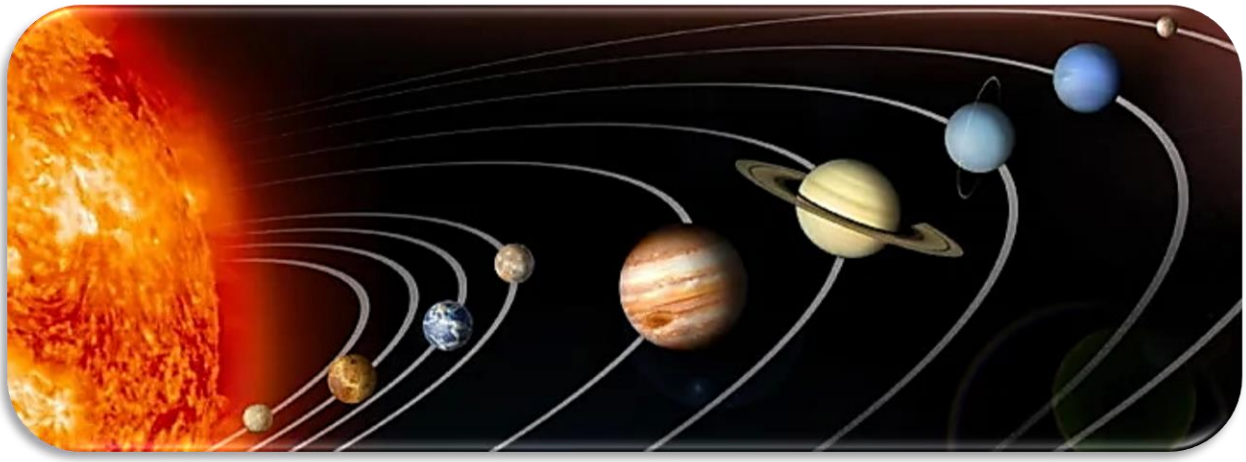
د. مُظفر جاسم
٢٠٢٣-٢٠٢٤

الفصل الثالث

كواكب المنظومة الشمسية

Planets of the Solar System



يتكون النظام الشمسي من الشمس والكواكب الثمانية والكواكب الأقزام والأقمار والكويكبات والمذنبات والشهب والغازات والأتربة الكونية التي تتخلل فضاء ما بين أجرام المنظومة الشمسية. وقد كشفت عقود من المراقبة واستكشاف المركبات الفضائية أن معظم هذه الأجسام تشكلت مع الشمس منذ ما يقارب 4.5 مليار سنة. ويمكن تقسيم نظامنا الشمسي إلى ثلاث مناطق: (١) النظام الشمسي الداخلي، (٢) النظام الشمسي الخارجي، (٣) حزام كايبر وسحابة أورت.

٣-١: تعريف الكوكب 3-1: Definition of planet

التعريف الأولي للكوكب هو أنه جسم فلكي كبير مستدير، ليس نجماً ولا بقايا نجم. ولكن هذا التعريف واجه بعض التعقيدات في نظامنا الشمسي بعد اكتشاف بعض الأجرام الكبيرة التي تدور حول الشمس واختلاف علماء الفلك في عدّها من الكواكب، لأنه لم يكن هنالك تعريف رسمي لما ينبغي أن يُعدّ كوكباً حتى اجتماع الاتحاد الفلكي الدولي International Astronomical Union (IAU) في شهر آب من سنة 2006 الذي وضع تعريفاً لكواكب نظامنا الشمسي ذكر فيه أن الكوكب هو جرم سماوي يمتلك المواصفات التالية:

١) يتحرك في مدار حول الشمس،

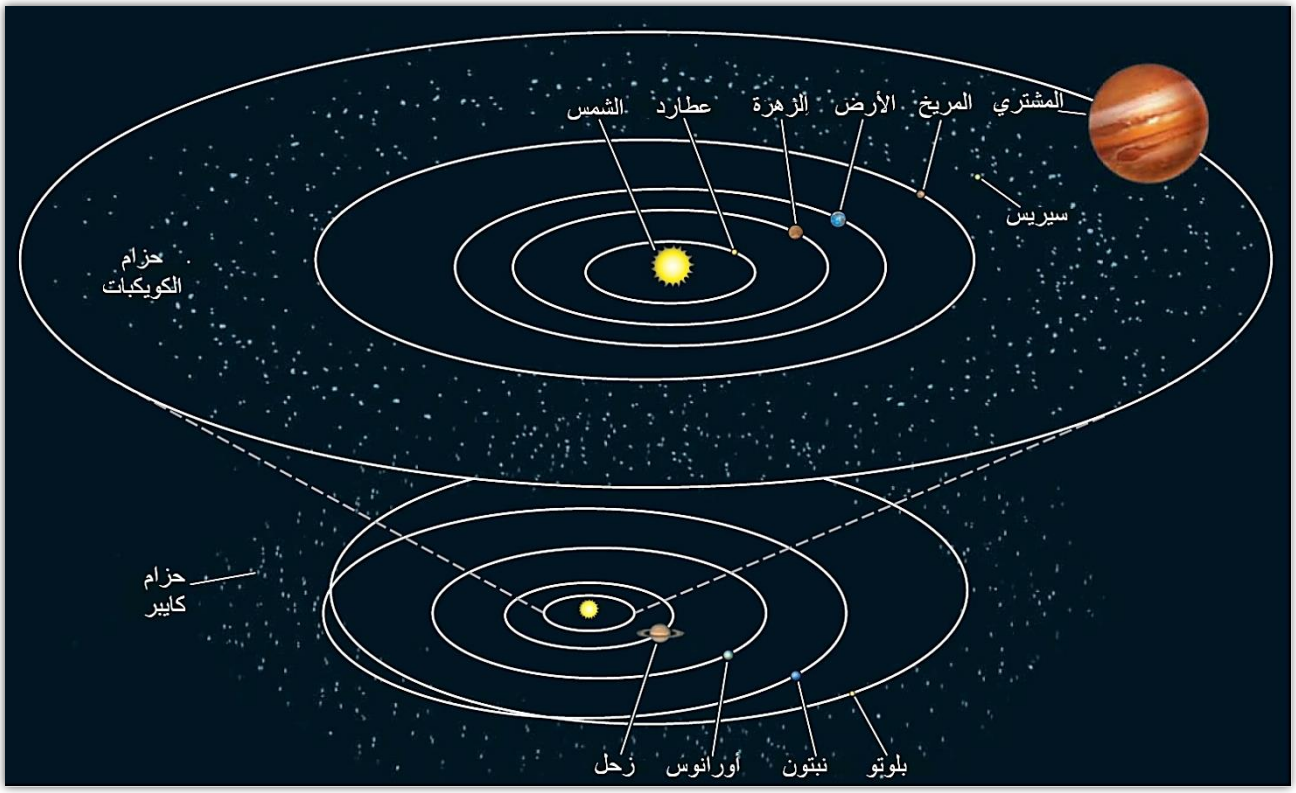
٢) لديه كتلة كافية لتمكين جاذبيته الذاتية من التغلب على قوى الجسم الصلد rigid body بحيث تحصل حالة توازن هيدروستاتيكي، فيتخذ شكلاً كروياً تقريباً،

٣) أخلى الجِوار حول مداره cleared the neighbourhood around its orbit، أي أصبح ذا جاذبية مهيمنة بحيث لا توجد أجسام أخرى في مداره حول الشمس ذات حجم مقارب. وهذا يستلزم ألا يتقاطع مع مدار كوكب آخر.

وتم إضافة صنف جديد إلى مكونات المجموعة الشمسية هو صنف "الكواكب الأقزام dwarf planets"، والذي يتوفر فيه الشرطان الأولان أعلاه، لكنه يفقد الشرط الثالث، فالكوكب القزم لم يُزِل الأجسام الأخرى ذات الحجم الأكبر أو المقارب من مداره حول الشمس. وعلى هذا الأساس تقرر تجريد بلوتو الذي اكتُشِف عام 1930 من رتبة كوكب واعتباره كوكباً قزماً، حيث أن مداره يتقاطع مع مدار الكوكب الثامن نبتون، ويشترك في جواره المداري مع العديد من أجرام حزام كايبر. لذا أضحى عدد الكواكب السيارة في مجموعتنا الشمسية ثمانية فقط، وهي بالتسلسل حسب قربها من الشمس: عطارد Mercury والزهرة Venus والأرض Earth والمريخ Mars والمشتري Jupiter وزحل Saturn وأورانوس Uranus ونبتون Neptune، (لاحظ الشكل ٣-١).

والكواكب الأقزام عددها خمسة لحد الآن وفق تصنيف الاتحاد الفلكي الدولي، وهي حسب قربها من الشمس: سيريس Ceres (الذي يبعد عن الشمس بمعدل مسافة قدره $2.8\ AU$) وبلوتو Pluto ($39.5\ AU$)، وهاميا Haumea ($43.1\ AU$)، وميكميك Makemake ($45.7\ AU$)، وإريس Eris ($67.7\ AU$). ويقول الاتحاد الفلكي الدولي إنه قد يكون هناك العديد من الكواكب الأقزام – ربما أكثر من مائة – في انتظار اكتشافها.

ولو توفر الشرط الأول فقط من الشروط أعلاه كان الجرم كويكباً ما لم يكن مذنباً.



