

# الجاذبية Gravitation

## الفصل 1

### ما الذي ستتعلمه في هذا الفصل؟

- وصف طبيعة قوة الجاذبية.
- الربط بين قوانين كبلر في حركة الكواكب وقوانين نيوتن في الحركة.
- وصف مدارات الكواكب والأقمار الاصطناعية باستعمال قانون الجذب الكوني (العام).

### الأهمية

تساعدك قوانين كبلر وقانون الجذب الكوني على فهم حركة الكواكب والأقمار الاصطناعية. المذنبات اكتُشف مذنب هال-بوب على يد العالمين ألن هال وتوماس بوب عام 1995م. ودخل هذا المذنب نظامنا الشمسي عام 1997م، وكان مرئيًا في كاليفورنيا، وظهرت مناظر لذيله الغباري الأبيض وذيله الأيوني الأزرق.

### فكر

تدور المذنبات حول الشمس كما تفعل الكواكب والنجوم. كيف تستطيع وصف مدار مذنب مثل مذنب هال-بوب؟

هذه صورة للمذنب هال - بوب عند أقرب نقطة له من الشمس، ويمكن الحكم من خلال ذيل المذنب بأن المذنب هال - بوب يتوجّه نحو الشمس التي تقع على يمين الصورة بالنسبة لموقع المذنب. وللمذنب هال - بوب زمن دوري كبير، ويدور حول الشمس في مدار إهليلجي.

## تجربة استهلاكية

### هل يمكنك عمل نموذج لحركة عطارد؟

**سؤال التجربة** هل تتحرك الكواكب في نظامنا الشمسي في مدارات دائرية أم في مدارات لها أشكال أخرى؟

#### الخطوات

1. استعمل جدول البيانات لرسم مدار عطارد باستعمال مقياس الرسم  $10 \text{ cm} = 1 \text{ AU}$ . ولاحظ أن الوحدة الفلكية الواحدة AU تساوي بُعد الأرض عن الشمس،  $1 \text{ AU} = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$ .

2. احسب المسافة بوحدة cm لكل مسافة مقيسة بوحدة AU.

3. عيّن نقطة في مركز ورقتك، وارسم المحاور الرئيسة X و Y عند هذه النقطة.

4. ضع المنقلة على الخط الأفقي على أن يكون مركزها منطبقاً على مركز الورقة، وقس الدرجات، ثم ضع علامة.

5. ضع المسطرة بحيث تمر بالمركز وعلامة الزاوية، وعلم المسافة للزاوية المقصودة بالسنتيمترات. قد تحتاج إلى وضع المنقلة على الخط الرأسي لقياس بعض الزوايا.
6. عندما تنتهي من وضع علامات لنقاط البيانات كلها ارسم خطاً يجمعها.

#### التحليل

| مسار عطارد       |                                  |
|------------------|----------------------------------|
| $d \text{ (AU)}$ | $\theta \text{ (}^\circ\text{)}$ |
| 0.35             | 4                                |
| 0.31             | 61                               |
| 0.32             | 122                              |
| 0.38             | 172                              |
| 0.43             | 209                              |
| 0.46             | 239                              |
| 0.47             | 266                              |
| 0.44             | 295                              |
| 0.40             | 330                              |
| 0.37             | 350                              |

صف شكل مدار عطارد، وارسم خطاً يمر بالشمس يمثل أطول محور للمدار، وسمّه المحور الرئيس.

**التفكير الناقد** كيف يمكن مقارنة مدار عطارد بمدار المذنب هال - بوب الظاهر في الصفحة السابقة؟

## 1-1 حركة الكواكب والجاذبية Planetary Motion and Gravitation



www.ien.edu.sa

### الأهداف

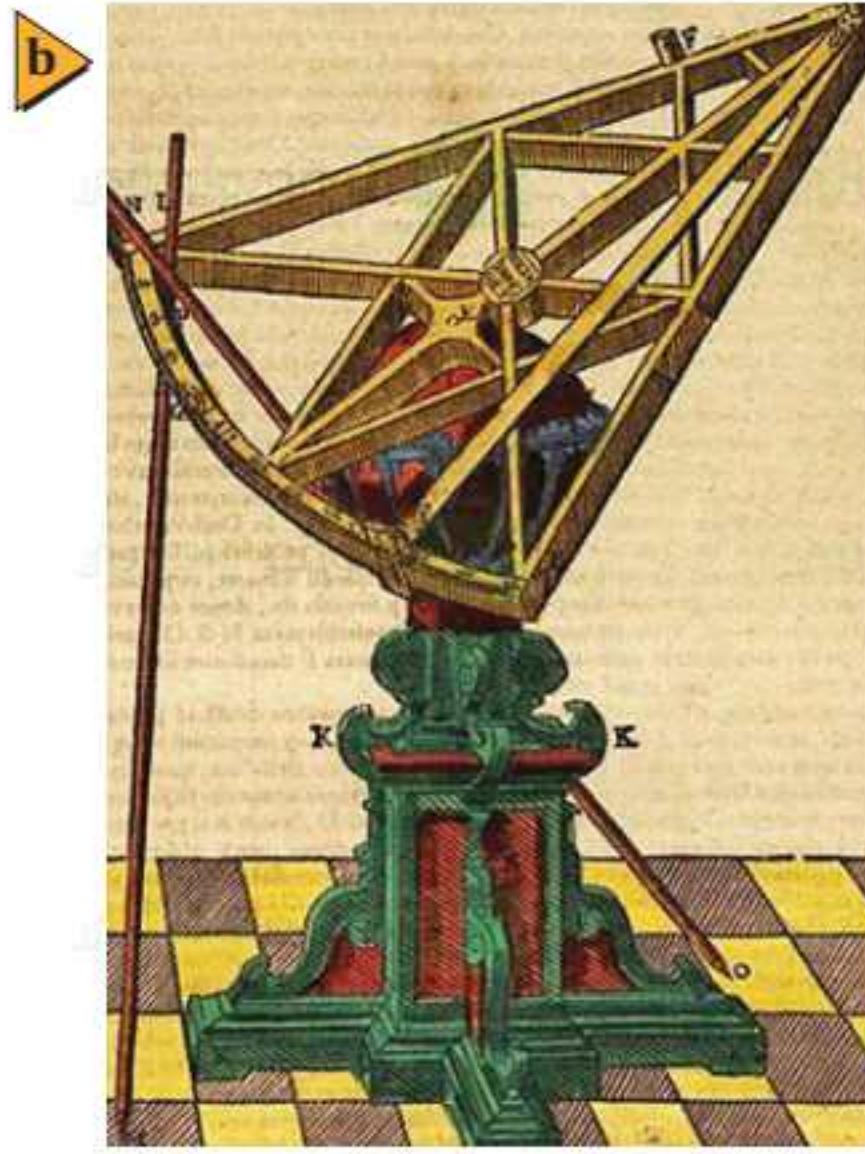
- تربط بين قوانين كبلر وقانون الجذب الكوني.
- تحسب الزمن الدوري ومقدار السرعة المدارية.
- تصف أهمية تجربة كافندش.

### المفردات

- القانون الأول لكبلر
- القانون الثاني لكبلر
- القانون الثالث لكبلر
- قوة الجاذبية
- قانون الجذب الكوني (العام)

كان يُعتقد قديماً أن الشمس والقمر والكواكب والنجوم تدور كلها حول الأرض، إلا أن العالم البولندي كوبرنيكس لاحظ أن المشاهدات المتوافرة لحركة الكواكب والنجوم لا تتفق كلياً مع هذا النموذج الذي مركزه الأرض. وقد نُشرت نتائج أعمال كوبرنيكس عام 1543م، حيث بيّن أن حركة الكواكب يمكن فهمها بصورة أفضل إذا افترضنا أن الأرض وغيرها من الكواكب تدور حول الشمس.

ثم جاء تايكو براهي، الذي ولد بعد سنوات قليلة من موت كوبرنيكس، حيث لاحظ -وهو في الرابعة عشرة من عمره في الدنمارك- كسوفاً للشمس عام 1560م، فقرّر أن يصبح فلكياً، درس الفلك خلال سفره عبر أوروبا مدة خمس سنوات. ولم يستعمل التلسكوب، بل استعمل أجهزة صممها بنفسه. وتوصل خطأ -كما سيتبين لاحقاً- إلى أن الشمس والقمر يدوران حول الأرض، في حين تدور الكواكب الأخرى حول الشمس.



الشكل 1-1 من بين الأجهزة الضخمة التي بناها براهي واستعملها على جزيرة Hven جهاز الأسطرلاب (a)، وآلة السُّدس (b)، وهي في الأصل من ابتكار علماء المسلمين.



## قوانين كبلر Kepler's Laws

أصبح يوهان كبلر الألماني مساعداً لبراهي عندما انتقل إلى براغ. ودرّب براهي مساعديه على كيفية استعمال أجهزة كالمبيّنة في الشكل 1-1. وعندما تُوفي براهي ورث كبلر نتائج مشاهداته، ودرس البيانات. اعتقد كبلر أن الشمس تولّد قوة على الكواكب المحيطة، واعتبرها مركز المجموعة الشمسية. وبعد عدة سنوات من الدراسة التحليلية لبيانات حركة المريخ اكتشف كبلر القوانين التي تصف حركة كل كوكب.

ينص **القانون الأول لكبلر** على أن مدارات الكواكب إهليلجية، وتكون الشمس في إحدى البؤرتين؛ فالشكل الإهليلجي له بؤرتان كما في الشكل 1-2. وتدور المذنبات في مدارات إهليلجية أيضاً مثل الكواكب والنجوم، وتقسم إلى مجموعتين اعتماداً على الزمن الدوري لها، وهو الزمن اللازم للمذنب ليكمل دورة واحدة. المجموعة الأولى لها زمن دوري أكبر من 200 سنة. أما الزمن الدوري للمجموعة الثانية فأقل من 200 سنة. إن الزمن الدوري للمذنب هال - بوب هو 2400 سنة، وهو مثال على المجموعة الأولى، في حين أن الزمن الدوري لمذنب هالي هو 76 سنة، ويُعدّ مثلاً على المجموعة الثانية.

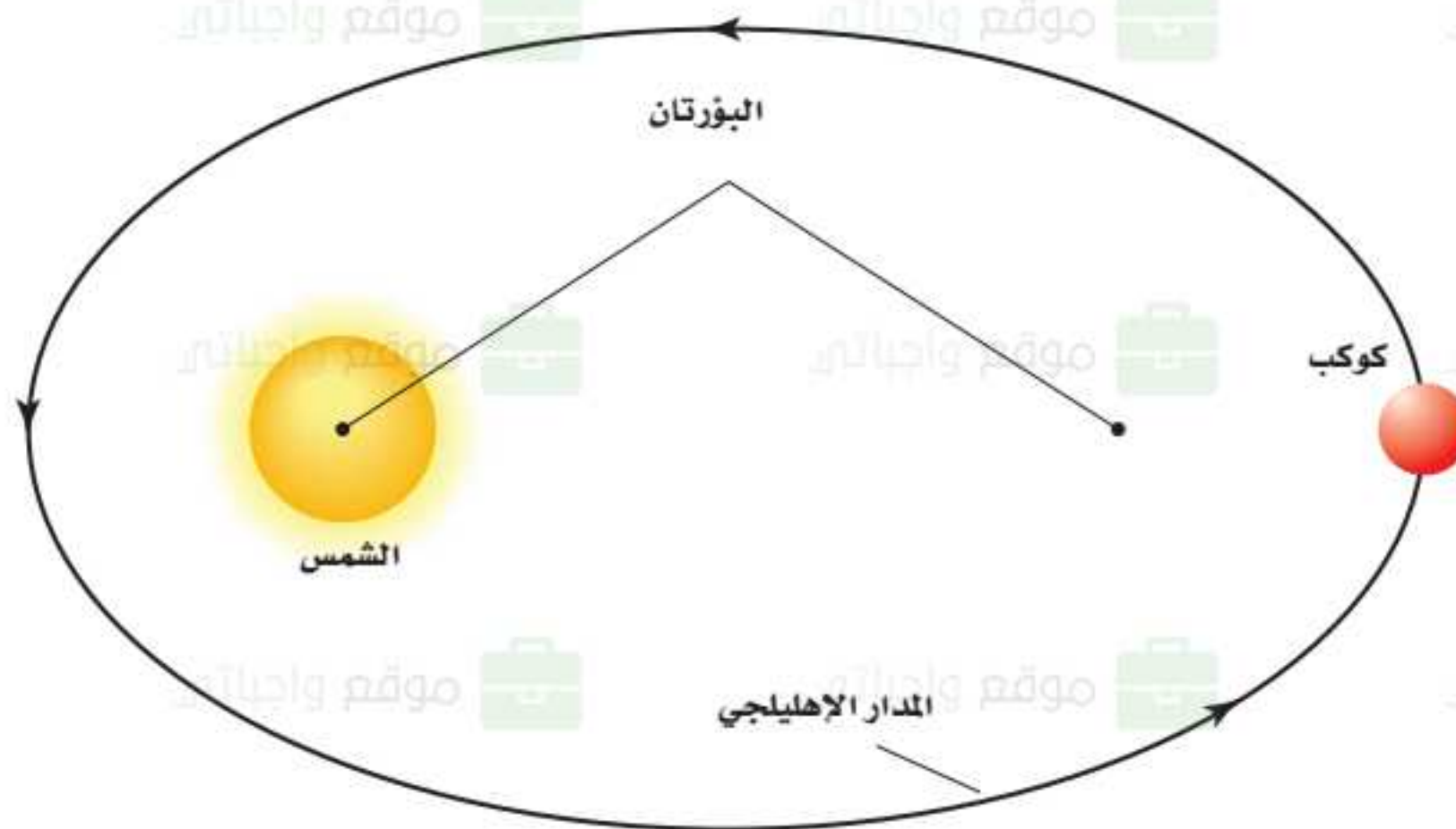


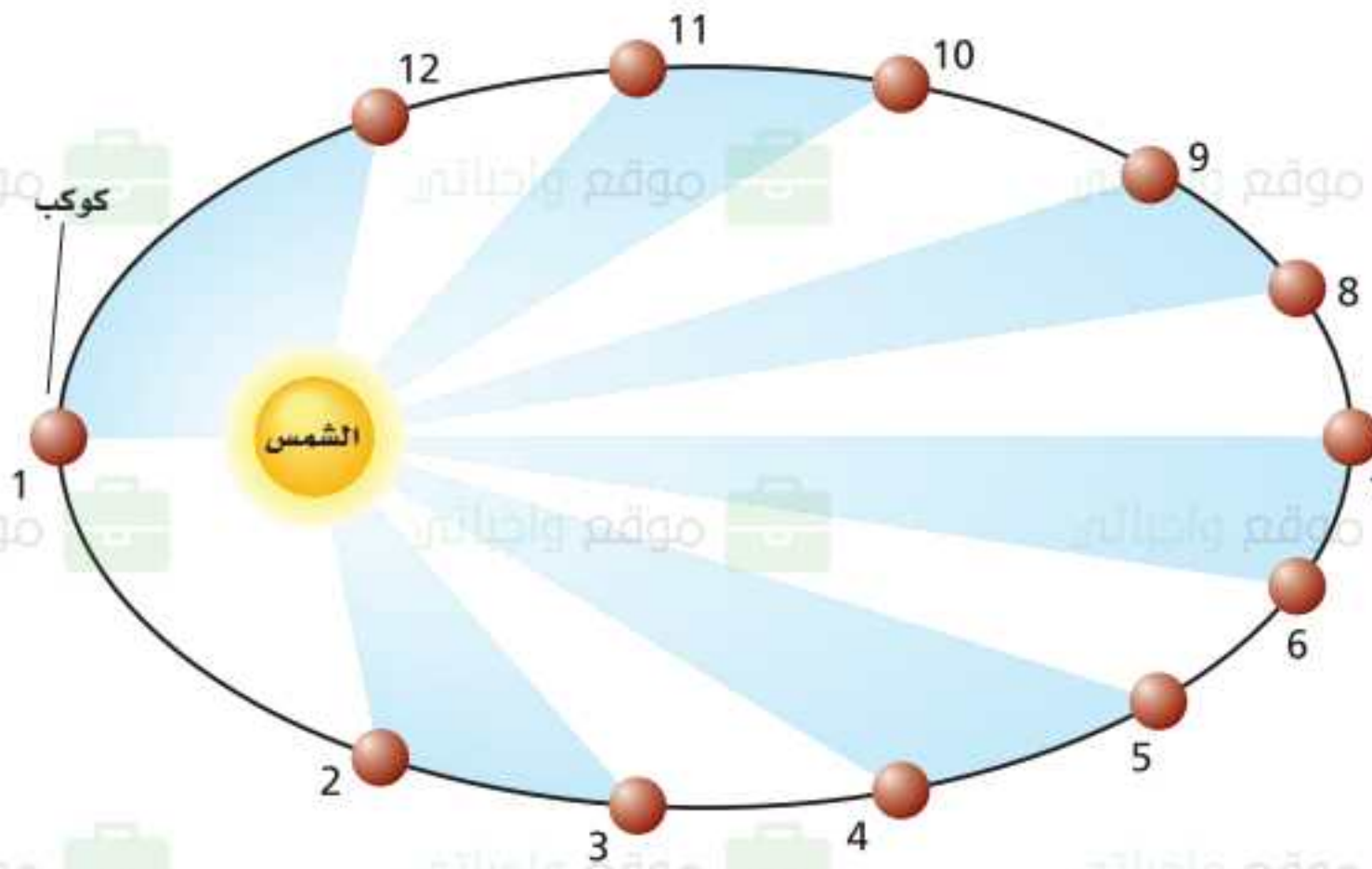
مُنح البروفيسور راشد عليفتش سنيّف جائزة الملك فيصل لعام ١٤٣٠هـ - ٢٠٠٩م تقديراً لإنجازته عملاً رائداً ومساهمة أساسية في مجال فيزياء الفلك، حيث أسست بحوثه النظرية حول خلفية الإشعاع الكوني قاعدة للمشاهدات الفلكية واستكشاف بُنية الكون والمجرات. ويُعدّ عمله المتعلق بالنقوب السوداء والنجوم الثنائية حاسماً في تطوير مجال الأشعة السينية الكونية.

المصدر: موقع جائزة الملك فيصل / فرع العلوم



الشكل 1-2 تدور الكواكب حول الشمس في مدارات إهليلجية، وتكون الشمس في إحدى البؤرتين.





