقبة السماوية:

١) أهم كوكبات فصل الشتاء: الجبار والثور وممسك الأعنة والكلب الأكبر والكلب الأصغر والجوزاء والسرطان.

٢) أهم كوكبات فصل الربيع: الأسد والدب الأكبر والدب الأصغر والعذراء والميزان والراعي والتاج.

٣) أهم كوكبات فصل الصيف: العقرب والجاثي والرامي (القوس) والعقاب والسلياق (القيثارة) والجدي والدجاجة.

٤) أهم كوكبات فصل الخريف: الدلو والفرس الأعظم وبرج الحوت والمرأة المسلسلة وذات الكرسي وفرساوس والحمل.

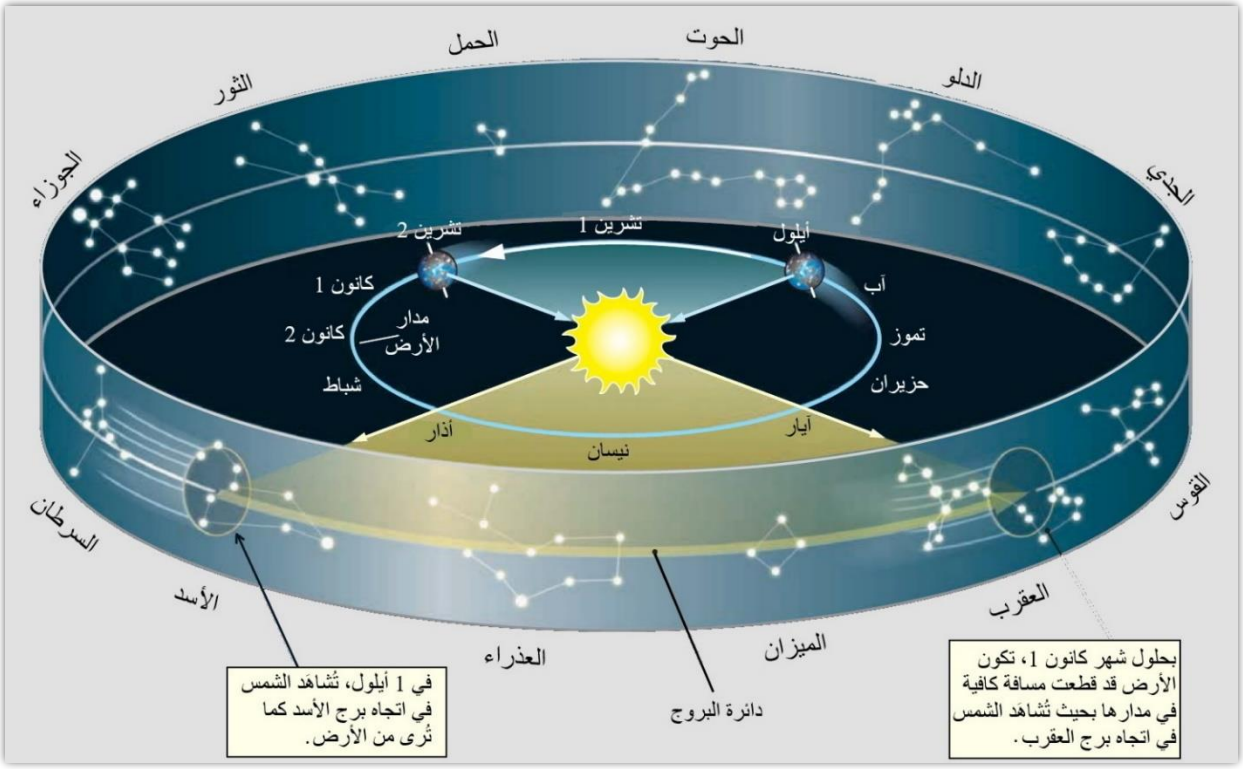


الشكل ١-١٥: (أ) مخطط لكوكبة الجبار. (ب) صورة تُظهر كوكبة الجبار في السماء.

١-٧: منطقة البروج ودائرة البروج 1-7: Zodiac and Ecliptic

إن منطقة البروج هي النطاق أو الحزام الوهمي الضيق الذي توجد فيه الشمس وكواكبها، ويلتف حول السماء، وسمكه على القبة السماوية حوالي 18° فقط، وذلك لأن مسارات الكواكب حول الشمس، والقمر حول الأرض، كلها تقع تقريباً في نفس المستوى. ويُقسم إلى اثنتي عشرة مجموعة نجمية (كوكبة نجمية) كل منها تدعى بالبرج sign of zodiac، أي إن البروج ما هي إلا كوكبات نجمية لها أشكالها الخاصة، ولكنها تمتاز بأنها واقعة خلف المسير الظاهري للشمس. والشكل ١-١٦ يبين البروج حسب ترتيبها. ويلاحظ أنه على الرغم من وجود 12 برجاً، إلا أن هناك في الواقع 13 كوكبة على مسار الشمس. لاحظ أيضاً الجدول ١-٢.

إن الأرض تدور حول الشمس مرة واحدة كل سنة، وعند انتقالها من موضع إلى آخر يُخيل إلينا وكأن الشمس قد انتقلت من برج إلى آخر، ويستغرق مسيرها في البرج الواحد حوالي 30 يوماً لأن الأرض تتحرك درجة واحدة تقريباً كل يوم وتكمل 360° خلال السنة.



الشكل ١-١٦: مسير الشمس الظاهري في منطقة البروج.

أما دائرة البروج فهي عبارة عن المسير الظاهري للشمس في مركز منطقة البروج بالنسبة إلى النجوم الخلفية التي تظهر ثابتة في السماء، وتميل هذه الدائرة بزاوية مقدارها 23.5° عن دائرة الاستواء السماوي. ومما يُلاحظ أنه في أي وقت من السنة، تكون بعض الكوكبات التي يعبرها مسير الشمس مرئية في سماء الليل، والبعض الآخر موجود في سماء النهار، ولهذا يختبئ تحت تألق الشمس.

الجدول ١-٢: تواريخ كوكبات منطقة البروج.

