د. مُظفر جاسم
٢٠٢٤-٢٠٢٥

الفصل الأول

القُبّة السَماويّة

Celestial Sphere

المقدمة

يُعرّف علم الفلك Astronomy بأنه العلم الذي يدرس الظواهر والأجرام التي تقع خارج كوكب الأرض ويدرس العمليات 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، 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، وتُستخدم 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 الهواةُ 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. وقد 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 لحركات الكواكب المرصودة أيسر بكثير من نموذج مركزية الأرض. وكان عمل كوبرنيكوس ثورياً، لأنه كان قادراً على مخالفة الرأي السائد في عصره حول مركزية الأرض، وكذلك اعتقاده 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؟[١]

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[٢] كبيرة وبوصلة فقط، ولم يكن التلسكوب قد اختُرع بعد. وكان لديه قبل وفاته بفترة قصيرة مساعد يُدعى كبلر Kepler (1571-1630) قد حصل بعد ذلك على البيانات الفلكية لأستاذه،

---

١) ما هي إجابتك عن هذه الأسئلة؟

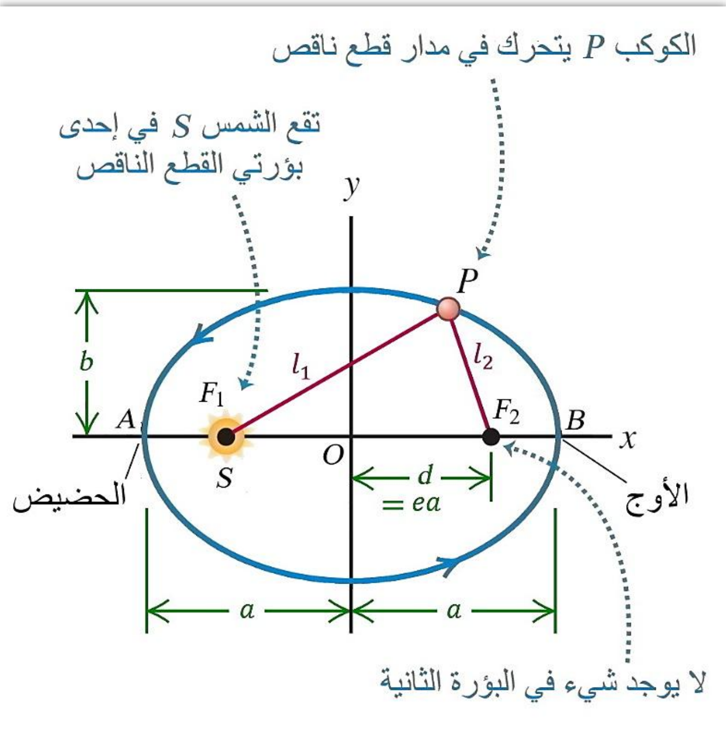
٢) آلة السدس هي أداة ملاحة عاكسة مزدوجة تقيس المسافة الزاوية بين جسمين مرئيين. والاستخدام الأساسي لها هو قياس الزاوية بين الجرم الفلكي والأفق.

وقضى 16 عاماً في محاولة لاستنتاج نموذج رياضي لحركة الكواكب. وكان فرز مثل هذه البيانات عسيراً لأن الكواكب المتحركة تُلاحظ من الأرض المتحركة وليس من مكان ثابت. وبعد العديد من الحسابات الشاقة وجد كبلر أن بيانات تيكو براه المتعلقة بدورة المريخ حول الشمس أدت إلى نموذج ناجح لصياغة 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 حول الشـــمس في مدارات بشـــكل قطع ناقص (إهليلجية elliptical orbit تقع الشمس في إحدى بؤرتيه.

في البداية نحتاج لبيان هندسة القطع الناقص والمدارات الإهليلجية الموصوفة في قانون كبلر الأول كما موضحة 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

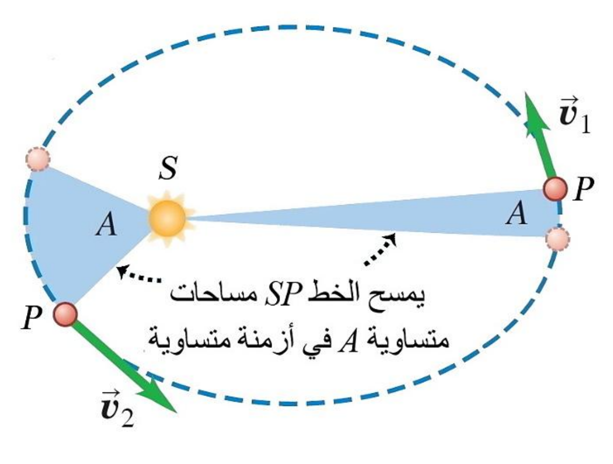


الشكل ١-١: قانون كبلر الأول.