وجد كبلر أن الكواكب تتحرك بسرعة أكبر عندما تكون قريبة من الشمس، بينما تتحرك أبطأ عندما تكون بعيدة عنها. وهكذا ينص **القانون الثاني لكبلر** على أن الخط الوهمي من الشمس إلى الكوكب يسمح مساحات متساوية في أزمنة متساوية، كما في الشكل 1-3. وقد توصل كبلر كذلك إلى علاقة رياضية تربط بين الزمن الدوري للكوكب ومتوسط بعده عن الشمس؛ حيث ينص **القانون الثالث لكبلر** على أن مربع النسبة بين زمنين دوريين لكوكبين حول الشمس يساوي مكعب النسبة بين متوسطي بُعديهما عن الشمس. وهكذا إذا كان الزمنان الدوريان لكوكبين هما  $T_A$  و  $T_B$  ومتوسط بُعديهما عن الشمس  $r_A$  و  $r_B$  فيصبح القانون الثالث لكبلر على النحو الآتي:

$$\left(\frac{r_A}{r_B}\right)^3 = \left(\frac{T_A}{T_B}\right)^2$$

**القانون الثالث لكبلر**

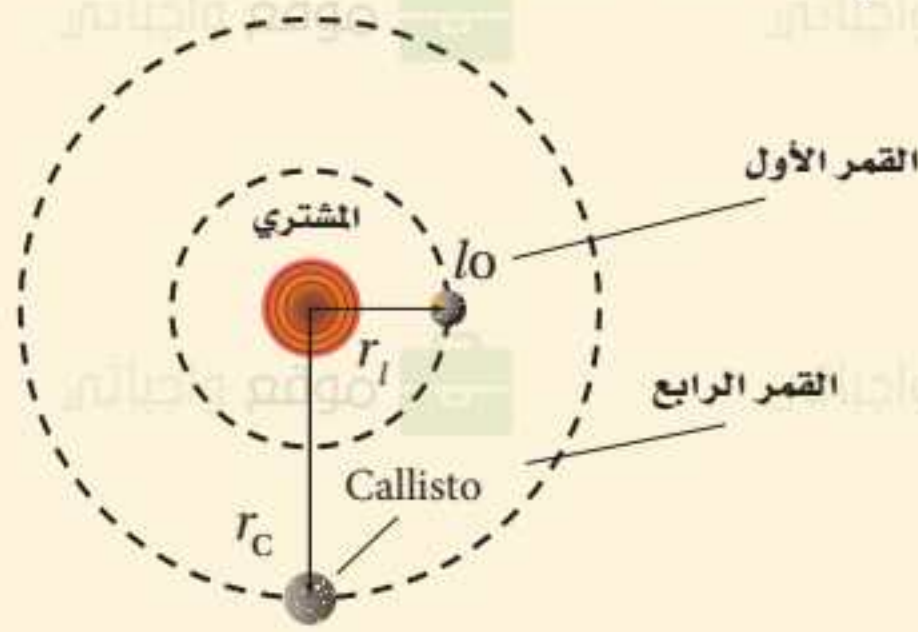
■ الشكل 1-3 يتحرك الكوكب بأقصى سرعة عندما يكون قريباً من الشمس، ويتحرك أبطأ عندما يكون بعيداً عنها، ويمسح مساحات متساوية في أزمنة متساوية.

لاحظ أن القانونين الأول والثاني يطبقان على كل كوكب على حدة، أما القانون الثالث فيربط بين حركة أكثر من كوكب حول الجسم نفسه. لذا يستعمل لمقارنة أبعاد الكواكب عن الشمس بأزمانها الدورية، كما في الجدول 1-1. ويستعمل لمقارنة الأبعاد والأزمان الدورية للقمر وللأقمار الاصطناعية حول الأرض.

ومما تجدر الإشارة إليه أن مدارات الكواكب حول النجوم تتفاوت في مدى إهليلجية أشكالها؛ فبعضها شبه دائري (مدار كوكب الزهرة مثلاً)، كما أن مدارات الأقمار حول الكواكب شبه دائرية. وستتعامل هنا مع مدارات الكواكب والأقمار على أنها دائرية؛ لتسهيل إجراء العمليات الرياضية.

| الجدول 1-1     |                     |                       |                          |
|----------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|
| بيانات الأجرام |                     |                       |                          |
| الجرم          | متوسط نصف القطر (m) | الكتلة (kg)           | متوسط البعد عن الشمس (m) |
| الشمس          | $6.96 \times 10^8$  | $1.99 \times 10^{30}$ | —                        |
| عطارد          | $2.44 \times 10^6$  | $3.30 \times 10^{23}$ | $5.79 \times 10^{10}$    |
| الزهرة         | $6.05 \times 10^6$  | $4.87 \times 10^{24}$ | $1.08 \times 10^{11}$    |
| الأرض          | $6.38 \times 10^6$  | $5.98 \times 10^{24}$ | $1.50 \times 10^{11}$    |
| المريخ         | $3.40 \times 10^6$  | $6.42 \times 10^{23}$ | $2.28 \times 10^{11}$    |
| المشتري        | $7.15 \times 10^7$  | $1.90 \times 10^{27}$ | $7.78 \times 10^{11}$    |
| زحل            | $6.03 \times 10^7$  | $5.69 \times 10^{26}$ | $1.43 \times 10^{12}$    |
| أورانوس        | $2.56 \times 10^7$  | $8.68 \times 10^{25}$ | $2.87 \times 10^{12}$    |
| نبتون          | $2.48 \times 10^7$  | $1.02 \times 10^{26}$ | $4.50 \times 10^{12}$    |

**بُعد القمر الرابع عن المشتري** قاس جاليليو أبعاد مدارات أقمار المشتري مستعملًا قطر المشتري وحدة قياس. ووجد أن الزمن الدوري لأقرب قمر هو 1.8 يوم، وكان على بُعد 4.2 وحدات من مركز المشتري. أما القمر الرابع فزمنه الدوري 16.7 يومًا. احسب بُعد القمر الرابع عن المشتري باستعمال الوحدات التي استعملها جاليليو.



### 1 تحليل المسألة ورسمها

- ارسم مداري القمرين الأول والرابع للمشتري.
- عَيِّن نصفَي قطري المدارين.

المجهول

$$r_c = ?$$

المعلوم

$$T_c = 16.7 \text{ days} \quad T_l = 1.8 \text{ days}$$

$$r_l = 4.2 \text{ units}$$

### 2 إيجاد الكمية المجهولة

حل القانون الثالث لكبلر لإيجاد  $r_c$

بالتعويض: يوم  $T_l = 1.8$  ويومًا  $T_c = 16.7$ ، وحدة  $r_l = 4.2$

### دليل الرياضيات

فصل المتغير 215

$$\left(\frac{r_c}{r_l}\right)^3 = \left(\frac{T_c}{T_l}\right)^2$$

$$r_c^3 = r_l^3 \left(\frac{T_c}{T_l}\right)^2$$

$$r_c = \sqrt[3]{r_l^3 \left(\frac{T_c}{T_l}\right)^2} = \sqrt[3]{(4.2 \text{ units})^3 \left(\frac{16.7 \text{ days}}{1.8 \text{ days}}\right)^2}$$

$$= \sqrt[3]{6.4 \times 10^3 \text{ units}^3}$$

$$= 19 \text{ units}$$

### 3 تقويم الجواب

- هل الوحدات صحيحة؟ ستكون  $r_c$  بوحدات جاليليو مثل  $r_l$ .
- هل الجواب منطقي؟ الزمن الدوري كبير، لذلك سيكون نصف القطر كبيرًا.

## مسائل تدريبية

1. الزمن الدوري لأحد أقمار المشتري 7.15 أيام. فكم وحدة يبلغ نصف قطر مداره؟ استعمل المعلومات المُعطاة في مثال 1.

$$\left(\frac{T_G}{T_l}\right)^2 = \left(\frac{r_G}{r_l}\right)^3$$

$$r_G = \sqrt[3]{r_l^3 \left(\frac{T_G}{T_l}\right)^2}$$

$$= \sqrt[3]{(4.2 \text{ units})^3 \left(\frac{7.15 \text{ days}}{1.8 \text{ days}}\right)^2}$$

$$= \sqrt[3]{(74.088 \text{ units}^3)(3.9722)^2}$$

$$= \sqrt[3]{1169.0011 \text{ units}^3}$$

$$= 11 \text{ units}$$

2. يدور كويكب حول الشمس في مدار متوسط نصف قطره يساوي ضعف متوسط نصف قطر مدار الأرض. احسب الزمن الدوري بالسنوات الأرضية.

$$\left(\frac{T_a}{T_E}\right)^2 = \left(\frac{r_a}{r_E}\right)^3$$

ولما كانت  $r_a = 2r_E$ ، فإن:

$$T_a = \sqrt{\left(\frac{r_a}{r_E}\right)^3 (T_E)^2} \\ = 2.8 \text{ y}$$

3. يمكنك أن تجد من الجدول 1-1 أن بُعد المريخ عن الشمس أكبر 1.52 مرة من بُعد الأرض عن الشمس. احسب الزمن اللازم لدوران المريخ حول الشمس بالأيام الأرضية.

$$\left(\frac{T_M}{T_E}\right)^2 = \left(\frac{r_M}{r_E}\right)^3$$

$$r_M = 1.52 r_E$$

وعليه فإن:

$$T_M = \sqrt{(r_M/r_E)^3 T_E^2} = \sqrt{\left(\frac{1.52r_E}{r_E}\right)^3 (365 \text{ day})^2}$$

$$= \sqrt{4.68 \times 10^5 \text{ day}^2}$$

$$= 684 \text{ day}$$

4. الزمن الدوري لدوران القمر حول الأرض 27.3 يومًا، ومتوسط بُعد القمر عن مركز الأرض  $3.90 \times 10^5 \text{ km}$ .

**a.** استعمل قوانين كبلر لحساب الزمن الدوري لقمر اصطناعي يبعد مداره  $6.70 \times 10^3 \text{ km}$  عن مركز الأرض.

$$\left(\frac{T_s}{T_M}\right)^2 = \left(\frac{r_s}{r_M}\right)^3$$

$$T_s = \sqrt{(r_s/r_M)^3 T_M^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{6.70 \times 10^3 \text{ km}}{3.90 \times 10^5 \text{ km}}\right)^3 (27.3 \text{ days})^2}$$

$$= \sqrt{3.78 \times 10^{-3} \text{ days}^2}$$

$$= 6.15 \times 10^{-2} \text{ days} = 88.6 \text{ min}$$

**b.** كم يبعد القمر الاصطناعي عن سطح الأرض؟

$$h = r_s - r_E$$

$$= 6.70 \times 10^6 \text{ m} - 6.38 \times 10^6 \text{ m}$$

$$= 3.2 \times 10^5 \text{ m}$$

$$= 3.2 \times 10^2 \text{ km}$$

5. استعمل البيانات المتعلقة بالزمن الدوري للقمر ونصف قطر مداره التي يتضمنها السؤال السابق، لحساب متوسط بُعد قمر اصطناعي عن مركز الأرض والذي زمنه الدوري يساوي يومًا واحدًا.

$$\left(\frac{T_s}{T_M}\right)^2 = \left(\frac{r_s}{r_M}\right)^3$$

$$r_s = \sqrt[3]{r_M^3 \left(\frac{T_s}{T_M}\right)^2} = \sqrt[3]{(3.90 \times 10^5 \text{ km})^3 \left(\frac{1.00 \text{ days}}{27.3 \text{ days}}\right)^2}$$

$$= \sqrt[3]{7.96 \times 10^{13} \text{ km}^3}$$

$$= 4.30 \times 10^4 \text{ km}$$

## قانون نيوتن في الجذب الكوني

### Newton's Law of Universal Gravitation

في عام 1666م، بعد مضي 45 سنة على نشر كبلر نتائجه، بدأ نيوتن دراسة حركة الكواكب، فوجد أن مقدار قوة جذب الشمس  $F$  المؤثرة في كوكب تتناسب عكسياً مع مربع البعد  $r$  بين مركز الكوكب ومركز الشمس؛ أي أن  $F$  تتناسب طردياً مع  $\frac{1}{r^2}$ ، وتؤثر القوة  $F$  في اتجاه الخط الواصل بين مركزي الجسمين.

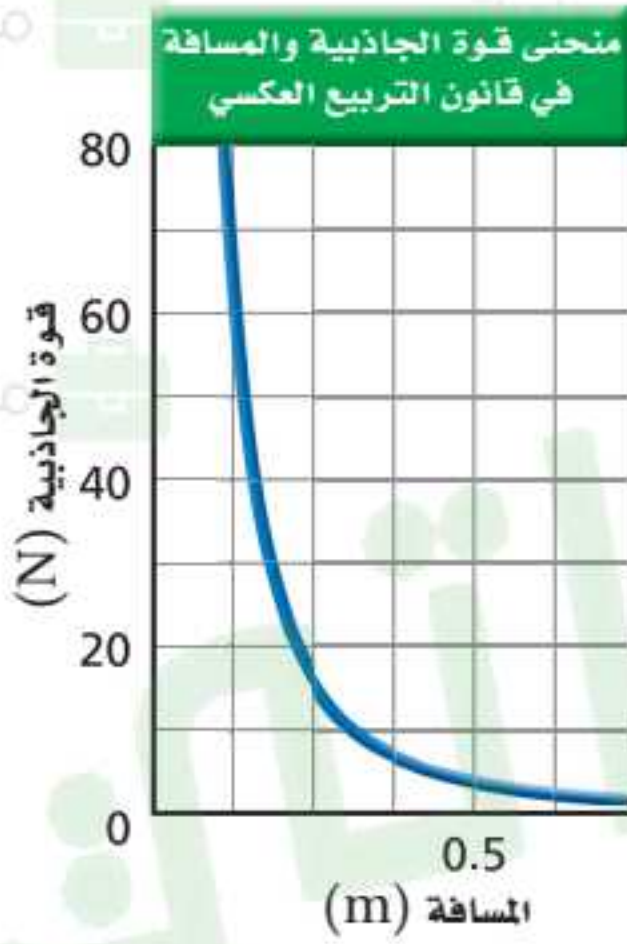
يُقال إن مشاهدة سقوط تفاحة جعلت نيوتن يتساءل: ماذا لو امتد أثر هذه القوة التي تسببت في سقوط التفاحة إلى القمر أو حتى أبعد من ذلك؟ وجد نيوتن أن تسارع كل من التفاحة والقمر متوافق مع العلاقة  $\frac{1}{r^2}$ . وبحسب قانون نيوتن الثالث فإن القوة التي تؤثر بها الأرض في التفاحة تساوي تلك القوة التي تؤثر بها التفاحة في الأرض. ويجب أن تتناسب قوة التجاذب بين أي جسمين مع كتل هذه الأجسام، وتُسمى هذه القوة **قوة الجاذبية**.

كان نيوتن واثقاً أن قوة التجاذب هذه موجودة بين أي جسمين في أي مكان من هذا الكون. وقد صاغ **قانونه في الجذب الكوني** الذي ينص على أن الأجسام تجذب أجساماً أخرى بقوة تتناسب طردياً مع حاصل ضرب كتلها، وعكسياً مع مربع المسافة بين مراكزها. ويمكن تمثيل ذلك بالمعادلة الآتية:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

قانون الجذب الكوني

قوة الجاذبية تساوي ثابت الجذب الكوني مضروباً في كتلة الجسم الأول مضروباً في كتلة الجسم الثاني مقسوماً على مربع المسافة بين مركزي الجسمين.



الشكل 4-1 تتغير قوة الجاذبية بتغير المسافة وفق قانون التربيع العكسي.

تبعاً لقانون نيوتن، تتناسب  $F$  طردياً مع  $m_1$  و  $m_2$ ، لذلك إذا تضاعفت كتلة الكوكب القريب من الشمس فإن القوة ستتضاعف. استعمل الرياضيات في الفيزياء في الجدول الآتي؛ لمساعدتك على إدراك أن تغير أحد المتغيرات يؤثر في الآخر. ويبين الشكل 4-1 منحنى لقانون التربيع العكسي (العلاقة بين قوة الجاذبية والمسافة).

| الرياضيات في الفيزياء                                                                     |                       |                           |                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------|
| العلاقات الطردية والعكسية يحتوي قانون نيوتن في الجذب الكوني كلا التناسبين الطردي والعكسي. |                       |                           |                 |
| $F \propto m_1 m_2$                                                                       |                       | $F \propto \frac{1}{r^2}$ |                 |
| النتيجة                                                                                   | التغير                | النتيجة                   | التغير          |
| $2F$                                                                                      | $2 m_1 m_2$           | $\frac{1}{4} F$           | $2 r$           |
| $3F$                                                                                      | $3 m_1 m_2$           | $\frac{1}{9} F$           | $3 r$           |
| $6F$                                                                                      | $2 m_1 3m_2$          | $4 F$                     | $\frac{1}{2} r$ |
| $\frac{1}{2} F$                                                                           | $\frac{1}{2} m_1 m_2$ | $9 F$                     | $\frac{1}{3} r$ |

## الجذب الكوني والقانون الثالث لكبلر

### Universal Gravitation and Kepler's Third Law

وضع نيوتن قانون الجذب الكوني بتعابير تنطبق على حركة الكواكب حول الشمس. وهذا يتفق مع القانون الثالث لكبلر، ويؤكد أن قانون نيوتن في الجذب الكوني يتطابق مع أفضل المشاهدات الحديثة.

إذا اعتبرت كوكبًا ما يدور حول الشمس، كما في الشكل 1-5، فيمكن كتابة القانون الثاني لنيوتن في الحركة على الصورة  $F_{\text{محسلة}} = m_p a_c$ ، حيث  $F$  قوة الجاذبية، و  $m_p$  كتلة الكوكب، و  $a_c$  التسارع المركزي للكوكب. ولتبسيط أكثر اعتبر المدارات دائرية الشكل. ولأنك درست في الفصل السادس أن التسارع المركزي في الحركة الدائرية المنتظمة يساوي  $a_c = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$ ، لذا يمكن كتابة العلاقة الآتية  $F_{\text{محسلة}} = m_p a_c$  على النحو الآتي:  $F_{\text{محسلة}} = \frac{m_p 4\pi^2 r}{T^2}$ . والمقصود بـ  $T$  في هذه المعادلة الزمن اللازم لدوران الكوكب دورة كاملة حول الشمس. وإذا ساويت الحد الأيمن في هذه المعادلة بالحد الأيمن لقانون الجذب الكوني تحصل على النتيجة الآتية:

$$G \frac{m_s m_p}{r^2} = \frac{m_p 4\pi^2 r}{T^2}$$

$$T^2 = \left( \frac{4\pi^2}{Gm_s} \right) r^3$$

$$T = \sqrt{\left( \frac{4\pi^2}{Gm_s} \right) r^3}$$

يمكن التعبير عن الزمن الدوري لكوكب يدور حول الشمس كما يأتي:

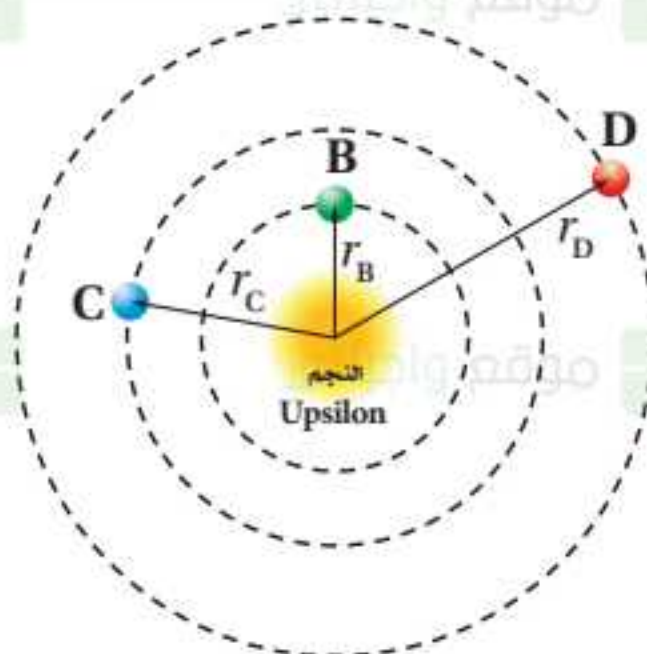
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{Gm_s}} \quad \text{الزمن الدوري لكوكب يدور حول الشمس}$$

وبتربيع الطرفين يتبين أن هذه المعادلة هي القانون الثالث لكبلر في حركة الكواكب. حيث يتناسب مربع الزمن الدوري طرديًا مع مكعب المسافة الفاصلة بين مراكز الأجسام. ويعتمد المعامل  $\frac{4\pi^2}{Gm_s}$  على كتلة الشمس وثابت الجذب الكوني. وقد وجد نيوتن أن هذا الاشتقاق ينطبق كذلك على المدارات الإهليلجية.