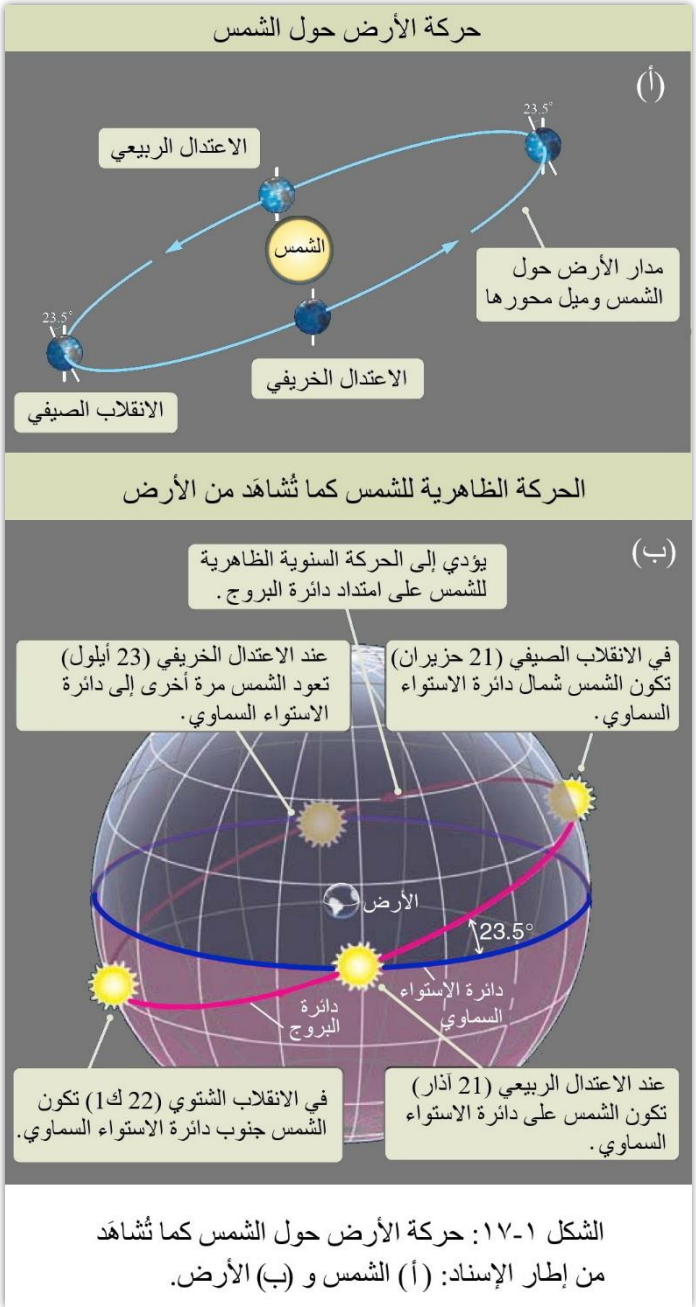
الكوكبة في دائرة البروج	تاريخ عبور الشمس للكوكبة
الجدي	21/1 – 16/2
الدلو	16/2 – 11/3
الحوت	11/3 – 18/4
الحمل	18/4 – 13/5
الثور	13/5 – 22/6
الجوزاء	22/6 – 21/7
السرطان	21/7 – 10/8
الأسد	10/8 – 16/9
العذراء	16/9 – 31/10
الميزان	31/10 – 23/11
العقرب	23/11 – 29/11
الحوّاء	29/11 – 18/12
القوس	18/12 – 21/1

١-٨: الفصول الفلكية الأربعة

1-8: The Seasons

يوضح الشكل ١-١٧-أ المسار السنوي للأرض حول الشمس، مع ميل محور الأرض بمقدار 23.5°. أي إن خط استواء الأرض يميل عن دائرة البروج بزاوية مقدارها 23.5°. وبسبب هذا الميل تحدث ظاهرة الفصول الأربعة على الأرض. وبسبب بعض

الاضطرابات تتغير هذه الزاوية مع مرور الوقت. ويتراوح الميل بين 22.1° و 24.5° خلال دورة زمنية تبلغ 41000 سنة. ويتناقص الميل في الوقت الحاضر، وهناك أيضاً اختلافات صغيرة قصيرة المدى.



الشكل ١-١٧: حركة الأرض حول الشمس كما تُشاهَد من إطار الإسناد: (أ) الشمس و (ب) الأرض.

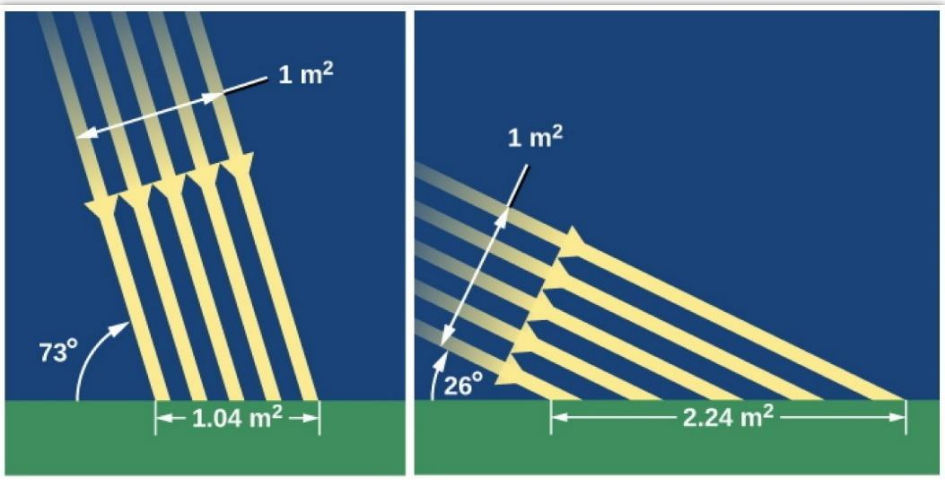
يبلغ الانحراف المركزي e لمدار الأرض حوالي 0.0167. ويتراوح بُعدها عن الشمس بين (152 → 147) مليون كيلومتر. ففي الأسبوع الأول من شهر كانون الثاني تصبح الأرض في أقرب نقطة من الشمس والتي تدعى بالحضيض perihelion، أما في الأسبوع الأول من شهر حزيران فتصبح الأرض في أبعد نقطة من الشمس والتي تدعى بالأوج aphelion. وقريب من هاتين النقطتين تكون نقطتا الانقلاب الشتوي winter solstice الذي يحدث حوالي 22 كانون الأول والانقلاب الصيفي summer solstice الذي يحدث حوالي 22 حزيران، وتوجد بينهما نقطتا الاعتدال الربيعي (~21 آذار) والاعتدال الخريفي (~23 أيلول). وعلى هذا الأساس ينقسم مدار الأرض إلى أربعة أقسام تمثل الفصول الأربعة، (لاحظ الشكل ١-١٧). وتكون فترات هذه الفصول غير متساوية المدة في كل من نصفي الأرض الشمالي والجنوبي. وكمثال، لاحظ الجدول ١-٣.