مسافة d من مركز القطع الناقص، حيث $(a^2 = b^2 + d^2)$.[١] 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 الشمس A فإن هذا يُدعى حضيض الكوكب perihelion. وعندما يكون في أبعد نقطة B يُدعى أوج الكوكب aphelion.

١) أثبت أن $(a^2 = b^2 + d^2)$.

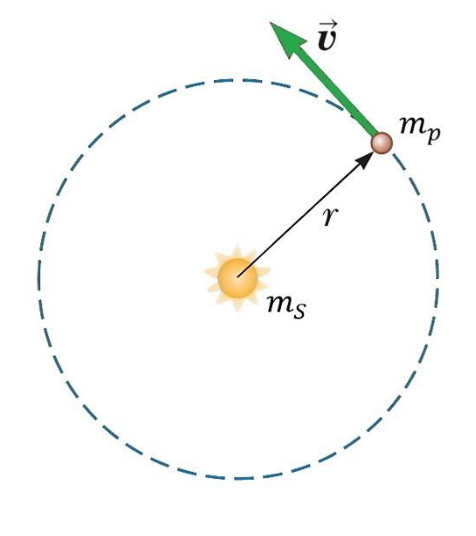
يُعرف الانحراف المركزي eccentricity للقطع الناقص على أنه $(e = d/a)$، وهو رقم بلا وحدات، وقيمته للقطع الناقص هي $(0 < e < 1)$، وهو يصف الشكل العام للقطع الناقص. وفيما يتعلق بالدائرة فإن $(d = 0)$، أي $(e = 0)$. ومن الشكل ١-١ نستنتج أن مسافة الحضيض = $(a - ea)$.



الشكل ١-٢: قانون كبلر الثاني.

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

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.



الشكل ١-٣: قانون كبلر الثالث.

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

نفترض أن أحد الكواكب (كتلته m_p) يتحرك حول الشمس (كتلتها m_s) بمسار دائري كما في الشكل ١-٣. وبسبب وجود تعجيل مركزي للكوكب أثناء تحركه في دائرة بسبب قوة الجاذبية فإنه سيكون متأثراً بمحصلة قوة ويتحرك 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:

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

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[١].

وقد أثبت نيوتن أن هذه المعادلة صالحة أيضاً للمدارات الإهليلجية لأن نصف المحور الرئيسي للمدار الإهليلجي يكافئ نصف قطر الدائرة:

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

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. وإذا افترضنا مدار تابع حول كوكب كمدار القمر حول الأرض فإن قيمة الثابت σ ستتغير، وتُستبدل كتلة الشمس m_S بكتلة الأرض m_E بحيث أن $(\sigma = 4\pi^2/Gm_E)$.

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

الحل: تُعتبر الطاقة الميكانيكية الكلية 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 $(U = -Gm_S m/r)$ بأدنى قيمة (أي الأكثر سلبية)، وهذا يحدث عندما تصبح المسافة بين الشمس والكوكب r أقل ما يمكن، أي عند الحضيض. ولذلك فإن السرعة v تكون الأكبر عند الحضيض لأن الطاقة الحركية ستكون بأعلى قيمها. 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.

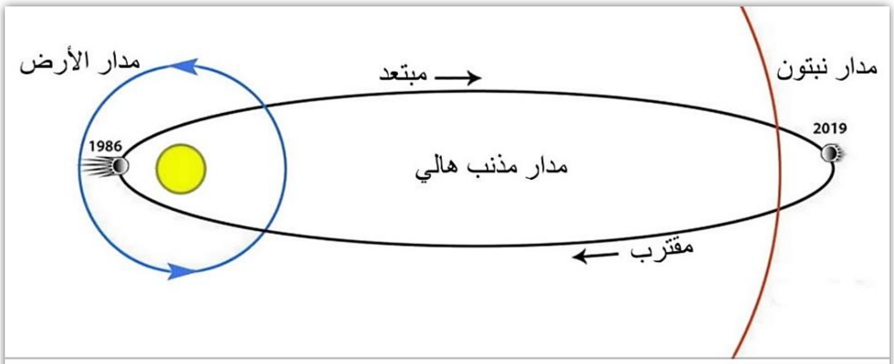
الحل : نستعمل قانون كبلر الثالث، $$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{Gm_S}\right)a^3 = \sigma a^3$$

