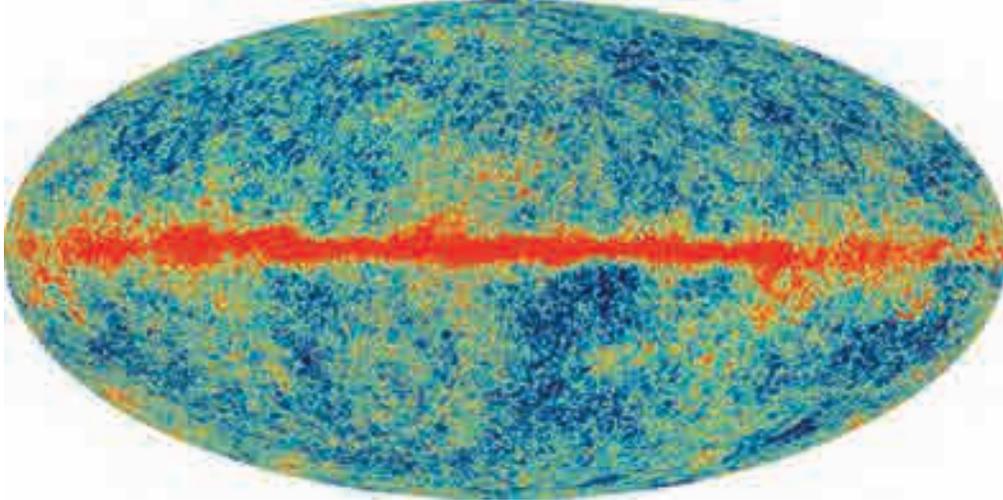


تمثّل الألوان في هذه الخريطة للسماء (WMAP) التغيرات الطفيفة لدرجة الحرارة في الخلفية الإشعاعية المنتظمة الناجمة من أشعة الميكروويف التي حرارتها 2.7-K ، والتي تصلنا من الاتجاهات جميعها في السماء. لقد أنتجت هذه الخريطة في عام 2003، وهي توفر لنا معلومات مفصلة عن أصل الكون وتركيبه. ويشير الشريط الأحمر في المنتصف إلى مجرتنا؛ درب التبانة كما تبدو في صدر الصورة. (اختيرت لتكون خط الاستواء لهذا المسقط من السماء). ولناقشة طبيعة الكون كما هو مفهوم هذه الأيام؛ نختبر النظريات الأخيرة لكيفية تكوّن النجوم والمجرات وتطورها، بما في ذلك التركيب التووي. وسناقش باختصار نظرية أينشتاين للنسبية العامة، والتي تعنى بالجاذبية وحبّ الفضاء. كما سنلقي نظرة عميقة على دلائل تمدد الكون والنموذج القياسي للكون المتطور عن نظرية الانفجار العظيم (*Big Bang*). وسنشير أخيراً إلى بعض المشكلات التي لا تزال بحاجة إلى حلّ، كطبيعة الأجسام المعتمة، والطاقة المعتمة التي تشكّل معظم كوننا.



33 الفصل

الفيزياء الفلكية وعلم الكونيات

درسنا في الفصل السابق أدق الأجسام في الكون وهي الجسيمات الأولية. وسننتقل الآن إلى أضخمها وهي النجوم والمجرات. هذان الموضوعان النقيضان: الجسيمات الأولية والأجسام الكونية يُعدّان من ضمن أكثر الموضوعات العلمية إثارة. وبطريقة مدهشة، فإنّ هذين الموضوعين النقيضين يرتبطان معاً بطريقة أساسية كما أشرنا في (الفصل 32).

إنّ استخدام التقنيات والأفكار الفيزيائية لدراسة السماء تعرف عادةً بالفيزياء الفلكية. وتركز على فهمنا النظري السابق للكون والأجسام الكونية اعتماداً على نظرية أينشتاين للنسبية العامة ونظرية الجاذبية. وهناك موضوعات أخرى في الفيزياء تؤخذ بالحسبان انطلاقاً من الكهرومغناطيسية، والديناميكا الحرارية وصولاً إلى الفيزياء الذرية والتووية، بالإضافة إلى الجسيمات الأولية. كما وتعدّ نظرية النسبية العامة أيضاً أساساً لعلم الكونيات الحديث. وهو دراسة الكون كوحدة واحدة. يهتم علم الكونيات خاصة بالبحث عن نظريات هيكلية لفهم الكون الملاحظ حولنا من حيث أصله ومستقبله. إنّ الأسئلة المطروحة من علم الكونيات عميقة وصعبة، والإجابات المحتملة عليها في العادة لا يمكن تخيلها. وهناك بعض الأسئلة التي يجب الإجابة عنها مثل: هل هذا الكون كان موجوداً دائماً؟ هل له بداية زمنية؟

إنَّ أيًّا من هذين السؤالين صعب تخيله: هل يمكن العودة بالزمن إلى الماضي عند بداية الكون؟ وماذا كان قبل ذلك؟ وماذا عن حجم الكون: هل هو محدود؟ أم لا نهائي الحجم؟ إنَّ تخيل الحالتين عملية عسيرة؛ فلو كان الكون محدودًا، فليس من المعقول السؤال عما وراءه، لأنَّ الكون هو الموجود كلُّه في هذه الحالة.

لقد حدث تطور كبير في الفيزياء الفلكية وعلم الكونيات في السنوات القليلة الماضية. حتى أنَّ كثيرًا من العلماء أطلقوا عليها العصر الذهبي لعلم الكونيات. وسيكون عرضنا في هذا الفصل نظريًا ولكننا سنتناول فيه معظم الأفكار المطروحة، وسنبداً بنظرة إلى ما نستطيع رؤيته من وراء نطاق كرتنا الأرضية.

1-33 النجوم والمجرات

وفقًا للنظريات القديمة، فإنَّ النجوم، باستثناء عدد قليل منها، تبدو متحركة (الكواكب). وتكون ثابتة على كرة بعد آخر كوكب. فقد كان الكون منسجمًا ذاتيًا، والأرض في مركزه أو بالقرب منه. ولكن في القرون التالية، فإنَّ المشاهدات لأول تلسكوب صنعه جاليليو للسماء عام 1610 غيرت نظرتنا للكون بشكل جذري. ولم نعد نضع أنفسنا في مركز الكون، كما أنَّ نظرتنا للكون أصبحت أكثر اتساعًا. إنَّ المسافات الكونية كبيرة جدًا بحيث نحددها بدلالة الزمن الذي يستغرقه الضوء لقطع مسافة معينة. فعلى سبيل المثال، فإنَّ الثانية الضوئية (light-second) تساوي

$$(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})(1.0 \text{ s}) = 3.0 \times 10^8 \text{ m} = 300,000 \text{ km}$$

أما الدقيقة الضوئية (light-minute) فتساوي $18 \times 10^6 \text{ km}$ ، في حين تساوي السنة الضوئية (light-year \equiv ly)

$$1 \text{ ly} = (2.998 \times 10^8 \text{ m/s})(3.156 \times 10^7 \text{ s/yr}) \\ = 9.46 \times 10^{15} \text{ m} \approx 10^{13} \text{ km}$$

السنة الضوئية
(وحدة)

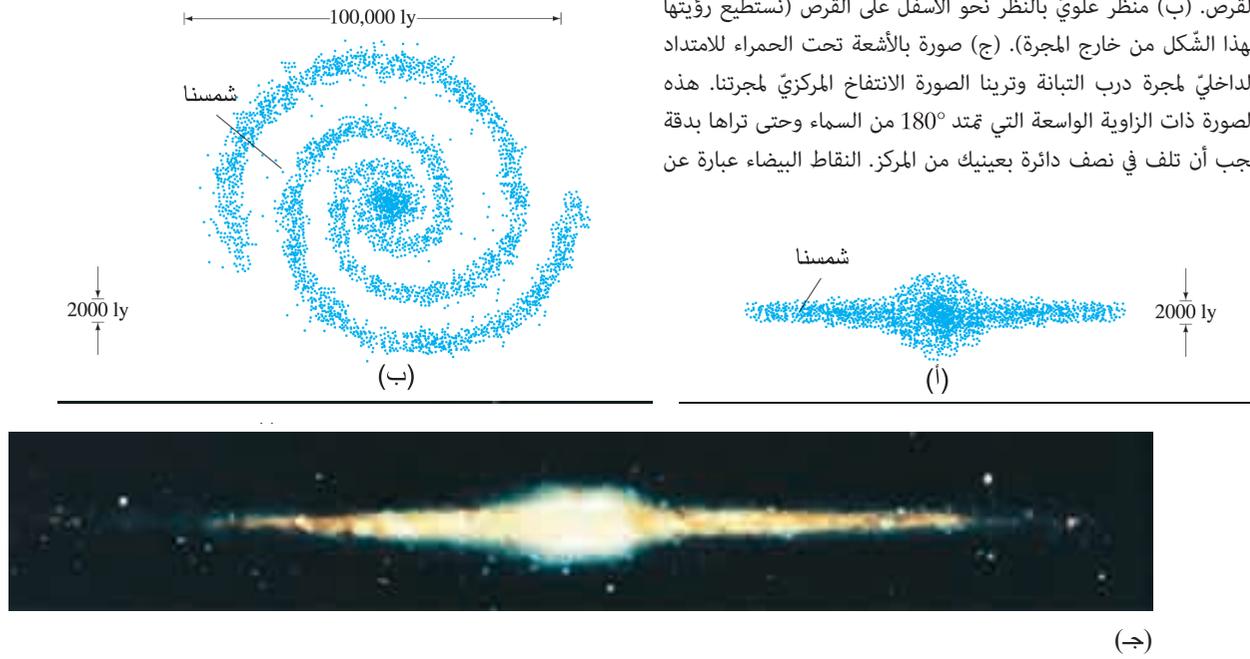
ولتحديد المسافة من الأرض إلى الشمس أو القمر، فإننا نستخدم عادةً وحدة المتر أو الكيلومتر ولكن يمكن أن نحددها بدلالة سرعة الضوء. إنَّ المسافة بين الأرض والقمر تساوي 384,000 km وتساوي 1.28 ثانية ضوئية، أما المسافة بين الأرض والشمس فتساوي $1.50 \times 10^{11} \text{ m}$ أو 150,000,000 km وهذه تساوي 8.3 دقيقة ضوئية. إذا سرنا مسافة أكبر في مجموعتنا الشمسية فإنَّ الكوكب التاسع (بلوتو) يبعد عن الشمس مسافة $6 \times 10^9 \text{ km}$ أو $6 \times 10^{-4} \text{ ly}$.

إنَّ أقرب نجم إلينا، عدا الشمس، هو نجم بروكسيما سينتوري الذي يبعد عنَّا مسافة 4.3 ly (لاحظ أنَّ أقرب نجم يبعد عنا نحو 10,000 مرّة من أبعد نقطة في مجموعتنا الشمسية). وفي ليلة غير مغمرة، يمكن رؤية آلاف النجوم بدرجات متفاوتة في الإضاءة، بما فيها منطقة كثيفة من النجوم تشبه الغيمة تمتد بشكل طولي في وسط السماء تسمّى درب التبانة. أول ملاحظات جاليليو بالتلسكوب الذي صنعه هو أنَّ درب التبانة هو تجمع هائل غير محدود من النجوم المنفردة. وبعد نحو قرن ونصف (عام 1750 تقريبًا) أشار توماس رايت إلى أنَّ درب التبانة قرص مسطح من النجوم تمتد إلى مسافات كبيرة في مستوى نسميها المجرة (Galaxy)، وهي الكلمة الإغريقية المناظرة لدرب التبانة. (شكل 33 - 1).



الشكل 33 - 1: مقطع من مجرة درب التبانة. يمثّل الخط الرفيع مسار قمر أرضي صناعي.

الشكل 33 - 2 مجرتنا كما تبدو من الخارج. (أ) منظر جانبي في مستوى القرص. (ب) منظر علوي بالنظر نحو الأسفل على القرص (نستطيع رؤيتها بهذا الشكل من خارج المجرة). (ج) صورة بالأشعة تحت الحمراء للامتداد الداخلي لمجرة درب التبانة وترينا الصورة الانتفاخ المركزي لمجرتنا. هذه الصورة ذات الزاوية الواسعة التي تمتد 180° من السماء وحتى تراها بدقة يجب أن تلف في نصف دائرة بعينيك من المركز. النقاط البيضاء عبارة عن



إنّ قطر مجرتنا يساوي 100,000 سنة ضوئية تقريباً. وذات سمك يساوي نحو 2000 سنة ضوئية. ولها انتفاخ مركزيّ (نواة). وأذرع لولبية (الشكل 33-2). وتقع شمسنا التي تبدو كنجمة مجاور عند نصف المسافة بين مركز المجرة وحافتها تقريباً. وتبعد نحو 26,000 سنة ضوئية عن المركز. تحتوي مجرتنا على حوالي 100 بليون (10^{11}) نجم. وتدور الشمس في مدار حول مركز المجرة مرة كل 250 مليون سنة تقريباً. وبالتالي تكون سرعتها نحو 200 km/s بالنسبة إلى مركز المجرة. لقد قُدّرت الكتلة الكلية للنجوم كلّها في مجرتنا بحوالي 3×10^{41} kg وهي من المادة التقليدية. وبالإضافة إلى ذلك، هنالك دليل قوي على أنّ مجرتنا محاطة بهالة غير مرئية من مادة معتمة سنناقشها في (البند 33 - 8).