تعتمد الطاقة الواردة من الشمس على ثلاثة عوامل:

١) في الصيف يمكن أن يكون للارتفاع الزاوي a للشمس قيم أكبر مما هو عليه في الشتاء، فتظهر الشمس عاليةً في السماء وتضرب أشعتها الأرض بشكل مباشر أكثر، وتنتشر على مساحة أقل، مما يعطي المزيد من

الجدول ١-٣: الانقلابان والاعتدالان لمدينة بغداد لعدة سنين.					
الأوج	المسافة (km)	الحضيض	المسافة (km)	الاعتدالان	الانقلابان
6-7-2023 23:06	152,093,251	4-1-2023 19:17	147,098,925	20-3-2023 23-9-2023	21-6-2023 22-12-2023
5-7-2024 8:06	152,099,968	3-1-2024 3:38	147,100,632	20-3-2024 22-9-2024	20-6-2024 21-12-2024
3-7-2025 22:54	152,087,738	4-1-2025 16:28	147,103,686	20-3-2025 22-9-2025	21-6-2025 21-12-2025
6-7-2026 20:30	152,087,774	3-1-2026 20:15	147,099,894	20-3-2026 23-9-2026	21-6-2026 21-12-2026
5-7-2027 8:05	152,100,481	3-1-2027 5:32	147,104,592	20-3-2027 23-9-2027	21-6-2027 22-12-2027

الطاقة لكل وحدة مساحة. وفي الشتاء تكون الشمس منخفضة في السماء وتنتشر أشعتها على مساحة أوسع بكثير، فتصبح أقل فعالية في تدفئة الأرض. أي إن الإشعاعات الشمسية في الصيف تتمركز على منطقة معينة أكثر مما هي عليه في الشتاء (الشكل ١-١٨). وهذه الحالة تكون معاكسة في النصف الجنوبي للأرض الذي يكون فيه حينئذ فصل الصيف.



(أ) في الصيف. (ب) في الشتاء.

الشكل ١-١٨: أشعة الشمس في الصيف والشتاء.

٢) عندما تكون الشمس قريبة من الأفق، يجب أن يخترق الإشعاع طبقات الغلاف الجوي السميكة. وهذا يعني اضمحلالاً كبيراً وإشعاعاً أقل على السطح.

٣) طول الفترة التي تكون فيها الشمس فوق الأفق.

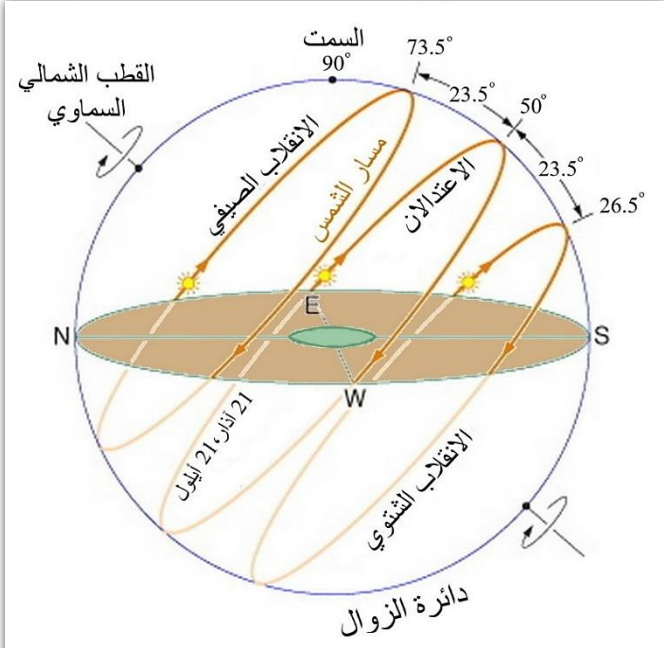
ففي النصف الشمالي من الكرة الأرضية يكون مسير الشمس في حزيران أطول من المعدل، ولهذا تكون فترة النهار أطول عند الانقلاب الصيفي، لاحظ الشكل ١-١٩.

في 21 حزيران، تشرق الشمس من الشمال الشرقي وتغرب من الشمال الغربي. وتقضي الشمس أكثر من 14 ساعة فوق الأفق في العراق مما يعني المزيد من ساعات النهار. وفي 21 كانون الأول،

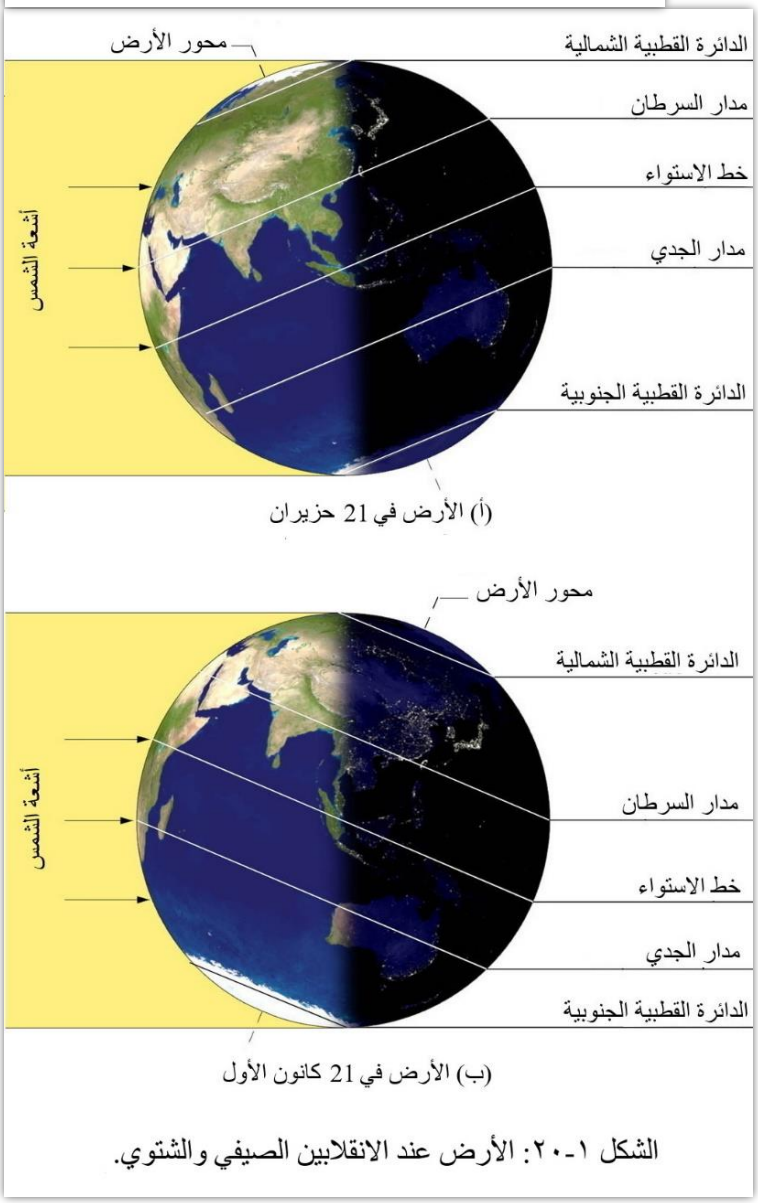
تشرق الشمس من الجنوب الشرقي وتغرب من الجنوب الغربي، وتقضي حوالي 10 ساعات فقط فوق أفق العراق، مما يعني ساعات نهار أقل وساعات ليل أكثر. وفي 21 آذار و 21 أيلول تقضي الشمس فترات متساوية تقريباً من الوقت فوق وتحت الأفق في كلا نصفي الكرة الأرضية.