---

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

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

مثال ١–٣: يتحرك مذنّب هالي Comet Halley حول الشمس (الشكل ١–٤) في مدار إهليلجي ممتد. 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. لذا فطول المحور الرئيسي $(2a)$ 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.

سؤال: احسب طول المحور الثانوي لمدار المذنب هالي.

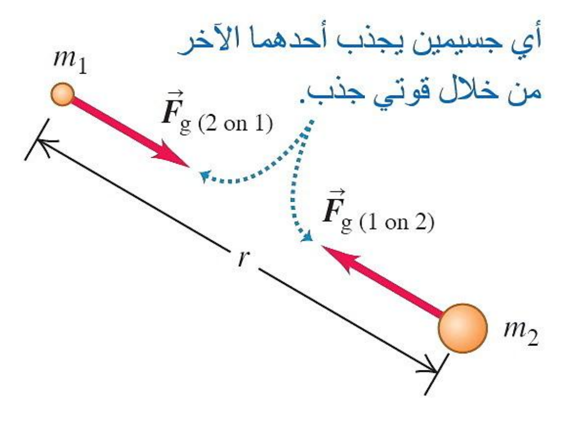
١-٢: قانون نيوتن للجاذبية
1-2: Newton's Law of Gravitation

بعد دراسة تأثيرات حركات الكواكب حول الشمس والقمر حول الأرض والاستفادة من قانون كبلر الثالث اكتشف نيوتن قانون الجاذبية الذي يصف التجاذب بين الأجسام 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). فإذا كان لجسيمين 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.

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.



الشكل ١-٥: قوّتا الجذب بين جسيمين.

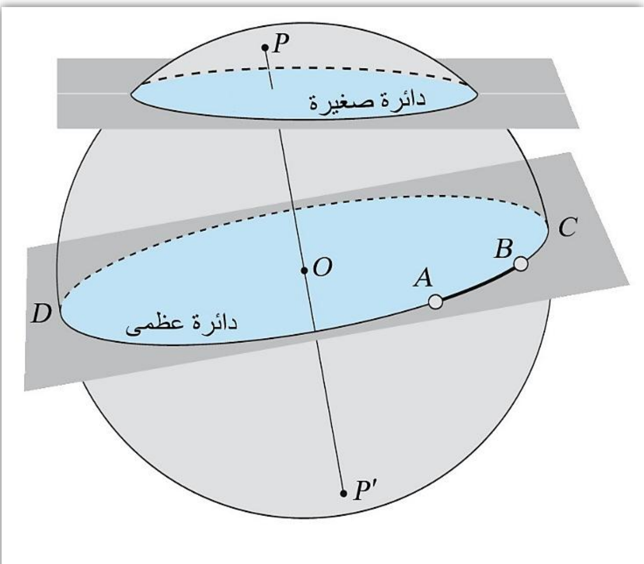
وكمثال على هذا فإن قوة الجاذبية التي يسلطها جسمك على الأرض لها نفس القوة التي تسلطها الأرض عليك، وعندما يسقط شخص من لوح غطس إلى حمام سباحة ترتفع الأرض كلها لمقابلته! (لا يلاحَظ هذا لأن كتلة الأرض أكبر من كتلة الشخص بما يقارب 10^{23} مرة. ومن ثم فإن تعجيل الأرض هو 10^{-23} فقط بقدر تعجيل الشخص).