الشكل ٣-١: مخطط لنظامنا الشمسي. وهناك ثلاثة كواكب أقزام أخرى إلى جانب بلوتو وسيريس غير معروضة هنا. ويُلاحظ تقاطع مدار بلوتو مع مدار نبتون.

٣-٢: نبذة مختصرة عن الكواكب 3-2: A Brief Overview of the Planets

تعتبر الكواكب الموجودة في نظامنا الشمسي من الأجرام الملائمة نسبياً للدراسة بسبب قربها منا لدرجة أن البشر تمكنوا من إرسال مجسات غير مأهولة إلى معظمها للحصول على صور وكميات كبيرة من البيانات، ويوجد الآن قدر هائل من المعلومات عنها. وتتمتع الكواكب بخصائص متنوعة، بعضها يسهل الحصول عليه إلى حد ما، ويصعب في البعض الآخر. ويمكن قياس بعض الخصائص من الأرض، بينما يتطلب البعض الآخر رؤية قريبة من الكوكب. وبعض الخصائص التي نعتقد أننا نعرفها قد يتبين لاحقاً أن لها قيماً مختلفة. وهذا يعني أنه في معظم قوائم خصائص الكواكب ستكون هناك بعض الأرقام معروفة بدقة وبعضها غير معروف جيداً.

إذا استعرضنا الحركات العامة لكواكب مجموعتنا الشمسية فسوف نجدها جميعاً في حركاتها المدارية حول الشمس تسير باتجاه واحد (من الغرب إلى الشرق بالنسبة للمشاهد الأرضي)، أما في حركتها المحورية حول نفسها فإنها تدور أيضاً بنفس الاتجاه (من الغرب إلى الشرق) ما عدا الزهرة

وأورانوس اللّذَين يدوران باتجاه معاكس (من الشرق إلى الغرب). لذا تكون قيمة الميل المحوري لهما أكثر من $90°$ كما يُلاحظ في الجدول ٣-٣.

لا تشكل كتل الكواكب مجتمعة إلا جزءاً صغيراً جداً من كتلة المنظومة الشمسية كما في الجدول التالي:

الجدول ٣-١: نِسَب كُتل مكونات المنظومة الشمسية.

الجرم	النسبة مقارنة بالكتلة الكلية للمنظومة الشمسية
الشمس	99.8%
المشتري	0.001
بقية الكواكب والكواكب الأقزام	0.0004
المذنبات	$(3 \times 10^{-4}) \rightarrow (5 \times 10^{-6})$ (تقديري)
الأقمار والحلقات	5×10^{-7}
الكويكبات	2×10^{-8} (تقديري)
الغبار الكوني	1×10^{-9} (تقديري)

تشترك بعض الكواكب في خصائص مماثلة. وهذا يسمح بجعلها ضمن مجموعة واحدة معاً وبيان الصفات المشتركة لها. لذا نُظمت الكواكب في مجموعتين يفصل بينهما حزام الكويكبات هما:

١) الكواكب الداخلية أو الصخرية أو الأرضية (أي الشبيهة بالأرض) terrestrial planets، وهي الكواكب الأربعة الأقرب للشمس: عطارد، والزهرة، والأرض، والمريخ. وتتسم هذه الكواكب بتركيبها الصخري والمعدني والصغر النسبي لحجمها، فأكبرها حجماً هو كوكب الأرض. ولا تختلف كثيراً في كثافتها وتركيبها الكيمياوي، لكنها تختلف اختلافاً بيّناً في الأحوال الطبيعية لسطحها كدرجة الحرارة وقوة الجاذبية ووفرة الماء والهواء في غلافها الجوي. ويتميز هذا القسم بقلة أقماره.

٢) الكواكب الخارجية أو المشترية (أي الشبيهة بالمشتري) Jovian planets (نسبة إلى "Jove" الاسم الآخر للمشتري) أو العملاقة giant planets، وهي الكواكب الأربعة الأبعد عن الشمس: الكوكبان الغازيان المشتري وزحل والكوكبان الجليديان أورانوس ونبتون. وتتركب من مواد خفيفة كالهيدروجين والهيليوم والماء. ولا وجود للقشرة الصخرية الشبيهة بالأرض، لذا تكون قليلة الكثافة. وهي كبيرة الحجم، فكوكب نبتون الذي هو أصغر هذه الكواكب الأربعة يفوق قطره قطر الأرض بما يقارب أربع مرات[١]. كما تتميز بكثرة

١) بكم مرة يكبر نبتونُ الأرضَ في الحجم؟

الأقمار. ويمتلك كل من هذه الكواكب الأربعة حلقات تدور حول خط استواء الكوكب، رغم أن الشائع هو أن زحل فقط له حلقات، وهذا راجع إلى صغر حجم حلقات الكواكب الأخرى. وهذه الحلقات تتكون من أعداد كبيرة من الأجسام الصغيرة التي تتراوح أحجامها من بضعة مايكرونات[1] إلى عشرات الأمتار. وتتكون من جليد الماء والغبار والصخور، على اختلاف في نسب هذه المكونات بين الكواكب الأربعة.

رغم أن الكواكب العملاقة تشترك في العديد من الخصائص، إلا أن هناك اختلافات كبيرة فيما بينها. فكوكبا المشتري وزحل متقاربان في الحجم ويتكونان بشكل أساسي من الهيدروجين والهيليوم، وهما أكبر بكثير من أورانوس ونبتون المتقاربين مع بعض في الحجم، والّذَين يحتويان على كميات أكبر بكثير من الماء والجليد مقارنة بالمشتري وزحل.

تشرق الشمس بشكل خافت وتوفر القليل جداً من الدفء في هذه الأجزاء النائية من النظام الشمسي. وتُرى الشمس من كوكب المشتري مجرد قرص صغير، يبلغ سطوعه $\frac{1}{27}$ مما يبدو من الأرض. وفي نبتون، لن تظهر الشمس كقرص، بل ستظهر كنقطة ضوء لامعة تشبه النجمة.

ويشترك بلوتو في بعض الخصائص مع إحدى المجموعتين وفي أخرى مع المجموعة الثانية. لذا فهو لا يشبه أياً من الكواكب، ولم يُحتسَب ضمن أي من المجموعتين حتى عندما كان يُعتبر كوكباً.

ويبين الجدولان التاليان المعلومات المدارية والفيزيائية للكواكب السيارة:

الجدول ٣-٢: بعض الثوابت المدارية للكواكب.

الكوكب	عطارد	الزهرة	الأرض	المريخ	المشتري	زحل	أورانوس	نبتون
طول المحور شبه الرئيسي (AU) distance from Sun	0.387	0.723	1	1.524	5.2	9.6	19.2	30
الفترة المدارية (سَنة الكوكب) بالسنين الأرضية orbital period	0.241	0.615	1	1.881	11.9	29.5	84	164.8
السرعة المدارية (km/s) orbital velocity	47.9	35	29.8	24.1	13.1	9.7	6.8	5.4
الانحراف المركزي eccentricity	0.206	0.007	0.017	0.093	0.048	0.054	0.047	0.009
زاوية ميل مستوى المدار عن دائرة البروج orbital inclination	7°	3.4°	0°	1.85°	1.31°	2.49°	0.77°	1.77°
زمن دوران الكوكب حول نفسه (يوم الكوكب) rotation period	58.65^d	243.02^d	23^h56^m	24^h37^m	9.9^h	10.7^h	17.2^h	16.1^h
الميل المحوري axial tilt	2°	177.36°	23.45°	25.19°	3.1°	26.7°	97.8°	29.3°

١) المايكرون $= m\ 10^{-6}$.

الجدول ٣-٣: بعض الثوابت الفيزيائية للكواكب.

الكوكب	عطارد	الزهرة	الأرض	المريخ	المشتري	زحل	أورانوس	نبتون
الكتلة (بدلالة كتلة الأرض) mass	0.055	0.815	1	0.107	318	95	14.5	17.1
القطر الاستوائي $(1000\ km)$ equatorial diameter	4.88	12.104	12.756	6.794	143	120.5	51.1	49.5
القطر الاستوائي (بدلالة قطر الأرض)	0.383	0.949	1	0.533	11.2	9.45	4	3.9
معدل الكثافة (gm/cm^3) mean density	5.43	5.24	5.52	3.93	1.3	0.7	1.3	1.6
الجاذبية السطحية (m/s^2) surface gravity	3.7	8.87	9.78	3.71	25.1	10.5	9	11.2
سرعة الإفلات (km/sec) escape speed	4.25	10.36	11.18	5.03	60.2	35.5	21.3	23.5
عدد الأقمار number of moons	0	0	1	2	95	146	27	14
معدل درجة الحرارة (°C) mean temperature	125	464	15	−65	−110	−140	−195	−200

توجد ملاحظات عديدة على الجدولين أعلاه، منها:

١) إن طول سنة الكوكب يزداد كلما كان الكوكب أبعد عن الشمس، لأنه سيستغرق زمناً أطول لإتمام دورة كاملة حول الشمس، فعطارد الكوكب الأقرب للشمس يدور حول الشمس كل 88 يوماً أرضياً، بينما يتم نبتون – الكوكب الأبعد – دورته حول الشمس خلال 165 سنة تقريباً.

٢) تكون السرعة المدارية (الدوران حول الشمس) للكواكب الداخلية أسرع مما للكواكب الخارجية.

٣) الاختلاف المركزي صغير جداً لجميع الكواكب ما عدا عطارد، أي لمعظمها مدارات شبه دائرية.