ونتيجة لحركتي الأرض المدارية والمحورية فإن تعامد الأشعة الشمسية لا يبقى ثابتاً على خط الاستواء بل ينتقل تعامدها (أي عندما تكون الشمس في السمت) ما بين مدارين أرضيين هما مدار السرطان في صيف نصف الكرة الشمالي ومدار الجدي في شتائه (أي في صيف نصف الكرة الجنوبي). وتُرى الشمس في السمت بين خطي العرض هذين مرتين سنوياً، أي في الاعتدالين الربيعي والخريفي. وذلك بسبب ميلان محور الأرض، مما يؤدي إلى تغير الزاوية التي يصنعها الشعاع الشمسي مع دائرة الاستواء خلال أيام السنة. لاحظ الشكل ١-٢٠.

هناك ظاهرة أخرى ذات علاقة بميل محور الأرض تدعى بظاهرة شمس منتصف الليل



الشكل ١-١٩: مسار الشمس في السماء لفصول مختلفة.

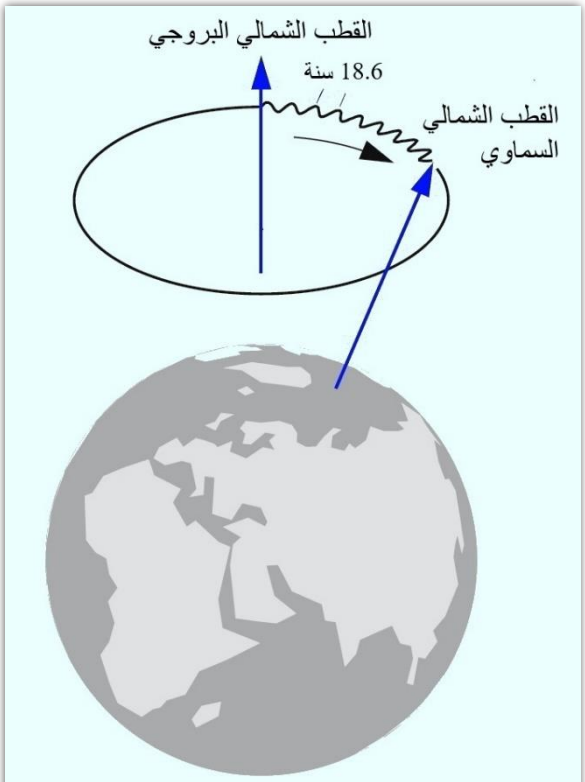


الشكل ١-٢٠: الأرض عند الانقلابين الصيفي والشتوي.

midnight Sun، ففي 21 حزيران عند خط العرض العالي 66.55° أو أكثر، أي عند الدائرة القطبية الشمالية Arctic Circle، لا يحصل ليل ولا تغرب الشمس، لاحظ الشكل ١-٢٠. وفي القطبين، يدوم النهار والليل نصف عام لكل منهما. أما في النصف الجنوبي فتلاحظ هذه الظاهرة يوم 23 كانون الأول.

١-٩: الترنح (دوران محور الأرض) 1-9: Precession

إن كل المادة في الكون في حالة تغير دائم، ومواقع ما يسمى بالنجوم الثابتة في الكرة السماوية ليست استثناءً. ويعود تغير المواقع إلى تأثير جاذبية الشمس والقمر والكواكب على الأرض الدوارة ذات الشكل المفلطح، لذا فإن المحور الأرضي ليس ثابتاً عند دوران الأرض حول الشمس، بل هو ذو حركة مخروطية بطيئة مشابهة لحركة المصراع كما في الشكل ١-٢١. ويؤدي هذا إلى تغير بطيء جداً في المواقع السماوية للقطب السماوي الشمالي والنجم القطبي وجميع النجوم الأخرى، وهو ما يسمى بالترنح. ويعود سبب الترنح إلى أن الأرض ليست كروية الشكل بالضبط. وهي منتفخة قليلاً حول وسطها الاستوائي، ومنبعجة عند قطبيها. وهذا الشكل المفلطح ينتج عن الدوران السريع للأرض حول محورها.

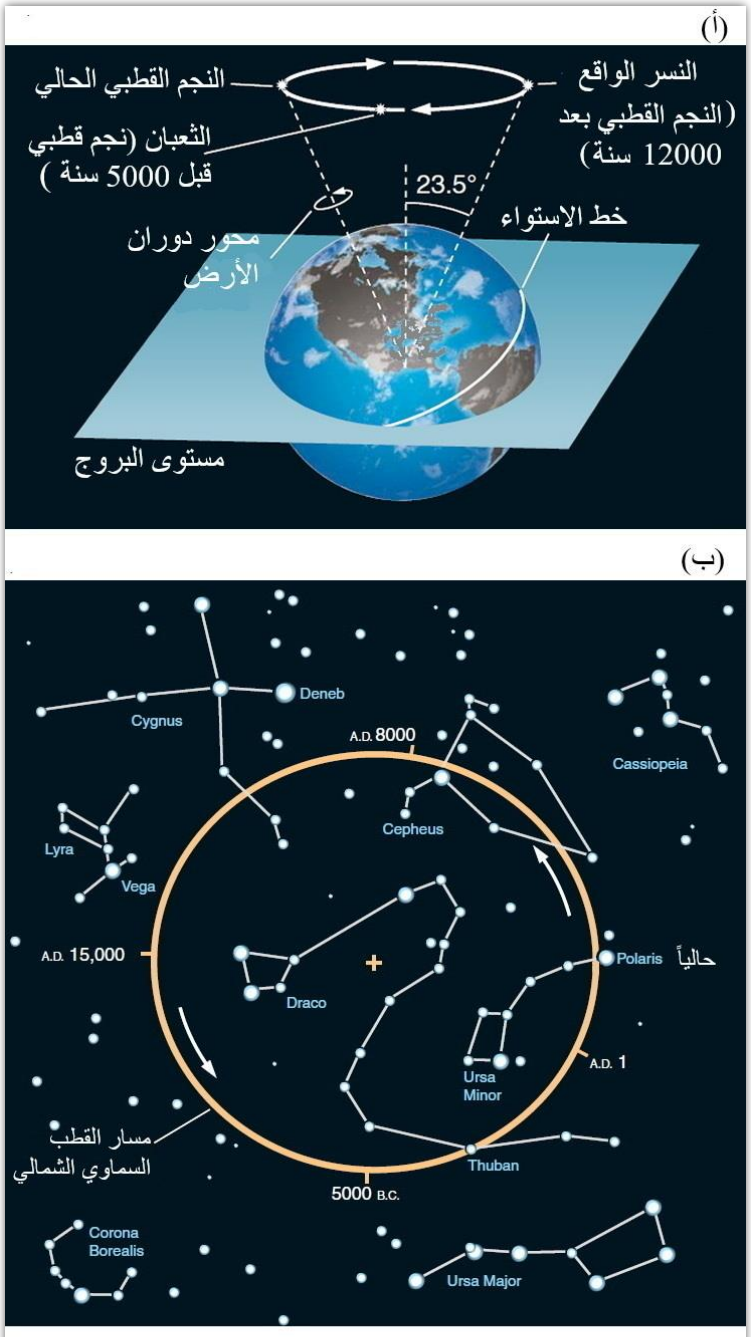


الشكل ١-٢١: الترنح، حيث يدور محور دوران الأرض حول القطب الشمالي البروجي. والتمايد هو التذبذب الصغير الذي يعكر سلاسة الحركة.