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

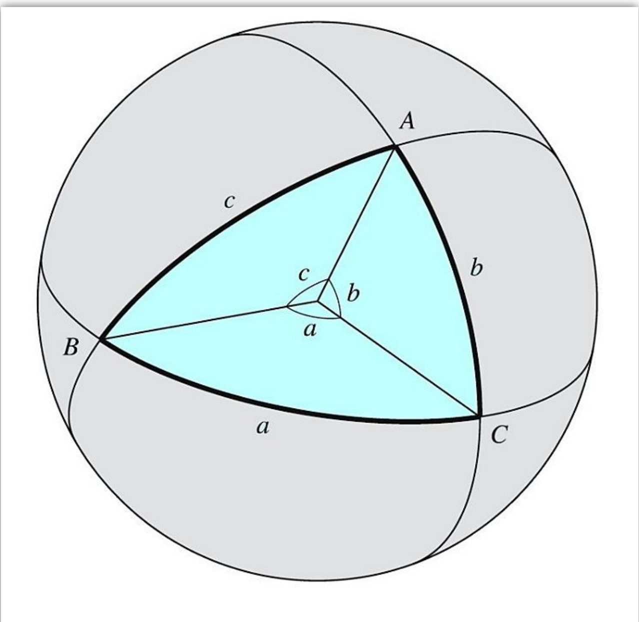
تُعرّف الكرة بأنها سطح مغلق يبعد عن نقطة تسمى المركز بأبعاد متساوية، ويسمى الخط المستقيم الواصل بين السطح والمركز بنصف القطر. وإذا مرّ مستوٍ عبر مركز الكرة فإنه سيقسم الكرة إلى نصفين متطابقين مولداً دائرة تسمى الدائرة العظمى great circle. ففي الشكل ١–٦ تكون الدائرة العظمى هي $(ABCD)$، ولو كان قطر الكرة 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 ١ـ٦: الدائرة العظمى.

المثلثات الكروية Spherical Trigonometry

المثلث الكروي spherical triangle هو المثلث الذي تشكل أضلاعه أقواساً من دوائر كبرى، وليس أية 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 ١–٧ 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



الشكل ١ـ٧: المثلث الكروي.

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

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:

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

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

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

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:

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

❋ قانون الجيوب تمام للأضلاع law of cosines for sides:

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

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

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

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

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:

$$\cos A = -\cos B \cos C + \sin B \sin C \cos a \qquad \ldots\ldots 1.5$$

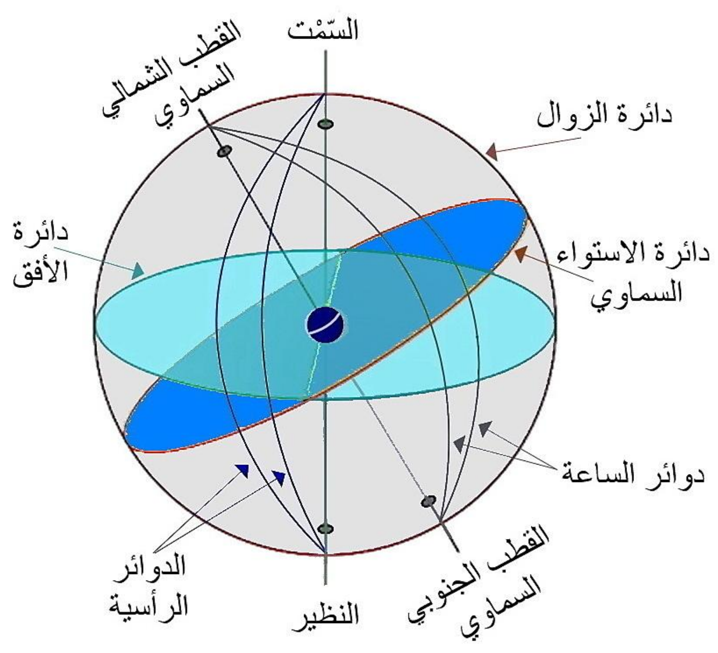
$$\cos B = -\cos C \cos A + \sin C \sin A \cos b \qquad \ldots\ldots 1.5'$$

$$\cos C = -\cos A \cos B + \sin A \sin B \cos c \qquad \ldots\ldots 1.5''$$

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 ١-٨ وكما يأتي تفصيله.



الشكل ١-٨: القبة السماوية.