مثال 1-33 تقدير كتلة مجرتنا

احسب الكتلة الكلية لمجرتنا باستخدام المعلومات المعطاة لدوران الشمس (بالإضافة إلى نظامنا الشمسيّ) حول مركز المجرة. افرض أنّ معظم كتلة المجرة مركزة بالقرب من مركزها. **النهج:** نفرض أنّ الشمس والنظام الشمسيّ (الكتلة الكلية m) يتحرك في مسار دائريّ حول مركز المجرة (كتلتها الكلية M). وأنّ هذه الكتلة M يمكن اعتبارها موضوعة في مركز المجرة. وبعد ذلك نطبّق قانون نيوتن الثاني. $F = ma$. حيث a هو التسارع المركزي $a = v^2/r$ و F هي قوة الجاذبية الناتجة من قانون الجذب العام (الفصل 5).

الحل: تدور شمسنا مع نظامنا الشمسيّ حول مركز المجرة بسرعة تساوي $v = 200$ km/s تقريباً وفقاً لأفضل الأقيسة كما ذكرنا سابقاً. وتقع على مسافة من مركز المجرة تساوي $r = 26,000$ ly تقريباً. وباستخدام قانون نيوتن الثاني. نحصل على

$$F = ma$$

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

حيث M هي كتلة المجرة. في حين أنّ m هي كتلة شمسنا ونظامنا الشمسيّ. وبحلّ المعادلة السابقة نحصل على

$$M = \frac{rv^2}{G} \approx \frac{(26,000 \text{ ly})(10^{16} \text{ m/ly})(2 \times 10^5 \text{ m/s})^2}{6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2} \approx 2 \times 10^{41} \text{ kg}$$

ملحوظة: بدلالة عدد النجوم في مجرتنا، إذا كانت كتلة كلّ نجم مثل كتلة شمسنا ($m = 2.0 \times 10^{30}$ kg). فسيكون لدينا نحو 10^{11} أو $(2 \times 10^{41} \text{ kg}) / (2 \times 10^{30} \text{ kg}) \approx 10^{11}$ نجوم تقريباً.



الشكل 33 - 3 هذا العنقود النجمي الكروي موجود في مجموعة هرقل النجمية.

الشكل 33 - 4 هذا السديم الغازي موجود في مجموعة كارينا النجمية، ويبعد عنا حوالي 9000 سنة ضوئية.



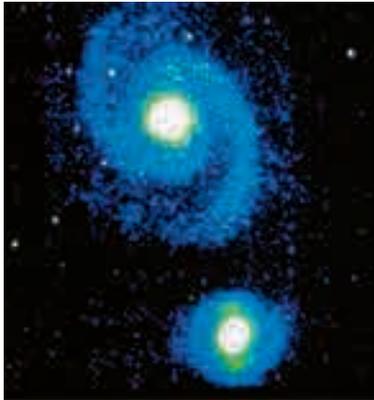
وبالإضافة إلى النجوم الموجودة داخل مجرة درب التبانة وخارجها، نستطيع أن نرى بالتلسكوب بقايا غيمية باهتة في السماء، تُسمى السُّدُم (nebulae). بعض من هذه السُّدُم موجودة في تجمعات أندروميديا وأوريون النجمية، والتي يمكن تمييزها بالعين المجردة في الليالي الصافية. وهناك بعض العناقيد النجمية (الشكل 33 - 3) وهي مجموعات من النجوم كثيرة العدد، والتي تظهر على شكل غيمة. كما أنّ هناك غيومًا متوهجة من الغاز أو الغبار (الشكل 33 - 4). ولهذا، فإننا نستخدم الآن كلمة **سديم**. أمّا أكثرها سحرًا فهي تلك التي تعود إلى فئة ثالثة، والتي عادةً ما يكون لها شكل إهليلجيّ، وتبدو على مسافة هائلة خارج مجرتنا. ويبدو أنّ إيمانويل (حوالي عام 1755) هو أول من اقترح أنّ هذه الأخيرة قد تكون أقراصًا دائرية، ولكنها تبدو إهليلجية لأننا نراها بزوايا معينة، وتكون باهتة لأنّها على مسافة كبيرة. في البداية، لم يُقبل عالميًا أنّ هذه الأجسام خارج مجرتنا. لقد أظهرت التلسكوبات الكبيرة التي صمّمت في القرن العشرين أنّ التجموع المنفردة يمكن أن تكون من ضمن التي تقع خارج المجرة، والتي يحتوي الكثير منها على أذرع لولبية. كما قام إدوين هابل (1889 - 1953) بالكثير من هذه المشاهدات العملية في عشرينيات القرن الماضي (1920 s) باستخدام تلسكوب قطره 2.5-m (100-inch) بالقرب من لوس أنجلوس في كاليفورنيا. وبعدها، أصبح الكون أكثر اتساعًا. أظهر هابل أنّ هذه الأجسام، في الواقع، تقع خارج مجرتنا بسبب بعدها الكبير. إنّ المسافة لأقرب مجرة عنا* هي مجرة أندروميديا، أكبر من مليوني سنة ضوئية، وهي مسافة أكبر بعشرين مرة من قطر مجرتنا. ويبدو منطقيًا أنّ هذه السُّدُم هي مجرات مشابهة لمجرتنا (لاحظ أننا، عادة، نستخدم لفظ المجرة للإشارة إلى مجرتنا). ومن المعتقد أنه في هذه الأيام لدينا حوالي $10^9 \times 40$ مجرة في الكون المشاهد. وهذا عدد تقريبي؛ لأنّ هنالك عدة مجرات تبدو كنجوم في مجرات أخرى. انظر (الشكل 33-5).

عدة مجرات تبدو في مجموعات على شكل **مجرة عنقودية** ترتبط مع بعضها بقوة الجذب الكتلية المتبادلة. ومن الممكن أن يكون في أيّ مكان من المجرات في كلّ عنقود أو عدة آلاف منها.

* 2.5 m (= 100 inches) تشير إلى قطر المرآة الشيئية المحدبة. كلّما كبرت المرآة، كلما جمعت كمية أكبر من الضوء (كثافة أكبر) وكلّما قل حيود الضوء (الوضوح وقوة التمييز) وبالتالي يمكن رؤية نجوم أكثر وخاصة الخافتة منها. ارجع إلى الفصل 25، بقيت الألواح/أو الأفلام الفوتوغرافية حتى وقت قريب هي ما يستعمل في الحصول على صور تحتاج إلى وقت طويل للتعرف للضوء. أمّا الآن فتستخدم أجهزة استشعار الحالة الصلبة CCD (الفصل 25-1) وهي متوفرة بقوة 100 جيجا بكسل بالمقارنة مع 5 أو 6 ميجابكسل تتوفر في الكاميرات الرقمية.

** غيوم مجلان أقرب إلينا من مجرة أندروميديا، ولكنها صغيرة لدرجة أنّها تعتبر مجرات ثابتة لمجرتنا.

الشكل 33 - 5 صور للمجرات. (أ) مجرة لولبية في مجموعة هيدرا النجمية. (ب) مجرتان؛ الكبيرة منهما والأكثر إثارة تعرف باسم مجرة الحوض الدوار. (ج) صورة بالأشعة تحت الحمراء بألوان غير حقيقية للمجرتين الموضحتين في الشكل (ب)، وهنا تبدو الأذرع اللولبية أكثر انتظامًا من الصورة بالضوء المرئي (ب)، الألوان المختلفة تعود إلى اختلاف الكثافات الضوئية. يتبعثر الضوء المرئي (أو يُستطار) ويمتص من الغبار الكوني أكثر من الأشعة تحت الحمراء. لذلك، فإنّ الأخيرة تظهر صورة أكثر وضوحًا.



(ج)



(ب)



(أ)

الجدول 33 – 1 المسافات السّماوية

المسافة من الأرض	تقريباً
الكوكب	
قمر	4×10^{-8}
شمس	1.6×10^{-5}
حجم النظام الشمسي (المسافة للوصول إلى بلوتو)	6×10^{-4}
أقرب نجم (بروكسيما سنوري)	4.3
وسط مجرتنا	2.6×10^4
أقرب مجرة كبيرة	2.4×10^6
أبعد المجرات	10^{10}

بالإضافة إلى ذلك، فإنّ العناقيد نفسها تبدو مرتبة في جمعات أكبر تُسمّى **عناقيد فائقة (super clusters)**. أبعد مجرّة مرصودة تقع على مسافة من الرتبة 1010 سنة ضوئية. انظر (الجدول 33 – 1).

مثال مفاهيمي 2-33 النظر إلى الزمن الماضي

يرى الفلكيون تلسكوباتهم عادة كآلة زمنية تنظر إلى الزمن الماضي لمعرفة أصل الكون. ما الزمن الماضي الذي يمكن رصده؟
الإجابة: تقيس المسافة بالسنة الضوئية بدقة الزّمن بالسنوات الذي يستغرقه الضّوء للوصول إلينا. وعليه، فإنّ (الجدول 33 – 1) يخبرنا عن الزمن الماضي الذي يمكن رصده. فعلى سبيل المثال، إذا شاهدنا انفجار قنطورس الأكبر إلى سوبرنوبا اليوم فهذا يعني أنّ هذا الحدث قد ظهر حقيقة قبل 4.3 سنة ماضية. إنّ أبعد مجرة مرصودة والتي تقع على مسافة 10^{10} سنة ضوئية تبعث ضوءاً إذا رأيناها هذه الأيام، فإنّها تكون قد بثته قبل 10^{10} سنة. وهي فترة قريبة من فترة نشوء الكون.

التمرين أ: افرض أنّنا نستطيع رؤية مرآة ضخمة على بعد سنة ضوئية واحدة عنّا. ماذا سنرى في هذه المرآة إذا واجهناها ونحن على سطح الأرض؟ قد تُسمّى هذه آلة زمن. بالإضافة إلى التّجوم العادية، والعناقيد النّجمية، والمجرات، والعناقيد المجرية، والعناقيد الفائقة، فإنّ الكون يحتوي على أجسام أخرى مثيرة، من أمثلتها جُوم تُسمّى العمالقّة الحُمْر، والأقزام البيض، والتّجوم النيوترونية،

وجُوم متمددة تُسمّى النّوفا والنّوفا الفائقة (سوبرنوبا)، والثّقوب السّود التي لها قوة جاذبية عالية لا يستطيع حتى الضّوء الإفلات منها. بالإضافة إلى ذلك، هنالك إشعاعات كهرومغناطيسية تصل الأرض ولكنها لا تبعث من الأجسام النقطية المضيئة التي نسميها التّجوم، وهي خلفية الميكروويف الإشعاعية، والتي تظهر بانتظام من الاتجاهات كافة في الكون. وسوف نناقش لاحقاً هذه الظواهر جميعها.

أخيراً، فإنّ هنالك الأنوية المجرية الفاعلة (AGN) وهي مصادر نقطية مضيئة جدّاً في مراكز المجرات وأكثر مثال مثير لها هو شبيهات النّجوم (كريزارس) والتي تكون مضيئة جدّاً، وتُجب الأضواء النّجمية التي تُحيط بها. ويعتقد أنّ إضاءتها تأتي من المادة التي تبدأ بالسقوط في الثّقوب السّود في مراكز المجرات.

شبيهات النّجوم (Quasars)

2-33 تطوّر النّجوم: ولادة النّجوم وموتها

تبدو النّجوم غير متغيرة، وليلة بعد أخرى، فإنّ السماء لا يبدو عليها أيّ تغيّر ملحوظ. في الواقع، وبمقياس الإنسان الزمني، فإنّ الأكثرية السّاحقة للنّجوم تتغيّر بشكل بسيط جدّاً (باستثناء النّوفا والسوبرنوبا وبعض النّجوم المتغيرة). وعلى الرغم من أنّ النّجوم تبدو ثابتة بالنسبة إلى بعضها بعضاً، فإنّ الكثير منها يتحرك بشكل يسمح بكشفه. إنّ سرعة النّجوم بالنسبة إلى النجوم المجاورة يمكن أن تكون مئات الكيلومترات في الثانية الواحدة، ولكن المسافة الهائلة التي تفصلها عنا تجعل هذه الحركة ممكنة الرصد بواسطة قياسات دقيقة فقط. بالإضافة إلى ذلك، فإنّ هنالك مدى هائلا من الإضاءة بين هذه النّجوم. وأنّ الفرق في الإضاءة يعود إلى الفرق في كمية ضوء النّجوم المنبعثة بالإضافة إلى المسافات المختلفة للنّجوم عنا.