إن قوة الدوران الخارجية (قوة الدفع الخارجي) تضاد قوة الجاذبية الداخلية، وهذا يؤدي إلى تقليل تأثير الجاذبية في اتجاه الدوران. وبما أن هذا التأثير يكون أكثر وضوحاً عند خط الاستواء وأقل تأثيراً عند القطبين فإن الأرض الصلبة تتكيف مع شكل مفلطح ممدود على طول خط الاستواء.

إن الشمس تقع دائماً في مستوى دائرة البروج، أما القمر فليس بعيداً عن هذا المستوى، فلهذا يُلاحظ أن قوى الجاذبية ستؤثر على الأرض وتحاول جعل محورها عمودياً على مستوى دائرة البروج. أي إن محصلة قوى الجاذبية وقوة دوران الأرض حول محورها تولّد قوة عمودية على هذه التأثيرات، وتَصارُع القوى هذا يؤدي إلى الترنح والتغير البطيء

في اتجاه المحور الدوراني للأرض بمرور الزمن. لذا فإن القطب السماوي الشمالي يتحرك حركة دائرية (تمثل قاعدة الحركة المخروطية)، ومركز هذه الدائرة هو قطب دائرة البروج، ونصف القطر الزاوي يعادل 23.5°. ومدة الترنح اللازمة لإكمال دورة تبلغ 25800 سنة تقريباً، ومعنى ذلك أن القطب السماوي الشمالي يتحرك ببطء خلال النجوم. فمثلاً في الوقت الحاضر يقع هذا القطب قريباً من النجم القطبي (يبعد عنه حوالي 0.75°)، ويُتوقع أنه سيقترب منه أكثر في القرن المقبل ثم يجتازه، وبعد 12000 عام سيقترب من نجم النسر الواقع Vega ببعد 5°.



الشكل ١-٢٢: (أ) يؤدي الترنح إلى تحرك مسقط محور دوران الأرض في دائرة قطرها 47°، مركزها القطب البروجي الشمالي، بفترة قدرها 25800 سنة. (ب) تغير اتجاه القطب الشمالي السماوي خلال 25800 سنة.

ولما كان موقع المحور الأرضي الدوراني يتغير في السماء فإن الاستواء السماوي سيتغير موقعه أيضاً. والنتيجة أن يتغير موقعا نقطتي الاعتدالين الربيعي والخريفي، حيث تكون الحركة بطيئة باتجاه الغرب ضمن دائرة البروج. وقد وُجد أن قيمة التحرك السنوي لنقطة الاعتدال (أي زحزحة نقطة الاعتدال) بالنسبة إلى النجوم تعادل 50.26 ثانية قوسية، (لاحظ الشكل ١-٢٢).

ونتيجة لهذه الحركة يُلاحظ أن إحداثيات النجوم التي تعتمد على نقطة الاعتدال تتغير بمرور الزمن، فلهذا يُعطى في الجداول الفلكية (الأزياج) تاريخ الاعتدالين في وقت التصنيف.

وهناك حركة ثانوية لمحور الأرض تسمى الميد (التمايد) nutation. وهي ناتجة عن الجاذبية الصادرة عن القمر نتيجة ميله الصغير (5°) على مستوى المدار الذي يؤثر على التفلطح الأرضي المائل الذي يحاول إطباق مستواه على مستوى دائرة البروج. ونتيجة لهذا الجذب القمري والشد الأرضي المقاوم له يحدث تذبذب ضئيل في مسير محور الأرض مدته 18.6 سنة يؤدي إلى رسم منحنيات موجية كما في الشكل ١-٢١. ولهذه الحركة علاقة وثيقة بدورة عقدتي القمر الصاعدة والنازلة على دائرة البروج، والتي تسمى بالساروس.

١-١٠: مقياس الكون 1-10: The Scale of the Universe

عادة ما تكون كتل وأحجام الأجرام الفلكية كبيرة جداً. ولفهم خصائصها يلزم دراسة أصغر أجزاء المادة: الجزيئات والذرات والجسيمات الأولية. وتختلف الكثافات ودرجات الحرارة والمجالات المغناطيسية في الكون ضمن حدود أكبر بكثير مما يمكن الوصول إليه في المختبرات على الأرض. فأعظم كثافة طبيعية تم العثور عليها على الأرض هي $22.5\ g/cm^3$ (لعنصر الأوزميوم osmium)، بينما في النجوم النيوترونية يمكن أن تصل الكثافة إلى مرتبة $10^{15}\ g/cm^3$. وتبلغ الكثافة في أفضل فراغ تم تحقيقه على الأرض $10^{-12}\ g/cm^3$ فقط، ولكن في الفضاء بين النجوم قد تكون كثافة الغاز $10^{-24}\ g/cm^3$ أو حتى أقل. وكمثال فإن الهواء الذي نتنفسه يحتوي على حوالي 10^{19} ذرة في كل سنتيمتر مكعب، ويوجد في الغاز الموجود بين النجوم في المجرة حوالي ذرة واحدة في كل سنتيمتر مكعب.

وفيما يتعلق بالطاقة فإن المعجلات الحديثة قد تعطي للجسيمات طاقات تصل إلى مرتبة $10^{12}\ eV$، بينما قد تكون للأشعة الكونية القادمة من السماء طاقات تزيد عن $10^{20}\ eV$.

ويستغرق ضوء الشمس 8 دقائق تقريباً كي يصل إلى الأرض، و 5.5 ساعة من بلوتو، و 4.25 سنة من أقرب نجم. ويستغرق الضوء القادم من مجرة المرأة المسلسلة Andromeda Galaxy في السماء الشمالية مليوني سنة. ومن أبعد الأجسام المعروفة الكويزارات quasars، وهي بعيدة جداً لدرجة أن إشعاعها، الذي يصل إلى الأرض الآن، انبعث قبل وقت طويل من ولادة الشمس أو الأرض.