١-٥: نُظُم الإحداثيات على القبة السماوية

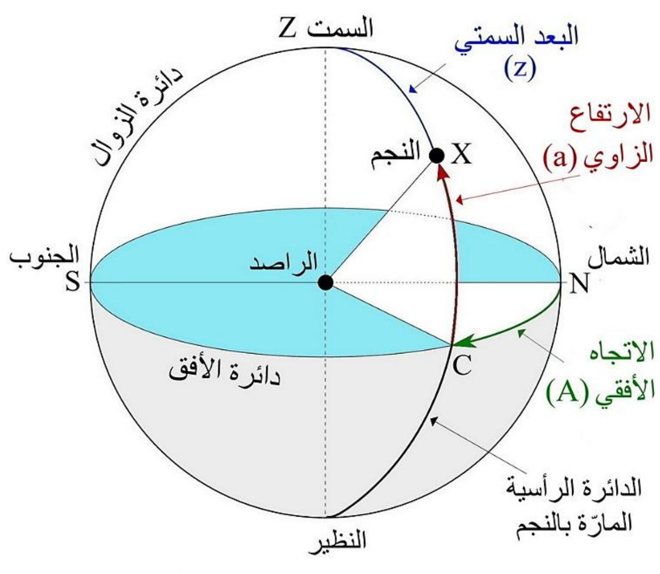
1-5: Coordinate Systems on the Celestial Sphere

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 الراصد هو النظام الأفقي (الشكل ١-٩). 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 لها أسفل الراصد تسمى النظير nadir. وتبعد دائرة الأفق 90° عن كل من سمت الرأس والنظير. وتسمى الدوائر الكبيرة التي تمر عبر السمت والنظير بالدوائر الرأسية



الشكل ١-٩: نظام الأفق.

vertical circles، وكل الدوائر الرأسية عمودية على دائرة الأفق. وجميع الخطوط العمودية تتقاطع مع الأفق بشكل عمودي.

وهناك 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 فإنه يبدو للراصد 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.

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 (كيف هذا؟). ويلاحظ من الشكل ١-٩ أننا لو رسمنا الدائرة الرأسية CXZ المارة بالنجم X فإن الارتفاع الزاوي a يعادل:

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

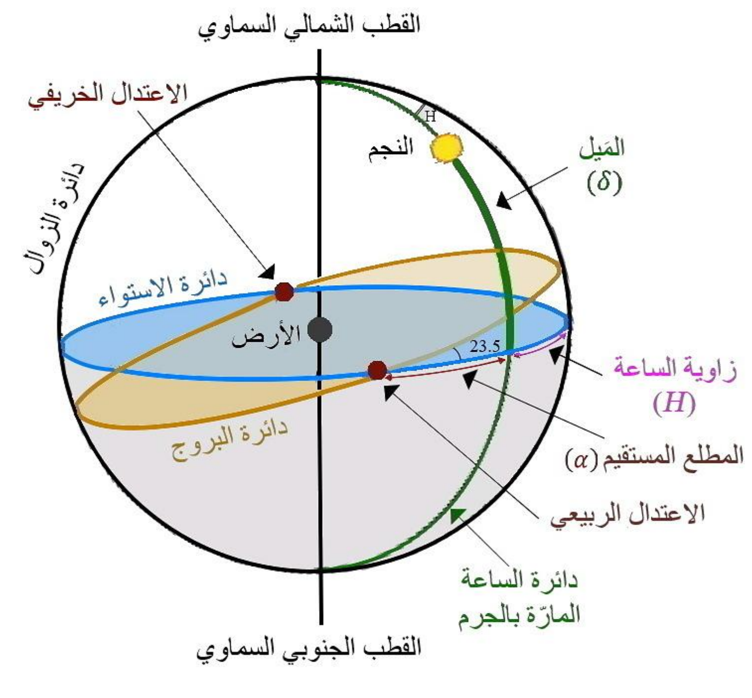
حيث z هو البعد السمتي zenith distance، وهو البعد الزاوي للجرم السماوي عن سمت الرأس.

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 ١–٩، يمكن رؤية ارتفاع النجم X واتجاهه الأفقي في لحظة ما. ومع تحرك النجم (بالحركة الظاهرية) 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

إذا افترضنا أن الأرض واقعة في مركز القبة السماوية فإن المحل الهندسي لتقاطع خطوط الطول والعرض الجغرافية بمحيط القبة السماوية هو ما نسميه بإحداثيات النظام الاستوائي للقبة السماوية. وتقاطع الكرة السماوية مع المستوى الاستوائي هو دائرة تسمى دائرة الاستواء السماوي celestial equator circle، 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 ١–١٠).



الشكل ١-١٠: النظام الاستوائي.