■ الشكل 1-5 كوكب كتلته  $m_p$  ونصف قطر مداره  $r$ ، يدور حول الشمس التي كتلتها  $m_s$ .

### مسألة تحفيز



اكتشف الفلكيون ثلاثة كواكب تدور حول النجم Upsilon وهذه الكواكب هي: الكوكب B الذي يبلغ نصف قطر مداره 0.059 AU وزمنه الدوري 4.6170 أيام، والكوكب C يبلغ نصف قطر مداره 0.829 AU وزمنه الدوري 241.5 يومًا، والكوكب D الذي يبلغ نصف قطر مداره 2.53 AU وزمنه الدوري 1284 يومًا. (المسافة بين الأرض والشمس تساوي 1.00 AU)

1. هل تحقق هذه الكواكب القانون الثالث لكبلر؟

2. أوجد كتلة النجم Upsilon بدلالة كتلة الشمس.

الإجابات في الصفحة التالية

## مسألة تحفيز

1. هل تحقق هذه الكواكب القانون الثالث لكبلر؟

تحقق من ذلك عن طريق حساب النسبة التالية :  $\frac{r^3}{T^2}$

$$\frac{r_B^3}{T_B^2} = 9.6 \times 10^{-6} \text{ AU}^3/\text{days}^2 \text{ : للوكب B}$$

$$\frac{r_C^3}{T_C^2} = 9.77 \times 10^{-6} \text{ AU}^3/\text{days}^2 \text{ : للوكب C}$$

$$\frac{r_D^3}{T_D^2} = 9.82 \times 10^{-6} \text{ AU}^3/\text{days}^2 \text{ : للوكب D}$$

وهذا يتفق مع القانون الثالث لكبلر.

2. أوجد كتلة النجم Upsilon بدلالة كتلة الشمس.

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{Gm_{\text{الجسم المركزي}}}{4\pi^2}$$

لنظام الأرض - الشمس

$$\frac{r^3}{T^3} = (1.000 \text{ AU})^3 / (1.000 \text{ yr})^2 = 1.000 \text{ AU}^3/\text{yr}^2$$

لنظام الكوكب C - Upsilon

$$\begin{aligned} \frac{r^3}{T^3} &= 9.77 \times 10^{-6} \text{ AU}^3/\text{days}^2 \\ &= (9.77 \times 10^{-6} \text{ AU}^3/\text{day}^2)(365 \text{ day}/\text{yr})^2 \end{aligned}$$

$$= 1.3 \text{ AU}^3/\text{yr}^2$$

$$= \frac{Gm_{\text{النجم}}}{4\pi^2}$$

النسبة بينهما تبين أن كتلة النجم تساوي 1.3 مرة كتلة الشمس.

## قياس ثابت الجذب الكوني

### Measuring the Universal Gravitational Constant

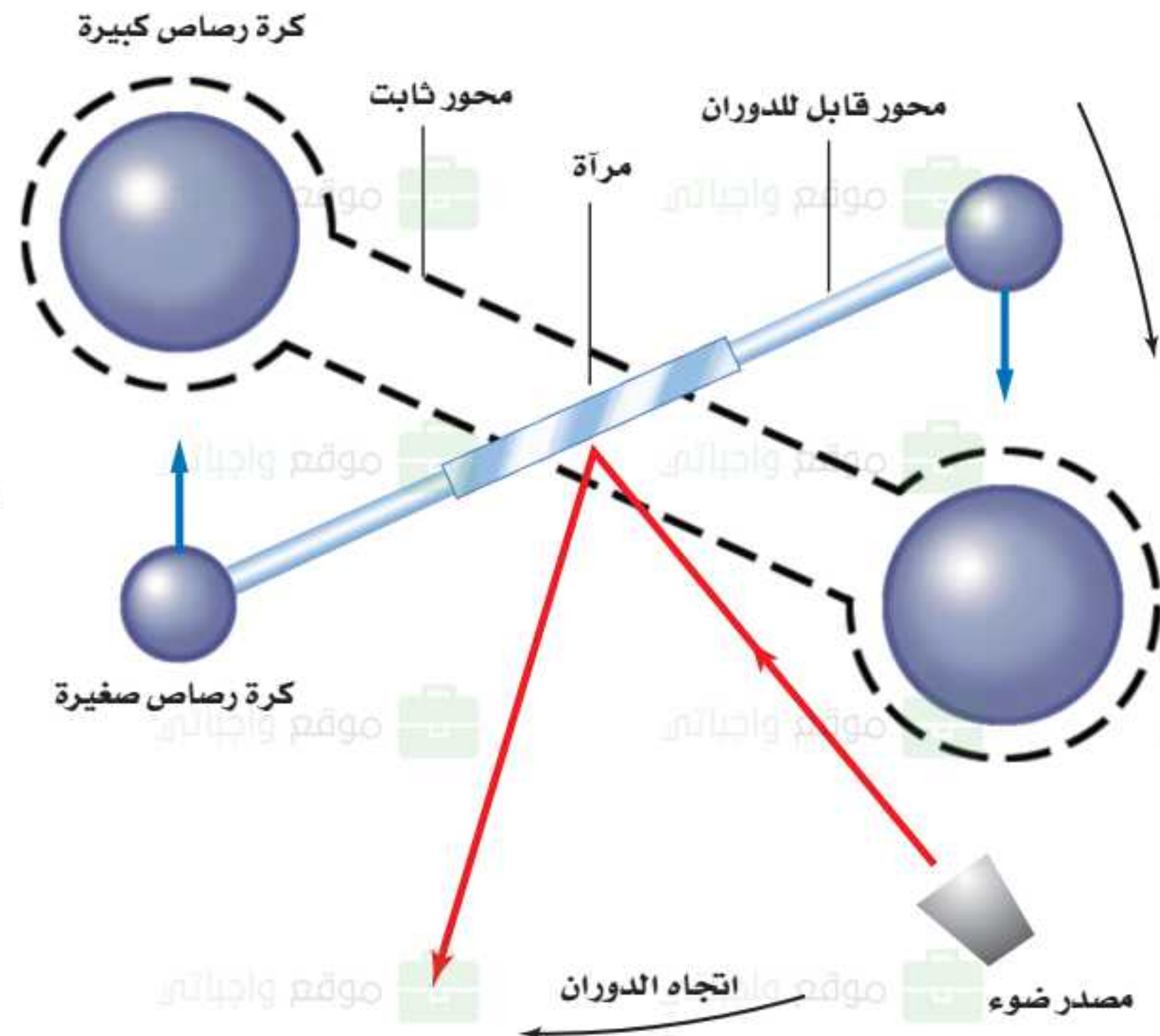
ما قيمة ثابت الجذب الكوني  $G$ ؟ تبدو قوة التجاذب بين جسمين على الأرض ضعيفة نسبياً، ويصعب الكشف عن هذه القوة بين كتلتي كرتي البولنج مثلاً. في الواقع استغرق الأمر 100 عام بعد نيوتن ليتمكن العلماء من تصميم جهاز حساس بما يكفي لقياس قوة الجاذبية.

**تجربة كافندش** استعمل العالم هنري كافندش في عام 1798م جهازاً، كما في الشكل 1-6، لقياس قوة الجاذبية بين جسمين. وللجهاز ذراع أفقية تحمل كرتين من الرصاص عند نهايتها. وهذه الذراع معلقة من منتصفها بسلك رفيع قابل للدوران. ولأن الذراع معلقة بسلك رفيع فهي حساسة لأي قوة أفقية. ولقياس  $G$ ، وضع كافندش كرتين ثقيلتين من الرصاص قريبتين من الكتلتين الصغيرتين، كما يبين الشكل 1-7. وقد أدت قوة التجاذب بين الكرتين الكبيرة والصغيرة إلى دوران الذراع. وعند تساوي قوة الليّ للسلك الرفيع وقوة التجاذب بين الكرات، تتوقف الذراع عن الدوران. وقد تمكن كافندش من قياس قوة التجاذب بين الكتل من خلال قياسه للزاوية التي شكّلها دوران الذراع؛ حيث تقاس الزاوية التي يشكلها دوران الذراع بالشعاع المنعكس عن مرآة مستوية. وقد تمكن كافندش - من خلال قياس الكتل والمسافة بين مراكز الكرات، والتعويض بذلك مستعملاً قانون نيوتن في الجذب الكوني - من تحديد قيمة تجريبية للثابت  $G$ ، حيث  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$ ، وذلك عندما تكون وحدة قياس  $m_1$  و  $m_2$  بـ (kg)، و  $r$  بـ (m)، و  $F$  بـ (N).



الشكل 1-6 تستعمل موازين كافندش الحديثة لقياس قوى الجذب بين جسمين.

الشكل 1-7 عند وضع الكرات الكبيرة بالقرب من الصغيرة تؤدي قوة الجاذبية إلى دوران الذراع. ويقاس الدوران بمساعدة الشعاع الضوئي المنعكس.



**أهمية الثابت G** تسمى تجربة كافندش أحياناً "إيجاد كتلة الأرض"؛ لأنها ساعدت على حساب كتلة الأرض. وبمعرفة قيمة الثابت G يمكن حساب كتلة الشمس أيضاً، إضافةً إلى حساب قوة الجاذبية بين أي كتلتين، وذلك بتطبيق قانون نيوتن في الجذب الكوني. فمثلاً، قوة التجاذب بين كرتي بولنج كتلة كل منهما 7.26 kg والمسافة بين مركزيهما 0.30 m يمكن حسابها على النحو الآتي:

$$F_g = \frac{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) (7.26 \text{ kg}) (7.26 \text{ kg})}{(0.30 \text{ m})^2}$$

$$F_g = 3.9 \times 10^{-8} \text{ N}$$

وتعلم أن وزن جسم كتلته  $m$  على سطح الأرض هو مقياس لقوة جذب الأرض له  $F_g = mg$ . فإذا سميت كتلة الأرض  $m_E$  ونصف قطر الأرض  $r_E$  فإن:

$$F_g = G \frac{m_E m}{r_E^2} = mg$$

$$g = G \frac{m_E}{r_E^2} \quad \text{ويستج عن ذلك أن}$$

$$m_E = \frac{g r_E^2}{G} \quad \text{ويمكن إعادة كتابة هذه المعادلة بدلالة } m_E \text{، أي}$$

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{N.m}^2}{\text{kg}^2} \quad \text{وكذلك } g = 9.80 \text{ m/s}^2; r_E = 6.38 \times 10^6 \text{ m} \quad \text{وبما أن}$$

فإننا نحصل على القيمة الآتية لكتلة الأرض:

$$m_E = \frac{(9.80 \text{ m/s}^2) \times (6.38 \times 10^6 \text{ m})^2}{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)} = 5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$$

وعندما تقارن كتلة الأرض بكتلة كرة البولنج تدرك لماذا لا تظهر بوضوح قوة التجاذب بين الأجسام التي نشاهدها في حياتنا اليومية. لقد ساعدت تجربة كافندش على تحديد قيمة الثابت G، وأكدت توقعات نيوتن من حيث وجود قوة تجاذب بين أي جسمين، وساعدت أيضاً على حساب كتلة الأرض.



6. الزمن الدوري لنبتون يدور نبتون حول الشمس في مدار نصف قطره  $4.495 \times 10^{12} \text{ m}$ ، مما يسمح للغازات - ومنها الميثان - بالتكثف وتكوين جو كما يوضحه الشكل 8-1. إذا كانت كتلة الشمس  $1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$ ، فاحسب الزمن الدوري لنبتون.

الشكل 8-1

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{Gm_s}}$$

$$= 2\pi \sqrt{\frac{(4.495 \times 10^{12} \text{ m})^3}{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(1.99 \times 10^{30} \text{ kg})}}$$

$$= 5.20 \times 10^9 \text{ s} = 6.02 \times 10^5 \text{ days}$$

7. الجاذبية إذا بدأت الأرض في الانكماش، وبقيت كتلتها ثابتة، فماذا يمكن أن يحدث لقيمة تسارع الجاذبية  $g$  على سطحها؟

**ستزداد قيمة  $g$ .**

8. قوة الجاذبية ما قوة الجاذبية بين جسمين كتلة كل منهما  $15 \text{ kg}$  والمسافة بين مركزيهما  $35 \text{ cm}$ ؟ وما نسبة هذه القوة إلى وزن أي منهما؟

$$F_g = G \frac{m m}{r^2}$$

$$= \frac{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) (15 \text{ kg})^2}{(0.35 \text{ m})^2}$$

$$= 1.2 \times 10^{-7} \text{ N}$$

**لأن الوزن يساوي  $mg = 147 \text{ N}$**

**فإن قوة الجاذبية تساوي  $8.2 \times 10^{-10}$  أو  $0.82$  جزء من بليون من الوزن.**

9. ثابت الجذب الكوني أجرى كافندش تجربته باستعمال كرات مصنوعة من الرصاص. افترض أنه استبدل بكرات الرصاص كرات من النحاس ذات كتل متساوية فهل تكون قيمة  $G$  هي نفسها أم تختلف؟ وضح ذلك.

**تكون قيمة  $G$  نفسها؛ لأنه باستعمال قيمة  $G$  نفسها تم بنجاح وصف التجاذب بين أجسام ذات تراكيب كيميائية مختلفة مثل: الشمس (النجوم)، والكواكب، والأقمار الاصطناعية.**

10. التفكير الناقد يحتاج رفع صخرة على سطح القمر إلى قوة أقل من التي تحتاج إليها على الأرض.

a. كيف تؤثر قوة الجاذبية الضعيفة على سطح القمر في مسار الحجر عند قذفه أفقياً؟

**يتطلب القذف الأفقي الجهد نفسه، وذلك بسبب خاصية القصور الذاتي للحجر  $F = ma$ . وتعتمد كتلة الحجر على**

**مقدار المادة الموجودة في الحجر فقط، وليس على موقعه في الكون. ويبقى المسار قطعاً مكافئاً، ولكنه سيكون أعرض بكثير (المدى الأفقي كبير)؛**

**لأن الحجر سيقطع مسافة أكبر قبل أن يرتطم بسطح القمر، مما يعطيه تسارعاً أقل وزمن تحليق أطول.**

**b.** إذا سقط الحجر على إصبع شخص، فأيهما يؤذيه أكثر: سقوطه - من الارتفاع نفسه - على سطح القمر، أم على سطح الأرض؟ فسر ذلك.

**افتراض أن السقوط تم من الارتفاع نفسه على الأرض وعلى القمر، فسيكون الأذى أكبر على سطح الأرض؛**

**لأن قيمة  $g$  على الأرض أكبر من قيمتها على القمر، مما يعني أن الحجر يضرب الإصبع بسرعة أقل على القمر مقارنة بسرعهه على الأرض.**

## 1-2 استخدام قانون الجذب الكوني Using the Law of Universal Gravitation



www.ien.edu.sa

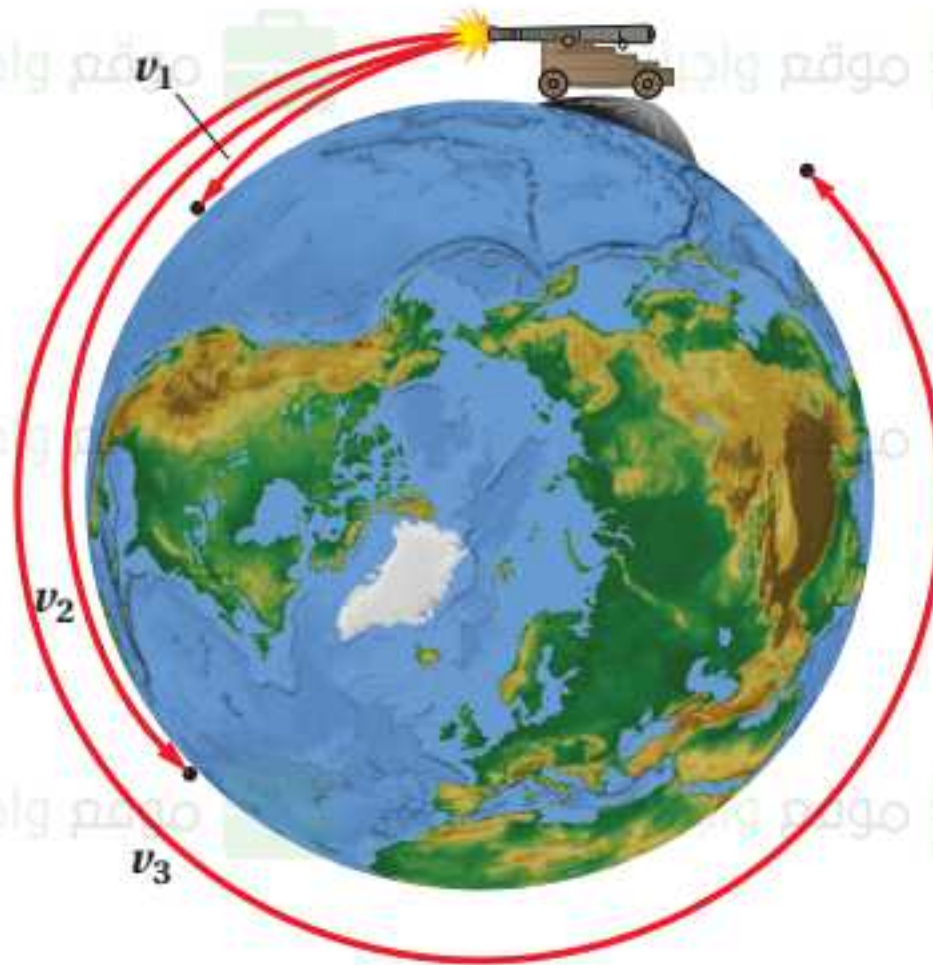
اكتُشف الكوكب أورانوس عام 1781م، وبحلول عام 1830م كان واضحاً أن مدار أورانوس الذي تم حسابه بقانون الجاذبية لا يتفق مع المدار الفعلي لهذا الكوكب. فاقترح عالمان فلكيان وجود كوكب آخر غير مكتشف يجذب أورانوس بالإضافة إلى جذب الشمس له. وقد قاما بحساب مدار هذا الكوكب عام 1845م، وبعد سنة أعلن فلكيون في مرصد برلين أنهم وجدوا ذلك الكوكب الذي يعرف اليوم بنبتون.