إن جميع ما يحدث في الكون، من أصغر جسيم أولي إلى أكبر العناقيد المجرية الفائقة يمكن تفسيره من خلال عمل أربع قوى معروفة لحد الآن هي: الجاذبية gravity،

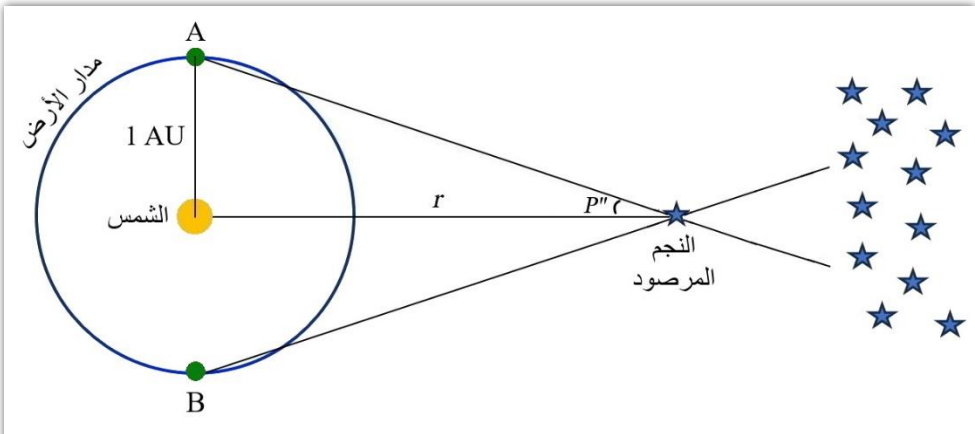
والكهرومغناطيسية electromagnetism التي تجمع بين تأثير الكهرباء والمغناطيسية، والنووية القوية strong nuclear force والنووية الضعيفة weak nuclear force.

ولفهم المقاييس الفلكية والمسافات ما بين الأجرام السماوية تُستعمل العديد من وحدات القياس الفلكية، فلقياس الكتلة mass غالباً ما تُستخدم كتلة الشمس كوحدة للكتلة في الفيزياء الفلكية، ويُشار لها بالرمز $M_{\odot}$، وقيمتها $(1.99 \times 10^{30}\ kg)$. ولقياس المسافات تُستعمل الوحدات التالية:

١) **الوحدة الفلكية** (AU) astronomical unit: وهي معدل المسافة بين مركزي الشمس والأرض وتعادل 149.597870 مليون كيلومتر، وعند التقريب 150 مليون كيلومتر. وهي وحدة مفيدة لقياس المسافات داخل النظام الشمسي. لكنها صغيرة جداً بحيث لا يمكنها التعبير عن المسافات بين النجوم والمجرات.

٢) **السنة الضوئية** (ly) light year: وهي المسافة التي يقطعها الضوء في الفراغ خلال سنة واحدة. فإذا اعتبرنا أن سرعة الضوء خلال الثانية الواحدة تبلغ $300000\ Km/sec$ ، فإن المسافة المقطوعة خلال سنة تعادل $9.46 \times 10^{12}\ km$ تقريباً، وهي السنة الضوئية. لذا فإن ضوء الشمس يستغرق 8.31 دقيقة تقريباً لكي يصل إلى الأرض.

٣) **زاوية اختلاف المنظر** parallax: يمكن تحديد المسافات إلى النجوم القريبة من الأرض بطريقة مُثلثية. فلو أخذنا بنظر الاعتبار حركة الأرض حول الشمس فإن الاتجاه الظاهري للنجم مقاساً بالنسبة إلى مواقع النجوم البعيدة يتغير مع دوران الأرض حول الشمس، والزاوية التي يقابلها نصف قطر مدار الأرض (أي $1\ AU$) وتنتج عن حركة الأرض حول الشمس هي زاوية اختلاف المنظر، وهي الزاوية P'' في الشكل ١-٢٣، والتي تمثل تغير الوضع الظاهري للأجرام السماوية نتيجة تغير موقع الراصد، وتقاس بالثواني القوسية. وكلما كان الجرم



الشكل ١-٢٣: زاوية اختلاف المنظر.

السماوي أقرب كلما كانت زاوية اختلاف المنظر أكبر. وتصلح هذه الطريقة للنجوم القريبة من الأرض فقط. وفي الشكل ١-٢٣ فُرض أن النجوم ثابتة تقريباً بالنسبة إلى الشمس (وإن كانت في الواقع غير ثابتة في حركتها داخل المجرة)، وأن النقطتين A,B تمثلان موقعي الراصد على مدار الأرض، والمدة بينهما ستة أشهر. ويلاحظ من الشكل أن:

$$r(\text{AU}) = \frac{360° \times 60' \times 60''/2\pi}{P''} = \frac{206265}{P''} \qquad \dots\dots 1.13$$

٤) **الفرسخ الفلكي** parsec (pc): وهو المسافة التي يصنع فيها الجرم السماوي زاوية اختلاف منظر قدرها ثانية قوسية واحدة، وتعادل 3.26 سنة ضوئية، وتستخدم لقياس مسافات الأجرام البعيدة. ولكن نادراً ما تستخدم في الأبحاث الفلكية التخصصية.

وفيما يلي العلاقات الرياضية بين الوحدات الفلكية المذكورة أعلاه:

$$r(ly) = \frac{3.26}{P''} \qquad \dots\dots 1.14$$

$$r(pc) = \frac{1}{P''} \qquad \dots\dots 1.15$$

$$pc = 3.26\ ly \qquad \dots\dots 1.16$$

مثال ١-٧: إذا علمت أن زاوية اختلاف المنظر لنجم الشِّعرَى اليمانيّة Sirius (الذي هو ألمع نجوم السماء) هي نحو $0.375''$. فما بعده عنا بالفراسخ الفلكية والسنوات الضوئية؟

الحل :

$$r(pc) = \frac{1}{P''} = \frac{1}{0.375} = 2.67\ pc$$

$$r(ly) = \frac{3.26}{P''} = \frac{3.26}{0.375} = 8.69\ ly$$

أسئلـة

١) ارسم نصف القبة السماوية مبيناً عليها احداثيات نظام الأفق.

٢) ما هو الميل وما هو المطلع المستقيم وما هي زاوية الساعة؟ وفي أي نظام تُستعمل؟

٣) ما هو الارتفاع الزاوي للجرم السماوي؟ وفي أي نظام إحداثي يُستعمل؟ وما علاقته بالبعد السمتي؟

٤) لماذا تكون سرعة الأرض متفاوتة خلال السنة؟

٥) لماذا تكون الأرض غير كروية تماماً بل مفلطحة؟

٦) علل: من خلال مراقبة حركة نجم على مدار الليل، يكتشف الراصد أنه يتبع مساراً ترتفع النجوم فيه من اتجاه الشرق، ثم تصل إلى أعلى نقطة لها وتغرب في الغرب.