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 عموديا فوق القطب الشمالي الجغرافي الأرضي بالقطب الشمالي السماوي، والتي تقع عمودياً أسفل القطب الجنوبي الجغرافي بالقطب الجنوبي السماوي. وتدور الكرة السماوية

حول هذين القطبين كما هو الحال عند دوران الأرض حول محورها. ومن الجدير بالذكر أن نجم الجُدَيّ 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:

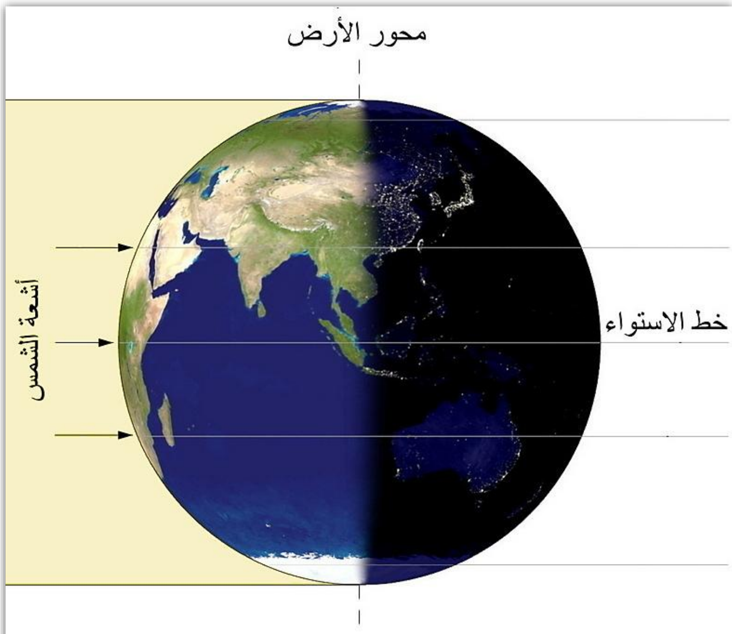
أ- الميَل (δ) declination: هو البعد الزاوي للجرم السماوي عن دائرة الاستواء السماوي، وهو يقابل خط العرض الجغرافي (ولا يعني هذا أن للجرم المرصود نفس قياس خط عرض الراصد)، ويقاس بالدرجات وأجزائها (درجة، دقيقة قوسية، ثانية قوسية). ويكون ذا إشارة موجبة إذا كان الجرم السماوي شمال دائرة الاستواء، وذا إشارة سالبة 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 حسب اتجاه حركة الجرم حول القبة السماوية. وعندما يكون مستوى الجرم السماوي ماراً بنقطة الاعتدال الربيعي فإن زاويته الساعية تعادل الزمن النجمي S_t sidereal time.

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.

الاعتدال الشمسي solar equinox: تتقاطع دائرتا الاستواء السماوي والبروج على القبة السماوية في نقطتين هما نقطتا الاعتدال الربيعي vernal equinox والاعتدال الخريفي autumnal equinox كما في الشكل ١–١٠، وتظهر مباشرة فوق خط الاستواء كما في الشكل ١–١١، وليس شماله أو جنوبه كما في الصيف والشتاء (لاحظ الشكل ١–٢٠).



الشكل ١-١١: الأرض عند الاعتدالين الربيعي والخريفي.

ويكون ميل الشمس ومطلعها المستقيم عند نقطة الاعتدال الربيعي صفراً. ولذلك يمكن اعتبار هذا الاتجاه نقطة الصفر لكل من النظامين الاستوائي والبروجي، ومن هذه النقطة يبدأ حساب خطوط الطول السماوية. ويكون الليل والنهار متساويين تقريباً في الطول في أيام الاعتدالين في مختلف الأماكن على الأرض.

وفي نصف الكرة الشمالي يكون الاعتدال الربيعي هو أول أيام فصل الربيع (21 آذار تقريباً). حيث يبدو فيه أن الشمس تعبر خط الاستواء السماوي من الجنوب إلى الشمال، ثم يأتي الربيع والصيف. بينما تتجه من الشمال إلى الجنوب عند الاعتدال الخريفي (23 أيلول تقريباً) فيأتي الخريف ثم الشتاء. وفي نصف الكرة الجنوبي يكون العكس هو الصحيح. والذي يسبب هذه التحولات هو ميلان الأرض حول محورها.