٤) يوم الكوكب الداخلي أطول منه للكوكب الخارجي. وهذا يعني أن سرعة الدوران المحوري للكوكب الخارجي أكبر بكثير، وهذه الكثرة استُنتجت من كبر محيط الكوكب الخارجي مقارنة بالداخلي[١].

٥) ميل محور دوران بعض الكواكب بالنسبة لمستوى مدارها حول الشمس صغير جداً، وهذا يعني أنها تدور في وضع مستقيم تقريباً وليست مائلة كالأرض التي تميل بـ(°23.45). فلعطارد ميل محوري قدره °2 وللزهرة °2.64 وللمشتري °3.1 فقط. وهذا يعني أنها لا تمتلك فصولاً فلكية ملحوظة كما للأرض.

٦) إن كتل وأحجام الكواكب الداخلية أصغر بكثير مما للكواكب الخارجية.

٧) تكون كثافة الكواكب الداخلية (الصخرية) أكبر مما للكواكب الخارجية (الغازية) لأن المادة الصلبة أكثر كثافة من المادة الغازية.

---

١) قارن بين سرعة الدوران المحوري للمشتري والأرض.

٨) سرعة الإفلات للكواكب الداخلية أصغر مما للكواكب الخارجية. وهذا بسبب صغر نسبة الكتلة إلى نصف القطر للكواكب الداخلية مقارنة بما للكواكب الخارجية حسب العلاقة $\left(v_{esc} = \sqrt{2Gm_M/R}\right)$.

٩) تمتلك الكواكب الداخلية 3 أقمار فقط، أحدها للأرض واثنان للمريخ، بينما تمتلك الكواكب الخارجية 282 قمراً.

١٠) تكون الكواكب الخارجية أبرد من الداخلية بسبب البعد عن الشمس، وتقل درجة الحرارة كلما زاد البعد عن الشمس إلا في حالة كوكبي عطارد والزهرة، فإن عطارد الكوكب الأقرب للشمس ليس هو الأكثر سخونة، وذلك بسبب عدم وجود غلاف جوي للكوكب للاحتفاظ بهذه الحرارة، فيفقدها بسهولة خلال الليل الذي يمكن أن تنخفض فيه درجة الحرارة على السطح إلى $(-180°C)$، وتصل خلال النهار إلى $(430°C)$. ويكون كوكب الزهرة الذي هو أبعد عن الشمس من عطارد ذا درجة حرارة أكبر بسبب غلافه الجوي الكثيف.

٣-٣: خصائص كوكبية 3-3: Planetary Properties

٣-٣-١: القطر 3-3-1: Diameter

يُستخدم أحيانا جهاز المايكرومتر الذي يُربط بالمرقب الفلكي لأجل قياس القطر الزاوي للكوكب بالثواني القوسية. وبعد معرفة بعده عن الأرض يمكن الحصول على القطر الحقيقي. وهذا يحصل وفق العلاقة التي مرت علينا عند حساب قطري الشمس والقمر $\left(\frac{D}{\theta} = \frac{2\pi r}{360^\circ}\right)$.

إذا كان الكوكب كروياً، فسيكون القطر متساوياً في كل مكان. ولكن معظم الكواكب ليست كروية تماماً، فلديها انتفاخ استوائي ناتج عن دورانها (كما مرّ ذكره عن الأرض في الفصل الأول). وهذا يعني أن القطر الاستوائي سيكون أكبر من القطر القطبي. وبشكل عام، عندما يتم إعطاء قيمة واحدة فقط للقطر فهي القطر الاستوائي. وبمعرفة القطر، يمكن إيجاد المحيط والمساحة السطحية والحجم[١].

٣-٣-٢: الكتلة 3-3-2: Mass

تُحسب الكتلة باستخدام قانون كبلر الثالث فيما لو كان للكوكب تابع طبيعي أو أكثر في مدار حوله كما هو الحال بالنسبة للأرض وبقية الكواكب الأبعد، ويتم ذلك بقياس مدة دورة التابع حول الكوكب،

١) وفق هذه الطريقة في حساب الحجم، هل سيكون دقيقاً تماماً؟ ولماذا؟

ثم تُستخدم العلاقة 2.2 التي حُسبت بها كتلة الشمس[1]. أما إذا لم يكن للكوكب تابع كما هو الحال في عطارد والزهرة فإن كتلته تقاس من خلال تأثيره على مدارات الكواكب الأخرى أو على مدار مذنب معين فيما لو اقترب منه، أو من مرور بعض المركبات الفضائية بالقرب منه.

وبعد معرفة كتلة وحجم الكوكب يمكن معرفة معدل كثافته، لأن $(\rho = m/V)$.

٣-٣-٣: الجاذبية السطحية 3-3-3: Surface Gravity

بعد معرفة كتلة الكوكب وقطره يمكن معرفة جاذبيته السطحية g من العلاقة 2.11 التي ذُكرت في حساب جاذبية القمر: $(g = Gm/R^2)$، حيث m: كتلة الكوكب، و R: نصف قطره، و G: ثابت الجذب العام.

٣-٣-٤: مدة الدوران المحوري 3-3-4: Axial Rotation Period

يمكن حساب مدة دوران الكوكب حول نفسه عن طريق قياس الزمن المستغرق لعلامة واضحة على سطح الكوكب أو على غلافه الجوي كي تعود – بعد دوران الكوكب – لنفس الاتجاه نسبة للنجوم، ثم إدخال التصحيحات اللازمة على هذه القياسات مثل معالجة نتيجة التغيّر الحاصل في بعد الأرض عن الكوكب بسبب تغيّر وصول الضوء من الكوكب إلينا. وكمثال على هكذا علامات هو البقعة الحمراء red spot في الغلاف الجوي لكوكب المشتري. وفي حالة عدم وجود علامة مميزة على سطح الكوكب تستخدم طرق أخرى، منها استخدام ظاهرة دوبلر في قياس إزاحة الخطوط الطيفية لحافة قرص الكوكب للحصول على سرعة الاقتراب أو الابتعاد عن الأرض.

٣-٣-٥: درجة الحرارة 3-3-5: Temperature

تتأثر درجة الحرارة الفعلية للكوكب بكمية الطاقة الشمسية الساقطة عليه وتأثيرات الغازات الدفيئة (غازات الاحتباس الحراري greenhouse gases) إن وجدت. ويمكن معرفة درجة حرارة سطح الكوكب من خلال المركبات الفضائية التي أجرت قياسات مباشرة لسطوح الكواكب التي وصلت إليها، ويمكن أيضاً تقدير درجة الحرارة بواسطة الدراسات الخاصة بكمية الحرارة المشَعة، لأنها تبين معدل امتصاص الكوكب للحرارة ومعدل ما يشعه منها.

---

١) $(m_S + m_p = 4\pi^2 r^3/GT^2)$.

٣-٣-٦: الغلاف الجوي 3-3-6: Atmosphere

الغلاف الجوي عبارة عن طبقة من الغازات التي قد تحيط بسطح الكوكب. وقد يحتوي الغلاف الجوي على سحب تمنعنا من رؤية السطح، أو قد يكون شفافاً. وقد تكون الغازات التي يتكون منها الغلاف الجوي مفيدة للحياة على السطح، أو قد تكون مُضرة.

إذا كان الغلاف الجوي شفافاً أو غير موجود، فقد نتمكن من التعرف على مجموعة متنوعة من المظاهر السطحية على الكوكب كالحُفر والجبال والوديان والبراكين وما إلى ذلك. وفي بعض الحالات يمكن التعرف على هذه الميزات على الرغم من الغطاء السحابي السميك باستعمال الرادار للتنقيب تحت الغيوم.

٣-٣-٧: البياض والسطوع 3-3-7: Albedo and Brightness

إن الكواكب وجميع الأجسام الأخرى في النظام الشمسي تعكس إشعاع الشمس. ويعتمد سطوع أو لمعان الجسم على بعده عن الشمس والأرض، وعلى انعكاسية أو بياض سطحه. ويحدد مصطلح البياض قدرة الجسم على عكس الضوء.

نحصل على لمعان الكوكب من الأرصاد الضوئية (حيث يُهمل هنا الإشعاع الحراري وموجات الراديو ويتم التركيز بشكل أساسي على الأطوال الموجية البصرية). وبما أن لمعان الكوكب يعتمد على بعده من الشمس فإن نورانيته تتغير تغيراً عكسياً مع مربع بعده عن الشمس حسب قانون التربيع العكسي، وكذلك يتغير القطر المرئي (القطر الزاوي) للكوكب وفقاً لبعده عن الأرض. وبعبارة أخرى فإن لمعان الكوكب بالنسبة لنا يتناسب عكسياً مع مربع بعده عن الشمس ومربع بعده عن الأرض.

تبلغ انعكاسية الأرض 0.37 ~، وهذا يعني أنها تعكس ما يقارب 0.37% من أشعة الشمس، أي إنها تمتص 63%. ويمتلك كوكب الزهرة انعكاسية تقارب 0.7، ويمتص 30% فقط من أشعة الشمس الساقطة عليه، لكن الغلاف الجوي المشبع بثاني أوكسيد الكربون سميك جداً لدرجة أن درجة حرارة سطحه ترتفع بشكل كبير. ويمتلك المريخ انعكاسية تبلغ 0.15، لذا يمتص الكثير من الطاقة الشمسية الساقطة، لكن غلافه الجوي الرقيق المكون من ثاني أوكسيد الكربون (ما يقارب 1/100 مما للغلاف الجوي للأرض) غير قادر على حبس الكثير من الحرارة، لذا فهو الآن بارد جداً بحيث لا تتمكن أشكال الحياة المعتمدة على الكربون والماء من البقاء على السطح.