٧) لماذا ترتفع درجة حرارة الجو خلال صيف نصف الكرة الأرضية الشمالي رغم أن الشمس تكون فيه أبعد مما في الشتاء.

٨) ما سبب حدوث الفصول الفلكية الأربعة على الأرض.

٩) لماذا تحدث ظاهرة التمايد.

١٠) لو حَدَثَ حَدَثٌ ما قرب نجم تبلغ زاوية اختلاف المنظر له 0.03 ثانية قوسية. فمتى يمكن أن نعلم به؟

١١) إذا كانت زاوية اختلاف المنظر للقمر $0.239°$ بعد قياسها من نقطتين على سطح الأرض تبعدان عن بعض مسافة $1600\ km$ فما هو بعد القمر عن الأرض؟ الجواب: $(383568\ km)$.

١٢) يُعد النجم المسمى الأقرب القنطورس Proxima Centauri أقرب نجم للشمس، وهو جزء من المنظومة النجمية الثلاثية ألفا قنطورس Alpha Centauri، ويبعد عنا مسافة 4.2465 سنة ضوئية. فلو انطلقت مركبة فضائية متجهة نحوه بسرعة $10^5\ km/h$ فكم ستستغرق من الزمن للوصول قربه؟ الجواب: $(\sim 46000\ y)$.

١٣) احسب كتلة الشمس باستخدام قانون كبلر الثالث إذا علمت أن معدل المسافة بين الأرض والشمس هو $(1.496 \times 10^{11}\ m)$ وأن ثابت الجذب العام هو $(6.674 \times 10^{-11}\ N.m^2/kg^2)$.

١٤) افترض أن مذنباً ما يتحرك حول الشمس.

أ- ما هي الفترة المدارية له إذا كان طول المحور شبه الرئيسي لمداره $50\ AU$؟

ب- ما هي المساحة (بوحدة AU لكل سنة) التي يمسحها الخط الواصل بين المذنّب والشمس؟

١٥) احسب القطر الاستوائي للأرض إذا علمت أنها تدور حول نفسها بسرعة $1674\ km/h$ عند خط الاستواء.

١٦) إذا دار كويكب ما حول الشمس في مدار إهليلجي ذي اختلاف مركزي كبير، وكانت مدة دورانه 90 يوماً. أيُ العبارات التالية يُعد صحيحاً حول احتمال حدوث تصادم بين هذا الكويكب والأرض؟

(أ) لا يوجد خطر محتمل من الاصطدام، (ب) هناك احتمال حدوث تصادم، (ج) لا توجد معلومات كافية لتحديد ما إذا كان هناك خطر حدوث تصادم.

١٧) أي من النقاط أو الأجرام التالية تبدو ثابتة في السماء طوال الوقت؟

(أ) الاعتدال الربيعي، (ب) خلفية النجوم، (ج) الشمس، (د) النجم القطبي.

١٨) ما هو ميل القطب السماوي الجنوبي؟
(أ) $18\ h$، (ب) $0°$، (ج) $-90°$، (د) لا يمكن تعريفه لأنه يتغير مع مرور الوقت.

١٩) ما هو خط الطول السماوي للانقلاب الشتوي؟
(أ) $18\ h$، (ب) $0°$، (ج) $-90°$، (د) لا يمكن تعريفه لأنه يتغير مع مرور الوقت.

٢٠) ما عدد ساعات المطلع المستقيم التي تتوافق مع ثلث دائرة؟
(أ) $3\ h$، (ب) $6\ h$، (ج) $12\ h$، (د) لا شيء مما سبق.

٢١) ما هو الكسر الذي تمثله ثانية قوسية واحدة في الدائرة الكاملة؟
(أ) 1/60، (ب) 1/3600، (ج) 1/86,400، (د) 1/1,296,000.

٢٢) إذا كنت تعيش في نصف الكرة الشمالي، فإن ارتفاع النجم القطبي فوق الأفق بالدرجات، هو تقريباً نفس ارتفاع
(أ) خط العرض الخاص بك، (ب) $90°$ ناقص خط العرض الخاص بك، (ج) ارتفاع الشمس في السماء وقت الظهيرة، (د) لا شيء على وجه الخصوص، إذ يتغير ارتفاعه مع مرور الفصول.

٢٣) في أي شهر يحدث الاعتدال الربيعي في نصف الكرة الجنوبي؟
(أ) آذار، (ب) حزيران، (ج) أيلول، (د) كانون أول.

٢٤) إن ميل الشمس، بعد أيام قليلة من الانقلاب الصيفي، وفقاً للأشخاص الذين يعيشون في مدينة سيدني الأسترالية سوف (أ) يتناقص ببطء، (ب) يتناقص بسرعة، (ج) يتزايد ببطء، (د) تتزايد بسرعة.

٢٥) عند خط عرض $55°\ S$، سيكون النجم القطبي تقريباً عند
(أ) $35°$ فوق الأفق، (ب) $35°$ تحت الأفق، (ج) $55°$ فوق الأفق، (د) $55°$ تحت الأفق.

٢٦) إن مواقع الكوكبات النجمية كما تُرى من خطوط العرض المعتدلة أو الاستوائية تتحول تدريجياً باتجاه الغرب في السماء من ليلة إلى أخرى بسبب
(أ) دوران الأرض حول محورها، (ب) دوران الأرض حول الشمس، (ج) تغير ميل محور الأرض، (د) تغير المطالع المستقيمة باستمرار، (هـ) تغير ميولها باستمرار.

٢٧) الخط الوهمي الواصل بين أي كوكب والشمس (أ) يدور حول الشمس بمعدل زاوي ثابت، (ب) يكون دائماً بنفس الطول، (ج) يكون أطول عندما يتحرك الكوكب بشكل أسرع، (د) يمسح مساحات متساوية في فترات زمنية متساوية، (هـ) يزداد طولاً باستمرار.

٢٨) يمتلك مدار المذنّب X محوراً شبه رئيسي أطول بأربع مرات من المحور شبه الرئيسي للمذنّب Y. ما نسبة الفترة المدارية للمذنّب X إلى الفترة المدارية للمذنّب Y؟ (أ) 2، (ب) 4، (ج) 8، (د) 16، (هـ) 32، (و) 64.

مسائل محلولة

(١) في إحدى ليالي الصيف في مدينة بغداد أريد معرفة موقع الهلال في السماء الغربية بعد مغيب الشمس مباشرة، وقد وُجد أن ميله $8°37'17''$ والمطلع المستقيم $14^h10^m4^s$ عندما كان الزمن النجمي المحلي $19^h18^m1.4^s$. جد الارتفاع الزاوي للهلال عن الأفق واتجاهه الأفقي. مع العلم أن خط العرض الجغرافي لمدينة بغداد هو $33.21°$.