لمعان النّجوم وسطوعها

هنالك معامل مفيد للنجم أو المجرّة وهو **السطوع** (أو السّطوع المطلق)، ويرمز إليه بالرمز (L) ، ويعني القدرة الكلية المشعة بوحدة الواط. بالإضافة إلى ذلك، فإنّ هنالك معاملاً آخر هو **البريق الظاهري** (l) الذي يعرف بأنه القدرة التي تقطع وحدة المساحة من سطح الأرض عمودياً على مسار الضّوء. إذا أعطيت أنّ الطاقة محفوظة، وبإهمال أيّ امتصاص في الفضاء، فإنّ القدرة الكلية المنبعثة L عندما جتاز مسافة d من النّجم سوف تنتشر على كرة مساحة سطحها $4\pi d^2$. وإذا كانت d هي المسافة من النّجم إلى الأرض، فإنّ L يجب أن تساوي $4\pi d^2$ مضروبة في l (القدرة بوحدة المساحة على سطح الأرض). أي أنّ

$$l = \frac{L}{4\pi d^2} \quad (1 - 33)$$

مثال 3-33 البريق الظاهري

افرض أن نجمًا معيّنًا له سطوع مطلق يساوي السطوع المطلق للشمس. ولكنه يبعد 10 ly عن الأرض. ما النسبة بين بريقه الظاهري والبريق الظاهري للشمس؟
النّهج: السطوع L لكلا النجمين متساوٍ. لذا، فإنّ البريق الظاهري يعتمد فقط على بعدهما عن الأرض. ونستخدم قانون التربيع العكسي الموضح في (المعادلة 33 - 1) لإيجاد البريق الظاهري النسبي.

الحل: باستخدام (المعادلة 33 - 1). فإنّ النجم يبدو أكثر بريقًا من الشمس بنسبة

$$\frac{l_{\text{star}}}{l_{\text{Sun}}} = \frac{d_{\text{Sun}}^2}{d_{\text{star}}^2} = \frac{(1.5 \times 10^8 \text{ km})^2}{(10 \text{ ly})^2 (10^{13} \text{ km/ly})^2} \approx 2 \times 10^{-12}.$$

لقد بينت دراسات دقيقة للنجوم القريبة أنّ السطوع المطلق يعتمد على الكتلة: * فكلما كانت كتلة النجم أكبر كان سطوعه أكبر. وهناك عامل مهم آخر للنجم هو درجة حرارة سطحه، والتي يمكن إيجادها من الطيف أو الترددات الكهرومغناطيسية التي يبثها. تمامًا كالجسم الأسود (البند 27 - 2). وكما رأينا في (الفصل 27)، فإنّه كلما ازدادت درجة حرارة الجسم، انزاح الطيف بعيدًا عن الترددات المنخفضة (الأطوال الموجية الأعلى كالأحمر) باتجاه الترددات العالية (الأطوال الموجية الأقل كالأزرق). وبشكل كميّ، فإنّ العلاقة التي اقترحها فين (العلاقة 27 - 2): طول موجة الذروة λ_P للطيف التاجم عن الضوء المنبعث من الجسم الأسود (والنجوم تقريبًا عبارة عن جسم أسود) تتناسب عكسيًا مع درجة حرارته T بالكلفن. أي أنّ: $\lambda_P T = 2.90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$. وتتراوح درجة حرارة سطح النجوم إلى حدّ ما بين 3500 K (المائل للأحمر) إلى 50.000 K (UV) (فوق البنفسجي).

تزداد شدة الاستضاءة بإزدياد كتلة النجم

مثال 4-33 تحديد درجة حرارة النجم وحجمه

افرض أنّ المسافة بين الأرض ونجمين متقاربين يمكن تقديرها بشكل معقول. وأنّ البريق الظاهري المقيس لهما يدلّ على أنّ كلا النجمين لهما السطوع المطلق L نفسه. يعطي طيف أحد النجمين قيمة قصوى عند طول موجيّ يساوي 700nm تقريبًا (مائل للأحمر). في حين يعطي طيف النجم الأحمر هذه القيمة عند 350nm تقريبًا (مائل للأزرق). استخدم قانون فين (المعادلة 27 - 2) ومعادلة ستيفن - بولتزمان (البند 14 - 8) لإيجاد: (أ) درجة حرارة سطح كلا النجمين. (ب) كم يكبر أحد النجمين عن الآخر؟
النّهج: نجد درجة حرارة سطح كلا النجمين باستخدام قانون فين. وبعد ذلك نستخدم معادلة ستيفن - بولتزمان (تناسب القدرة المعطاة أو السطوع مع AT^4). وعليه، نستطيع تحديد النسبة بين مساحتي سطح النجمين. ومن ثمّ النسبة بين حجميهما.
الحل: (أ) ينصّ قانون فين (المعادلة 27 - 2) على أنّ $\lambda_P T = 2.90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$. لذا، تكون درجة حرارة النجم المائل للأحمر هي

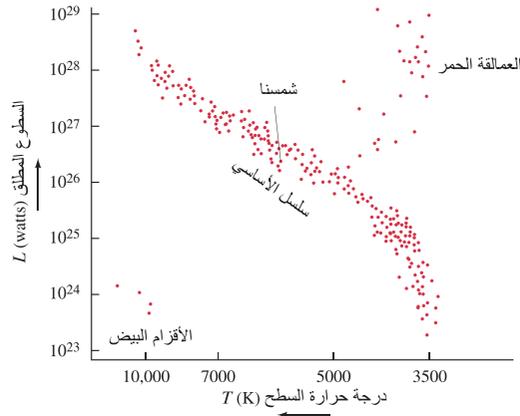
$$T_r = \frac{2.90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{700 \times 10^{-9} \text{ m}} = 4140 \text{ K}.$$

وتكون درجة حرارة النجم المائل للأزرق ضعف هذه القيمة؛ لأنّ الطول الموجيّ يساوي النصف (350 nm مقابل 700 nm). وللتأكد: نطبّق المعادلة مرة أخرى فنحصل على

$$T_b = \frac{2.90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{350 \times 10^{-9} \text{ m}} = 8280 \text{ K}.$$

(ب) معادلة بولتزمان - ستيفن والتي ناقشناها في (الفصل 14) (انظر المعادلة 14 - 5) تنصّ على أنّ القدرة الإشعاعية المنبعثة بوحدة المساحة من الجسم تتناسب مع القوة الرابعة لدرجة الحرارة بالكلفن T^4 . والآن، فإنّ درجة حرارة النجم (المائل للأزرق) ضعف درجة حرارة النجم (المائل للأحمر): أي أنّ النجم المائل للأزرق يبث طاقة بوحدة المساحة أكبر بـ $16 = 2^4$ مرة من النجم (المائل للأزرق). أعطينا أنّ النجمين لهما السطوع نفسه (القدرة المعطاة نفسها). وأنّ مساحة النجم الأزرق تساوي $\frac{1}{16}$ من مساحة النجم الأحمر). وحيث إنّ مساحة السطح تساوي $4\pi r^2$. فإنّنا نستنتج أنّ نصف قطر النجم الأحمر يساوي $\sqrt{16}$ مرات أكبر من النجم الأزرق. إذن، فحجمه أكبر $64 = 4^3$ مرة من النجم الأحمر.

* ينطبق على النجوم "تسلسل رئيسي" (انظر الصفحة التالية)، ويمكن تحديد كتلة نجم من خلال مراقبة آثاره الجانبية. العديد من النجوم هي جزء من الكتلة. وأبسط كونها نجمة ثنائية في اثنين من النجوم التي تدور حول بعضها البعض. ما يسمح تحديد الجماهير وذلك باستخدام ميكانيكا التناوب.



الشكل 33 - 6 مخطط هيتزبرغ - رسل (H - R). لاحظ أن درجة الحرارة تزداد نحو اليسار.

مخطط (H - R)

هناك اكتشاف فلكي مهم تم الوصول إليه في عام 1900 تقريباً. وهو أنه لمعظم النجوم، يرتبط اللون بالسطوع المطلق. أي بالكتلة. وهناك طريقة مفيدة لتمثيل هذه العلاقة هي ما يُسمّى مخطط هيتزبرغ - رسل (H - R). في مخطط (H - R)، يشير المحور الأفقي إلى درجة الحرارة T . في حين يمثل المحور العمودي السطوع L . وكل نجم يُمثّل بنقطة على هذا المخطط. (الشكل 33 - 6). تقع معظم النجوم على الخط القطري الذي يعرف بالسلسلة الأساسي (main sequence). إذا بدأنا من أسفل اليمين، فسنعجد النجوم الأبرد، وهي النجوم الأكثر احمراراً، والأقل سطوعاً. لذا، فكتلتها أقل. وإذا ابتعدنا إلى اليسار أكثر فإننا نجد النجوم الأكثر حرارة، والأكثر سطوعاً، وهي النجوم البيضاء، كشمسنا. أمّا إذا ابتعدنا أكثر إلى اليسار، فسنعجد النجوم الأكبر كتلة، والأكثر سطوعاً، وذات اللون الأزرق. تسمّى النجوم التي تقع على هذا الخط القطري نجوم التسلسل الأساسي. وهناك أيضاً نجوم تقع خارج هذا التسلسل الأساسي. وفي أعلى اليمين، نجد النجوم المتطرفة الكبيرة التي يكون لها سطوع كبير، ولكن يكون لها لون أحمر، وحرارة منخفضة، وتُسمّى العمالقة الحمراء (red giants). وفي أسفل اليسار، نجد عدداً قليلاً من النجوم ذات سطوع قليل، وبدرجة حرارة عالية تُسمّى الأقزام البيضاء (white dwarfs).

مخطط H - R

نجوم التسلسل الرئيس

العمالقة الحمراء
الأقزام البيضاء

مثال 33-5 تقدير بعد النجوم باستخدام مخطط H-R واللون

افرض أنّ تفاصيل دراسة نجم معين أشارت إلى أنه يقع على التسلسل الأساسي لمخطط H - R. إذا كان بريقه الظاهري هو $l = 1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ والطول الموجي المقابل لأقصى نقطة على طيفه هو $\lambda_p \approx 600$ ، فقدّر بعده عنا. **النهج:** نجد درجة الحرارة باستخدام قانون فين. (المعادلة 27 - 2). السطوع المطلق له يقدر من موقعه على التسلسل الأساسي في مخطط H - R في (الشكل 33 - 6). ثم نجد المسافة باستخدام المعادلة 33 - 1. **الحل:** من قانون فين (المعادلة 27 - 2)، فإنّ درجة حرارة النجم تساوي

$$T \approx \frac{2.90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{600 \times 10^{-9} \text{ m}} \approx 4800 \text{ K}.$$

وعند درجة الحرارة هذه، فإنّ النجم على التسلسل الأساسي في مخطط H - R سيكون له سطوع مطلق يساوي $L \approx 1 \times 10^{26} \text{ W}$ تقريباً. وبالقراءة من (الشكل 33 - 6)، وبالتالي من (المعادلة 33 - 1) نحصل على

$$d = \sqrt{\frac{L}{4\pi l}} \approx \sqrt{\frac{1 \times 10^{26} \text{ W}}{4(3.14)(1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2)}} \approx 3 \times 10^{18} \text{ m}.$$

وتكون مسافته عنا بالسنة الضوئية

$$d = \frac{3 \times 10^{18} \text{ m}}{10^{16} \text{ m/ly}} \approx 300 \text{ ly}.$$

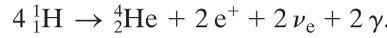
التمرين ب قدر بعد نجم درجة حرارته 6000 K و سطوعه الظاهري $2.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$

التطور النجمي؛ السلسلة النووية

السؤال الذي يطرح نفسه الآن هو: لماذا هذه الأنواع المختلفة من النجوم مثل العملاقة الحمراء والأقزام البيضاء ونجوم التسلسل الأساسي؟ هل ولدت جميعها في البداية بالطريقة نفسها وبالزمن ذاته؟ أم أنّ الأنواع المختلفة تمثل أعماراً مختلفة في دورة حياة كل نجم؟ لاحظ أننا لا نستطيع تتبع حياة أي نجم لأنّ أصغر جزء من دورة حياة أي نجم أكبر بكثير من الحياة التي نعيشها. وقد تصل إلى ملايين أو بلايين السنوات. ومع هذا، دعنا نتبع آلية تطور نجم من ولادته وحتى مماته. كما صممها نظرياً الفيزيائيون الفلكيون هذه الأيام.