الزمن النجمي أو الفلكي sidereal time S_t: هو مقدار الزمن المنقضي 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 ($23^h 56^m 4.0905^s$)، وهو أقصر من اليوم الشمسي solar day بـ $3^m 56^s$ 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 δ والمطلع المستقيم α 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. ولذلك فإن المستوى الاستوائي هو مستوى مرجعي مناسب لنظام إحداثي يكون مستقلاً عن الوقت وموقع الراصد. ويعتمد هذا النظام كلياً على دوران الكرة الأرضية. 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 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 فسوف ينتج:

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

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

وبالمثل يمكن الحصول على المعادلة التالية:

$$\sin\delta = \sin\phi \cos z - \cos A \cos\phi \sin z \qquad \dots\dots 1.9$$

$$\text{or} \quad \sin\delta = \sin\phi \sin a - \cos A \cos\phi \cos a \qquad \dots\dots 1.9'$$

وأيضاً يمكن الحصول على المعادلتين التاليتين:

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

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

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

A: زاوية الاتجاه الأفقي للجرم السماوي.

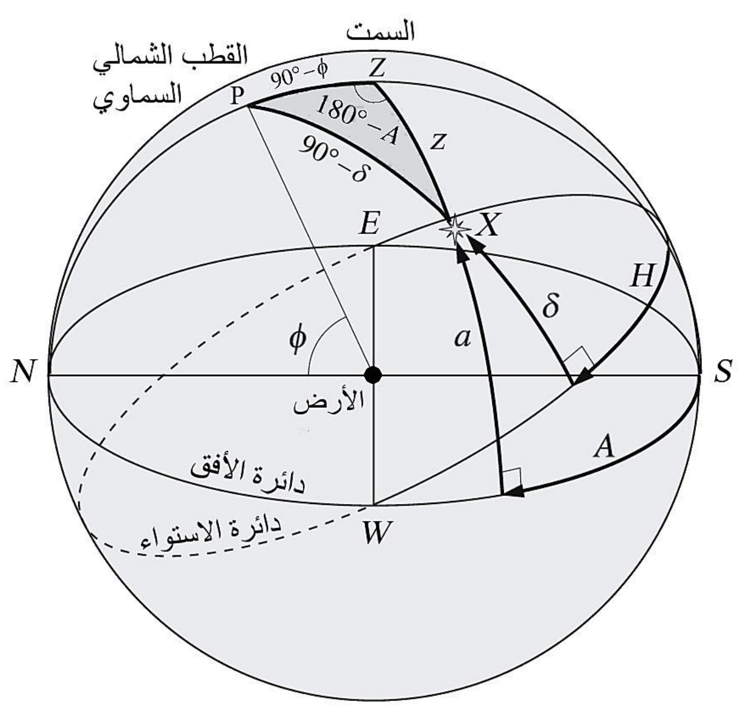
δ: ميل الجرم السماوي، ونحصل على قيمته من الجداول الفلكية عادة.

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:

الجدول ١-١: التحويل بين الوحدات الزمنية والقوسية.

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



الشكل ١-١٢: التحويل بين النظامين الأفقي والاستوائي.

مثال ١-٤: 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: $\phi = 60°\,N\,,\;\; \delta = 42°21' = 42.35°\,N$

$H = 8^h16^m42^s = 8.278\,h = 8.278 \times 15° = 124.17°$

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

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

$A = 41.29°$

مثال ١-٥: 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 :

$$a = 7°14'24'' = 7° + \left(\frac{14}{60}\right)^{\circ} + \left(\frac{24}{3600}\right)^{\circ} = 7.24°$$

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

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

(٢) $\quad \sin\delta = \sin\phi \cos z - \cos\phi \cos A \sin z$

$\quad = \sin 33.21 \cos 82.76 - \cos 33.21 \cos 85.55 \sin 82.76$

$\quad = 0.0046 \quad \rightarrow \quad \delta = 0.265°$

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

$$\cos H = \frac{\cos z - \sin\phi \sin\delta}{\cos\phi \cos\delta} = \frac{\cos 82.76 - \sin 33.21 \sin 0.265}{\cos 33.21 \cos 0.265} = 0.147$$

$$H = 81.512° = 81.512 \times \left(\frac{24}{360}\right)^{h} = 5.434^h$$

ويمكن أيضاً تطبيق المعادلة 1.10 لإيجاد H.