### مدارات الكواكب والأقمار الاصطناعية Orbits of Planets and Satellites

استخدم نيوتن رسماً، كما في الشكل 9-1؛ ليوضح تجربة ذهنية، فتخيل مدفعاً يطلق قذيفة في اتجاه أفقي بسرعة معينة. هذه القذيفة لها سرعة أفقية وأخرى رأسية، ولذلك يكون مسارها قطعاً مكافئاً، ثم تسقط على الأرض.

إذا زادت السرعة الأفقية للقذيفة ستقطع مسافة أطول على سطح الأرض، ولكنها ستسقط في النهاية على سطحها. أما إذا كان هناك مدفع ضخيم تنطلق منه القذيفة بسرعة مناسبة فإن القذيفة تسير المسافة كاملةً حول الأرض وتستمر في ذلك، أي أن القذيفة ستتحرك في مدار دائري حول الأرض.

لقد أهملت تجربة نيوتن الذهنية مقاومة الهواء المحيط بالأرض. ولكي تتخلص القذيفة من مقاومة الهواء يجب أن تُطلق من مدفع على جبل ارتفاعه أكثر من 150 km فوق سطح الأرض. وبالمقارنة فإن الجبل سيكون أعلى كثيراً من قمة جبل إفرست التي يبلغ ارتفاعها 8.85 km. إن قذيفة تطلق من ارتفاع 150 km لن تواجه مقاومة الهواء؛ لأنها تكون خارج معظم الغلاف الجوي الأرضي. لذا فإن قذيفة أو قمراً اصطناعياً عند هذا الارتفاع سيدور في مدار ثابت حول الأرض.



**الشكل 9-1 السرعة الأفقية  $v_1$**   
ليست كبيرة، لذا ستسقط القذيفة على الأرض. وعند سرعة أكبر  $v_2$  فإن القذيفة تقطع مسافة أكبر. وتقطع القذيفة المسار كله حول الأرض عندما تكون السرعة  $v_3$  كبيرة بدرجة كافية.

#### الأهداف

- تحل مسائل على الحركة المدارية.
- تربط انعدام الوزن مع أجسام في حالة سقوط حر.
- تصف مجال الجاذبية.
- تقارن بين كتلة القصور وكتلة الجاذبية.
- تقارن بين وجهتي نظر نيوتن وأينشتاين حول الجاذبية.

#### المفردات

- مجال الجاذبية
- كتلة القصور
- كتلة الجاذبية
- مبدأ التكافؤ

## تطبيق الفيزياء

### المدار المتزامن مع الأرض يدور

القمر الاصطناعي GOES-12 للتوقعات

الجوية حول الأرض دورة كل يوم على ارتفاع

35,785 km. وتطابق السرعة المدارية

للقمر معدل دوران الأرض، لذا يبدو القمر

بالنسبة لمراقب على الأرض كأنه فوق بقعة

معينة على خط الاستواء. ولذلك يُوجّه

طبق الاستقبال على الأرض في اتجاه معين،

ولا يلزم تغيير اتجاهه لالتقاط الإشارات

المرسلة من القمر الاصطناعي.



الشكل 10-1 يوجّه القمر الاصطناعي

لاندسات 7 عن بُعد، وكتلته 2200 kg،

ويدور حول الأرض على ارتفاع 705 km.

### الربط مع علم الأرض

يتحرك القمر الاصطناعي الذي يدور على ارتفاع ثابت عن الأرض حركة دائرية منتظمة. تذكر أن تسارعه المركزي يُعبّر عنه بالعلاقة الآتية:  $a_c = \frac{v^2}{r}$ ، لذا يكتب القانون الثاني لنيوتن على الصورة الآتية:  $F_{\text{محصلة}} = \frac{mv^2}{r}$ . فإذا كانت كتلة الأرض  $m_E$ ، ودُمج هذا القانون مع قانون نيوتن في الجذب الكوني، فإنه يُعبّر عنه بالعلاقة:

$$G \frac{m_E m}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

ولذا تحصل على مقدار سرعة القمر الاصطناعي الذي يدور حول الأرض بالعلاقة:

$$v = \sqrt{\frac{Gm_E}{r}}$$

**الزمن الدوري للقمر الاصطناعي** مدار القمر الاصطناعي حول الأرض يشبه مدار كوكب حول الشمس. وتعلم أن الزمن الدوري للكوكب حول الشمس يُعبّر عنه بالعلاقة:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{Gm_s}}$$

لذا فإن الزمن الدوري للقمر الاصطناعي حول الأرض يُعبّر عنه بالعلاقة:

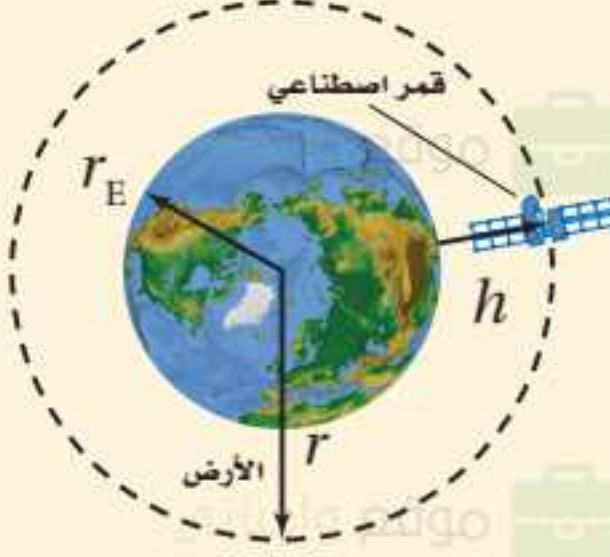
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{Gm_E}}$$

يمكن استعمال معادلتى سرعة القمر الاصطناعي وزمنه الدوري لأي جسم آخر يتحرك في مدار حول جسم ثانٍ. ويحل محل  $m_E$  في المعادلتين كتلة الجسم المركزي، وستكون  $r$  المسافة بين مركز الجسم الذي يتحرك في المدار ومركز الجسم المركزي. أما إذا كانت كتلة الجسم المركزي أكبر كثيرًا من كتلة الجسم الذي يتحرك في المدار فإن  $r$  ستكون المسافة بين الجسم الذي يتحرك في المدار ومركز الجسم المركزي. إن السرعة المدارية  $v$  والزمن الدوري  $T$  مستقلان عن كتلة القمر الاصطناعي. فهل هناك أي عوامل تحد من كتلة القمر الاصطناعي؟

**كتلة القمر الاصطناعي** يزودنا القمر الاصطناعي لاندسات 7 الموضح في الشكل 10-1 بصور سطحية للأرض، تستعمل في رسم الخرائط ودراسة الاستغلال الأمثل للأرض، كما يقوم هذا القمر بعمل مسح للمصادر الأرضية والخامات والتغيرات التي تحدث على الكرة الأرضية. ويمكن تسريع مثل هذه الأقمار باستعمال الصواريخ التي تزودها بالسرعة المناسبة من أجل وضعها في مداراتها حول الأرض. ولأن تسارع أي جسم يحسب بقانون نيوتن الثاني في الحركة،  $F = ma$ ، فإنه كلما زادت كتلة القمر تطلّب ذلك صاروخًا أقوى لإيصاله إلى مداره.

## مثال 2

**السرعة المدارية والزمن الدوري** افترض أن قمرًا اصطناعيًا يدور حول الأرض على ارتفاع 225 km فوق سطحها. فإذا علمت أن كتلة الأرض تساوي  $5.97 \times 10^{24}$  kg ونصف قطر الأرض  $6.38 \times 10^6$  m، فما مقدار سرعة القمر المدارية وزمنه الدوري؟



### 1 تحليل المسألة ورسمها

• ارسم الوضع مبيناً ارتفاع المدار.

**المجهول**

$$v = ?$$

$$T = ?$$

**المعلوم**

$$h = 2.25 \times 10^5 \text{ m}$$

$$m_E = 5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$r_E = 6.38 \times 10^6 \text{ m}$$

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$$

### 2 إيجاد الكمية المجهولة

أوجد نصف قطر المدار بإضافة ارتفاع القمر عن الأرض إلى نصف قطر الكرة الأرضية.

**بالتعويض**

$$r = h + r_E$$

$$= 2.25 \times 10^5 \text{ m} + 6.38 \times 10^6 \text{ m} = 6.61 \times 10^6 \text{ m}$$

$$h = 2.25 \times 10^5 \text{ m}, r_E = 6.38 \times 10^6 \text{ m}$$

$$v = \sqrt{\frac{Gm_E}{r}} = \sqrt{\frac{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(5.97 \times 10^{24} \text{ kg})}{6.61 \times 10^6 \text{ m}}}$$

احسب السرعة

$$= 7.76 \times 10^3 \text{ m/s}$$

$$\text{بالتعويض } G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2 \text{ و } m_E = 5.97 \times 10^{24} \text{ kg} \text{ و } r = 6.61 \times 10^6 \text{ m}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{Gm_E}}$$

احسب الزمن الدوري

$$= 2\pi \sqrt{\frac{(6.61 \times 10^6 \text{ m})^3}{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(5.97 \times 10^{24} \text{ kg})}}$$

$$\text{بالتعويض } G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$$

$$m_E = 5.97 \times 10^{24} \text{ kg} \text{ و } r = 6.61 \times 10^6 \text{ m}$$

$$= 5.35 \times 10^3 \text{ s}$$

### 3 تقويم الجواب

• هل الوحدات صحيحة؟ وحدة السرعة هي m/s، ووحدة الزمن الدوري هي الثانية.

## مسائل تدريبية

افترض أن مدار الأقمار دائري عند حل المسائل الآتية:

11. افترض أن القمر في المثال السابق تحرك إلى مدار نصف قطره أكبر 24 km من نصف القطر السابق، فكم يصبح

مقدار سرعته؟ وهل هذه السرعة أكبر أم أقل مما في المثال السابق؟

12. استعمل تجربة نيوتن الذهنية في حركة الأقمار الاصطناعية لحل ما يأتي:

a. حساب مقدار سرعة إطلاق قمر اصطناعي من مدفع بحيث يصبح في مدار يبعد 150 km عن سطح الأرض.

b. احسب الزمن الذي يستغرقه القمر الاصطناعي (بالثواني والدقائق) ليكمل دورة حول الأرض ويعود إلى المدفع.

13. استعمل البيانات المتعلقة بعطارد المعطاة في الجدول 1-1 لإيجاد ما يأتي:

a. مقدار سرعة قمر اصطناعي في مدار على بُعد 260 km من سطح عطارد.

b. الزمن الدوري لهذا القمر.

## الإجابات في الصفحة التالية

افترض أن مدار الأقمار دائري عند حل المسائل الآتية:

11. افترض أن القمر في المثال السابق تحرك إلى مدار نصف قطره أكبر 24 km من نصف القطر السابق، فكم يصبح مقدار سرعته؟ وهل هذه السرعة أكبر أم أقل مما في المثال السابق؟

$$r = (h + 2.40 \times 10^4 \text{ m}) + r_E$$

$$= (2.25 \times 10^5 \text{ m} + 2.40 \times 10^4 \text{ m}) + 6.38 \times 10^6 \text{ m} = 6.63 \times 10^6 \text{ m}$$

$$v = \sqrt{\frac{Gm_E}{r}}$$

$$= \sqrt{\frac{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(5.97 \times 10^{24} \text{ kg})}{6.63 \times 10^6 \text{ m}}}$$

$$= 7.75 \times 10^3 \text{ m/s, أقل}$$

12. استعمل تجربة نيوتن الذهنية في حركة الأقمار الاصطناعية لحل ما يأتي:

a. حساب مقدار سرعة إطلاق قمر اصطناعي من مدفع بحيث يصبح في مدار يبعد 150 km عن سطح الأرض.

$$v = \sqrt{\frac{Gm_E}{r}}$$

$$= \sqrt{\frac{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(5.97 \times 10^{24} \text{ kg})}{(6.38 \times 10^6 \text{ m} + 1.5 \times 10^5 \text{ m})}}$$

$$= 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$$

b. احسب الزمن الذي يستغرقه القمر الاصطناعي (بالثواني والدقائق) ليكمل دورة حول الأرض ويعود إلى المدفع.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{Gm_E}} = 2\pi \sqrt{\frac{(6.38 \times 10^6 \text{ m} + 1.5 \times 10^5 \text{ m})^3}{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(5.97 \times 10^{24} \text{ kg})}}$$

$$= 5.3 \times 10^3 \text{ s} \approx 88 \text{ min}$$

13. استعمل البيانات المتعلقة بعطارد المعطاة في الجدول 1-1 لإيجاد ما يأتي:  
 a. مقدار سرعة قمر اصطناعي في مدار على بُعد 260 km من سطح عطارد.

ترمز  $M$  لعطارد

$$v = \sqrt{\frac{Gm_M}{r}}$$

$$r = r_M + 260 \text{ km}$$

$$= 2.44 \times 10^6 \text{ m} + 0.26 \times 10^6 \text{ m}$$

$$= 2.70 \times 10^6 \text{ m}$$

$$v = \sqrt{\frac{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(3.30 \times 10^{23} \text{ kg})}{(2.70 \times 10^6 \text{ m})}}$$

$$= 2.86 \times 10^3 \text{ m/s}$$

b. الزمن الدوري لهذا القمر.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{Gm_M}} = 2\pi \sqrt{\frac{(2.70 \times 10^6 \text{ m})^3}{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(3.30 \times 10^{23} \text{ kg})}}$$

$$= 5.94 \times 10^3 \text{ s} = 1.65 \text{ h}$$

## تجربة

### ماء عديم الوزن

يُجرى هذا النشاط خارج الفصل. استعمل قلم رصاص لإحداث فتحتين في كأس ورقية: إحدهما في قاع الكأس والأخرى في جانبها، ثم أغلق الفتحتين بإصبعيك واملأ ثلثي الكأس بالماء الملون.

1. توقع ما يحدث عندما تُسقط الكأس سقوطاً حراً.

2. اختبر توقعك: أسقط الكأس، وراقب ما يحدث.

### التحليل والاستنتاج

3. صف مشاهداتك.

4. عند إسقاط الكأس سيبقى الماء فيها.

**لا يوجد ضغط من الماء على الكأس أو العكس، حيث إنهما يتسارعان بتسارع الجاذبية الأرضية نفسه، لذلك فهما في حال انعدام وزن ظاهري.**

الشكل 1-11 يظهر أحد رواد الفضاء في حالة انعدام الوزن في مكوك الفضاء كولومبيا، حيث يسقط المكوك بما فيه سقوطاً حراً في اتجاه الأرض



## تسارع الجاذبية الأرضية

### Acceleration Due To Gravity

يمكن إيجاد تسارع الأجسام الناشئ عن الجاذبية الأرضية باستعمال القانون الثاني لنيوتن وقانون الجذب الكوني، وذلك من خلال تطبيق المعادلة الآتية على الجسم الذي كتلته  $m$  ويسقط سقوطاً حراً:

$$F = \frac{Gm_E m}{r^2} = ma$$

$$a = \frac{Gm_E}{r^2}$$

ولذلك فإن

وبما أن  $a = g$  عند سطح الأرض،  $r = r_E$ ، لذا يمكن التعبير عن ذلك بالعلاقتين:

$$g = \frac{Gm_E}{r_E^2}$$

$$m_E = \frac{g r_E^2}{G}$$

وإذا عوضنا عن  $m_E$  في العلاقة  $a = \frac{Gm_E}{r^2}$  للجسم الساقط سقوطاً حراً سنحصل على:

$$a = G \frac{g r_E^2}{r^2}$$

$$a = g \left( \frac{r_E}{r} \right)^2$$

وبالتالي فإن

يوضح هذا أنه كلما ابتعدت عن الأرض فإن التسارع الناتج عن الجاذبية الأرضية يقل تبعاً لعلاقة التربيع العكسي هذه. ترى، ماذا يحدث لوزنك  $F_g$  كلما ابتعدت أكثر وأكثر عن مركز الأرض؟

**الوزن وانعدام الوزن** من المحتمل أنك شاهدت صوراً مشابهة لتلك الموضحة في الشكل 1-11، حيث يظهر رواد الفضاء في مركبة فضائية في حالة تسمى (zero-g) أو انعدام الوزن. يدور المكوك على ارتفاع 400 km فوق سطح الأرض، وعند هذه المسافة يكون  $g = 8.7 \text{ m/s}^2$ ؛ أي أقل قليلاً من قيمته على سطح الأرض. لذا فإن قوة الجاذبية الأرضية المؤثرة في المكوك لا تساوي صفراً بالتأكيد. وتسبب هذه الجاذبية دوران المكوك حول الأرض. فلماذا يبدو رواد الفضاء إذاً عديمي الوزن؟

تذكر أنك تشعر بوزنك عندما يؤثر فيك شيء بقوة تماس كالأرض أو الكرسي. لكن إذا كنت أنت والكرسي وأرض الغرفة، تتسارعون بالكيفية نفسها في اتجاه الأرض فإنه لا توجد قوى تماس تؤثر فيك. لذا يكون وزنك الظاهري صفراً وتشعر بانعدام الوزن. وكذلك يشعر رواد الفضاء في المكوك.

## مجال الجاذبية

### The Gravitational Field

تذكر من الفصل الرابع أن الكثير من القوى هي قوى تماس. فالاحتكاك يتولد عند تلامس جسمين، ومن ذلك دفع الأرض أو الكرسي عليك. لكن الجاذبية مختلفة؛ فهي تؤثر في التفاحة التي تسقط من الشجرة، وتؤثر في القمر. أي أن الجاذبية تؤثر عن بُعد، وهي تعمل بين أجسام غير متلامسة، أو قد تكون بعيدة. وقد انشغل نيوتن بذلك وكان يتساءل: كيف تؤثر الشمس بقوة في الأرض البعيدة؟

جاء الجواب عن هذا التساؤل من خلال دراسة المغناطيسية. ففي القرن التاسع عشر طور فارادي مفهوم المجال لتفسير كيفية جذب المغناطيس للأشياء. ثم طُبّق مبدأ المجال على الجاذبية. فكل جسم له كتلة محاط **بمجال جاذبي** يؤثر من خلاله بقوة في أي جسم آخر يوجد في ذلك المجال نتيجة التفاعل المتبادل بين كتلته والمجال الجاذبي  $g$ . ويوصف ذلك بالمعادلة الآتية:

$$g = \frac{GM}{r^2}$$

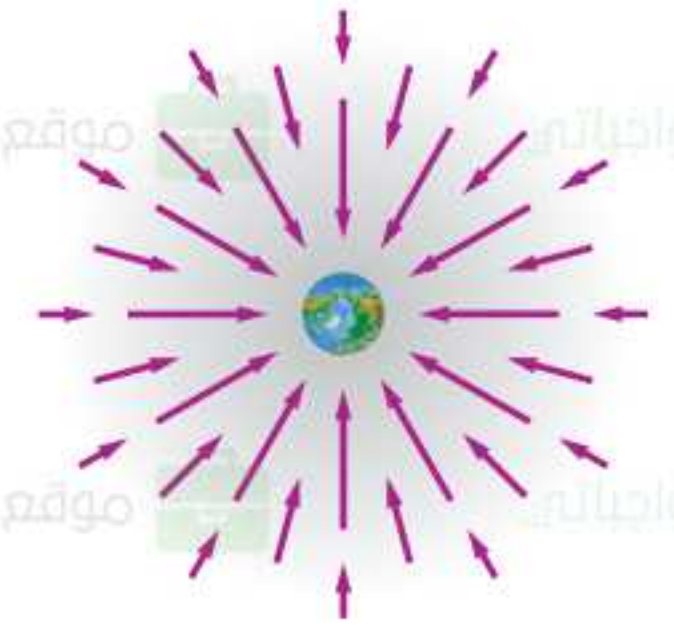
المجال الجاذبي

المجال الجاذبي يساوي ثابت الجذب الكوني مضروباً في كتلة الجسم، مقسوماً على مربع البعد عن مركز الجسم. ويكون اتجاهه في اتجاه مركز الكتلة.