ولادة نجم

يُعتقد أنّ النجوم تولد عندما تنقبض غيمة غازية (معظمها من الهيدروجين) بسبب شدة قوة الجاذبية. الغيمة الموجبة الضخمة من الممكن أن تتجزأ إلى عدة كتل متركزة، وكلّ منها يتمركز في الحيز الذي تكون فيه الكثافة أكبر قليلاً من النقاط المجاورة، وبالتالي فإنّ كلّ كتلة متكونة تعمل الجاذبية على جذبها باتجاه مركز كتلتها. وعندما تتسارع جسيمات هذا النجم الأولي، فإنّ طاقتها الحركية تزداد. وإذا أصبحت الطاقة الحركية عالية بشكل كافٍ، فإنّ قوى التنافر الكولومية بين الشحنات الموجبة لا تكون قوية بشكل كافٍ لإبقاء أنوية الهيدروجين بعيدة عن بعضها. ما يؤدي إلى حدوث اندماج نووي. وفي نجم كشمسنا، فإنّ حرق (H_2) الهيدروجين* (أي حدوث الاندماج) يظهر بطريقة حلقة البروتون - بروتون (الجزء 31 - 3، المعادلات 6 - 31). وفيها تندمج أربعة بروتونات لتكون نواة 4He مع انبعاث أشعة جاما وبوزيترونات ونيوترينوات:



تحتاج هذه التفاعلات إلى درجة حرارة تساوي نحو $10^7\ K$ ، وتقابل متوسط طاقة حركية (kT) تساوي $1\ keV$ تقريباً (المعادلة 13 - 8). وفي النجوم ذات الكتل الأكبر، فإنّ حلقة الكربون تنتج الأثر نفسه: أربع أنوية من 1H تنتج 4He نواة (انظر البند 31 - 3). يحدث تفاعل الاندماج بدايةً في قلب النجم، حيث تكون درجة الحرارة T عالية بما فيها الكافية. (تكون درجة حرارة سطح النجم بالطبع أقلّ كثيرًا، وبرتبة تصل إلى بعض الآلاف من الكلفن). وينتج الانطلاق المروع للطاقة في هذه التفاعلات الاندماجية ضغطًا خارجيًا كافيًا لإيقاف التجاذب الكتلي للداخل. وهنا، تشكل البروتونات النجمية جُماً يافعاً يثبت على التسلسل الأساسي. وعندما يقع النجم على التسلسل الأساسي، فإنّ هذا يعتمد تمامًا على كتلته. وكلما كان النجم ذا كتلة أكبر وقع إلى الأعلى (وإلى اليسار) في مخطط $H - R$ في (الشكل 33 - 6). ولاجتياز التسلسل الأساسي: فإنّنا نحتاج إلى 30 مليون سنة إذا كان النجم مثل شمسنا، مع العلم أنّه من المتوقع بقاؤه في موقعه** هذا على التسلسل الأساسي نحو 10 بلايين سنة ($10^{10}\ yr$)

حلقة البروتون - حلقة بروتون

حلقة بروتون

حلقة الكربون

اجتياز التسلسل

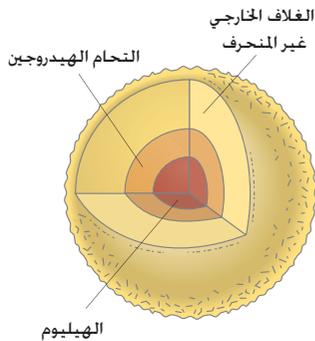
الأساسي

الشكل 33 - 7 حرق الهيدروجين (اندماجه لتكوين الهيليوم) يحيط بالقلب حيث يتكاثف الهيليوم المتكوّن حديثًا.

وعلى الرغم من أنّ معظم النجوم يصل عمرها إلى بلايين السنين، إلا أنّ هنالك دلائل على حقيقة أنّ بعض النجوم تولد في هذه اللحظة. عندما يندمج الهيدروجين لتكوين الهيليوم، فإنّ الهيليوم المتكوّن يصبح أكثر كثافة، ويتجه للتكتل في القلب المركزي الذي تتشكّل فيه. وكلما نما قلب الهيليوم، استمر الهيدروجين بالاندماج في قشرة حوله. انظر إلى (الشكل 33 - 7). عندما تستهلك كمية كبيرة من الهيدروجين داخل القلب، فإنّ إنتاج الطاقة يقلّ في المركز، ولا يطول الأمر بشكل يكفي لإعاقة قوة الجاذبية الهائلة، وهو ما يجعل القلب ينقبض ويزداد حرارة. ويندمج الهيدروجين في القشرة حول القلب بشكل عنيف بسبب ارتفاع الحرارة، ما يسبب تمدد الغلاف الخارجي وبرودته. وبالتالي، فإنّ درجة حرارة سطح النجم تقلّ ما يؤدي إلى إنتاج طيف ضوئيّ تكون قمته على طول موجي أكبر (أكثر احمرارًا).

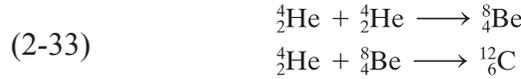
* تستخدم كلمة حرق في تفاعلات الاندماج ذات الحرارة العالية، والتي تحدث بعملية نووية ولا تقارن بعملية الاحتراق العادية (مثل احتراق الورق، أو الخشب، أو الفحم) والتي هي عبارة عن تفاعل كيميائيّ يحدث على مستوى الذرة (وله درجة حرارة أقلّ بكثير).

** بما أن النجوم الكبيرة أكثر سخونة ويمكن التغلب على قوى التنافر بسهولة أكبر، فإنها تحترق بسرعة أكبر، وبالتالي تستنفذ وقودها بسرعة مما يؤدي إلى فترة حياة أقصر، فمثلًا، نجم بكتلة تساوي 10 أضعاف كتلة شمسنا، فستعيش مدة أطول من فترة حياة شمسنا $10^{10}\ yr$.



حتى هذا الوقت، يكون النجم إلى يسار التسلسل الأساسي. يصبح النجم أكثر احمرارًا. وعندما يزداد حجمه، يصبح أكثر سطوعًا. وبعد ذلك، يبدأ بالتحرك نحو اليمين وإلى الأعلى على مخطط H – R كما هو موضح في (الشكل 33 – 8). وكلما حرك إلى الأعلى، فإنه يقترب من مرحلة العملاقة الحمراء. لذا، فإنّ النظريات تناقش أصل العملاقة الحمراء كخطوة طبيعية لتطور النجم. إنّ شمسنا، على سبيل المثال، موجودة في التسلسل الأساسي منذ $4\frac{1}{2}$ بليون سنة تقريبًا. وستبقى هناك مدة 4 أو 5 بلايين سنة أخرى. وعندما تغادر شمسنا التسلسل الأساسي، فمن المتوقع أن ينمو قطرها (عندما تصبح عملاقًا أحمر) أكبر 100 مرة أو أكثر. وعندها ستبتلع كوكبًا أو أكثر من الكواكب الداخلية (المريخ، الزهرة وربما الأرض).

وإذا كان النجم كبيرًا كشمسنا، فإنّ انشطارات أكثر يمكن أن تحدث. وعندما تصل درجة الحرارة إلى حوالي 10^8 K، فإنه حتى أنوية الهيليوم بالرغم من شحنتها الأكبر وبالتالي التنافر الكهربائي الأكبر، يمكن أن تقترب من بعضها لتعمل اندماجًا تكون تفاعلاته كما يلي:



مع انبعاث فوتونين من أشعة γ . هذان التفاعلات يظهران بشكل سريع على التوالي (لأنّ غير مستقر بشكل كبير) وبالتالي يكون التأثير النهائي لهذه التفاعلات:

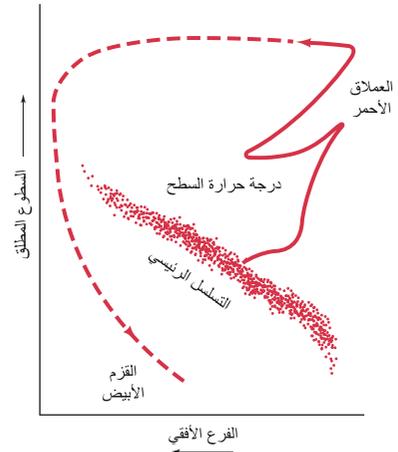


بسبب هذا الاندماج للهيليوم تغيرًا في النجم الذي يتحرك بسرعة على التفرع الأفقي على مخطط H – R (الشكل 33 – 8). بالإضافة إلى ذلك، فإنّ تفاعلات الاندماج النووي لـ 4He مع 12C يمكنه لتكوين 16O . وفي النجوم ذات الكتل الأكبر، فإنّ عناصر لها عدد ذري (Z) أكبر مثل 20Ne أو 24Mg يمكن أن تتكوّن. وتسمّى هذه الآلية لتكوين أنوية أثقل من أنوية أخف (أو بامتصاص النيوترونات والذي يظهر عند الأعداد الذرية الأكبر) السلسلة النووية.

إنّ نهاية النجم تعتمد على كتلته؛ فالنجوم تفقد الكتلة التي تتسرب من غلافها إلى الفضاء الخارجي. تولد النجوم بكتلة تساوي 8 أو 10 أضعاف كتلة الشمس، وتنتهي أخيرا بكتلة متبقية أقل من حوالي 1.4 من كتلة الشمس، والتي تعرف باسم نهاية غاندراسيخز وعند هذه الكتلة لا يمكن أن يظهر مزيدًا من طاقة الاندماج النووي.

قلب هذا النجم قليل الكتلة (الذي كتلته الأساسية ≥ 8 كتل شمسية)، ويتقلص تحت تأثير الجاذبية، ويتمدد غلافه الخارجي مرة أخرى. ويصبح النجم عملاقًا أحمر كاملاً. وأخيرا، تتسرب الطبقة الخارجية إلى الفضاء، وينكمش القلب، ويبرد النجم، وإلى حدّ نموذجي يتبع المسار الموضح في (الشكل 33 – 8). ومن ثمّ يهبط إلى الأسفل ليصبح قزمًا أبيض. إنّ القزم الأبيض بكتلة تساوي كتلة الشمس له حجم يساوي حجم الأرض. إنّ القزم الأبيض يتقلص إلى النقطة التي تبدأ عندها غيمة الإلكترونات بالتداخل، ولكنها لا تنهار أكثر بسبب مبدأ باولي للاستثناء، والذي ينصّ على أنه لا يمكن لإلكترونين أن يكونا في المستوى الكمّي نفسه. إنّ الوصول إلى هذه النقطة يُسمّى تشعب الإلكترون ($electron\ degeneracy$). ويستمر القزم الأبيض في فقدان طاقته الداخلية بالإشعاع فتقل حرارته، ويصبح باهتًا إلى أن يفقد ضوءه تمامًا. وعندها يصبح كومة رماد باردة ومظلمة. ويعتقد بأنّ النجوم التي كتلتها المتبقية أكبر من نهاية غاندراسيخز التي تساوي 1.4 من كتلة الشمس (كتلتها الأصلية أكبر من 8 أو 10 مرات كتلة الشمس) تتبع نمطًا مختلفًا؛ فالنجوم بهذه الكتلة الكبيرة يمكن أن تنكمش وتزداد حرارتها بشكل أكبر. إنّ الأنوية التي بثقل 56Fe و 58Ni في المدى $T = 2.5 - 5 \times 10^9$ K، يمكن أن تتشكل. وهنا يتوقف تكوّن الأنوية الثقيلة من الأنوية الأخف منها بواسطة الاندماج. وكما رأينا في (الشكل 30 – 1)، فإنّ متوسط طاقة الربط لكلّ نيوكليون تبدأ بالتناقص عند عدد كتلي A أكبر من حوالي 60. بالإضافة إلى ذلك، فإنّ الاندماج يحتاج إلى طاقة أكثر من التي يطلقها العناصر الأثقل من النيكل (Ni) يعتقد أنها تتكون أساسًا من التقاط النيوترون، وبشكل جزئي في انفجار السوبرنوف. عدد كبير من النيوترونات الحرة ينتج من التفاعلات النووية، ويظهر داخل النجوم وتستطيع أن تتحد مع نواة 56Fe على سبيل المثال لتكوين (عند التقاط ثلاثة منها) نواة 59Fe ، وتستطيع نواة 59Co اقتناص نيوترونات، فتصبح غنية بالنيوترونات، وتنحل بعدها بإصدار β^- وتنتج العنصر الذي يليه مباشرة في الترتيب الدوري بالنسبة للعدد الذري Z ، وهكذا. العناصر الأكبر في العدد الذري Z يعتقد أنها تتكون بطريقة مشابهة بالتقاط النيوترونات خلال انفجار السوبرنوف عندما تتوافر مجموعة من النيوترونات.