٣-٤: قاعدة بود 3-4: Bode's Law

تمت صياغة هذه القاعدة في القرن الثامن عشر لقياس المسافات بين الشمس والكواكب المعروفة آنذاك، وهي ستة كواكب من عطارد إلى زحل. ولكن بعد فترة وجيزة – في عام 1781 – تم اكتشاف كوكب أورانوس الذي كان بعده عن الشمس مناسباً لقاعدة بود بشكل جيد. وقد افتُرض بمقتضى هذه القاعدة وجود كوكب بين المريخ والمشتري. ولكن الواقع الذي لم يكن معروفاً آنذاك هو وجود مركز حزام الكويكبات في ذلك الموقع وليس كوكباً، وتم التحقق من هذا عندما تم اكتشاف الكويكب الأول سيريس في عام 1801 الذي كان يبعد مسافة $2.8\ AU$ كما هو الحال مع العديد من الكويكبات الأخرى التي تم اكتشافها لاحقاً في حزام الكويكبات بين المريخ والمشتري).

ومع النجاح في التنبؤ بمواقع أورانوس وسيريس، بدأ التساؤل عما إذا كانت قاعدة بود ذات أساس فيزيائي. لكن اكتشاف نبتون في عام 1846 ثم بلوتو في عام 1930 أظهر أنها لم تكن قاعدة مثالية.

ويمكن تلخيص قاعدة بود الرياضية كما يلي:

١) ابدأ بكتابة سلسلة الأرقام التالية: $0, 3, 6, 12, 24, 48, 96, 192, \ldots..$

٢) أضف لكل رقم من الأرقام المذكورة أعلاه الرقم 4 فتحصل على سلسلة من الأرقام الجديدة هي: $4, 7, 10, 16, 28, 52, 100, 196, \ldots..$

٣) قسِّم كل رقم من أرقام السلسلة الثانية على 10 فتحصل على معدل البعد التقريبي لكل كوكب عن الشمس مقاساً بالوحدات الفلكية AU.

ويمكن ادراج هذه العلاقة بالصيغة التالية:

$$r = 0.4 + 0.3 \times 2^n \qquad \ldots\ldots 3.1$$

حيث r: معدل البعد التقريبي للكوكب عن الشمس مقاساً بالوحدات الفلكية AU.

و $n = (-\infty)$ لعطارد، و (0) للزهرة، و (1) للأرض، و (2) للمريخ، و (3) لحزام الكويكبات، و (4) للمشتري، و(5) لزحل، ..... الخ. والجدول ٣-٤ يبين بعد كل كوكب عن الشمس محسوباً بطريقة بود ومعدل البعد الحقيقي.

٤) إذا أردت استخراج البعد التقريبي لكل كوكب عن الشمس بوحدة الكيلومتر فيمكن استخدام العلاقة التالية:

$$r = 0.6 + 0.45 \times 2^n \qquad \ldots\ldots 3.2$$

حيث r: معدل البعد التقريبي للكوكب عن الشمس مقاساً بوحدة $10^8\ km$.

$n = -\infty, 0, 1, 2, 3, 4, \ldots$

الجدول ٣-٤: البعد التقريبي (قاعدة بود) والبعد الحقيقي لكل كوكب عن الشمس.

الكواكب	البعد التقريبي وفق قاعدة بود بالوحدات الفلكية	البعد الحقيقي بالوحدات الفلكية
عطارد	0.4	0.387
الزهرة	0.7	0.723
الأرض	1	1
المريخ	1.6	1.524
حزام الكويكبات	2.8	2.8
المشتري	5.2	5.2
زحل	10	9.6
أورانوس	19.6	19.2
نبتون	38.8	30

٣-٥: الأقمار 3-5: The Moons

هي الأجرام الفلكية المتكونة طبيعياً وتدور حول الكواكب، وتسمى أيضاً توابع كوكبية planetary satellites. ويدور التابع (والمتبوع أيضاً) حول مركز كتلة النظام الكوكبي. ووفقاً لفريق ديناميكيات النظام الشمسي لمختبر الدفع النفاث التابع لناسا NASA/ Jet Propulsion Laboratory Solar System Dynamics team فإن العدد الحالي للأقمار التي تدور حول كواكب نظامنا الشمسي هو 290 قمر: واحد للأرض، واثنان للمريخ. و 95 للمشتري، و 146 لزحل، و 27 لأورانوس، و 14 لنبتون، و 5 للكوكب القزم بلوتو.

وقد وثّق علماء الفلك أيضاً أكثر من 470 تابعاً أو قمراً يدور حول أجسام أصغر من الكواكب، مثل الكويكبات والكواكب الأقزام وأجرام حزام كايبر خارج مدار نبتون. وتُدعى هذه الأقمار بالتوابع ذات الأجسام الصغيرة small-body satellites. ومن المحتمل أن يكون هناك آلاف الأقمار الأخرى التي تنتظر اكتشافها في نظامنا الشمسي.

٣-٦: الكويكبات 3-6: Asteroid

يمكن القول بأن الكويكبات هي أجرام صغيرة الحجم ليست كواكب ولا مذنبات، وتدور حول الشمس، وهي أجسام قد تكون صخرية أو معدنية أو جليدية، وليس لها غلاف جوي. ويختلف حجمها وشكلها عن بعض بشكل كبير، ومعظمها ذات أشكال غير منتظمة، وبعضها يكون شبه كروي، وغالباً ما تكون ذوات حفر.

لبعض الكويكبات صفات أو أصل مماثل للمذنبات، ومن المحتمل أن تكون بعض الكويكبات القريبة من الأرض عبارة عن بقايا مذنبات اختفت منها جميع العناصر المتطايرة. ومن ثم فإن التصنيف الحالي يعتمد على المظهر البصري والأعراف الفلكية أكثر من اعتماده على الاختلافات الفيزيائية الحقيقية. وتفترض النظرية المقبولة حالياً أن الكويكبات تشكلت في وقت واحد مع الكواكب الكبرى. وكانت الكويكبات البدائية عبارة عن قطع كبيرة، يدور معظمها بين مداري المريخ والمشتري. وبسبب الاصطدامات المتبادلة والتشظّي، فإن الكويكبات الحالية هي حطام تلك الأجسام البدائية التي لم تكن قادرة على تشكيل كوكب كبير.

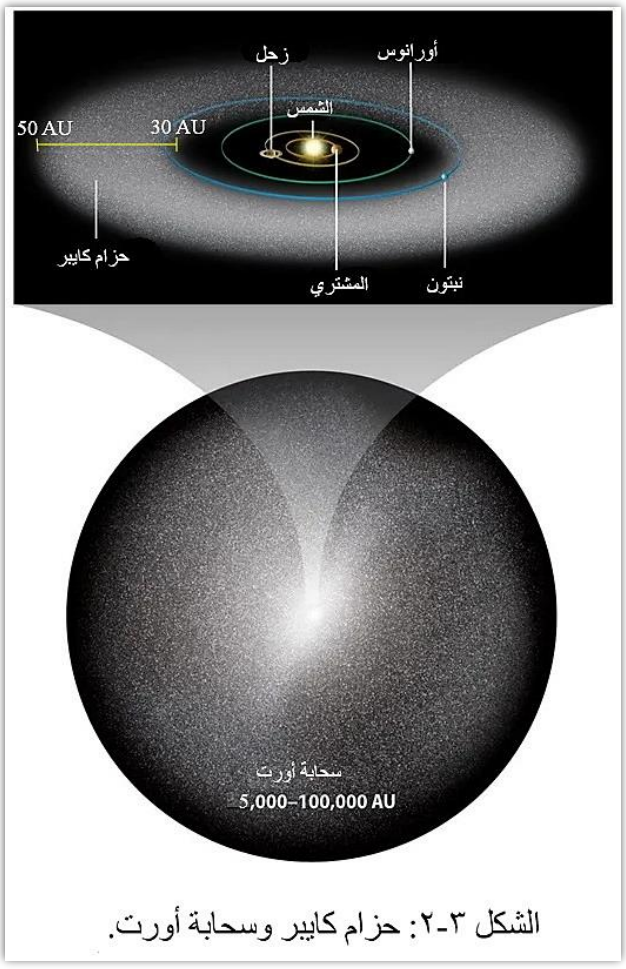
تشكل الكويكبات مجموعة كبيرة ومتناثرة من الأجسام التي تدور حول الشمس. وتشكل المجموعة الأكثر شهرة حزامَ الكويكبات بين المريخ والمشتري على مسافة $(2.2 - 3.3\ AU)$ من الشمس. وأبعد الكويكبات هي أبعد بكثير من مدار بلوتو، وهناك عدد من الكويكبات التي تكون أقرب إلى الشمس من الأرض. وتتراوح أقطار الكويكبات من مئات الأمتار إلى مئات الكيلومترات. وأكبرها هو ڤيستا Vesta الذي يبلغ قطره ما يقارب $530\ km$. ويبلغ عدد الكويكبات المرصودة أكثر من 1.3 مليون. والكتلة الإجمالية لجميع الكويكبات مجتمعة أقل من كتلة قمر الأرض.