افترض أن هناك مجالاً جاذبياً ناتجاً عن الشمس، فإن أي كوكب كتلته  $m$  سيخضع لقوة تؤثر فيه، تعتمد على كتلة الكوكب ومقدار المجال في ذلك المكان؛ أي  $F = mg$  في اتجاه الشمس.

تنتج القوة بسبب تفاعل كتلة الكوكب مع المجال الجاذبي في مكان وجود الكوكب وليس مع الشمس نفسها التي تبعد ملايين الكيلومترات. وإذا أردنا إيجاد المجال الجاذبي الذي يسببه أكثر من جسم فيجب حساب المجال الجاذبي لكل جسم، ثم تُجمع جميعاً اتجاهياً. ويمكن حساب مجال الجاذبية بوضع جسم كتلته  $m$  في المجال، ثم تقاس القوة المؤثرة فيه، وتقسم القوة  $F$  على الكتلة  $m$ ، كما في العلاقة الآتية:  $g = F/m$ ، حيث يُقاس المجال الجاذبي بوحدة  $N/kg$  التي تساوي أيضاً  $m/s^2$ .

إن شدة المجال الجاذبي عند سطح الأرض تساوي  $9.80 N/kg$  في اتجاه مركز الأرض. ويمكن تمثيل المجال بمتجه طوله  $g$  يشير إلى مركز الجسم الذي يُنتج هذا المجال. ويمكنك تصور مجال الأرض بمجموعة من المتجهات تحيط بالأرض وتشير إلى مركزها، الشكل 1-12. ويتناسب المجال عكسياً مع مربع البعد عن مركز الأرض، كما يعتمد على كتلة الأرض لا على كتلة الجسم.



■ الشكل 1-12 تشير كل المتجهات الممثلة لمجال الجاذبية إلى اتجاه مركز الأرض. ويضعف المجال كلما ابتعدنا عن الأرض.

## نوعا الكتلة

### Two Kinds of Mass

لقد درست سابقاً مفهوم الكتلة وتم تعريف ميل المنحنى في الرسم البياني للتسارع - القوة أنه مقلوب الكتلة، ويعبر عنه بالعلاقة  $k = \frac{1}{m}$ . ومن العلاقة الخطية بين القوة والتسارع تم التوصل إلى أن:  $a \propto F$ ، ومنها  $a = kF$ ، ومن ثم فإن  $a = \frac{1}{m}F$ ، ولذا فإن  $m = \frac{F}{a}$ ؛ أي أن الكتلة هي نسبة مقدار القوة المحصلة المؤثرة في جسم ما إلى مقدار تسارعه. ويسمى هذا النوع من الكتلة المرتبط بقصور الجسم **كتلة القصور**، وتمثل بالمعادلة:

$$m_{\text{القصور}} = \frac{F_{\text{محصلة}}}{a}$$

كتلة القصور

كتلة القصور تساوي مقدار القوة المحصلة المؤثرة في الجسم مقسومة على مقدار تسارعه.

تُقاس كتلة القصور بالتأثير بقوة في الجسم ثم قياس تسارعه باستعمال ميزان القصور، ومنها الميزان الموضح في الشكل 1-13. وكلما كانت كتلة الجسم أكبر كان الجسم أقل تأثراً بأي قوة، لذا يكون تسارعه أقل. وتُعد كتلة القصور مقياساً لممانعة أو مقاومة الجسم لأي نوع من أنواع القوى المؤثرة فيه.

يحتوي قانون نيوتن في الجذب الكوني على كتلة، غير أنها نوع آخر من الكتل. وتحدد الكتلة المستعملة في هذا القانون مقدار قوة الجاذبية بين جسمين، وتسمى **كتلة الجاذبية**. ويمكن

**تجربة عملية**  
هل كتلة القصور تساوي كتلة الجاذبية؟  
ارجع إلى دليل التجارب في منصة عين الإثرائية



■ الشكل 1-13 يُمكنك ميزان القصور من حساب كتلة القصور لجسم ما من خلال الزمن الدوري T لحركة الذهاب والإياب للجسم. وتستعمل كتل معايرة كما في الشكل للحصول على منحنى بين  $T^2$  والكتلة، ثم يقاس الزمن الدوري للكتلة المجهولة التي يمكن معرفتها من الرسم.



## الشكل 1-14 يُمكننا الميزان ذو

الكفتين المبين في الشكل من قياس كتل الأجسام؛ وذلك بمقارنة قوة جذب الأرض لها بقوة جذبها لكتل معيارية.



قياسها باستعمال الميزان ذي الكفتين كما في الشكل 1-14. فإذا قُست قوة الجذب المؤثرة في جسم من جسم آخر كتلته  $m$ ، وعلى بُعد  $r$  أمكنك تعريف كتلة الجاذبية بالطريقة الآتية:

$$m_{\text{الجاذبية}} = \frac{r^2 F_{\text{الجاذبية}}}{Gm}$$

كتلة الجاذبية لجسم ما تساوي مربع المسافة بين الجسمين مضروبة في مقدار قوة الجاذبية بين الجسمين مقسومة على حاصل ضرب ثابت الجذب الكوني في كتلة الجسم الثاني.

تجربة  
عملية

كيف تقيس الكتلة؟

ارجع إلى دليل التجارب في منصة عين  
الإسرائيلية



## الشكل 1-15 التطورات التي شهدتها علم الفلك

حول حركة الكواكب والجاذبية.

في عام 1543 م في عصر النهضة الأوربية، قدم نيكولاس كوبرنيكس نموذج مركزية الشمس؛ حيث تدور الكواكب حول الشمس، لا حول الأرض.



1400

600

اهتم المسلمون بدراسة علم الفلك، لمعرفة أوقات الصلاة بحسب الموقع الجغرافي والفصل الموسمي، وتحديد اتجاه القبلة، ورؤية هلال رمضان، واخترعوا حسابات وطرائق بديعة لم يسبقهم إليها أحد. ويعود إلى المسلمين فضل تخلص علم الفلك من الشعوذة والدجل وجعله علماً خالصاً يعتمد على النظرية والبرهان.



في نحو عام 370 ق.م صمم الإغريق نظاماً ميكانيكياً لشرح حركات الكواكب. اقترح يودوكسوس أن الكواكب والشمس والقمر والنجوم تدور كلها حول الأرض. وفي القرن الرابع قبل الميلاد أدخل أرسطو هذه النظرية الهندسية، وهي نظرية مركزية الأرض، في نظامه الفلسفي.

كيف يختلف نوعا الكتلتين؟ إذا كان لديك بطيخة في أرضية صندوق سيارتك، فإذا تسارعت السيارة في اتجاه الأمام فإن البطيخة ستتدحرج إلى الخلف بالنسبة إلى السيارة، وهذا بسبب كتلة قصور البطيخة التي تقاوم التسارع، وإذا بدأت السيارة بصعود منحدر، فإن البطيخة ستتدحرج إلى الخلف مرة أخرى ولكنها ستجذب هذه المرة بسبب كتلة الجاذبية إلى أسفل في اتجاه الأرض. وقد أعلن نيوتن أن كتلة القصور وكتلة الجاذبية متساويتان من حيث المقدار. ويسمى هذا **مبدأ التكافؤ**. وكل التجارب التي أجريت حتى الآن توصلت إلى نتائج تدعم صحة هذا المبدأ. وكان العالم ألبرت أينشتاين أيضًا مهتمًا بمبدأ التكافؤ وجعله نقطة رئيسة في نظريته عن الجاذبية. وبين الشكل 1-15 التطورات التي شهدتها علم الفلك حول حركة الكواكب والجاذبية.



فاز ثلاثة علماء أمريكيين بجائزة نوبل في الفيزياء لعام 2017 تقديراً لإسهاماتهم الحاسمة في رصد موجات الجاذبية، وهي تموجات في نسيج الزمكان تنبأت بها النظرية النسبية العامة لألبرت أينشتاين.

## نظرية أينشتاين في الجاذبية Einstein's Theory of Gravity

يمكننا قانون نيوتن في الجذب الكوني من حساب قوة الجاذبية المتبادلة بين جسمين بسبب كتلتيهما.

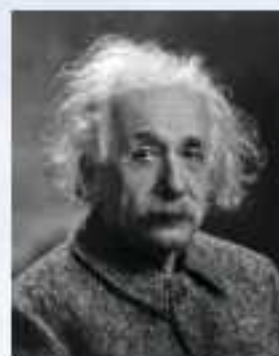
إن مفهوم مجال الجاذبية يتيح لنا تصور طريقة تأثير الجاذبية في الأجسام عندما تكون بعيدة بعضها عن بعض. افترض أينشتاين أن الجاذبية ليست مجرد قوة، بل هي تأثير من الفضاء نفسه، وبناءً على فرضية أينشتاين فإن الكتل تغير الفضاء (الزمكان) المحيط بها، فتجعله منحنيًا، وتسارع الأجسام الأخرى بسبب الطريقة التي تسير بها في هذا الفضاء المنحني.

قدم نيوتن قانون الجاذبية العام ليفسر حركة الكواكب، واستطاع تفسير الإشكالات التي لم تستطع قوانين كبلر تفسيرها.



1900

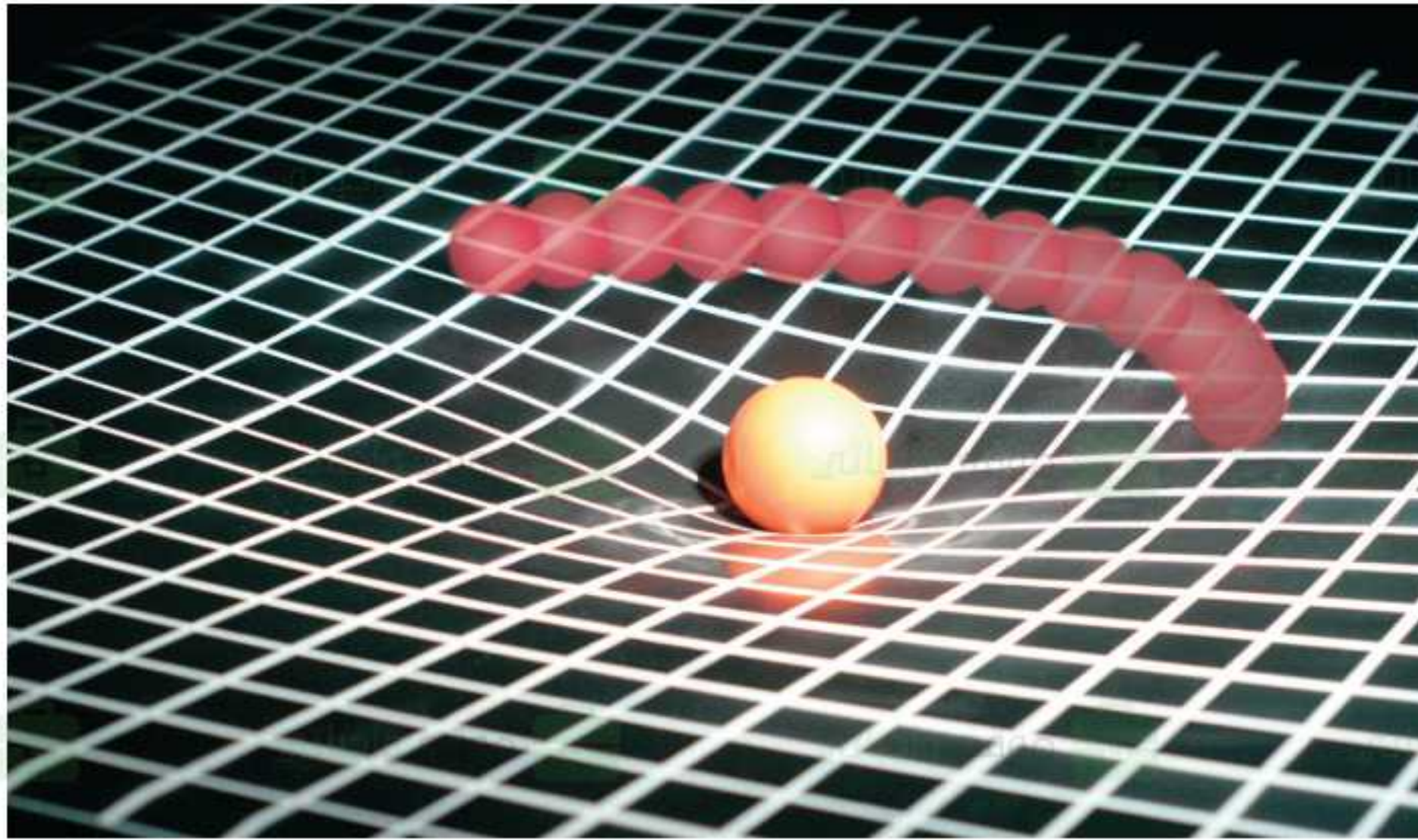
النظرية النسبية العامة هي نظرية هندسية للجاذبية، نشرها ألبرت أينشتاين عام 1916م، وتمثل الوصف الحالي للجاذبية في الفيزياء الحديثة، وذلك بتعميمها للنسبية الخاصة وقانون الجذب العام لنيوتن، وإعطاء وصف موحد للجاذبية كخاصية هندسية للمكان والزمان، أو الزمكان.



1600

يعد كبلر أول من وضع نظامًا لوصف تفاصيل حركة الكواكب حول الشمس في مدارات إهليلجية. ورغم ذلك، لم ينجح كبلر في صياغة نظرية تدعم القوانين التي سجلها.





الشكل 1-16 تسبب المادة انحناء الفضاء (الزمكان) تماماً كما يؤثر جسم في شبك مطاطي حوله. الأجسام المتحركة بالقرب من الكتلة تسلك مساراً منحنياً في الفضاء. تتحرك الكرة الحمراء في اتجاه حركة عقارب الساعة حول الكتلة المركزية.

من طُرق تصور كيفية تأثير الفضاء بالكتلة، مقارنة الفضاء بشبكة كبيرة من المطاط ثنائية الأبعاد، كما هو موضح في الشكل 1-16، حيث تمثل الكرة الصفراء جسمًا كتلته كبيرة جدًا على الشبكة، وهي تسبب الانحناء. والكرة الحمراء تدور عبر الشبكة، وتحاكي حركة كوكب حول نجم في الفضاء (الزمكان).

تتسارع الكرة الحمراء عندما تتحرك بالقرب من المنطقة المنحنية من الشبكة. وبالطريقة نفسها فإن كلاً من الشمس والأرض تجذب الأخرى؛ بسبب طريقة تشوه الفضاء الناجم عن الجسمين. وقد تنبأت نظرية أينشتاين - التي تسمى النظرية النسبية العامة - بعدة تنبؤات حول كيفية تأثير الأجسام ذات الكتل الكبيرة بعضها في بعض. وقد أعطت نتائج صحيحة لكل الاختبارات التي أجريت في الفترات اللاحقة.

**انحراف الضوء** تنبأت نظرية أينشتاين بانحراف الضوء عند مروره بالقرب من أجسام ذات كتل كبيرة جدًا، حيث يتبع الضوء الفضاء المنحني حول الأجسام ذات الكتل الكبيرة مما يؤدي إلى انحنائه، كما هو موضح في الشكل 1-17.

لاحظ علماء الفلك في أثناء كسوف الشمس سنة 1919م أن الضوء القادم من النجوم البعيدة، الذي يمر بالقرب من الشمس، قد انحرف عن مساره بما يحقق تنبؤات أينشتاين.

ومن نتائج النسبية العامة أيضًا تأثير الأجسام ذات الكتل الكبيرة في الضوء. فإذا كانت كتلة الجسم كبيرة جدًا وكثافته كبيرة بشكل كاف فإن الضوء الخارج



الشكل 1-17 الضوء القادم من النجوم البعيدة يتأثر بمجال جاذبية الشمس. الرسم للتوضيح ولا يمثل مقياس رسم حقيقي.

منه يرتدّ إليه بشكل كامل، وبذلك لا يستطيع الضوء الخروج منه أبدًا. وتسمى مثل هذه الأجسام الثقوب السوداء. ويستدل على وجودها من خلال تأثيرها في النجوم القريبة منها. كما يُستفاد من الأشعة الناتجة عن انجذاب المادة إلى الثقوب السوداء وسقوطها فيها في تحديد هذه الثقوب والكشف عن أماكن وجودها.

وعلى الرغم من أن نظرية أينشتاين تنبأت بشكل دقيق في تأثيرات الجاذبية، إلا أنها لا تزال غير مكتملة؛ فهي لا توضح أصل الكتلة، ولا كيف تعمل الكتلة على تحذب (انحناء) الفضاء. ويعمل الفيزيائيون على فهم الجاذبية وأصل الكتلة نفسها بشكل أعمق.

## 1-2 مراجعة

14. **مجالات الجاذبية** يبعد القمر مسافة  $3.9 \times 10^5 \text{ km}$

عن مركز الأرض، في حين يبعد  $1.5 \times 10^8 \text{ km}$  عن مركز

الشمس. وكتلتا الأرض والشمس  $6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$  و

$2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$  على الترتيب.