العملاقة الحمراء



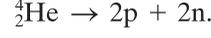
الشكل 33 – 8 مسار تطوّر نجم مثل شمسنا فمثلا على مخطط H – R.

السلسلة النووية

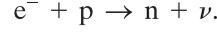
الأقزام البيضاء

إنتاج الأنوية الثقيلة

علاوة على ذلك، وعند درجات الحرارة العالية جداً هذه، والتي تكون أكبر من 10^9K ، فإن الطاقة الحرارية للأنوية تكون عالية جداً بحيث يبقى اندماج الأنوية الأثقل من الحديد ممكناً حتى لو احتاج التفاعل إلى طاقة مدخلة. ولكن الطاقة العالية للاصطدامات يمكن أن تسبب تحطم النيكل أو الحديد لتكوين أنوية الهيليوم He التي تنحل بدورها إلى بروتونات ونيوترونات



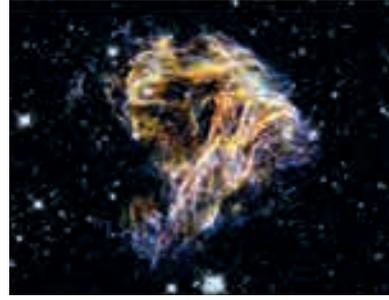
وهذه التفاعلات تحتاج إلى طاقة (ماصة للحرارة)، ولكن عند درجة حرارة وضغط عاليين جداً، فإن الطاقة تكون متوافرة بما يكفي لجمع الإلكترونات والبروتونات مع بعضها لتكوين نيوترونات في عملية معاكسة لانحلال أشعة بيتا:



وعندما ينهار القلب تحت طاقة الجاذبية الهائلة، فإن الكتلة الضخمة تصبح نواة هائلة مصنوعة بشكل كامل من النيوترونات. ويبقى حجم النجم إلى حد ما محدداً مبدأً باولي للاستثناء، والذي يطبق هنا على النيوترونات (*neutron degeneracy*) ويبدأ التجم بالانكماش سريعاً باتجاه تكوين نجم نيوتروني هائل الكثافة. إن انكماش القلب يعني نقصاً كبيراً في الطاقة الكامنة الناجمة عن الجاذبية، وهذه الطاقة يجب أن تتحرر بصورة ما. وفي الواقع، اقترح في ثلاثينيات القرن الماضي أن انهيار القلب النهائي للنجم النيوتروني يصاحبه انفجار هائل تستطيع طاقته الضخمة فعلياً تشكيل عناصر الجدول الدوري كلها. وإطلاق الغلاف الخارجي للنجم بالكامل بعيداً (الشكل 33 - 9). ونشر مكوناته في الفراغ الموجود بين النجوم. ويعتقد أن مثل هذه الانفجارات هي السبب في بعض انفجارات السوبرنوفات الملحوظة، حيث يشير وجود العناصر الثقيلة على الأرض وفي نظامنا الشمسي إلى أن نظامنا الشمسي قد تشكل من هذه الانفجارات.

النجوم النيوترونية

انفجار السوبرنوفات



الشكل 33 - 9 هذه الخيوط المتوهجة التي رصدت بتلسكوب هبل الفضائي، هي بقايا انفجار سوبرنوفات الذي وصل ضوءه الأرض بعد آلاف السنوات. وفي الداخل، هنالك نجم نيوتروني دوار يُسمى النابض (Pulsar).

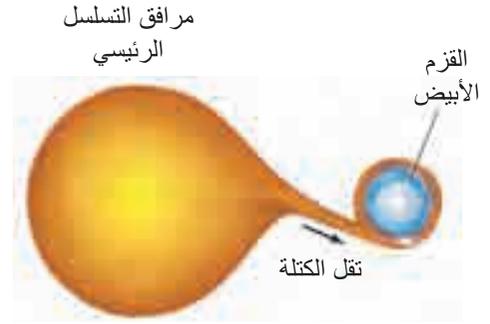
إن قلب النجم النيوتروني ينكمش إلى النقطة التي تكون عندها النيوترونات كلها قريبة من بعضها كقربها في النواة. أي أن كثافة النجم النيوتروني أكبر 10^{14} مرة من الأجسام الصلبة والسائلة العادية على سطح الأرض. إن كوتها مملوءاً من مادة النجم النيوتروني قد يزن ملايين الأطنان. كما أن النجم النيوتروني الذي كتلته أكبر بمرّة ونصف من شمسنا له قطر يساوي 20 km فقط.

إذا كانت الكتلة النهائية للنجم النيوتروني أقل من حوالي مرتين أو ثلاث من كتلة الشمس، فإنه بعد تطوره المتتالية، يعتقد أنه سيصبح مشابهاً للأقزام البيضاء. ولكن إذا كانت الكتلة أكبر من ذلك، فإن النجم سينهار تحت تأثير الجاذبية، متجاوزاً حتى مبدأ باولي للاستثناء الخاص بالنيوترونات. وتصبح الجاذبية هنا قوية جداً؛ لدرجة أن الضوء لا يستطيع الإفلات منها - يسحب الضوء للداخل بسبب قوة الجاذبية، وبالتالي فإنه لا يظهر أي إشعاع من مثل هذا النجم. ولذلك لا يمكن رؤيته - ويعود راجعاً. وأي جسم يمر به أو ينحرف باتجاهه نتيجة مجال جاذبيته بحيث يكون قريباً جداً منه، فإنه سوف يبتلع، ولن يفلت منه. وهذا ما يُسمى بالثقب الأسود.

النوفا والسوبرنوفا

النوفا (والتي تعني الجديد باللغة اللاتينية) هي نجوم باهتة يزداد بريقها فجأة بمعامل يزيد على 10^4 في شهر أو شهرين قبل أفولها. ويعتقد أنّ النوفا قرمّ أبيض باهت، يسحب كتلته من مرافق قريب منه (يعملان معًا كنظام ثنائي) كما هو موضح في (الشكل 33 - 10). تندمج الكتلة الممتصة من الهيدروجين لتكوين الهيليوم بمعدل عالٍ في أسابيع قليلة. معظم النوفا (إن لم يكن كلّها) متكررة: أي أنّها تكرر سطوعها في سنوات لاحقة. كما أنّ السوبرنوفا أيضًا انفجار مختصر لحظي، ولكنه يبتّ طاقة أكبر ملايين المرات من النوفا. ويصل سطوعها إلى 10^{10} مرة من سطوع شمسنا، أضف إلى أنّ ذروة البريق يمكن أن تساوي تلك التي لكامل المجرة التي تكون فيها، والتي تدوم بضعة أيام فقط. وهي تبقى ساطعة، ولكنها تتلاشى تدريجيًا خلال بضعة شهور. زد على ذلك أنّ الكثير من السوبرنوفا تتشكل بانفجار قلب النجوم النيوترونية كما هو موضح سابقًا.

إنّ النوع Ia من السوبرنوفا تبدو بشكل مختلف. ويبدو لها كلّها السطوع نفسه. ويعتقد بأنّها عبارة عن نجوم ثنائية أحدها قرمّ أبيض يسحب كتلته من مرافقه كما هو في حالة النوفا. (الشكل 33 - 10). تصبح الكتلة أكبر فأكثر باستمرار امتصاص الكتلة، وبوصول الكتلة الكلية إلى حدّ غاندراسيخر وهو 1.4 من كتلة الشّمس، يبدأ النجم بالانهيار ثم ينفجر مشكلًا سوبرنوفا.



الشكل 33 - 10 نموذج افتراضي للنوفا والنوع (Ia) من السوبرنوفا يرينا كيف أنّ القرم الأبيض يستطيع سحب الكتلة من مرافقه الطبيعي.

la سوبرنوفا

3-33 قياس المسافات

سنتناول الآن المسافات الهائلة للأجسام في الكون. ولكن كيف نستطيع قياس هذه المسافات؟ إحدى الطرق الأساسية تستعمل طريقة هندسية بسيطة لقياس ما يُسمّى **اختلاف المطلع (Parallax)** أبعد بسبب حركة الأرض حول الشّمس. وكما هو موضح في (الشكل 33 - 11)، فإنّ الزاوية البصرية للنجم مع مستوى مدار الأرض (الزاوية θ) يمكن قياسها في أزمنة مختلفة من السنة. ولأننا نعرف المسافة d بين الأرض والشّمس، يمكننا تنظيم المثلثات القائمة الموضحة في (الشكل 33 - 11)، وبالتالي تحديد المسافة D * التي تمثل بعد النجم.

* هذه هي الطريقة المستخدمة لتحديد ارتفاع الجبال بواسطة المثلثات. انظر (المثال 9-1).

كيف نستطيع قياس المسافات الفلكية؟

الشكل 33 - 11 (أ) تحديد بعد النجم بطريقة اختلاف المطلع. المثلثات التخيلية هي مثلثات قائمة، و ϕ زاوية صغيرة جدًا. (ب) يرينا منظرًا للسماء، موقع الظهور لنجم قريب بالنسبة للنجوم الأبعد في وقتين مختلفين (كانون الثاني وتموز). زاوية الظهور في كانون الثاني تضع النجم أبعد إلى اليمين بالنسبة لموقع النجم، ولكن في تموز، يكون النجم أبعد إلى اليسار (الدائرة المخططة ترينا الموقع في كانون الثاني).

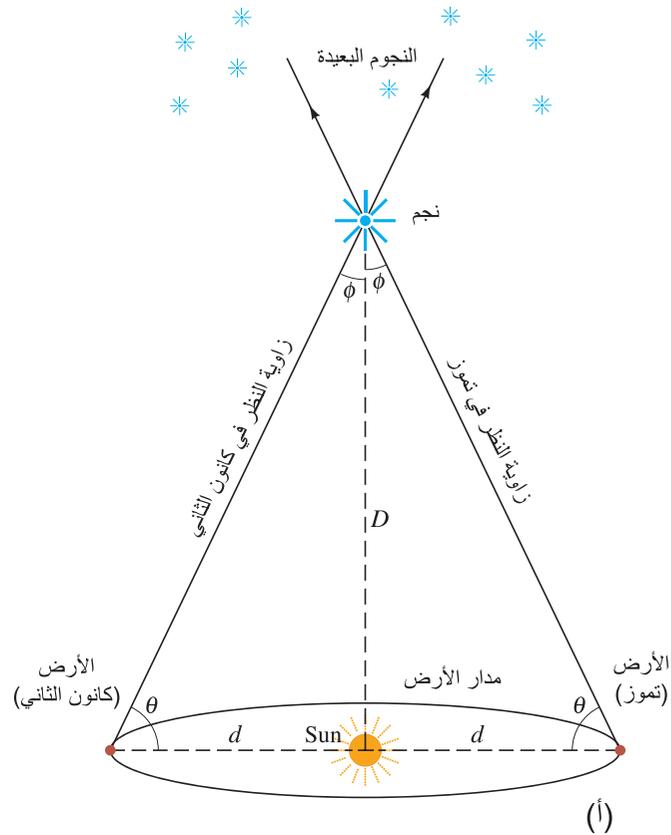


السماء كما تبدو من الأرض خلال شهر يناير



وكما ترى من الأرض خلال شهر يوليو

(ب)



مثال 6-33 تقدير بُعد النجم بطريقة اختلاف المطلع

احسب المسافة D التي يبعدها النجم إذا كانت الزاوية θ في (الشكل 33 - 11) قد قيست لتساوي 89.99994° .