يراقب العلماء باستمرار الكويكبات التي تتقاطع مساراتها مع مدار الأرض والكويكبات القريبة من الأرض التي تقترب من المسافة المدارية للأرض إلى مسافة تقارب 45 مليون كيلومتر والتي قد تشكل خطر الاصطدام. وتسمى الكويكبات التي تقترب مداراتها من مدار الأرض بالكويكبات القريبة من الأرض. وإحدى المجاميع الكويكبية تسمى الأموريات Amors، ويتقاطع مدارها مع مدار المريخ ولا يتقاطع مع مدار الأرض. وهنالك مجموعتان أخريان هما الأتونيات Atens والأبولويات Apollos، ومداراتها تتقاطع مع مدار الأرض، وربما تصطدم بالأرض أو القمر. ويقدر علماء الفلك أن هناك أكثر من 3500 كويكب ضمن مجموعتي أتون وأبولو بأقطار أكبر من

كيلومتر واحد. وإن الاصطدامات بين الأرض أو القمر ومثل هذه الأجسام لها أهمية جيولوجية، وقد أدّى بعضها إلى تغيير تاريخ الحياة على الأرض بشكل كبير.

٣-٦-١: حزام كايبر 3-6-1: Kuiper Belt

هو عبارة عن مجموعة واسعة من الصخور والأجسام الجليدية الواقعة خارج مدار نبتون، ويدور حول الشمس في نفس مستوى الكواكب تقريباً، وتوجد فيه أجسام أكبر من بلوتو مثل الكوكب القزم إريس الذي اكتُشف عام 2003. ويقدر العدد الكلي للأجسام في حزام كايبر التي يزيد قطرها عن $100\ km$ بأكثر من 100 ألف. وتعتبر أجسام حزام كايبر من بقايا مراحل التشكيل المبكرة للنظام الشمسي. وكان مجرد افتراض حتى عام 1992 عندما تم التعرف على أول جسم هناك.



الشكل ٣-٢: حزام كايبر وسحابة أورت.

ويُعد حزام كايبر واحداً من الهياكل الكبرى في نظامنا الشمسي، وشكله العام يشبه القرص المنتفخ أو الدونات. وتبدأ حافته الداخلية عند مدار نبتون، على بعد يقارب $30\ AU$ من الشمس. وتنتهي المنطقة الرئيسية على بعد يقارب $50\ AU$. وتشير إحدى الدراسات الحديثة أن حزام كايبر قد يكون أكبر من المتوقع، وقد يمتد إلى مسافة $80\ AU$ من الشمس.

تتداخل مع الحافة الخارجية للجزء الرئيسي من حزام كايبر منطقة ثانية تسمى القرص المبعثر scattered disk، والتي تمتد إلى ما يقرب من $1000\ AU$، وتوجد بعض الأجسام في مدارات أبعد من ذلك.

٣-٦-٢: سحابة أورت 3-6-2: Oort Cloud

يُعتقد أنها عبارة عن قشرة كروية عملاقة مثل فقاعة كبيرة وسميكة حول نظامنا الشمسي تحيط بالشمس والكواكب وأجسام حزام كايبر، وهي ليست كالكواكب التي تدور في مستوى مسطح،

(لاحظ الشكل (٣-٢). وتتكون سحابة أورت من أجسام جليدية تشبه المذنبات، ويمكن أن تكون أجسامها الجليدية كبيرة مثل الجبال، وفي بعض الأحيان أكبر.

والأبعاد الدقيقة لهذه السحابة غير معروفة بسبب حجمها وبعدها الكبير. ومع ذلك تُقدر كتلتها الكلية بعشرات أضعاف كتلة الأرض، وتحتوي على أكثر من 10^{12} مذنباً. ويُعتقد أن الحافة الداخلية لسحابة أورت تقع على بعد $(2000 - 5000\ AU)$ من الشمس، وتقع الحافة الخارجية بين $(10000 - 100000\ AU)$، أي تمتد لمسافة تقارب 1.5 سنة ضوئية (ثلث الطريق إلى أقرب نجم).

٣-٧: المذنبات 3-7: Comets

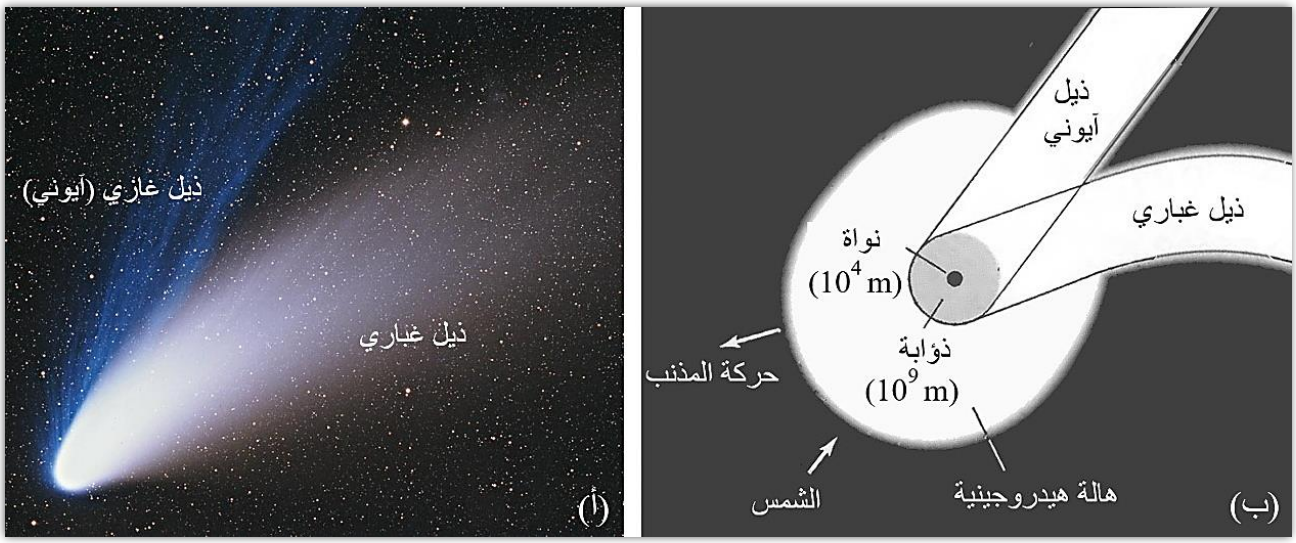
هي أجسام جليدية صغيرة تدور في النظام الشمسي قد يبلغ عرض الواحد منها بضعة كيلومترات، ولها رأس غازي كبير على شكل غيمة كبيرة مضيئة تحيط بنواة المذنب الصغيرة. وقد تم اكتشاف مجموعة غنية من الذرات والجزيئات والأيونات والمركبات الكيميائية في المذنبات باستخدام التحليل الطيفي، منها الجليد المائي الذي قد يشكل (75-80%) من المادة المتطايرة، وغازات مجمدة مثل أول أكسيد الكربون (CO)، وثاني أكسيد الكربون (CO2)، والميثان (CH4)، والأمونيا (NH3)، والفورمالديهايد (H2CO).

والضوء القادم من المذنبات هو الضوء المنعكس من مادتها. ويكون المذنب غير مرئي عندما يكون بعيداً عن الشمس، وعندما يقترب بأقل من $2\ AU$ تقريباً تبدأ حرارة الشمس في إذابة الجليد. ويتمزق بعض المذنبات عند اقترابه كثيراً من الشمس، وربما يتحول إلى زخات من الشهب تطال الأرض.

وللمذنب ذَنَب طويل ينمو من تطاير مادة الرأس بتأثير ضغط الإشعاع والرياح الشمسية عند اقترابه من الشمس، وقد يمتد لعدة ملايين من الكيلومترات بعيداً عن الجسم الرئيسي للمذنب، ويتخذ الاتجاه المعاكس للشمس دائماً (لاحظ الشكل ٣-٤). ويشكل الغاز والغبار المتدفق غلافاً يمثل ذؤابة coma حول النواة. وهناك ذيلان للمذنب:

١) ذيل مستقيم آيوني (غازي) ion tail: يتكون نتيجة تأثر الجزيئات المتأينة ذوات الكتل الصغيرة الموجودة في نواة المذنب بالرياح الشمسية، فتندفع مباشرة إلى الخلف في الاتجاه المضاد للشمس، فيتكون الذنب المستقيم. ويرجع سطوع الذيل الأيوني في الغالب إلى الانبعاث بواسطة الذرات المتهيجة.