**a.** أوجد النسبة بين مجال جاذبية الأرض وبين مجال جاذبية الشمس عند مركز القمر.

**مجال جاذبية الشمس:**

$$g_s = \frac{Gm_s}{r_s^2}$$

**مجال جاذبية الأرض:**

$$g_E = \frac{Gm_E}{r_E^2}$$

$$\frac{g_s}{g_E} = \left( \frac{m_s}{m_E} \right) \left( \frac{r_E^2}{r_s^2} \right)$$

$$= \frac{(2.0 \times 10^{30} \text{ kg}) (3.9 \times 10^5 \text{ km})^2}{(6.0 \times 10^{24} \text{ kg}) (1.5 \times 10^8 \text{ km})^2} = 2.3$$

**b.** عندما يكون القمر في طور ربعه الثالث (ليلة 21 في الشهر)، الشكل 1-18، يكون اتجاهه بالنسبة إلى الأرض عمودياً على اتجاه الأرض بالنسبة إلى الشمس. ما محصلة المجال الجاذبي للأرض والشمس عند مركز القمر؟

القمر



الأرض

الشكل 1-18

بما أن الاتجاهات تُشكّل مثلثاً قائم الزاوية، فإن المجال المحصل يساوي الجذر التربيعي لمجموع مربعي المجالين.

$$g_s = \frac{Gm_s}{r^2} = \frac{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(2.0 \times 10^{30} \text{ kg})}{(1.5 \times 10^{11} \text{ m})^2} = 5.9 \times 10^{-3} \text{ N/kg}$$

وبالمثل،

$$g_E = 2.6 \times 10^{-3} \text{ N/kg}$$

$$g_{\text{المحصلة}} = \sqrt{(5.9 \times 10^{-3} \text{ N/kg})^2 + (2.6 \times 10^{-3} \text{ N/kg})^2} = 6.4 \times 10^{-3} \text{ N/kg}$$

15. مجال الجاذبية كتلة القمر  $7.3 \times 10^{22}$  kg ونصف قطره 1785 km، ما شدة مجال الجاذبية على سطحه؟

$$g = \frac{GM}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(7.3 \times 10^{22} \text{ kg}) / (1.785 \times 10^3 \text{ m})^2$$

$$= 1.5 \text{ N/kg}$$

**سُدس شدة مجال الجاذبية الأرضية تقريباً، أو  $1.5 \text{ N/kg}$ .**

16. الزمن الدوري والسرعة قمران اصطناعيان في مدارين دائريين حول الأرض؛ يبعد الأول 150 km عن سطح الأرض، والثاني 160 km.

**a.** أي القمرين له زمن دوري أكبر؟

**عندما يكون نصف قطر المدار كبيراً يكون زمنه الدوري كبيراً أيضاً، فالقمر الذي على بعد 160 km من سطح الأرض له زمن دوري أكبر.**

**b.** أي القمرين سرعته أكبر؟

**القمر الذي على بعد 150 km من سطح الأرض**

**وذلك لأنه كلما قل نصف قطر المدار زادت السرعة.**

17. حالة انعدام الوزن تكون المقاعد داخل محطة الفضاء عديمة الوزن. إذا كنت على متن إحدى هذه المحطات وكنت حافي القدمين فهل تشعر بالألم إذا ركلت كرسيًا؟ فسر ذلك.

**نعم؛ لأن الكرسي عديم الوزن وليس عديم الكتلة فلا يزال له قصور ويمكنه توليد قوى تماس مع القدم.**

18. **التفكير الناقد** لماذا يُعد إطلاق قمر اصطناعي من الأرض إلى مدار ليدور في اتجاه الشرق أسهل من إطلاقه ليدور في اتجاه الغرب؟ وضح.

**تدور الأرض في اتجاه الشرق وتضاف سرعتها إلى سرعة القمر الاصطناعي الناتجة عن الصاروخ، وبذلك تقلل السرعة التي يتعين على الصاروخ تزويدها للقمر.**

# مختبر الفيزياء

## نمذجة مدارات الكواكب والأقمار

ستحلل في هذه التجربة نموذجًا يبين كيف يُطبق القانونان الأول والثاني لكبلر في الحركة على مدارات الأجسام في الفضاء. ينص القانون الأول لكبلر على أن مدارات الكواكب إهليلجية وتقع الشمس في إحدى بؤرتي المدار. أما القانون الثاني لكبلر فينص على أن الخط الوهمي الواصل بين الشمس والكوكب يمسح مساحات متساوية في فترات زمنية متساوية. ويعرف شكل المدار الإهليلجي باللامركزية  $e$ ، وهي تساوي نسبة البعد بين البؤرتين إلى المحور الرئيس. وعندما يكون الجسم في أبعد مكان له عن الشمس على امتداد المحور الرئيس فإنه يكون في (الأوج). وعندما يكون في أقرب مسافة له من الشمس على امتداد المحور الرئيس فإنه يكون في (الحضيض).

### سؤال التجربة

ما شكل مدارات الكواكب والأقمار في النظام الشمسي؟

#### الخطوات

1. ثبت قطعة الورق البيضاء على الورق المقوى.
2. ارسم خطاً عبر منتصف الورقة في اتجاه طولها؛ ليُمثل المحور الرئيس.
3. عين منتصف الخط وسمّه C.
4. اربط أحد الخيوط لتكون حلقة يكون طولها عند سحبها 10 cm. واحسب المسافة بين البؤرتين ( $d$ ) لكل جسم في الجدول باستعمال المعادلة:

$$d = \frac{2e(10.0 \text{ cm})}{e+1}$$

5. لرسم دائرة، ثبت دبوساً عند C، وضع الحلقة فوق الدبوس واسحبها بالقلم. وحرك القلم بصورة دائرية حول المركز على أن يتحكم الخيط في حركة القلم.
6. لرسم مدار الأرض، انزع الدبوس من النقطة C، ثم ثبته على بُعد  $\frac{d}{2}$  cm من C على المحور الرئيس.
7. ثبت الدبوس الآخر على بُعد  $\frac{d}{2}$  من الجهة الأخرى بالنسبة إلى C، حيث يمثل الدبوسان البؤرتين.
8. ضع الحلقة فوق الدبوسين واسحبها بقلم الرصاص بحيث يتحكم الخيط في حركته.
9. كرر الخطوات 8-6 للمذنب.

#### الأهداف

- تصوغ نماذج للاستدلال على شكل مدارات الكواكب والأقمار.
- تجمع وتنظم البيانات لمسافات الأوج والحضيض للأجسام عندما تدور حول الشمس.
- تستخلص نتائج حول القانونين الأول والثاني لكبلر في الحركة.

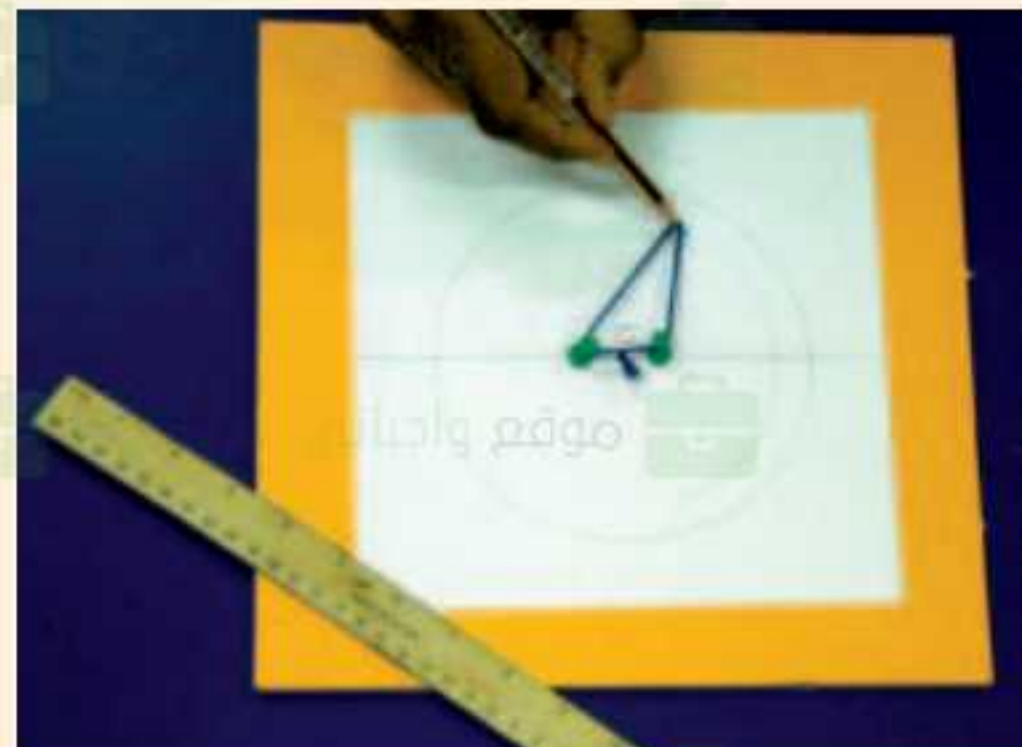
#### احتياطات السلامة



- الدبابيس حادة ويمكن أن تخدش الجسم.

#### المواد والأدوات

- |              |               |
|--------------|---------------|
| مسطرة مترية  | قطعة ورق مقوى |
| قلم رصاص     | طبق ورقي أبيض |
| خيوط (25 cm) | دبوسان        |



| الجسم | e     | d(cm) | A المقيسة | P المقيسة | e المقيسة | % نسبة الخطأ |
|-------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| دائرة | 0     | 0.00  | 10.0      | 10.1      | 0.0050    | *            |
| الأرض | 0.017 | 0.33  | 10.2      | 9.9       | 0.15      | 12 %         |
| مذنب  | 0.70  | 8.2   | 17.3      | 2.7       | 0.73      | 4.3 %        |

- لاحظ أن حساب نسبة الخطأ للدائرة غير ممكن؛ لأن ذلك يعني أننا نقسم على صفر.

### التحليل

5. **حلل** لماذا يكون المدار ذو القيمة ( $e = 0$ ) دائرياً؟

**كلتا البؤرتين عند المركز**

1. **قس** مسافة الأوج A، وهي البعد بين إحدى البؤرتين وأبعد نقطة على المدار على امتداد المحور الرئيس. وسجل النتيجة في جدول البيانات.

**انظر بيانات جدول الإجابة**

6. **قارن** بين مدار الأرض وشكل الدائرة.

**مدار الأرض قريب جداً من شكل الدائرة.**

2. **قس** مسافة الحضيض P، وهي البعد بين البؤرة السابقة نفسها وأقرب نقطة على المدار على امتداد المحور الرئيس.

**انظر بيانات جدول الإجابة**

7. **لاحظ** أي المدارات يكون إهليلجياً في الواقع؟

3. **احسب** اللامركزية التجريبية e من المعادلة:

$$e = \frac{A - P}{A + P}$$

**انظر بيانات جدول الإجابة، فمثلاً للمذنب**

$$e = \frac{14.6}{20} = 0.73$$

4. **حلل الخطأ** احسب الخطأ النسبي بين القيمة التجريبية والقيمة المحسوبة لـ e.

**انظر بيانات جدول الإجابة**

## التوسع في البحث

1. استعملت طريقة تقريبية للنظر إلى القانون الثاني لكبلر. اقترح تجربة للحصول على نتائج أدق لإثبات القانون الثاني.

اجمع معلومات عن تواريخ وأماكن وجود كوكب ما، واستعمل المساحات والتواريخ لتحقيق القانون الثاني لكبلر.

2. صمّم تجربة لإثبات القانون الثالث لكبلر. بيانات لإثبات إجابتك.

استعمل نموذجًا حاسوبيًا مزودًا بالحركة الحقيقية لكوكب ما لتثبت القانون الثالث لكبلر، وبذلك يمكن قياس الزمن الدوري والبعد.

## الفيزياء في الحياة

يدور قمر اصطناعي للاتصالات أو الأرصاد الجوية حول الأرض. هل يحقق هذا القمر قوانين كبلر؟ اجمع

يمكن للطلاب البحث في المدارات الإهليلجية للأقمار الاصطناعية. شجعهم على اختيار قمر واحد على الأقل؛ لكي يرسموا بيانات المدار ويحددوا شكل المدار الذي يسلكه هذا القمر.

1. هل ينطبق القانون الأول لكبلر على المدار الذي رسمته؟ وضح.

نعم، يسير المذنب والكواكب في مدارات إهليلجية.

2. درس كبلر بيانات مدار المريخ ( $e = 0.093$ ) واستنتج أن الكواكب تتحرك حول الشمس في مدارات إهليلجية. ماذا كان يستنتج لو كان على المريخ ودرس حركة الأرض؟ لأنّ لا مركزية الأرض صغيرة، لا يستطيع كبلر استنتاج أن مدارها إهليلجي.

3. أين تكون سرعة الكوكب أكبر: عند الأوج أم الحضيض؟ ولماذا؟

تسير أسرع عندما تكون في الحضيض؛ حسب القانون الثاني لكبلر فإنّ مساحات متساوية تُمسح في أزمنة متساوية؛ ولأنّ المساحة صغيرة عندما تكون الكواكب في الحضيض، فإنّ عليها أن تسير بسرعة كبيرة فيه.

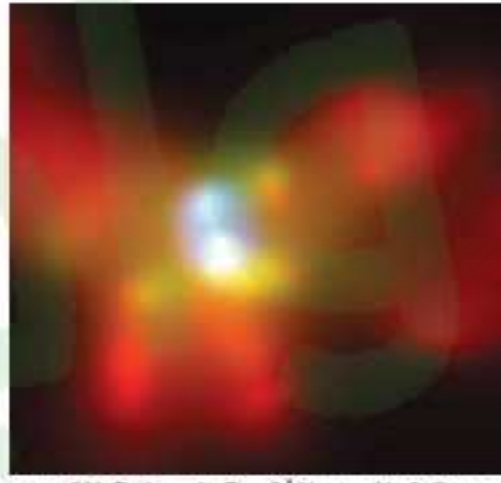
4. يساعد القانون الثاني لكبلر على تحديد نسبة سرعة الأرض في الأوج والحضيض ( $v_A/v_P$ ). لتحديد هذه النسبة احسب أولاً المساحة التي تمسحها الأرض في مدارها، وهذه المساحة تساوي تقريباً مساحة مثلث مساحته  $= \frac{1}{2}$  البعد عن الشمس  $\times$  سرعته في تلك الفترة  $\times$  الزمن. إذا كانت المساحة التي يمسحها الكوكب في فترات زمنية محددة (30 يوماً مثلاً) متساوية عند الأوج والحضيض، فإنه يمكن كتابة هذه العلاقة على النحو الآتي:  $\frac{1}{2} P v_P t = \frac{1}{2} A v_A t$  ما النسبة  $\frac{v_P}{v_A}$  لكوكب الأرض؟

$$\frac{v_P}{v_A} = 10.2/9.9 = 1.03$$

الثقب الأسود من خلال المجال الجاذبي الذي يولده. وتحسب الكتلة باستعمال صيغة معدلة للقانون الثالث لكبلر في حركة الكواكب. وقد أثبتت دراسات (ناسا) أن الثقب الأسود يدور حول نفسه مثل النجوم والكواكب. ويدور الثقب الأسود لأنه يحتفظ بالزخم الزاوي للنجم الذي كوَّنه. ويفترض العلماء أن الثقب الأسود يمكن أن يُشحن كهربائياً عندما يسقط عليه أحد أنواع الشحنة الكهربائية الزائدة، على الرغم من عدم قدرة العلماء على قياس شحنته حتى الآن. كما أمكن الكشف عن الأشعة السينية الناتجة عن الغازات الفائقة الحرارة. على الرغم من أننا لا نعرف كل شيء عن الثقوب السوداء إلا أن هناك دلائل مباشرة وغير مباشرة على وجودها. وسوف تؤدي الأبحاث المتواصلة والبعثات الخاصة إلى فهم أكبر لحقيقة الثقوب السوداء.



صورة هابل للمجرة NGC 6240



صورة شاندرلا بالأشعة السينية لثقبين أسودين في NGC 6240.

## الثقوب السوداء Black Holes

ماذا يحدث لو كنت تسافر إلى ثقب أسود؟ سوف يتمدد جسمك، ويصبح مفلطحاً ومن ثم يسحب إلى أجزاء ويتمزق. ما الثقب الأسود؟ وماذا تعرف عن الثقوب السوداء؟

الثقب الأسود إحدى المراحل النهائية المحتملة لتطور نجم. فعندما تتوقف تفاعلات الاندماج في قلب نجم كتلته أكبر من كتلة الشمس 20 مرة ينهار قلب النجم إلى الأبد، وتتجمع الكتلة في أصغر حجم. ويسمى هذا الجسم المتناهي الصغر ذو الكثافة المتناهية في الكبر الجسم المفرد (الاستثنائي). وتكون قوة الجاذبية هائلة حول هذا الجسم فلا يفلت منها شيء حتى الضوء، وتُعرف هذه المنطقة بالثقب الأسود. **لا شيء يستطيع الإفلات** في عام 1917 م استنتج العالم الألماني شوارتزشيلد -رياضياً- إمكانية وجود الثقوب السوداء. وقد استعمل حلاً لنظرية أينشتاين في النسبية العامة لوصف خصائص الثقب الأسود، واشتق صيغة لنصف قطر سمّي نصف قطر شوارتزشيلد، لا يمكن للضوء ولا للمادة الإفلات من قوة الجاذبية خلاله. ويعبر عن نصف قطر شوارتزشيلد بالعلاقة:

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

حيث تمثل G ثابت نيوتن في الجذب الكوني، و M كتلة الثقب الأسود، و c سرعة الضوء.

تُعرف حافة الكرة التي نصف قطرها  $R_s$  بأفق الحدث. وسرعة الإفلات عند أفق الحدث تساوي سرعة الضوء؛ ولأنه لا يوجد شيء يسير بسرعة أكبر من سرعة الضوء فإن الأجسام التي تقترب من هذه المنطقة لا يمكن أن تنجو أو تفلت.

**دلائل مباشرة وغير مباشرة** للثقوب السوداء ثلاث خصائص يمكن قياسها نظرياً، هي: الكتلة، والزخم الزاوي، والشحنة الكهربائية. ويمكن تحديد كتلة

### التوسع

**حل** يمكن تحديد سرعة الإفلات لجسم لدى مغادرته لجرم فضائي وفقاً للمعادلة:

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R_s}}$$

حيث: G ثابت نيوتن في الجذب الكوني، و M كتلة الثقب الأسود، و  $R_s$  نصف قطر الثقب الأسود. بيّن أن هذه السرعة تساوي سرعة الضوء c.

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R_s}}$$

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

عوض مستخدماً

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{2GM} \times c^2}$$

$$v = c$$

وينتج أن

# الفصل 1

## دليل مراجعة الفصل

### 1-1 حركة الكواكب والجاذبية Planetary Motion and Gravitation

#### المفردات

- القانون الأول لكبلر
- القانون الثاني لكبلر
- القانون الثالث لكبلر
- قوة الجاذبية
- قانون الجذب الكوني (العام)

#### المفاهيم الرئيسية

- ينص القانون الأول لكبلر على أن الكواكب تتحرك في مدارات إهليلجية، وتكون الشمس في إحدى البؤرتين.
- ينص القانون الثاني لكبلر على أن الخط الوهمي من الشمس إلى الكوكب يمسح مساحات متساوية في أزمان متساوية.
- ينص القانون الثالث لكبلر على أن مربع النسبة بين الزمنين الدوريين لأي كوكبين يساوي مكعب النسبة بين بعديهما عن الشمس.

$$\left(\frac{T_A}{T_B}\right)^2 = \left(\frac{r_A}{r_B}\right)^3$$

- ينص قانون نيوتن في الجذب الكوني على أن قوة الجاذبية بين أي جسمين تتناسب طردياً مع حاصل ضرب كتلتيهما وعكسياً مع مربع المسافة بين مركزيهما، ويعبر عن قوة الجذب بالعلاقة:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

- يمكن استعمال قانون نيوتن في الجذب الكوني لإعادة كتابة القانون الثالث لكبلر على الصورة الآتية:

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{Gm_s}\right) r^3$$

حيث  $m_s$  كتلة الشمس.