النّهج: من هندسة المثلثات، يكون $\tan \phi = d/D$ في (الشكل 33 - 1). البعد بين الشمس والأرض هو $d = 1.5 \times 10^8$ km

$$\text{الحل: } \phi = 90^\circ - 89.99994^\circ = 0.00006^\circ \\ 1.0 \times 10^{-6} \text{ radians}$$

ولأن ϕ صغيرة جدًا، فإننا نستطيع استخدام $\tan \phi \approx \phi$. لذا، فإن بُعد النجم D يساوي

$$D = \frac{d}{\tan \phi} \approx \frac{d}{\phi} = \frac{1.5 \times 10^8 \text{ km}}{1.0 \times 10^{-6} \text{ rad}} = 1.5 \times 10^{14} \text{ km,}$$

أو 15 سنة ضوئية

تحدد المسافات النجمية دائمًا بدلالة زاوية المطلع التي تعطى بثواني القوس؛ حيث إن ثانية واحدة ($1''$) تساوي $\frac{1}{60}$ من الدقيقة القوسية والتي تساوي $\frac{1}{3600}$ من الدرجة ولذلك فإن $1'' = \frac{1}{3600}$ من الدرجة. تعطى المسافة بوحدة تُسمى **الفرسخ الفلكي (pc)** والتي تعني الزاوية القوسية بوحدة الثواني، وتساوي $1/\phi$ حيث ϕ بالثواني. في (المثال 33 - 6)، $\phi = (6 \times 10^{-5})^\circ (3600) = 0.22''$. وبالتالي نستطيع القول إن النجم على مسافة $1/0.22'' = 4.5$ pc. ومن السهل الاستنتاج أن الفرسخ (pc) يعطى كما يلي:

$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ ly} \\ = (3.26 \text{ ly})(9.46 \times 10^{15} \text{ m/ly}) = 3.08 \times 10^{16} \text{ m.}$$

فرسخ (وحدة)

ويمكن استخدام طريقة اختلاف المطلع لقياس مسافة النجوم التي تبعد 100 سنة ضوئية (≈ 30 parsecs) من الأرض. ومن مدار القمر الصناعي، يمكن قياس مسافات تكبر 5 - 10 مرات عن هذه المسافة. أما أبعد من ذلك، فإن زاوية المطلع تصبح صغيرة جدًا بحيث يصعب قياسها. في حين يجب استخدام تقنيات مناسبة أكثر لمسافات أكبر. نستطيع مقارنة البريق الظاهري لمجرتين واستخدام قانون التربيع العكسي (حيث تقل شدة الضوء مع مربع المسافة) لتقدير المسافة النسبية لكليهما. ولا نتوقع أن تكون هذه الطريقة دقيقة جدًا؛ لأننا لا نتوقع أن المجرات جميعها لها السطوع نفسه. وقد يكون هنالك تقدير أفضل يفترض أن النجوم الساطعة في المجرات جميعها (أو المجرات الساطعة في العناقيد المجرية) متشابهة، ولها السطوع المطلق نفسه. وهكذا فإن بريقها الظاهري يعد مقياسًا لبعدها.

وهناك طريقة أخرى نستخدم فيها مخطط $H - R$. يمكن قياس درجة حرارة سطح النجم (من طيفه)، وتحديد مكانه ($\pm 20\%$) على مخطط $H - R$ على اعتبار أن النجم من نجوم التسلسل الأساسي يمكن تقدير سطوعه من المحور العمودي (الشكل 33 - 6). إن بريقه الظاهري و (المعادلة 33 - 1) يعطينا المسافة التقريبية. انظر (المثال 33 - 5).

كما أن تقديرًا أفضل يأتي من مقارنة النجوم المتغيرة، مثل النجوم المتغيرة القيفاوية، والتي يتناسب معدل سطوعها الحقيقي (الذي يتغير مع الزمن) مع زمنها الدوري. إن المسافات الأكبر يمكن تقديرها من مقارنة البريق الظاهري للنوع Ia من السوبرنوفات (SNIa) المختلفة. إن النوع Ia من السوبرنوفات له المصدر نفسه (تنهار إلى نجوم نيوترونية عند 1.4 من الكتلة الشمسية كما شرحنا في الصفحة السابقة والشكل 33 - 10). وانفجارها اللحظي يبتئ ضوءًا يتوقع أن يكون له السطوع الكلي نفسه، وفي بعض الأحيان تكون شبيهة بالشموع المعيارية.

إضاف إلى ذلك أن هناك طريقة أخرى مهمة لقياس المسافات من خلال الانزياح نحو الأحمر لخط طيف العناصر أو المركبات. يرتبط الانزياح نحو الأحمر بتمدد الكون كما سنناقشه في (البند 33 - 5). وتعد هذه الطريقة مفيدة في حالة الأجسام التي تبعد عنا مسافة 10^7 إلى 10^8 سنة ضوئية. وكلما نظرنا بعيدًا أكثر، فإن القياس سيكون أقل مصداقية وغير دقيق.

متغيرات cepheid

SN Ia كوحدة قياس
عيارية

4-33 نظرية النسبية العامة: الجاذبية وتحبب الفضاء

الشكل 33 - 12 مصعد يسقط سقوطاً

حرّاً. الكتاب الساقط يحوم تحت يدي صاحبه، (ب) بعد لحظات قليلة من (a).



مبدأ التساوي



لقد رأينا أنّ قوة الجاذبية تقوم بدور مهم في العمليات التي تظهر في النجوم. كما أنّ الجاذبية مهمة أيضاً في نشوء الكون كوحدة متكاملة. إنّ الأسباب التي جعل قواعد قوة الجاذبية مسيطرة في الكون وليست واحدة من أنواع القوى الأربعة الأخرى في الطبيعة هي أنّها: (1) ذات مدى واسع. (2) قوة جاذب دائماً. إنّ القوى النووية القوية والضعيفة تؤثر في مسافات قصيرة جداً فقط. في حدود حجم النواة. أي أنّها لا تؤثر في مدى المسافات الفلكية (تؤثر بين الأتوية والجسيمات النووية في النجوم لإنتاج تفاعل نووي). أما القوة الكهرومغناطيسية كالجاذبية. فتؤثر في مسافات كبيرة. ولكنها يمكن أن تكون قوى جاذب أو تنافر. أي أنّ الكون لا يبدو كأنه يحوي مساحات واسعة من الشحنات الكهربائية الكلية. ولا تظهر هنا قوة محصلة كبيرة. إنّ الجاذبية تؤثر كقوة جاذب بين الكتل جميعها. ويكون هنالك تراكم كبير للكتلة وهي من النوع نفسه (ليس كالشحنات الكهربائية لها إشارة (-) وإشارة (+)). بالإضافة إلى ذلك فإنّ قوة الجاذبية كما وصفها نيوتن في قانون الجذب العام ترينا تناقضات في الأبعاد الكونية. لقد طوّرت أينشتاين في نظريته النسبية العامة نظرية الجاذبية التي تشكّل الآن أساسيات الديناميكا الكونية.

لقد استنتج أينشتاين في نظرية النسبية الخاصة (الفصل 26). عدم وجود طريقة يستطيع من خلالها المشاهد أن يحدد كون محور إسناد معين ساكناً أو متحركاً بسرعة ثابتة. وعلى خط مستقيم. لذا. فإنّ قوانين الفيزياء يجب أن تكون نفسها في محاور الإسناد القصورية المختلفة. ولكن ماذا عن الحالة الأكثر عمومية للحركة. والتي تكون فيها محاور الإسناد متسارعة؟ أخذ أينشتاين بالحسبان المحاور المتسارعة في نظريته النسبية العامة. وكذلك في تطوير نظرية الجاذبية. وتعدّ رياضيات نظرية النسبية العامة معقدة نوعاً ما. ولذلك. سيكون نقاشنا وصفيّاً فقط.

سنبدأ بمبدأ أينشتاين للتكافؤ الذي ينصّ على:

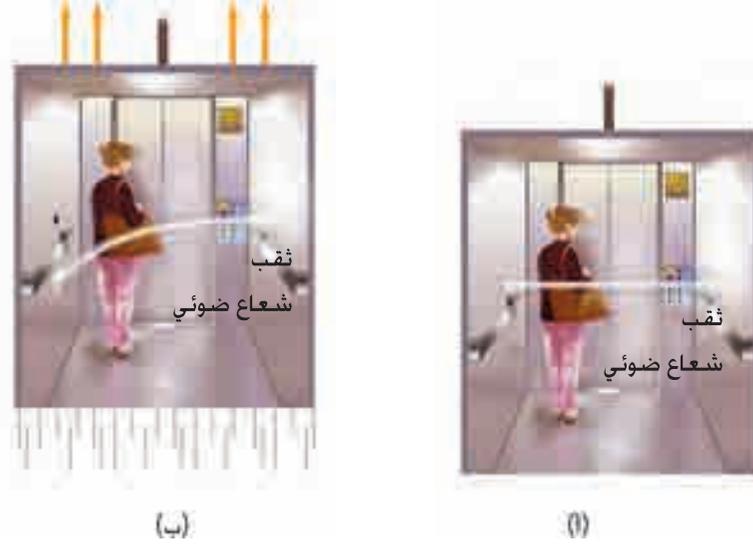
لا نستطيع عمل تجربة نستطيع التمييز من خلالها بين مجال الجاذبية المنتظم وأي تسارع منتظم مكافئ له.

إذا أحسّ أشخاص بأنهم يتسارعون (كما في مركبة تسير على منعطف حاد). فإنّهم لا يستطيعون الإثبات (بأيّ تجربة) بأنهم في الحقيقة لا يتأثرون من سحب مجال الجاذبية الأرضية. وعلى العكس من ذلك. يجب عليهم التفكير بأنهم يسحبون من قبل الجاذبية عندما يشعرون في الحقيقة من تسارع قصوريّ. ولا يستطيعون عمل شيء مع الجاذبية.

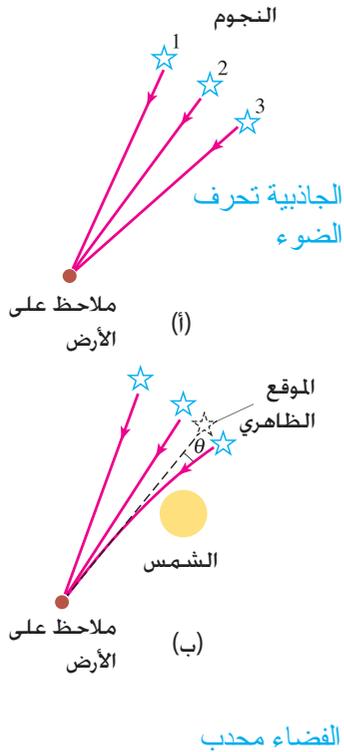
وكتجربة ذهنية. افترض أن شخصاً ما داخل مصعد يسقط سقوطاً حرّاً بالقرب من سطح الأرض. إذا كانت مشاهدتنا هي إسقاط كتاب من بين يدي هذا الشخص. فماذا سيحدث؟ ستقوم الجاذبية بسحبه للأسفل باتجاه الأرض. ولكن في الوقت نفسه. فإنّ الشخص والمصعد يتحركان نحو الأسفل بالتسارع نفسه ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$). لذا. فإنّ الكتاب سيحوم تحت يدي الشخص (الشكل 33 - 12). إنّ التأثير سيكون نفسه تماماً في حال كون محور الإسناد هذا ساكناً ولا يتأثر بأيّ قوة. ومن جهة أخرى. إذا كان المصعد في الفضاء الخارجي حيث يكون مجال الجاذبية مساوياً للصفر. فإنّ الكتاب الساقط سيطفو كما هو الحال في (الشكل 33 - 12). وبعد ذلك. إذا كان المصعد الموجود في الفضاء الخارجي يتسارع للأعلى بمعدل 9.8 m/s^2 . فإنّ الكتاب كما يرى من مشاهدنا سيسقط على أرضية المصعد بتسارع مقداره 9.8 m/s^2 كما هو الوضع عند سقوطه سقوطاً حرّاً في مجال الجاذبية الأرضية على سطح الأرض. واستناداً إلى مبدأ التكافؤ. فإنّ المشاهد لا يستطيع تحديد سبب سقوط الكتاب: هل هو من تسارع المصعد للأعلى. أم بسبب مجال الجاذبية الذي يؤثر للأسفل عندما يكون المصعد ساكناً؛ فالوضعان السابقان متكافئان تماماً.

يرتبط مبدأ التكافؤ بمفهوم عدم وجود نوعين من الكتلة. إنّ قانون نيوتن الثاني. $F = ma$ يستخدم الكتلة القصورية. ونستطيع القول إنّ الكتلة القصورية تمثل مقاومة الجسم لأيّ نوع من أنواع القوى. أمّا النوع الثاني من الكتلة فهو كتلة الجذب؛ فعندما يقوم جسم بجذب جسم آخر بقوة جذب معينة (تعطى من قانون الجذب العام لنيوتن $F = Gm_1 m_2 / r^2$. الفصل 5). فإنّ مقدار هذه القوة يتناسب مع حاصل ضرب كتلتي الجذب لكلا الجسمين. وهذا يشبه تماماً قوة الجذب الكهربائية بين جسمين. والتي تتناسب مع حاصل ضرب شحنتيهما.

الشكل 33 – 13 (أ) الحزمة الضوئية تذهب بمسار مستقيم في مصعد غير متسارع. (ب) الحزمة الضوئية تنحني في المصعد الذي يتسارع للأعلى.