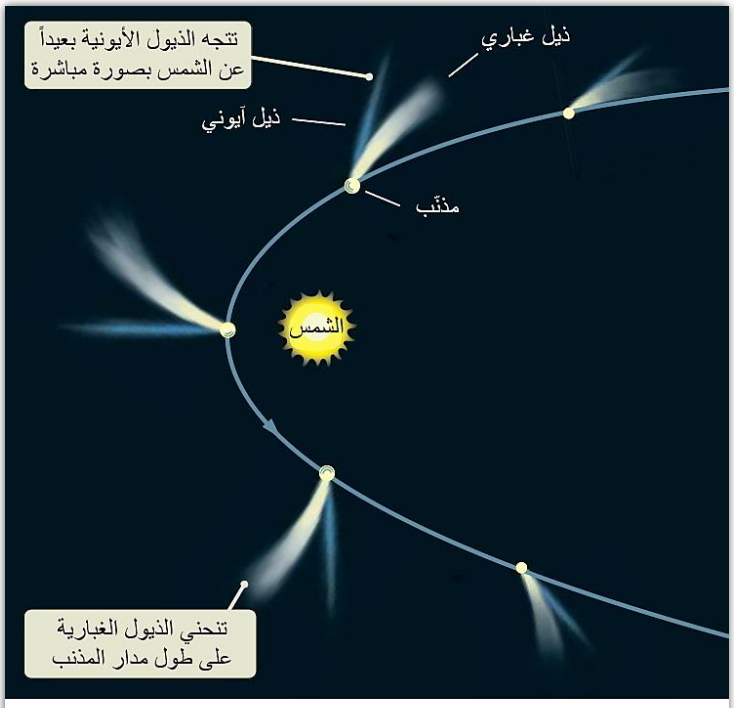
٢) ذيل منحني غباري dust tail: يتكون نتيجة تأثر الجسيمات الصخرية الموجودة في نواة المذنب بالضغط الاشعاعي للشمس، حيث إنها لا تتأثر بسهولة بالرياح الشمسية، وبذلك تندفع إلى خلف النواة على مسير منحنٍ مكونة الذيل المنحني الغباري. (لاحظ الشكل ٣-٣). ويكون لونه أبيض أو مصفر.



الشكل ٣-٣: ذيلا المذنب، (أ) عندما يقترب المذنب من الشمس تصبح معالمه أكثر وضوحاً. وفي هذه الصورة من وكالة ناسا التي التقطت سنة 1997 ويظهر فيها المذنب هيل بوب Hale-Bopp، يمكن رؤية ذيلي المذنب: الذيل الغباري المنحني الأكثر وضوحاً، والذي يمكن أن يصل طوله إلى 10 ملايين كيلومتر، والذيل الغازي المستقيم الخافت (أو الذيل الأيوني)، والذي يصل طوله إلى مئات الملايين من الكيلومترات. والحبيبات التي يتكون منها ذيل الغبار هي في حجم جزيئات الدخان. وعلى مقياس هذه الصورة ستكون النواة (المخفية داخل السحابة) بمثابة نقطة صغيرة جداً، بحيث لا يمكن رؤيتها. (ب) مخطط لأحد المذنبات.

إن استطارة الضوء هي التي تعطي الذيل الغباري مظهره الأبيض أو المصفر. أما لون الذيل الأيوني فهو أزرق لأن أيونات أول أوكسيد الكربون CO^+ تمتص وتعيد إشعاع الفوتونات الشمسية عند أطوال موجية قريبة من $420\ nm$.

تظل المذنبات مرئية عند اقترابها من الأرض لفترات تتراوح عادة من بضعة أسابيع إلى عدة أشهر. والمذنب الدوري الأكثر شهرة هو مذنب هالي الذي تقارب مدته المدارية 76 سنة،



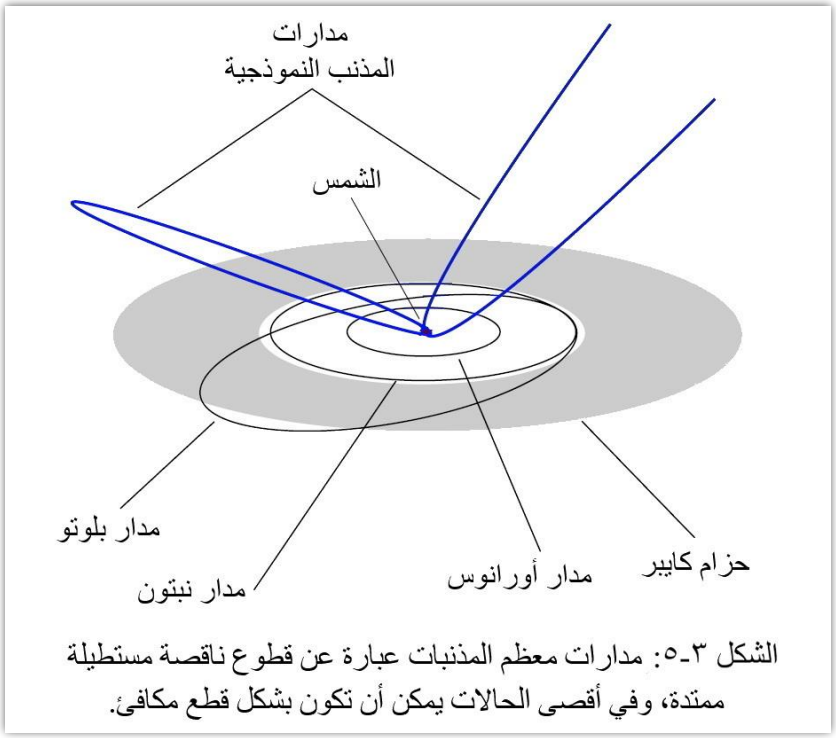
الشكل ٣-٤: اتجاه الذيلين الغباري والآيوني في عدة نقاط في مدار المذنب.

وكان آخر مرة في الحضـيض في عام 1986، وشـوهد حينئذ من الأرض بالعين المجردة وتمت دراسته عن طريق إرسال خمس مركبات فضائية قدمت لنا ثروة من المعلومات حول تركيبه، ومن المتوقع عودته عام 2061.

٣-٧-١: مدارات المذنبات 3-7-1: Comets Orbits

تقسم المذنبات بصورة عامة إلى قسمين من حيث أشكال مداراتها، وهي:

١) مذنبات الفترة القصيرة short-period comets (أو مذنبات المدارات الثابتة): يعتقد أنها تنشأ في حزام كايبر، حيث يمكن لاضطرابات الجاذبية الصغيرة من نبتون أن تغير مداراتها تدريجياً حتى تتمكن من اختراق النظام الشمسي الداخلي. وتسمى أيضاً بالمذنبات الدورية لأنها بعد أن تدور حول الشمس تعود إلى مصدرها فترسم بذلك مدارات قطع ناقص ممدود إلى حد كبير، أي لها انحراف مركزي e كبير، وتكون مدة دورتها حول الشمس أقل من 200 سنة.



الشكل ٣-٥: مدارات معظم المذنبات عبارة عن قطوع ناقصة مستطيلة ممتدة، وفي أقصى الحالات يمكن أن تكون بشكل قطع مكافئ.

٢) مذنبات الفترة الطويلة long-period comets (أو المذنبات غير الدورية): تلك التي لها فترات طويلة جداً بحيث لم يتم قياسها أبداً، ولها مدارات شديدة الانحراف بحيث تشبه تقريباً القطع المكافئ. وتبلغ فترة دورانها حول الشمس من 200 سنة إلى آلاف السنين إن أكملت دورتها أصلاً. ويُعتقد أنها تأتي من سحابة أورت.

بالإضافة إلى ذلك فإن بعض المذنبات تدور حول الشمس خارج المستوى العام الذي تدور فيه الكواكب (الشكل ٣-٥). ويقضي مثل هذا الجسم معظم وقته في الأطراف الخارجية للنظام الشمسي. وعندما يدخل من أعماق الفضاء البعيدة والمظلمة والباردة فإنه يكتسب سرعة أكبر.

٣-٨: الشهب والنيازك 3-8: Meteors and Meteorites

الشهب هي جسيمات صلبة صغيرة تدخل الغلاف الجوي للأرض من الفضاء بين الكواكب الذي يحتوي على ملايين الأطنان من الصخور والغبار. وقبل أن يدخل الشهاب غلافنا الجوي، ربما كان يدور حول الشمس لملايين السنين بعد أن تشظّى من كويكب، أو كان من بقايا نواة متحللة لمذنب عند اقترابه من الشمس، حيث تبقى الجسيمات الترابية الصلبة في مسيرها ترسم مدار القطع الناقص حول الشمس نتيجة لتأثرها بجاذبية الشمس، وربما تمر بالغلاف الجوي الأرضي فتحترق وتولد الشهب التي تكون على نوعين: المنتظمة (زخات من الشهب) وغير المنتظمة.

وعند مرور هذه الكتل السماوية في الغلاف الجوي الأرضي تزداد مقاومة الهواء لها فتتولد عملية احتكاك ميكانيكية بين جزيئات الهواء وجزيئاتها السطحية، فترتفع درجة حرارتها وتزداد بازدياد سرعتها حتى تحترق وتتطاير جسيماتها مولدة مساراً نارياً قصيراً يسميه البعض "النجوم المتساقطة shooting stars". وبما أنها تتحرك بسرع كبيرة $(10 - 70\ km/s)$ فإن الاحتكاك مع الهواء يؤدي إلى احتراقها متحولة إلى رماد على ارتفاع $(80 - 130\ km)$. ويمكن قياس ارتفاعات الشهب باستعمال الرادار، لأن موجات الراديو ترتد عن الغاز المتأين في مسارات الشهب كما ترتد عن المعدن في الطائرة أو السيارة. وكمقارنة للارتفاعات، فإن الطائرات النفاثة التجارية تحلق عادةً على ارتفاعات تقارب $10\ km$.