### 1-2 استخدام قانون الجذب الكوني Using the Law of Universal Gravitation

#### المفردات

- مجال الجاذبية
- كتلة القصور
- كتلة الجاذبية
- مبدأ التكافؤ

#### المفاهيم الرئيسية

- يُعبر عن سرعة جسم يتحرك في مدار دائري بالقانون:

$$v = \sqrt{\frac{Gm_E}{r}}$$

- يُعبر عن الزمن الدوري لقمر اصطناعي يتحرك في مدار دائري بالعلاقة:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{Gm_E}}$$

- كل الأجسام لها مجالات جاذبية تحيط بها.

$$g = \frac{Gm}{r^2}$$

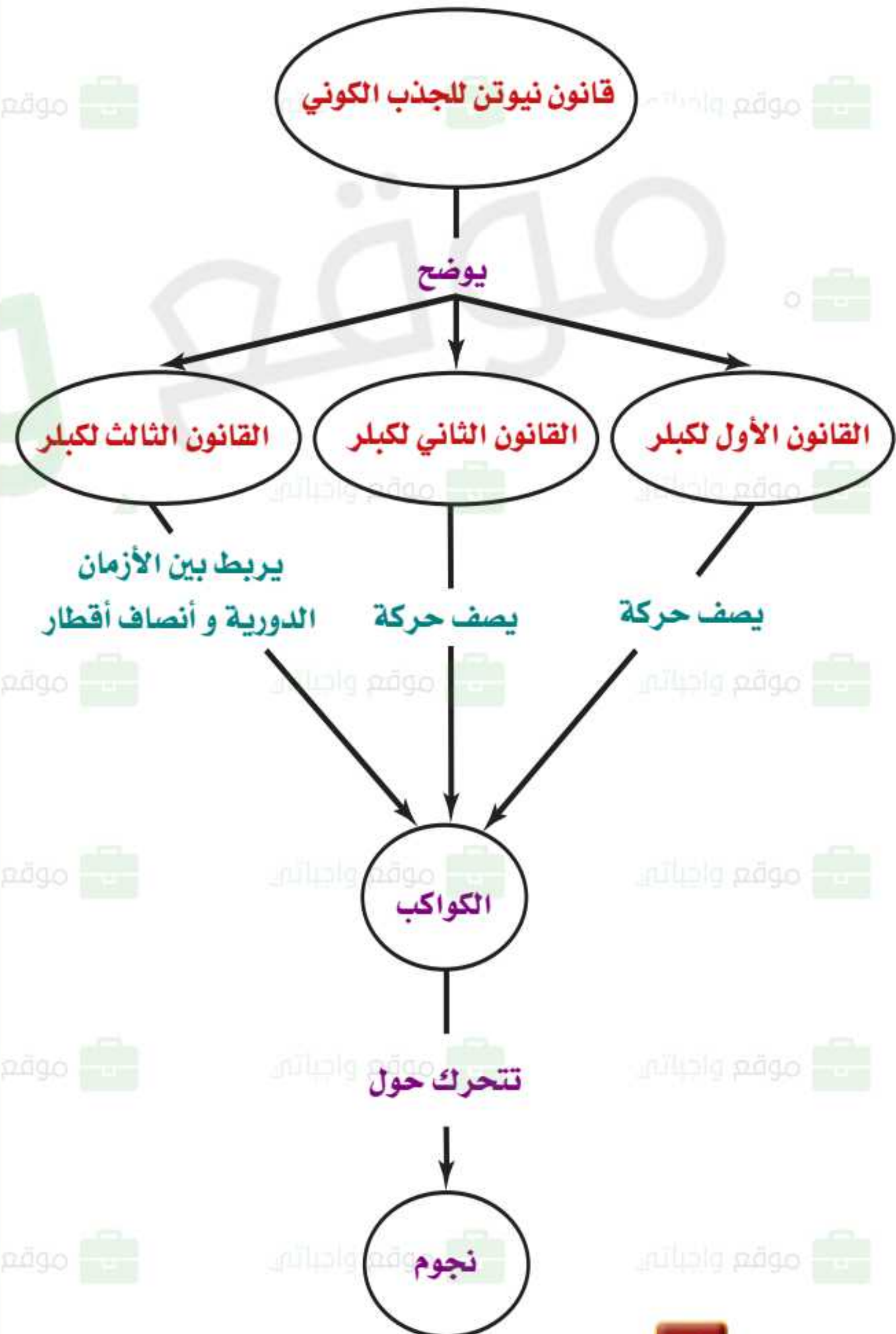
- كتلتا القصور والجاذبية مفهومان مختلفان، إلا أنها متساويان في مقدار الكتلتين.

$$m_{\text{القصور}} = \frac{F_{\text{محصلة}}}{a}$$

$$m_{\text{الجاذبية}} = \frac{r^2 F_{\text{الجاذبية}}}{Gm}$$

خريطة المفاهيم

19. كَوْن خريطة مفاهيمية مستعملاً هذه المصطلحات: كواكب، نجوم، قانون نيوتن للجذب الكوني، القانون الأول لكبلر، القانون الثاني لكبلر، القانون الثالث لكبلر.



إتقان المفاهيم

20. تتحرك الأرض في مدارها خلال الصيف ببطء في نصفها الشمالي أكبر مما هي عليه في الشتاء، فهل هي أقرب إلى الشمس في الصيف أم في الشتاء؟ (1-1)

تتحرك الأرض في مدارها ببطء أكبر خلال الصيف، ومن القانون الثاني لكبلر، يجب أن تكون أبعد عن الشمس، لذلك تكون الأرض أقرب إلى الشمس في أشهر الشتاء.

21. هل المساحة التي تمسحها الأرض في وحدة الزمن  $(m^2/s)$  عند دورانها حول الشمس تساوي المساحة التي يمسحها المريخ في وحدة الزمن  $(m^2/s)$  عند دورانه حول الشمس؟ (1-1)

لا، إن تساوي المساحات المقطوعة في وحدة الزمن يُطبّق على كل كوكب على حدة.

22. لماذا اعتقد نيوتن أن هناك قوة تؤثر في القمر؟ (1-1)

عرف نيوتن أن القمر يتحرك في مدار منحني، لذلك؛ فهو متسارع، والتسارع يتطلب وجود قوة مؤثرة فيه.

23. كيف أثبت كافندش وجود قوة جاذبية بين جسمين صغيرين؟ (1-1)

قاس الكتل بدقة وقاس المسافة وقوة التجاذب بينها، ثم حسب قيمة  $G$  باستعمال قانون نيوتن في الجذب الكوني.

# الفصل 1

## التقويم

28. بين أن وحدات  $g$  في المعادلة  $g = F/m$  هي  $m/s^2$  (1-2)

$$\frac{N}{kg} = \frac{kg \cdot m/s^2}{kg} = m/s^2$$

29. لو كانت كتلة الأرض ضعف ما هي عليه مع بقاء حجمها ثابتاً، فماذا يحدث لقيمة  $g$ ؟ (1-2)

**تضاعف قيمة  $g$ .**

**تطبيق المفاهيم**

30. كرة التنس قوة الجاذبية التي تؤثر في جسم ما قرب سطح الأرض تتناسب مع كتلة الجسم. يبين الشكل 1-19 كرة تنس وكرة تنس طاولة في حالة سقوط حر. لماذا لا تسقط كرة التنس بسرعة أكبر من كرة تنس الطاولة؟



$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$m_1$  = كتلة الأرض

$$a = \frac{F}{m_2}$$

$m_2$  = كتلة الجسم

وعليه فإن:

$$a = \frac{G m_1}{r^2}$$

لا يعتمد التسارع على كتلة الجسم، حيث تحتاج الأجسام ذات الكتلة الأكبر إلى قوة أكبر لتتسارع بالمعدل نفسه.

24. ماذا يحدث لقوة الجذب بين كتلتين عند مضاعفة المسافة بينهما؟ (1-1)

وفقاً لقانون نيوتن، فإن  $F \propto 1/r^2$ . فإذا ضاعفنا المسافة قلت القوة إلى الربع.

25. ما الذي يحافظ على القمر الاصطناعي فوقنا؟ وضح ذلك. (1-2)

**سرعته، إذ إنه يسقط طوال الوقت في اتجاه الأرض.**

26. يدور قمر اصطناعي حول الأرض. أي العوامل الآتية تعتمد عليها سرعته؟ (1-2)

a. كتلة القمر.

b. البعد عن الأرض.

c. كتلة الأرض.

**تعتمد السرعة فقط على كل من: b (البعد عن الأرض)، c (كتلة الأرض).**

27. ما مصدر القوة التي تسبب التسارع المركزي لقمر اصطناعي في مداره؟ (1-2)

**قوة الجاذبية بينه وبين الأرض في اتجاه مركز الأرض.**

# الفصل 1

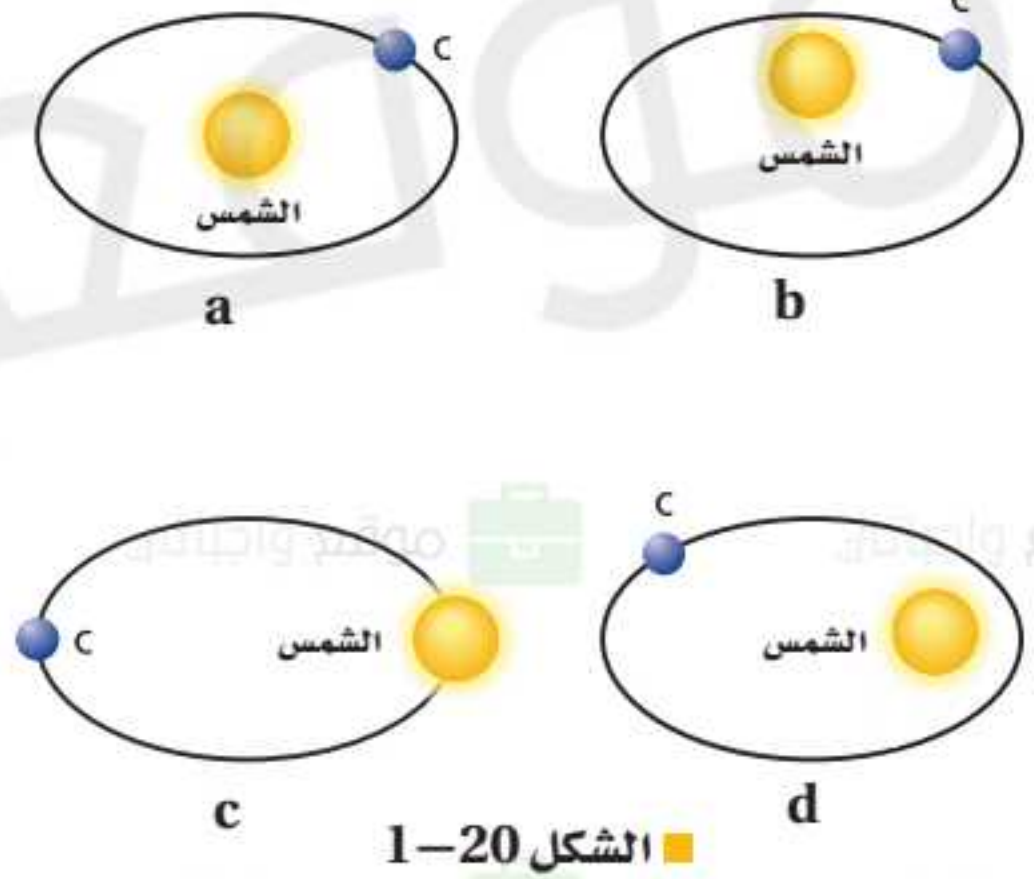
## التقويم

### تطبيق المفاهيم

31. ما المعلومات التي تحتاج إليها لإيجاد كتلة المشتري باستعمال صيغة نيوتن للقانون الثالث لكبلر؟

**يجب أن تعرف الزمن الدوري ونصف قطر المدار لأحد الأقمار على الأقل.**

32. قرّر إذا كان كل مدار من المدارات الموضحة في الشكل 1-20 مدارًا ممكنًا لكوكب ما أم لا.



**d هو المدار الممكن فقط، أما في a و b فلا تكون الشمس في البؤرة، وفي c فإن الكوكب ليس في مدار حول الشمس.**

33. يجذب القمر والأرض كل منهما الآخر، فهل تجذب الأرض ذات الكتلة الأكبر القمر بقوة أكبر من قوة جذب القمر لها؟ فسر ذلك.

**لا؛ حيث إنّ القوتين تمثّلان كلا من الفعل ورد الفعل، وتبعاً للقانون الثالث لنيوتن فهما متساويتان في المقدار ومتعاكستان في الاتجاه.**

## تقويم الفصل 1

34. ماذا يحدث للثابت  $G$  إذا كانت كتلة الأرض ضعف قيمتها، وبقي حجمها ثابتاً؟

**لا يتغير؛ لأن الثابت  $G$  ثابت كوني لا يعتمد على كتلة الأرض. أمّا قوة جذبها فإنها ستتضاعف.**

35. إذا ارتفع مكوك فضاء إلى مدار أبعد من مداره، فماذا يحدث لزمّنه الدوري؟

**وفقاً للمعادلة التالية:**

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{Gm_E}}$$

**فإنه، إذا زاد نصف قطر المدار يزداد الزمن الدوري.**

36. كتلة المشتري أكبر 300 مرة من كتلة الأرض، ونصف قطره أكبر عشر مرات من نصف قطر الأرض. احسب بالتقريب قيمة  $g$  على سطح المشتري.

**$g \propto \frac{m_E}{r_E^2}$ . إذا كانت كتلة المشتري أكبر 300 مرة من كتلة الأرض، ونصف قطره**

**أكبر عشر مرات من نصف قطر الأرض فإن:  $g \propto 300/10^2 = 3$**

**وعليه فإن قيمة  $g$  على المشتري تساوي ثلاثة أمثال قيمتها على الأرض.**

37. إذا ضاعفنا كتلة تخضع لمجال الأرض الجاذبي، فماذا يحدث للقوة التي يولدها هذا المجال على هذه الكتلة؟

**ستتضاعف أيضاً.**

# تقويم الفصل 1

## إتقان حل المسائل

### 1-1 حركة الكواكب والجاذبية

38. المشتري أبعد من الأرض عن الشمس 5.2 مرة. احسب الزمن الدوري له بالسنوات الأرضية.

$$\left(\frac{T_J}{T_E}\right)^2 = \left(\frac{r_J}{r_E}\right)^3$$

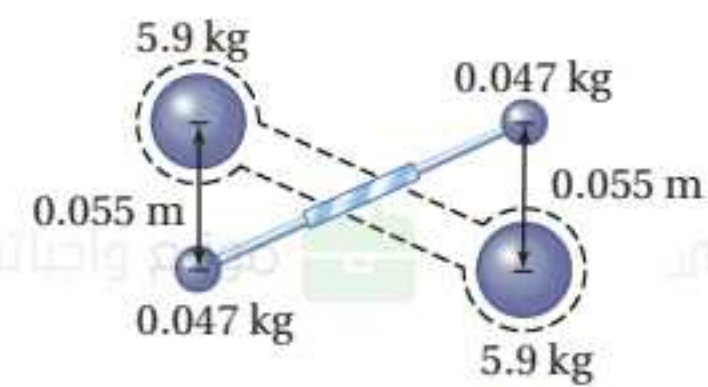
$$T_J = \sqrt{\left(\frac{r_J}{r_E}\right)^3 T_E^2}$$

$$= \sqrt{(5.2/1.0)^3 (1.0 \text{ y})^2}$$

$$= \sqrt{141 \text{ y}^2}$$

$$= 12 \text{ y (سنة أرضية)}$$

39. بين الشكل 1-21 جهاز كافندش المستعمل في حساب  $G$ . وهناك كتلة رصاص كبيرة  $5.9 \text{ kg}$  وكتلة صغيرة  $0.047 \text{ kg}$ ، المسافة بين مركزيهما  $0.055 \text{ m}$ ، احسب قوة التجاذب بينهما.



الشكل 1-21

$$F = G \frac{m_{\text{كتلة كبيرة}} m_{\text{كتلة صغيرة}}}{r^2}$$

$$= (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) \frac{(5.9 \text{ kg})(4.7 \times 10^{-2} \text{ kg})}{(5.5 \times 10^{-2} \text{ m})^2}$$

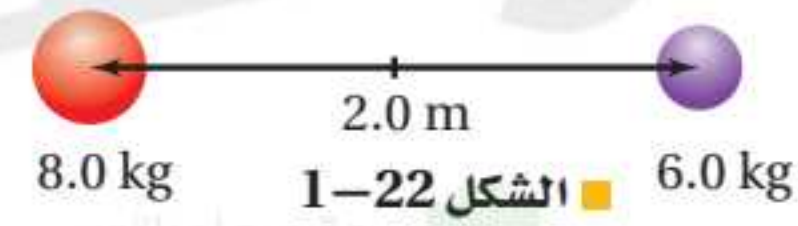
$$= 6.1 \times 10^{-9} \text{ N}$$

## تقويم الفصل 1

40. باستعمال الجدول 1-1، احسب القوة التي تؤثر بها الشمس في المشتري.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$
$$= \frac{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) (1.99 \times 10^{30} \text{ kg}) (1.90 \times 10^{27} \text{ kg})}{(7.78 \times 10^{11} \text{ m})^2}$$
$$= 4.17 \times 10^{23} \text{ N}$$

41. إذا كان البعد بين مركزي كرتين 2.0 m، كما في الشكل 1-22. وكانت كتلة إحداهما 8.0 kg وكتلة الأخرى 6.0 kg، فما قوة الجاذبية بينهما؟



$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$
$$= (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) \frac{(8.0 \text{ kg})(6.0 \text{ kg})}{(2.0 \text{ m})^2}$$
$$= 8.0 \times 10^{-10} \text{ N}$$

42. كرتان متماثلتان، كتلة كل منهما 6.8 kg، والبعد بين مركزيهما 21.8 cm. ما قوة الجاذبية التي تؤثر بها كل منهما في الأخرى؟ (1-2)

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$
$$= (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) \frac{(6.8 \text{ kg})(6.8 \text{ kg})}{(0.218 \text{ m})^2}$$
$$= 6.5 \times 10^{-8} \text{ N}$$

## تقويم الفصل 1

43. إذا كانت قوة الجاذبية بين إلكترونين البعد بينهما 1.00 m تساوي  $5.54 \times 10^{-71} \text{ N}$  ، فاحسب كتلة الإلكترون.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$m_1 = m_2 = m_e \text{ ولما كانت:}$$

فإن:

$$m_e = \sqrt{\frac{Fr^2}{G}}$$

$$= \sqrt{\frac{(5.54 \times 10^{-71} \text{ N})(1.00 \text{ m})^2}{6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2}} \\ = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

44. أورانوس يحتاج أورانوس إلى 84 سنة ليدور حول الشمس. احسب نصف قطر مدار أورانوس بدلالة نصف قطر مدار الأرض.

$$\left(\frac{T_U}{T_E}\right)^2 = \left(\frac{r_U}{r_E}\right)^3$$

$$\frac{r_U}{r_E} = \sqrt[3]{\left(\frac{T_U}{T_E}\right)^2} \\ = \sqrt[3]{\left(\frac{84 \text{ y}}{1.0 \text{ y}}\right)^2}$$

$$= 19$$

لذلك فإن

$$r_U = 19r_E$$

## تقويم الفصل 1

45. كرتان المسافة بين مركزيهما 2.6 m، وقوة الجاذبية بينهما  $2.75 \times 10^{-12} \text{ N}$ . ما كتلة كل منهما إذا كانت كتلة إحداها ضعف كتلة الأخرى؟

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

ولما كانت:  $m_2 = 2m_1$ ، فإن:

$$F = G \frac{(m_1)(2m_1)}{r^2}$$

$$m_1 = \sqrt{\frac{Fr^2}{2G}}$$

$$= \sqrt{\frac{(2.75 \times 10^{-12} \text{ N})(2.6 \text{ m})^2}{(2)(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)}}$$

إلى أقرب رقمين معنويين  $0.37 \text{ kg}$  أو  $0.3733 \text{ kg}$

إلى أقرب رقمين معنويين  $0.75 \text{ kg}$  أو  $0.7466 \text{ kg} = m_2 = 2m_1 = (2)(0.3733 \text{ kg})$

46. تُقاس المساحة بوحدة  $\text{m}^2$ ، لذا فإن المعدل الزمني للمساحة التي يمسحها كوكب أو قمر هي  $\text{m}^2/\text{s}$ .