الشكل 33 – 14 (أ) ثلاثة نجوم في السماء. (ب) إذا كان الضوء الصادر عن أحد النجوم يمر بالقرب من الشمس فإن جاذبيته تحرف الأشعة. وبالتالي، يبدو النجم أعلى من مكانه الحقيقي.



إنّ الشحنة الكهربائية لجسم لا تتناسب مع كتلته القصورية. إذن، فلماذا يجب أن نتوقع بأنّ كتلة الجذب للأجسام (يمكن إذا أردت أن تسمّيها شحنة الجاذبية) تتناسب مع كتلتها القصورية؟ إنّ كلّ ما نملكه هو اعتبارهما متساويتين. لماذا؟ بسبب عدم وجود تجربة - بدقة عالية - تستطيع أن تبيّن أيّ فرق مقيس بين الكتلة القصورية وكتلة الجذب. وهذه طريقة أخرى لتعريف مبدأ التكافؤ: كتلة الجذب تكافئ كتلة القصور.

يمكن استخدام مبدأ التكافؤ ليرينا أنّ الضوء يُتوقع أن ينحرف بسبب قوة الجاذبية للأجسام ذات الكتل الكبيرة. خذ التجربة الذهنية التالية التي يكون فيها المصعد في الفضاء تخيلياً لا يتأثر بأيّ جاذبية. إذا مرت حزمة ضوئية من خلال ثقب في أحد جوانب المصعد، فإنّ هذه الحزمة تذهب بمسار مستقيم خلاله، وتعمل بقعة على الجانب المقابل للثقب تمامًا إذا كان المصعد ساكنًا (الشكل 33 – 13 أ). أمّا إذا كان المصعد يتسارع نحو الأعلى كما في (الشكل 33 – 13 ب)، فإنّ الحزمة الضوئية تستمر بالسير بمسار مستقيم خلال المصعد في محور إسناد ساكن. في تسارع المصعد للأعلى، من جهة أخرى، يلاحظ أنّ الحزمة تنحني تجاه الأسفل. لماذا؟ لأنّه خلال الزمن الذي تحتاج إليه الحزمة الضوئية للسير من أحد جوانب المصعد إلى آخر، فإنّ المصعد يتحرك نحو الأعلى بسرعة متزايدة، ونلاحظ بعد ذلك أنه اعتمادًا على مبدأ التكافؤ، فإنّ محور الإسناد الذي يتسارع صوب الأعلى يكافئ مجال الجاذبية الذي يتجه نحو الأسفل. وهنا نستطيع أن نتخيل المسار المائل للضوء في (الشكل 33 – 13 ب)، وكأنه ينتج من تأثير مجال الجاذبية. لذلك، ومن مبدأ التكافؤ، فإننا نتوقع أنّ الجاذبية تؤثر بقوة في الحزمة الضوئية، وتعمل على انحنائها عن السير بخط مستقيم!

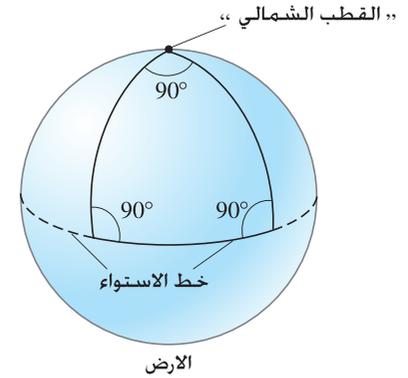
إنّ تأثير الضوء بالجاذبية هو استنتاج مهمّ لنظرية أينشتاين العامة في النسبية. ويمكن اختبار هذا الاستنتاج. كمية الانحراف للحزمة الضوئية عن الخط المستقيم يجب أن تكون صغيرة حتى عند مرورها بالقرب من الكتل الكبيرة. (مثلًا، الضوء الذي يمر بالقرب من الأرض، وبعد مروره 1 km، يُتوقع أن ينحرف مسافة تساوي $10^{-10}m$ تقريبًا، والتي تساوي قطر ذرة صغيرة غير مرئية). إنّ أكبر كتلة بالقرب منا هي الشمس. وعليه، فإنّ البريق الهائل لها لا يغمر مرور الضوء المستقيم بالقرب من حافتها. وقد ظهر كسوف ملائم في عام 1999، حيث سافر العلماء إلى شمال المحيط الأطلسي لمشاهدته، وقد التقطوا صورًا للنجوم القريبة من الشمس أظهرت انحرافًا عن مكانها موافقة لاستنتاج أينشتاين.

إذا تحركت الحزمة الضوئية بمسار مائل، كما نوقش سابقًا، فيمكن القول إنّ الفضاء بحدّ ذاته محدّب، وإنّ كتلة الجذب هي سبب هذا التحدّب. وفي الواقع، فإنّ تحدّب الفضاء (أو الفضاء ذو الأبعاد الرباعية مع الزمن) يعدّ موضوعًا رئيسًا لنظرية النسبية العامة لأينشتاين.

ماذا نعني بالفضاء المَحْدَب (*curved space*)؟ لفهم هذا؛ فإننا نسترجع أنّ الطرق العادية لتصور العالم هي من خلال الهندسة المستوية الإقليديّة، والتي يكون لدينا فيها الكثير من البيهيات والنظريات المسلّم بها، مثل: مجموع زوايا المثلث يساوي 180° .

أمّا الهندسة غير الإقليديّة التي نعني بالفضاء المَحْدَب، فيمكن تخيلها أيضًا بواسطة الرياضيين. إنّ تخيل الفضاء المنحني بثلاثة أبعاد صعبٌ للغاية، فما بالك بتخيل الفضاء بأربعة أبعاد، بإضافة الزمن كبعد رابع. لذلك، دعنا نحاول فهم فكرة الفضاء المَحْدَب باستخدام سطحين ثنائيّ الأبعاد. افرض على سبيل المثال سطحين ثنائيّ الأبعاد لكرة. من الواضح أنّ التحدب (الشكل 33 - 5). يظهر لنا على الأقلّ من الخارج من عالمنا ثلاثيّ الأبعاد، ولكن كيف تستطيع مخلوقات افتراضية ثنائية الأبعاد تخيل كون الفضاء ثنائي الأبعاد مستويًا أو محدبًا؟ إنّ إحدى الطرق تكون بقياس مجموع زوايا المثلث. إذا كان السطح مستويًا، فسيكون مجموع الزوايا 180° . كما تعلمنا في الهندسة المستوية. ولكن إذا كان الفضاء محدبًا، فسيتشكل بالضرورة لدينا مثلث كبير يكون مجموع الزوايا فيه ليس 180° . ولتشكيل مثلث على سطح منحني، على كرة مثلاً كما في (الشكل 33 - 15). يجب علينا استخدام ما يكافئ الخطّ المستقيم: أيّ أقصر مسافة بين نقطتين، والتي تسمّى الجيوديسك. يكون الجيوديسك على الكرة قوسًا من دائرة كاملة (القوس في المستوى يمر في مركز الدائرة) مثل خط الاستواء الأرضي وخطوط الطول الأرضية. خذ، على سبيل المثال، المثلث الكبير في (الشكل 33 - 15)؛ ضلعا المثلث عبارة عن خطي طول يبران من القطب الشمالي إلى خط الاستواء، والضلع الثالث هو مقطع من خطّ الاستواء كما هو موضح في الشكل. خطا الطول يصنعان زاوية مقدارها 90° مع خطّ الاستواء (انظر إلى الكرة الأرضية لرؤية ذلك بوضوح) كما أنّهما يصنعان زاوية مقدارها 90° مع بعضهما بعضًا عند القطب الشمالي. مجموع هذه الزوايا يساوي $90^\circ + 90^\circ + 90^\circ = 270^\circ$. وبصورة واضحة، فإنّ هذا السطح ليس فضاءً إقليديًا، ومن جهة أخرى، لاحظ أنه إذا كان المثلث صغيرًا مقارنة بنصف قطر الكرة، فإنّ مجموع الزوايا سيصبح قريبًا من 180° . وبذلك يكون المثلث (وبالتالي الفضاء) مستويًا.

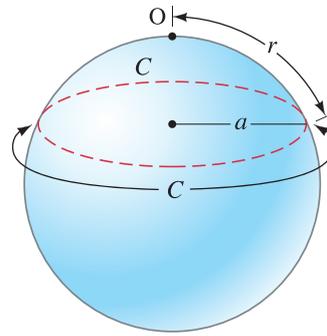
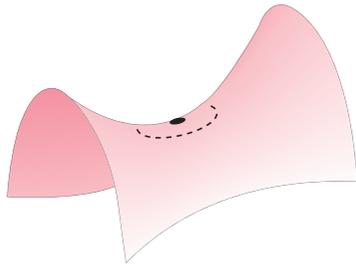
الجيوديسك (الخط الجيوديسي)



الشكل 33 - 15 مجموع زوايا المثلث في سطح ثنائي الأبعاد لا يساوي 180° .

وهناك طريقة أخرى لاختبار انحناء الفضاء وهي بقياس نصف القطر r والمحيط C لدائرة كبيرة. في السطح المستوي، يكون $C = 2\pi r$. ولكن في السطح الكروي ثنائي الأبعاد، فإنّ C تكون أقلّ من $2\pi r$ كما يمكن ملاحظته في (الشكل 33 - 16). إنّ التّناسب بين C و r أقلّ من 2π . ويقال لمثل هذا السطح بأنّه ذو انحناء موجب. إنّ محيط الدائرة للسطح الموضح في (الشكل 33 - 17) والذي يشبه سرج الفرس أكبر من $2\pi r$. ولهذا، فإنّ مجموع زوايا المثلث المرسوم عليه أقلّ من 180° ؛ مثل هذا السطح له انحناء سالب.

الشكل 33 - 17 مثال على سطح ثنائي الأبعاد ذي تحدب سالب.



انحناء الكون

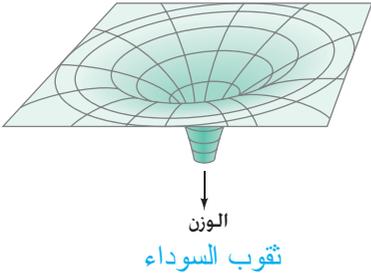
والآن، ماذا عن الكون؟ في مقياس أكبر (ليس فقط بالقرب من الكتل الكبيرة) ماذا عن الانحناء الكلي للكون؟ ما انحناءه: موجب، أم سالب؟ أم أنّه مستو (دون انحناء)؟ إذا كان للكون انحناء موجب، فيجب أن يكون مغلّقًا، أو محدودًا في الحجم. وهذا لا يعني أنّ التّجوم والمجرات تنتشر نحو الخارج إلى حدّ معيّن، ومن ثمّ سيكون هناك فضاء فارغ. لا يوجد حدّ أو حافة في مثل هذا الكون. إذا تحرك جسيم بخط مستقيم باتجاه معيّن فإنّه سيعود إلى نقطة البداية؛ بالطبع بعد دهر من الزمن.

الشكل 33 - 16 رسمت دائرة محيطها C حول نقطة O كمركز لها. نصف قطر الدائرة (وليس الكرة) هو المسافة r على سطح الكرة. (لاحظ أنه من نظرتنا ثلاثية الأبعاد يمكن القول بأنّ $C = 2\pi a$ ، ولأنّ $r > a$ ، فإنّ $2\pi r > C$).

هل الكون مفتوح أم مغلق؟

ومن جهة أخرى. إذا كان انحناء الفضاء يساوي صفرًا أو سالبًا. فإنّ الكون يكون مفتوحًا وسيستمر كذلك إلى الأبد. ومن الممكن أن يكون الكون المفتوح لانهائيًا. ولكن ليس بالضرورة اعتمادًا على الأبحاث المعاصرة.

في هذه الأيام. تشير الدلالات بقوة إلى أنّ الكون بمقياس أكبر قريب جدًا من التسطح. وبالفعل. لأنّه كذلك. فهذا يحول دون معرفتنا هل الانحناء موجب قليلًا أم سالب قليلًا.



الشكل 33 – 18 صفيحة مطاط كنموذج لتحذب الفضاء الزمني بالمادة.

الثقوب السوداء

استنادًا إلى نظرية أينشتاين. فإنّ الفضاء الزمني ينحني بالقرب من الأجسام الكبيرة. يمكن تخيل الفضاء على أنه يشبه صفيحة مطاطية رقيقة. إذا علّق جسم ذو كتلة كبيرة بها. فإنّها تنحني كما في (الشكل 33 – 18). إنّ الوزن هنا يشبه الكتلة الهائلة التي تسبب انحناء الفضاء. لذلك. فإنّنا لا نتكلم في نظرية أينشتاين* عن قوة الجاذبية التي تؤثر في الأجسام. وخصوصًا عن ذلك. نقول إنّ الأجسام والأشعة الضوئية تتحرك بطريقتها لأنّ الفضاء الزمني منحني. الجسم الساكن أو الذي يتحرك ببطء بالقرب من الكتلة الهائلة في (الشكل 33 – 18) سيتبع الجيوديسك (المكافئ للخط المستقيم في الهندسة المستوية) باتجاه ذلك الجسم.