إن أغلب الشهب صغيرة الحجم وتحترق في الجو، وقليل منها يسقط على سطح الأرض فيسمى نيزكاً. أي إن النيازك تمثل الأجزاء الساقطة من الكتل السماوية على الأرض التي لا تُستهلك بالاحتراق في الغلاف الجوي. وقد أظهرت نتائج فحصها بأنها تتركب من عناصر ومعادن متوفرة على الأرض كالكربون والسليكون والمغنيسيوم والحديد والنيكل وغيرها. وإذا كان النيزك كبيراً بما فيه الكفاية (قطره أمتار أو أكثر) فإن سرعته لا تتضاءل في الغلاف الجوي. لذا فإنه يصطدم بالأرض بسرعته الكونية، ويؤدي سقوطه إلى حدوث حفر كبيرة على سطح الأرض، وقد يسبب كارثة واسعة النطاق.

إن شدة توهج الشهاب تتناسب طردياً مع كتلته ومربع سرعته $(L \propto mv^2)$. لذا فإن فقدان كتلته يعتمد كلياً على سرعته، أي بزيادة سرعته يزداد توهجه، أي يزداد احتراق مادته، فتزداد عملية فقدانه لمادته.

أصغر الأجسام المسببة للشهب تقارب كتلتها 1 غرام، أي ليس أكبر من حبة البازلاء. ويمكن رؤيته رغم هذا الحجم الصغير بواسطة الضوء الصادر من المنطقة الأكبر منه بكثير ذات الغاز الساخن

المتوهج المحيط بهذه الحبة الصغيرة. وبسبب سرعته العالية، فإن الطاقة الموجودة في الشهاب الصغير هذا تقارب طاقة قذيفة مدفعية عند اطلاقها من الأرض، ولكن طاقة الشهاب تتشتت عالياً في الغلاف الجوي للأرض.

تشـــير التقديرات إلى أن ما لا يقل عن 100 طن $(10^5\ kg)$ من المواد النيزكية تســـقط على الأرض يومياً. ومعظم هذه المواد عبارة عن نيازك دقيقة (معظمه جســـيمات قطرها أصـــغر من 100 مايكرومتر) ولا تسبب ظواهر مرئية، وتستقر في النهاية على الأرض على شكل غبار ناعم.

٣-٨-١: الفوائد العلمية لدراسة النيازك

3-8-1: Scientific Advantages of Studying Meteorites

للنيازك أهمية كبيرة كمادة ســماوية لجمع المعلومات عن المنظومة الشــمسـية بعد تحليلها في المختبرات العلمية للأسباب التالية:

١) يمكن تقدير أعمارها بواسطة عمليات النشاط الإشعاعي، فقد وُجد أن عمر أقدمها يقارب 4500 مليون سنة كما هو عمر الصخور القديمة.

٢) معرفة وفرة العناصـــر الموجودة فيها، وعند مقارنتها بالعناصـــر المكتشـــفة في الطيف الشـــمســـي والعناصـــر الموجودة في القشـــرة الأرضـــية يمكن تكوين فكرة لا بأس بها عن وفرة العناصـــر الموجودة في المنظومة الشمسية. حيث وُجد أن موادها تشبه مواد القشرة الأرضية وباطنها. كذلك فإن تفسير نشوء المجموعة الشمسية يعتمد على وجود مثل هذه العناصر.

٣) يمكن فحصـها لمعرفة آثار المواد العضـوية خارج الكرة الأرضـية، وبالتالي دراسـة احتمالية وجود نوع من الحياة في المنظومة الشمسية.

٣-٩: أصل المنظومة الشمسية 3-9: Origin of the Solar System

إن الفرضيات التي توضع حول أصل المنظومة الشمسية وكيفية تكوينها يجب أن تفسر الخواص العامة لها والحقائق الأســاســـية لحركة أفرادها. وترتبط الخطوات الأولى لعمليات تكوين الكواكب ارتباطاً وثيقاً بتكوين النجوم. ويمكن تلخيص هذه الخواص بما يلي:

١) نوعية مكونات المنظومة الشمسية، حيث تتألف من الشمس والكواكب التي تدور حولها هي وتوابعها الكثيرة، والكواكب الأقزام وملايين الكويكبات المتمركزة في حزام كويكبي بين المريخ والمشتري

وفي حزام كايبر وأماكن أخرى، وعدد كبير من المذنبات والشهب. إضافة إلى الغبار والغازات المنتشرة بين الكواكب.

٢) كيفية توزيع الكواكب بأبعاد منتظمة تقريباً عن الشمس، والتي يُعبّر عنها بقاعدة بود المذكورة سابقاً.

٣) انتظام الحركة العامة للكواكب في المنظومة الشمسية تقريباً، لأنها جميعاً تدور حول الشمس في نفس اتجاه دوران الشمس حول محورها من الغرب إلى الشرق (أي عكس اتجاه عقرب الساعة عندما ننظر من القطب الشمالي لمدار الأرض)، وتدور حول محاورها بنفس اتجاه دورانها حول الشمس ما عدا كوكبي الزهرة وأورانوس فإنهما يدوران حول محورهما باتجاه عقرب الساعة، ومثلهما الكوكب القزم بلوتو.

٤) وقوع مدارات الكواكب في مستوى واحد تقريباً ومتوازية مع خط الاستواء الشمسي، إذ أن كلاً منها يميل بزاوية أقل من $4°$ عن مستوى دائرة البروج، ما عدا عطارد $7°$.

٥) مدارات الكواكب في حركتها حول الشمس شبه دائرية، لأن الانحراف المداري (الانحراف المركزي) لها صغير، ما عدا عطارد (راجع الجدول ٣-٢).

٦) وقوع مدارات أقمار الكواكب بموازاة المستويات الاستوائية لكواكبها تقريباً، والغالبية العظمى تدور في مداراتها بنفس الكيفية التي تدور فيها كواكبها حول محور كل منها. ويستثنى من ذلك القمر الأرضي والقمر ترايتون من أقمار أورانوس.

٧) أظهرت القياسات أن أعمار كل من الشمس والأرض والقمر والنيازك متقاربة، وأن عمر الشمس يقدر بين 4.5 إلى 5 مليار سنة.

٨) يلعب الزخم الزاوي (عزم الزخم الخطي) للمنظومة الشمسية دوراً هاماً في دراسة نشوئها، فلو فرض أن جسماً كتلته m يبعد مسافة r عن مركز الكتلة ويدور بسرعة v فإن زخمه الزاوي L يعطى بالعلاقة:

$$L = mvr = I\omega \qquad \dots\dots 3.2$$

حيث I عزم القصور الذاتي للجسم و ω سرعته الزاوية. ولذلك فإن الكواكب والأجرام الأخرى في المنظومة الشمسية لكل منها زخم زاوي بسبب حركتها المدارية، وكذلك الأقمار التي تدور حول كواكبها. وعلى هذا الأساس وُجد أن الزخم الزاوي للشمس يبلغ 2% تقريباً من الزخم الزاوي الكلي للمنظومة الشمسية رغم امتلاكها 99.8% من الكتلة الكلية للمنظومة الشمسية، حيث أن أغلب الزخوم الزاوية تتوزع على الكواكب. فمثلاً يمتلك المشتري لوحده 60% تقريباً من الزخم الزاوي الكلي، وإن أغلب الزخم الزاوي المتبقي موزع بين زحل وأورانوس ونبتون.

٩) أما التركيب الكيميائي لأفراد المنظومة الشمسية فقد وُجد أن أغلب العناصر الموجودة في الشمس هي الهيدروجين والهيليوم، وأن الهيدروجين وحده يشكل حوالي 73% من كتلة الشمس. ويحتوي المشتري وزحل على عناصر مشابهة تقريباً، ونفس العناصر تكون بدرجة أقل في أورانوس ونبتون. وهي تختلف عن الكواكب الداخلية التي تكون فيها النسبة المئوية للعناصر الثقيلة أكبر من العناصر الأخرى.

ومما ورد أعلاه نستخلص أن أية فرضية توضع لتفسير نشوء المنظومة الشمسية يجب أن تنطبق عليها جميع الخواص المذكورة أعلاه. وهناك عدة فرضيات اندثر بعضها بسرعة وصمد البعض الآخر ردحاً من الزمن.

ومن الفرضيات المهمة ما تقول أن المنظومة الشمسية قد نشأت باقتراب نجم كبير الحجم من الشمس، ونتيجة لقوانين الجاذبية تولدت الكواكب حول الشمس بسبب انفصال الغازات من الشمس وبقيت تدور حولها. أما النجم الكبير فقد انفصلت غازات منه هو أيضاً واستمرت بالدوران حول هذا النجم لتشكل كواكب أخرى حوله.