الحل:

$$\phi = 33.21°\,,\quad \delta = 8°37'17'' = 8.621°$$

$$\alpha = 14^h10^m4^s = 14.168^h\ ,\quad S_t = 19^h18^m1.4^s = 19.3^h$$

زاوية الساعة:

$$H = S_t - \alpha = 19.3^h - 14.168^h = 5.132^h = 76.98°$$

لإيجاد الارتفاع الزاوي a:

$$\cos z = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos H$$

$$= \sin 33.21 \sin 8.621 + \cos 33.21 \cos 8.621 \cos 76.98 = 0.268$$

$$z = 74.43°$$

$$a = 90° - z = 90° - 74.43° = 15.57°$$

لإيجاد الاتجاه الأفقي A:

$$\sin H \cos\delta = \sin A \cos a$$

$$\sin A = \frac{\sin H \cos\delta}{\cos a} = \frac{\sin 76.98 \cos 8.621}{\cos 15.57} = 0.9999$$

$$A = 89.63°$$

(٢) احسب زاوية الساعة للشمس واتجاهها الأفقي وقت الغروب عند خط عرض $50°\ N$ إذا كان ميلها $20°\ N$.

الحل:

$$\phi = 50°\,,\quad \delta = 20°$$

عند الغروب يكون الميل صفراً، لذا فإن $(z = 90°)$ وفق العلاقة $(z = 90° - a)$.

لإيجاد زاوية الساعة H:

$$\cos z = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos H$$

$$\cos H = \frac{\cos z - \sin\phi \sin\delta}{\cos\phi \cos\delta} = \frac{\cos 90 - \sin 50 \sin 20}{\cos 50 \cos 20} = -0.4337$$

$$H = 115.706 = 7^h42^m23.7^s$$

لإيجاد الاتجاه الأفقي A:

$$\sin\delta = \sin\phi \cos z + \cos\phi \cos A \sin z$$

$$\cos A = \frac{\sin\delta - \sin\phi \cos z}{\cos\phi \sin z} = \frac{\sin 20 - \sin 50 \cos 90}{\cos 50 \sin 90} = 0.532$$

$$A = 57.85° = 57°\ 51'W$$

(٣) مذنّب يدور حول الشمس، وأبعد نقطة له عنها هي $31.5\ AU$. والأقرب عند $0.5\ AU$. ما هي الفترة المدارية لهذا المذنّب؟

الحل: مسافة الحضيض + مسافة الأوج = المحور الرئيسي للمدار.
لذا فإن المحور شبه الرئيسي،

$$a = \frac{31.5 + 0.5}{2} = 16\ AU$$

ووفق قانون كبلر الثالث: $T^2 \propto a^3$

$$T^2 = 1\frac{(year)^2}{(AU)^3}a^3 = 1\frac{(year)^2}{(AU)^3}4096\ (AU)^3 = 4096\ (year)^2$$

$$T = 64\ years$$

(٤) بالنسبة للمذنب المذكور في السؤال ٣ أعلاه، ما هي المساحة (بوحدة AU لكل سنة) التي يمسحها الخط الواصل بين المذنب والشمس؟

الحل: تبلغ مدة دورة هذا المذنب 64 عاماً وقيمة محوره شبه الرئيسي $16\ AU$. وبموجب قانون كبلر الثاني، سوف يمسح المذنب مساحات متساوية في أوقات متساوية. لذا فإن المساحة لكل سنة هي،

$$\text{Area per year} = \frac{\text{Area of elliptical orbit}}{T} = \frac{\pi ab}{T}$$

مسافة الحضيض: $\text{perihelion distance} = a - ea = 0.5\ AU$

$$e = 1 - \frac{0.5\ AU}{a}$$

حيث e هو الاختلاف المركزي. ومرّت علينا العلاقة التالية في هندسة القطع الناقص:

$$a^2 = b^2 + d^2 = b^2 + (ea)^2$$

$$b^2 = a^2 - (ea)^2 = a^2(1 - e^2) = a^2\left[1 - \left(1 - \frac{0.5}{a}\right)^2\right]$$

$$= a^2 - (a - 0.5)^2 = 16^2 - 15.5^2 = 256 - 240.25 = 15.75$$

$$b = 3.97\ AU$$

$$\text{Area per year} = \frac{\pi \times 16 \times 3.97}{64} = 3.12\ (AU)^2/year$$

(٥) الفترة الزمنية بين ظهيرة اليوم الأول من تموز وظهيرة اليوم 31 من كانون الأول هي 183 يوماً شمسياً. ما هو مقدار هذه الفترة بالأيام الفلكية؟

الحل: عدد الأيام الشمسية في هذه الفترة هو 183 يوماً، ورياضياً فإن اليوم الفلكي أقصر بمقدار بـ 3^m56^s من اليوم الشمسي. لذا:

$$183\ \text{solar days} = 183^d + 183 \times 3^m56^s = 183^d + 719.8^m$$

$$= 183^d + 11.9967^h = 183^d11^h59^m48^s \approx 183.5\ \text{days}$$

فهرست الفصل الأول

الموضوع	الصفحة
المقدمة	١
١-١: قوانين كبلر	٢
١-٢: قانون نيوتن للجاذبية	٧
١-٣: هندسة الكرة	٩
١-٤: القبة السماوية	١١
١-٥: نُظُم الإحداثيات على القبة السماوية	١١
١-٥-١: نظام الأفق	١٢
١-٥-٢: النظام الإستوائي	١٣
١-٥-٣: التحويل بين النظامين الأفقي والاستوائي	١٦
١-٥-٤: النظام البروجي	١٩
١-٥-٥: النظام المجري	١٩
١-٦: الكوكبات النجمية	٢٠
١-٧: منطقة البروج ودائرة البروج	٢١
١-٨: الفصول الفلكية الأربعة	٢٢
١-٩: الترنح (دوران محور الأرض)	٢٦
١-١٠: مقياس الكون	٢٨
أسئلة	٣١
مسائل محلولة	٣٣

مصادر الفصل الأول

١- فيزياء الجو والفضاء ج٢، د. حميد مجول وفياض النجم، 1981.

2- Astronomy. Andrew Fraknoi, David Morrison and Sidney C. Wolff, 2016.

3- 21st century astronomy, Je- Hester et al, 3rd ed, 2010.

4- Astronomy Demystified, Stan Giblisco, 2003.

5- Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, Serway and Jewett, 10th Edition. 2019.

6- University Physics with Modern Physics, Young and Freedman, 15th Edition, 2020.

7- Fundamental Astronomy, Hannu Karttunen et al, 5th Edition-2007.

8- An Introduction to Modern Astrophysics, Bradley W. Carrol and Dale A. Ostlie, 2nd ed, -2007

9- Essential Astrophysics, Kenneth R. Lang, 2013.

10- Astrophysics for Physicists, Arnab Rai Choudhuri, 2010.

11- A Problem book in Astronomy and Astrophysics, Aniket Sule, 2013.