**a.** ما معدل المساحة ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) التي تمسحها الأرض في مدارها حول الشمس؟

$$r = 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$T = 3.156 \times 10^7 \text{ s}, 365.25 \text{ days} = 1.00 \text{ y}$$

$$\frac{\pi r^2}{T} = \pi (1.50 \times 10^{11} \text{ m})^2 / (3.156 \times 10^7 \text{ s})$$

$$= 2.24 \times 10^{15} \text{ m}^2/\text{s}$$

## تقويم الفصل 1

**b.** ما معدل المساحة ( $m^2/s$ ) التي يمسحها القمر في مداره حول الأرض؟ افترض أن متوسط المسافة بين الأرض والقمر  $3.9 \times 10^8 m$ ، والزمن الدوري للقمر حول الأرض 27.33 يومًا.

$$\frac{\pi(3.9 \times 10^8 m)^2}{(2.36 \times 10^6 s)} = 2.0 \times 10^{11} m^2/s$$

### 1-2 استخدام قانون الجذب الكوني

47. كتاب كتلته  $1.25 kg$  ووزنه في الفضاء  $8.35 N$ ، ما قيمة المجال الجاذبي في ذلك المكان؟

$$g = \frac{F}{m} = \frac{8.35 N}{1.25 kg} = 6.68 N/kg$$

48. إذا كانت كتلة القمر  $7.34 \times 10^{22} kg$  وبُعد مركزه عن مركز الأرض  $3.8 \times 10^8 m$ ، وكتلة الأرض  $5.97 \times 10^{24} kg$ ، فاحسب:

**a.** مقدار قوة الجذب الكلي بينهما.

$$\begin{aligned} F &= G \frac{m_E m_M}{r^2} \\ &= (6.67 \times 10^{-11} N \cdot m^2/kg^2) \frac{(5.97 \times 10^{24} kg)(7.34 \times 10^{22} kg)}{(3.8 \times 10^8 m)^2} \\ &= 2.0 \times 10^{20} N \end{aligned}$$

## تقويم الفصل 1

**b.** مقدار مجال الجاذبية للأرض على القمر.

$$g = \frac{F}{m} = \frac{2.03 \times 10^{20} \text{ N}}{7.34 \times 10^{22} \text{ kg}} = 0.0028 \text{ N/kg}$$

لاحظ أنه استخدم المقدار  $2.03 \times 10^{20} \text{ N}$  بدلاً من  $2.0 \times 10^{20} \text{ N}$  لتجنب الخطأ الناتج عن التقريب.

49. إذا كان وزن أخيك الذي كتلته  $91 \text{ kg}$  على سطح القمر هو  $145.6 \text{ N}$ ، فما قيمة مجال الجاذبية للقمر على سطحه؟

$$F_g = mg$$
$$g = \frac{F_g}{m} = \frac{145.6 \text{ N}}{91.0 \text{ kg}} = 1.60 \text{ N/kg}$$

## تقويم الفصل 1

50. رائد فضاء إذا كانت كتلة رائد فضاء 80 kg، وقد فقد 25% من وزنه عند نقطة في الفضاء، فما شدة مجال جاذبية الأرض عند هذه النقطة؟

$$F_g = mg = (80.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2) = 784 \text{ N}$$

$$F_{g, \text{المختزل}} = (784 \text{ N})(0.750) = 588 \text{ N}$$

$$g_{\text{المختزل}} = \frac{F_{g, \text{المختزل}}}{m} = \frac{588 \text{ N}}{80.0 \text{ kg}} = 7.35 \text{ m/s}^2$$

### مراجعة عامة

51. استعمل البيانات الخاصة بالأرض في الجدول 1-1 لحساب كتلة الشمس باستخدام صيغة نيوتن للقانون الثالث لكبلر.

$$T^2 = \left( \frac{4\pi^2}{Gm} \right) r^3$$

$$mT^2 = \frac{4\pi^2}{G} r^3$$

$$m = \left( \frac{4\pi^2}{G} \right) \frac{r^3}{T^2}$$

$$= \left( \frac{4\pi^2}{6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2} \right) \frac{(1.50 \times 10^{11} \text{ m})^3}{(3.156 \times 10^7 \text{ s})^2}$$

$$= 2.01 \times 10^{30} \text{ kg}$$

## تقويم الفصل 1

52. استعمل البيانات في الجدول 1-1 لحساب مقدار السرعة والزمن الدوري لقمر اصطناعي يدور حول المريخ على ارتفاع 175 km من سطحه.

$$r = r_M + 175 \text{ km} = 3.40 \times 10^6 \text{ m} + 0.175 \times 10^6 \text{ m} \\ = 3.58 \times 10^6 \text{ m}$$

$$v = \sqrt{\frac{GM_M}{r}} \\ = \sqrt{\frac{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(6.42 \times 10^{23} \text{ kg})}{(3.58 \times 10^6 \text{ m})}} \\ = 3.46 \times 10^3 \text{ m/s}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{GM_M}} \\ = 2\pi \sqrt{\frac{(3.58 \times 10^6 \text{ m})^3}{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(6.42 \times 10^{23} \text{ kg})}} \\ = 6.45 \times 10^3 \text{ s أو } 1.79 \text{ h}$$

## تقويم الفصل 1

53. ما سرعة دوران كوكب بحجم الأرض وكتلتها، بحيث يبدو الجسم الموضوع على خط الاستواء عديم الوزن؟ أوجد الزمن الدوري للكوكب بالدقائق.

يجب أن يكون التسارع المركزي مساوياً لتسارع الجاذبية على ألا يؤثر سطح هذا الكوكب بأي قوة (المعروفة باسم الوزن).

$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{m_E m}{r^2}$$

$$v = \sqrt{\frac{Gm_E}{r}}$$

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r}{\sqrt{\frac{Gm_E}{r}}} \quad \text{لذا فإن} \quad v = \frac{2\pi r}{T}$$

$$= 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{Gm_E}}$$

$$= 2\pi \sqrt{\frac{(6.38 \times 10^6 \text{ m})^3}{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(5.97 \times 10^{24} \text{ kg})}}$$

$$= 5.07 \times 10^3 \text{ s} = 84.5 \text{ min}$$

# تقويم الفصل 1

## التفكير الناقد

54. **حلل واستنتج** يقول بعض الناس إن المد الذي يحدث للماء على سطح الأرض تسببه قوة سحب من القمر. هل هذه العبارة صحيحة؟

**a.** أوجد القوى التي تؤثر بها الشمس والقمر في كتلة  $m$  من الماء على سطح الأرض. اجعل إجابتك بدلالة  $m$ .

$$F_{S,m} = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2 \left( \frac{(1.99 \times 10^{30} \text{ kg})(m)}{(1.50 \times 10^{11} \text{ m})^2} \right)$$
$$= (5.90 \times 10^{-3} \text{ N})m$$

$$F_{M,m} = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2 \left( \frac{(7.36 \times 10^{22} \text{ kg})(m)}{(3.80 \times 10^8 \text{ m})^2} \right)$$
$$= (3.40 \times 10^{-5} \text{ N})m$$

**b.** أي الجسمين يجذب الماء الموجود على سطح الأرض بقوة أكبر: الشمس أم القمر؟

**تجذب الشمس الماء الموجود على سطح الأرض بقوة أكبر مرة من قوة جذب القمر له.**

## تقويم الفصل 1

**c.** أوجد الفرق بين القوتين اللتين يؤثر بهما القمر في الماء الموجود على سطح الأرض القريب منه، والبعيد عنه، كما يبين الشكل 1-23، وذلك بدلالة الكتلة  $m$ .



$$F_{M, \text{القريب}} - F_{M, \text{البعيد}} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(7.36 \times 10^{22} \text{ kg})(m) \times \left( \frac{1}{(3.80 \times 10^8 \text{ m} - 6.37 \times 10^6 \text{ m})^2} - \frac{1}{(3.80 \times 10^8 \text{ m} + 6.37 \times 10^6 \text{ m})^2} \right) = (2.28 \times 10^{-6} \text{ N})m$$

**d.** أوجد الفرق بين القوتين اللتين تؤثر بهما الشمس في الماء الموجود على سطح الأرض، القريب منها، والبعيد عنها.

$$F_{S, \text{القريب}} - F_{S, \text{البعيد}} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(1.99 \times 10^{30} \text{ kg})(m) \times \left( \frac{1}{(1.50 \times 10^{11} \text{ m} - 6.37 \times 10^6 \text{ m})^2} - \frac{1}{(1.50 \times 10^{11} \text{ m} + 6.37 \times 10^6 \text{ m})^2} \right) = (1.00 \times 10^{-6} \text{ N})m$$

# تقويم الفصل 1

**e.** أيّ الجسمين - الشمس أم القمر - له فرق كبير بين القوتين اللتين يسببهما على الماء الموجود على سطح الأرض، القريب منه والسطح البعيد عنه؟

## القمر

**f.** لماذا تُعد العبارة الآتية مضلّلة: "ينتج المد عن قوة جذب من القمر"؟ استبدل بها عبارة صحيحة توضح كيف يسبب القمر ظاهرة المدّ على الأرض.

**ينتج المد بسبب الفرق بين قوة جذب القمر للماء الموجود على سطح الأرض القريب منه، وقوة جذبها للماء الموجود على سطح الأرض البعيد عنه.**

## الكتابة في الفيزياء

55. اكتب نبذة عن التطور التاريخي لقياس البعد بين الشمس والأرض.

**أحد القياسات البسيطة التقريبية تمت على يد العالم**

**جيمس برادلي James Bradley عام 1732م. كما يجب أن تناقش الإجابات القياسات**

**التي تمت لمروور كوكب الزهرة والتي رصدت في تسعينيات القرن السابع عشر.**

## تقويم الفصل 1

56. استكشف جهود الفلكيين في اكتشاف كواكب حول نجوم أخرى غير الشمس، وما الطرائق التي استعملها الفلكيون؟ وما القياسات التي أجروها وحصلوا عليها؟ وكيف استعملوا القانون الثالث لكبلر؟

تمكّن علماء الفلك من قياس السرعة الصغيرة للنجوم الناتجة عن قوى جاذبية الكواكب الضخمة المؤثرة فيها، حيث تمّ حساب السرعة من خلال قياس انزياح دوبلر لضوء النجم الناتج عن هذه الحركة. وتتذبذب السرعة بسبب دوران الكواكب حول النجم، مما أتاح لهم حساب الزمن الدوري للكوكب. وبمعرفة السرعة يمكن تقدير أبعاد الكوكب وكتلته. وبمقارنة أبعاد الكواكب في المجموعة الشمسية وأزمانها الدورية بكواكب متعددة، وباستعمال القانون الثالث لكبلر، يمكن للفلكيين أن يحصلوا على أبعاد النجوم والكواكب وكتلها بصورة أفضل.

### مراجعة تراكمية

57. الطائرات أقلعت طائرة من مدينة الدمام عند الساعة 2:20 بعد الظهر، وحطت في مطار الرياض عند الساعة 3:15 بعد الظهر من اليوم نفسه. فإذا كان متوسط سرعة الطائرة في الهواء 441.0 km/h، فما مقدار المسافة بين المدينتين؟

$$\Delta t = 55 \text{ min} = 0.917 \text{ h}$$

$$\bar{v} = \frac{\Delta d}{\Delta t}$$

$$\Delta d = \bar{v} \Delta t$$

$$= (441.0 \text{ km/h})(0.917 \text{ h})$$

$$= 404 \text{ km}$$

## تقويم الفصل 1

58. حشرة البطاطس تدور حشرة كتلتها 1.0 g حول الحافة الخارجية لقرص قطره 17.2 cm بسرعة 0.63 cm/s. ما مقدار القوة المركزية المؤثرة في الحشرة؟ وما المصدر الذي يسبب هذه القوة؟

$$F_c = \frac{mv^2}{r} = \frac{(0.0010 \text{ kg})(0.0063 \text{ cm})^2}{(0.086 \text{ m})} = 5.0 \times 10^{-7} \text{ N}$$

مصدر القوة هو قوة الاحتكاك بين الحشرة والثمرة.

## اختبار مقنن

### أسئلة الاختيار من متعدد

اختر رمز الإجابة الصحيحة فيما يأتي:

1. قمران في مداريهما حول كوكب؛ نصف قطر مدار أحدهما  $8.0 \times 10^6 \text{ m}$  وزمنه الدوري  $1.0 \times 10^6 \text{ s}$ ، ونصف قطر مدار القمر الثاني  $2.0 \times 10^7 \text{ m}$ . ما الزمن الدوري للقمر الثاني؟

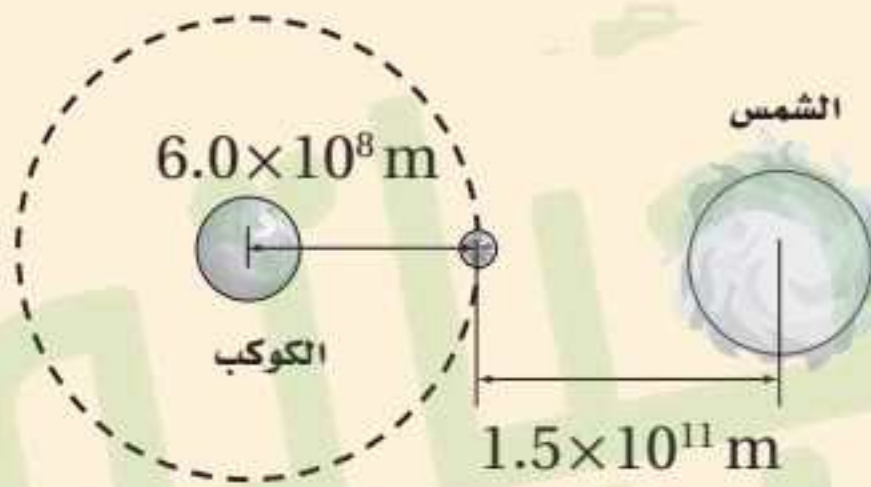
- (A)  $5.0 \times 10^5 \text{ s}$  (B)  $2.5 \times 10^6 \text{ s}$   
(C)  $4.0 \times 10^6 \text{ s}$  (D)  $1.3 \times 10^7 \text{ s}$

2. يبين الرسم الآتي قمرًا نصف قطر مداره  $6.7 \times 10^4 \text{ km}$  ومقدار سرعته  $2.0 \times 10^5 \text{ m/s}$ ، يدور حول كوكب صغير. ما كتلة الكوكب الذي يدور حوله القمر؟

- (A)  $2.5 \times 10^{18} \text{ kg}$  (B)  $4.0 \times 10^{20} \text{ kg}$   
(C)  $2.5 \times 10^{23} \text{ kg}$  (D)  $4.0 \times 10^{28} \text{ kg}$

5. يدور قمر حول كوكب، ويخضع في أثناء ذلك لقوة جذب من الكوكب وقوة جذب من الشمس أيضًا. يبين الرسم أدناه القمر في حالة كسوف الشمس عندما يكون الكوكب والقمر والشمس على خط واحد. فإذا كانت كتلة القمر  $3.9 \times 10^{21} \text{ kg}$ ، وكتلة الكوكب  $2.4 \times 10^{26} \text{ kg}$ ، وكتلة الشمس  $2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$ ، وبُعد القمر عن مركز الكوكب  $6.0 \times 10^8 \text{ m}$ ، وبُعد القمر عن مركز الشمس  $1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ ، فما النسبة بين قوة الجاذبية التي تؤثر بها الكوكب في القمر وقوة الجاذبية التي تؤثر بها الشمس في القمر خلال كسوف الشمس؟

- (A) 0.5 (B) 2.5  
(C) 5.0 (D) 7.5



### الأسئلة الممتدة

6. قمران في مداريهما حول كوكب، فإذا كان القمر  $S_1$  يستغرق 20 يومًا ليدور حول الكوكب ويبعد عن مركزه  $2 \times 10^5 \text{ km}$ ، في حين أن القمر  $S_2$  يستغرق 160 يومًا،

$$6.8 \times 10^5 \text{ km}$$



3. قمران في مداريهما حول كوكب ما. فإذا كانت كتلة القمر A تساوي  $1.5 \times 10^2 \text{ kg}$ ، وكتلة القمر B تساوي  $4.5 \times 10^3 \text{ kg}$ ، وكتلة الكوكب  $6.6 \times 10^{24} \text{ kg}$ ، وكان لمداريهما نصف القطر نفسه وهو  $6.8 \times 10^6 \text{ m}$ ، فما الفرق بين الزمنين الدوريين للقمرين؟

- (A) لا يوجد فرق (B)  $1.5 \times 10^2 \text{ s}$   
(C)  $2.2 \times 10^2 \text{ s}$  (D)  $3.0 \times 10^2 \text{ s}$

4. يدور قمر حول كوكب بسرعة مقدارها  $9.0 \times 10^3 \text{ m/s}$ ، فإذا كانت المسافة بين مركزي القمر والكوكب  $5.4 \times 10^6 \text{ m}$ ، فما الزمن الدوري للقمر؟

- (A)  $1.2 \pi \times 10^2 \text{ s}$  (B)  $6.0 \pi \times 10^2 \text{ s}$   
(C)  $1.2 \pi \times 10^3 \text{ s}$  (D)  $1.2 \pi \times 10^9 \text{ s}$