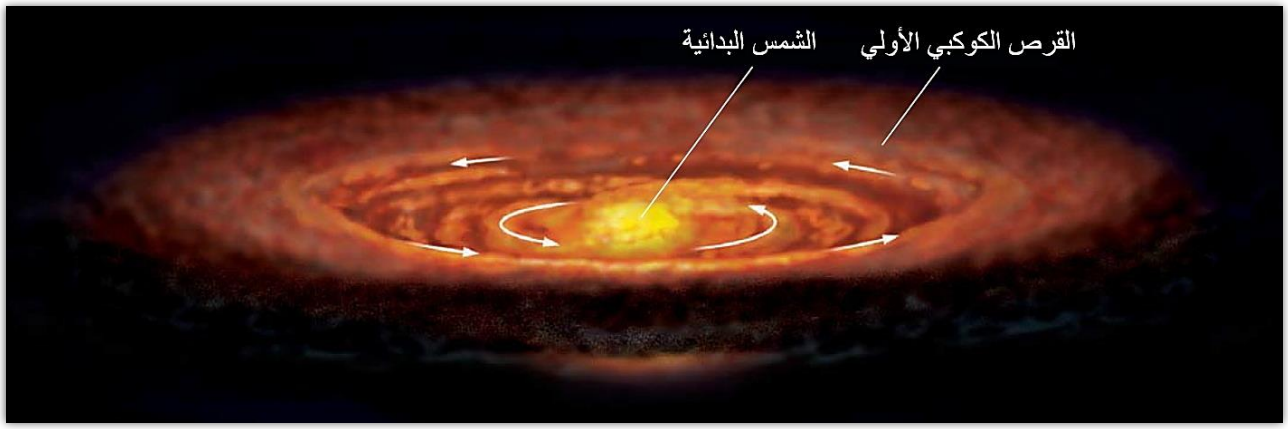
وهناك فرضية تذكر أن الشمس كانت في أول الأمر نجماً ضمن منظومة ثنائية تدور حول مركز ثقلهما المشترك، وما لبث أن انفجر أحد النجمين مولداً الكواكب وتوابعها.

وهناك الفرضية السديمية nebular hypothesis، وهي المعتمدة حالياً في الأوساط العلمية، وتنص على أن الشمس والكواكب تشكلت معاً نتيجة لانهيار سحابة من الغاز والغبار تحت تأثير جاذبية مادتها (لاحظ الشكل ٣-٦)، وتُعرف أيضاً باسم السديم الشمسي solar nebula، ويكون حجمه أكبر من حجم المنظومة الشمسية الحالية بعدة مرات. فرغم أن معظم كتلة مجرة درب التبانة تتمركز في النجوم، إلا أن الفضاء بين النجوم ليس فارغاً تماماً بل يحتوي على الغاز والغبار على شكل سحب متفرقة ووسط منتشر. وإجمالاً فإن 10% تقريباً من كتلة درب التبانة يتكون من غاز بين النجوم. وجسيمات الغبار أصغر بكثير من الغبار الأرضي. ولعل الأفضل تسميتها بالدخان.

وكان هذا السديم الذي تكونت منه المنظومة الشمسية في أول الأمر ذا درجة حرارية واطئة، ويدور حول محوره المركزي بسرعة بطيئة، وبالتدريج بدأ بالانكماش والتقلص تحت تأثير قوى جذبه الذاتي. واستناداً إلى قانون حفظ الزخم تزداد سرعته عندما يقل نصف قطره نتيجة لانكماشه وتقلصه (وذلك لأن الزخم الزاوي يتناسب طردياً مع نصف قطره الدوراني وسرعته وكتلته، وإن قانون حفظ الزخم الزاوي ينص على أن مقداره ثابت لنظام معزول)، وهكذا فكلما زادت السرعة أصبح السديم أكثر

تفلطحاً، أي يقترب شكله من شكل القرص بفعل القوة المركزية، ويستمر في الانكماش إلى أن تختل قوة التماسك بين جزيئاته، فتتغلب القوة المركزية على أجزائه وينهار المركز تحت تأثير الجاذبية فتزداد درجة حرارته وتبدأ التفاعلات النووية الاندماجية في الشمس الوليدة، ثم تنفصل حلقات كاملة من المادة من المناطق الخارجية للسديم وتندفع إلى الخارج، وتتخذ مدارات مختلفة السعة حول السديم المركزي الذي يستمر في الانكماش، وتبدأ جزيئات هذه الحلقات بالتكاثف بفعل الجاذبية، وتلتصق حبيبات الغبار الموجودة في القرص المحيط بالشمس البدائية مع بعض لتشكل أجساماً صلبة أكبر وأكبر. وبمرور الزمن تتكون الكواكب التي تدور حول مركز السديم الذي هو الشمس في مستوى واحد بنفس اتجاه دوران الشمس. وبنفس الطريقة تتكون التوابع حول كواكبها.

وتحدد اختلافات درجات الحرارة داخل القرص أنواع المواد التي يمكن أن تتشـــكل منها الأجسام الصلبة.



الشكل ٣-٦: رسم تخيلي عن الفرضية السديمية لتكوين النظام الشمسي.

ويُعتقد أن القرص المحيط بالشمس كان مشابهاً إلى حد كبير الأقراص التي يراها علماء الفلك اليوم تحيط بالنجوم المتكونة حديثاً في أماكن أخرى من مجرتنا. ويشـــار إلى هذا القرص على أنه قرص كوكبي أولي protoplanetary disk. ومن المحتمل أنه يحتوي على أقل من 1% من كتلة النجم الناشئ في مركزه، لكن هذه الكمية كانت أكثر من كافية لتفسير نشوء الكواكب وبقية الأجسام التي تشكل النظام الشمسي اليوم.

أسئلـة

١) عُدّ بلوتو كوكباً بعد اكتشافه سنة 1930، ولكنه اعتُبر كوكباً قزماً سنة 2006. لماذا؟

٢) ما هو شرط عدِّ الجرم كوكباً قزماً؟

٣) احسـب مدة دورة الكوكب أورانوس حول الشـمس إذا علمت أن معدل بعده عنها $19.2\ AU$ وسـرعته المدارية $6.8\ km/s$.

٤) لماذا لا تحدث في المشتري فصول سنوية ملحوظة كالأرض؟

٥) احسب معدل بعد الكوكب زحل عن الشمس وعن الأرض بالكيلومترات باستعمال قاعدة بود؟

٦) احسب سرعة الإفلات من عطارد والمشتري. وبيّن سبب الفرق الكبير بينهما.

٧) علل ارتفاع درجة حرارة كوكب الزهرة مقارنة بعطارد رغم أن عطارد أقرب للشمس.

٨) أيها أكبر حجماً حزام كايبر أم سحابة أورت؟ ولماذا؟

٩) قد تصل الحافة الخارجية لسحابة أورت إلى مسافة $100000\ AU$. بيّن أن هذا يعادل مسافة تقارب 1.5 سنة ضوئية.

١٠) ارسم مخططاً لمذنب نموذجي.

١١) قارن بين الذنب الغازي والذنب الغباري للمذنب.

١٢) ما هي الشهب؟ وما فرقها عن النيازك؟

١٣) لماذا تكون الأرض بمأمن من خطورة أكثر الشهب بينما لا تتوفر هذه الميزة في القمر؟

١٤) تشير التقديرات إلى أن ما لا يقل عن 100 طن $(10^5\ kg)$ من المواد النيزكية تسقط على الأرض يومياً. هل يؤثر هذا على زيادة كتلة الأرض عملياً؟ ولماذا؟

١٥) لماذا لا يشكل الزخم الزاوي للشمس إلا نسبة قليلة من الزخم الزاوي الكلي للمنظومة الشمسية رغم امتلاكها 99.8% من الكتلة الكلية للمنظومة الشمسية.

١٦) اشرح الفرضية السديمية لنشوء المنظومة الشمسية.

١٧) احسب مدة دوران المريخ حول الشمس إذا كان طول المحور شبه الرئيسي لمداره يبلغ $1.524\ AU$.

١٨) إذا كانت مدة دوران أورانوس حول الشمس 84 سنة فاحسب معدل بعده عن الأرض بالوحدات الفلكية.

١٩) لماذا لا يتصادم نبتون مع بلوتو ما دام مداراهما حول الشمس يتداخلان؟

٢٠) كم تستغرق الإشارة الراديوية لمركبة فضائية قرب نبتون للوصول إلى الأرض؟

مصادر الفصل الثالث

١- فيزياء الجو والفضاء ج٢، د. حميد مجول وفياض النجم، 1981.
2- 21st century astronomy, Je- Hester et al, 3rd ed, 2010.
3- An Introduction to Modern Astrophysics, Bradley W. Carrol and Dale A. Ostlie, 2nd ed, -2007
4- Astronomy Demystified, Stan Giblisco, 2003.
5- Astronomy. Andrew Fraknoi, David Morrison and Sidney C. Wolff, 2016.
6- Elementary Astronomy-2013
7- Essential Astrophysics, Kenneth R. Lang, 2013.
8- https://www.nasa.gov/
9- Introduction to Astronomy and Cosmology-2008

فهرست الفصل الثالث

الموضوع	الصفحة
٣-١: تعريف الكوكب	١
٣-٢: نبذة مختصرة عن الكواكب	٣
٣-٣: خصائص كوكبية	٧
٣-٣-١: القطر	٧
٣-٣-٢: الكتلة	٧
٣-٣-٣: الجاذبية السطحية	٨
٣-٣-٤: مدة الدوران المحوري	٨
٣-٣-٥: درجة الحرارة	٨
٣-٣-٦: الغلاف الجوي	٩
٣-٣-٧: البياض والسطوع	٩
٣-٤: قاعدة بود	١٠
٣-٥: الأقمار	١١
٣-٦: الكويكبات	١٢
٣-٦-١: حزام كايبر	١٣
٣-٦-٢: سحابة أورت	١٣
٣-٧: المذنبات	١٤
٣-٧-١: مدارات المذنبات	١٦
٣-٨: الشهب والنيازك	١٧
٣-٨-١: الفوائد العلمية لدراسة النيازك	١٨
٣-٩: أصل المنظومة الشمسية	١٨
أسئلة	٢٢