إنّ الانحناء المبالغ فيه في الفضاء الزمني الموضح في (الشكل 33 – 18) يمكن أن ينجم عن ثقب أسود. الثقب الأسود. كما رأينا في (البند 33 – 2). كثيف جدًا. لدرجة أنّ الضوء لا يستطيع الإفلات منه. وحتى يصبح ثقبًا أسود. فإنّ الجسم ذا الكتلة M يجب أن يخضع لانهايار جاذبي بحيث ينقبض تحت تأثير جاذبيته الذاتية ليصبح نصف قطره مساويًا لما يُسمّى بنصف قطر شوارزشيلد:

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

حيث G هو ثابت الجذب العام. و c سرعة الضوء.

الأفق اللحظي

يمثل نصف قطر شوارزشيلد أيضًا الأفق اللحظي للثقب الأسود. والأفق اللحظي يعني السطح الذي تحته لا يمكن لأيّ إشارة أن تتجاوزنا. وبالتالي يخبرنا عن اللحظات التي تحدث. وعندما ينهار النجم باتجاه الثقب الأسود. فإنّ الضوء الذي يُبعثه يُسحب بشكل أقوى بسبب الجاذبية. ولكننا لا نزال نستطيع رؤيته. وعندما تمر المادة خلال الأفق اللحظي. فإنّ الضوء المنبعث لا يستطيع الإفلات. ولكنه يسحب إلى الخلف بالجاذبية.

كلّ ما نستطيع معرفته عن الثقب الأسود هو كتلته. وزخمه الزاوي (قد نجد ثقبًا سودا دوارًا). وشحنته الكهربائية. ولكننا لا نستطيع معرفة معلومات أخرى عنه كتركيبه. أو نوع المواد التي تشكله: بسبب عدم وجود معلومات تستطيع الإفلات منه.

هل نستطيع مشاهدة الثقوب السوداء؟ لا نستطيع رؤيتها: لأنّه لا يفلت منها أيّ ضوء وبالتالي ستبدو أجسامًا سودا في سماء سوداء. ولكنها تؤثر بقوة جذب في الأجسام المجاورة.

لقد اكتشف الثقب الأسود الذي يُعتقد بوجوده في مركز مجرتنا باختبار حركة المواد في المنطقة المجاورة له. وهناك طريقة أخرى هي اختبار النجوم التي تبدو دوارًا كأنها أعضاء في نظام ثنائي (نجمان يدوران حول مركز كتلتهما). وأيضًا فإنّ النجم المرافق يكون غير مرئي. إذا كان النجم غير المرئي ثقبًا أسود. فمن المتوقع أن يسحب المواد الغازية من مرافقه المرئي (كما في الشكل 33 – 10). عندما تصل هذه المادة إلى الثقب الأسود. فإنّها تتسارع بشدة. وتبعث أشعة سينية (X-rays) لها خصائص معينة قبل غرقها في الأفق اللحظي. إنّ مثل هذه الأشعة السينية. بالإضافة إلى معلومات وافية عن الكتلة الهائلة المحسوبة من الحركة الدورانية. يمكن أن توفر دليلًا على وجود الثقب الأسود. وهناك واحد من عدة مرشحات لتكوين ثقب أسود موجود في نظام النجم الثنائي في كوكبة الدجاجة X-1.

* كتب الكسندر بوب (1688 - 1749) نقسًا على ضريح نيوتن يقول: الطبيعة. وقوانين الطبيعة مخبأ في الليل.

قال الله. ليكن نيوتن. فكان الضوء

وأضاف السيد جون سكوير (1884 - 1958) الذي لم يكن معجبًا بأفكار أينشتاين العظيمة قائلا:

لم تدم طويلا: فقد صاح الشيطان. هو!

ليكن اينشتاين! فاستعاد الوضع الراهن

5-33 الكون المتمدد الانزياح نحو الأحمر وقانون هبل

ناقشنا في (البند 33 - 2) كيفية تطوّر التّجوم من الولادة وحتى الممات مثل الأقزام البيض. والتّجوم النيوترونية. والثّقوب السوداء. ولكن ماذا عن الكون ككل؟ هل هو ساكن أم متغير؟ واحدة من أهم النتائج العلمية في القرن العشرين هي أنّ المجرات البعيدة تنطلق بعيداً عنا. وأنّه كلّما كانت أبعد كانت أسرع في الابتعاد. كيف توصل الفلكيون إلى هذه الفكرة الفلكيّة؟ وماذا تعني بالنسبة إلى تاريخ الكون الماضي ومستقبله. هذا ما سنبحثه فيما تبقى من الكتاب.

اقترحت فكرة تمدد الكون أولاً بواسطة إدوين هبل عام 1929. وقد اعتمدت هذه الفكرة على المسافات التي تمّ قياسها للمجرات (البند 33 - 3) وتحديد سرعتها من انزياح دوبلر لخط الطيف للضوء الصادر عنها (الشكل 33 - 19). وفي الفصل 12. رأينا كيفية تغيّر كلّ من تردد موجة الصوت وطولها إذا كان المصدر يتحرك باتجاه المشاهد أو بعيداً عنه. إذا تحرك المصدر باتجاهنا. فإنّ التردد يصبح أعلى. في حين يصبح الطول الموجي أقصر. أمّا إذا تحرك المصدر بعيداً عنا. فإنّ التردد يصبح أقلّ. في حين يصبح الطول الموجي أطول. وتظهر ظاهرة دوبلر أيضاً في الصّوء. ولكن الطول الموجي أو التردد الجديدين يعطيان بصيغة تختلف قليلاً عمّا هي عليه في حالة الصوت*. واستناداً إلى نظرية النسبية الخاصة. فإنّ انزياح دوبلر يعطى كما يلي:

[المصدر والمشاهد يتحركان بعيداً عن بعضهما]

$$(3-33) \quad \lambda = \lambda_0 \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}$$

حيث λ_0 الطول الموجي المنبعث كما يشاهد من محور إسناد سكوني بالنسبة للمصدر. و λ الطول الموجي المقيس من محور إسناد يتحرك بسرعة v بعيداً عن المصدر على خط النظر. (في حالة الحركة النسبية بعيداً عن بعضهما بعضاً تكون $v < 0$ في هذه المعادلة). عندما يبعث المصدر ضوءاً بطول موجي محدد. وعندما يتحرك هذا المصدر بعيداً عنا. فإنّ الطول الموجي يبدو أطول بالنسبة لنا؛ يُزاح لون الصّوء (إذا كان مرئياً) باتجاه النهاية الحمراء للطيف المرئي. وتعرف هذه الظاهرة بالانزياح نحو الأحمر. (إذا كان المصدر يتحرك باتجاهنا. فإنّ لون الصّوء يُزاح نحو الأزرق أو الطول الموجي الأقصر). إنّ مقدار الانزياح نحو الأحمر يحدد بمعامل الانزياح نحو الأحمر (z) والذي يعرف كما يلي:

$$(4-33) \quad z = \frac{\lambda}{\lambda_0} - 1 = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

ونستطيع دمج (المعادلتين 33 - 3 و 4 - 33) للحصول على⁽²⁾

$$(5-33) \quad z = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}} - 1$$

وللسرعات التي ليست قريبة جداً من سرعة الصّوء. من السهل إثبات أنّ z (المسألة 29) تتناسب مع سرعة المصدر في حالة ابتعاده عنا (كما هو الحال بالنسبة للصوت).

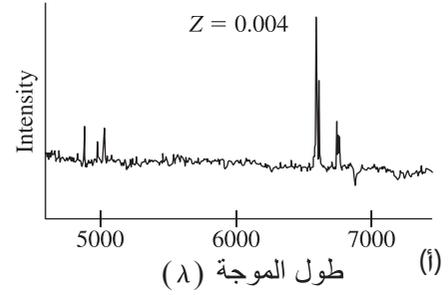
$$(5-33) \quad z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \approx \frac{v}{c} \quad [v \ll c]$$

وعندما يكون الانزياح نحو الأحمر ليس صغيراً. فالتقريب في هذه الحالة غير وارد في (المعادلة 33 - 5 ب). التلسكوبات الحديثة لاحظت بطريقة منتظمة مجرّات لها $z \approx 5$.

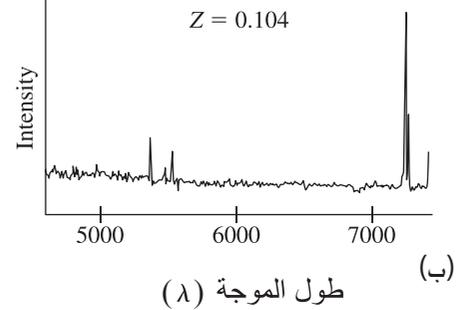
* بالنسبة للضوء. لا يكون هناك وسط ناقل. ولا يميّز بين حركة كلّ من المصدر والمشاهد (التنظير النسبية الخاصة) كما هو الحال في حالة الصوت الذي يحتاج إلى مصدر مادي ينتقل فيه (الفصل 12).

** (المعادلة 33 - 5 أ) ليست دقيقة تماماً؛ لأنّ من المؤكّد أنّ الانزياح نحو الأحمر هو بسبب تمدد الفضاء. وليس بسبب الحركة فيه. (ظاهرة دوبلر. معادلة 33 - 3).

انزياح نحو الأحمر المنخفض لطيف المجرة



انزياح نحو الأحمر المرتفع لطيف المجرة



الشكل 33 - 19

الذرات والجزئيات تبعث الصّوء وتمتصّه بترددات محددة تعتمد على المسافات بين مستويات الطاقة لها كما رأينا في (الفصول 27، و 28، و 29).

(أ) الطيف الضوئي المنبعث من مجرة بطيئة الحركة حيث.

$$Z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$$

(ب) الطيف الصادر عن مجرة تتحرك بعيداً عنا بسرعة أكبر. لاحظ انزياح خطوط الطيف لأطوال موجية أكبر (انزياح نحو الأحمر).

المثال 7-33 إذا أعطيت z فما هي قيمة v ؟

ما سرعة مجرة إذا كان معامل انزياحها نحو الأحمر هو $z = 5$ ؟
النَّهَج: جُري تقريبًا باستخدام صيغة دوبلر. (المعادلة 33 - 5) (لاحظ الملاحظة ** في الصفحة السابقة).
الحل: نضيف 1 إلى كلا الجانبين في (المعادلة 33 - 5)

$$z + 1 = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}$$

وبتعويض $z = 5$ ، وبتربيع كلا الطرفين في هذه المعادلة، ثم استعمال المعادلة لإيجاد قيمة v

$$6^2 = \frac{1 + v/c}{1 - v/c}$$

$$36\left(1 - \frac{v}{c}\right) = 1 + \frac{v}{c}$$

وبتجميع الحد v/c في جهة واحدة، نحصل على

$$35 = 37 \frac{v}{c}$$

وأخيرًا، فإنَّ

$$v = \frac{35}{37} c = 0.95c$$

ملحوظة: تبين هذه السرعة كيفية تمدد الكون (وكذلك الفضاء) بسرعة كبيرة عند موقع هذه المجرة كما يشاهد من الأرض.

التمرين ج: إذا كانت $v = 0.70c$ فما مقدار z ؟

في أطراف بعض النجوم الموجودة في مجرات أخرى، تشاهد خطوط الطيف مشابهة لخطوط الطيف المنبعثة من بعض الذرات المحددة (انظر البند 27 - 11). لقد لاحظ هيل أنَّ الخطوط في أطراف المجرات البعيدة تكون مزاحة نحو الأحمر بشكل عام، ويبدو أنَّ مقدار هذا الانزياح وكأنه يتناسب مع بُعد المجرات عنَّا تقريبًا. أي أنَّ السرعة مجرة تتحرك بعيدًا عنَّا تتناسب مع بُعد المجرة عنَّا d :

(6-33)

$$v = Hd.$$

وهذا هو قانون هيل. أحد أكبر الأفكار الفلكية الأساسية. يُسمَّى الثابت H مُعامل هيل. إنَّ قانون هيل لا يعمل بشكل جيد في حالة المجرات القريبة - في الواقع، المجرات القريبة ترينا انزياحًا نحو الأزرق (تتحرك باتجاهنا) والتي لا تمثل إلا حركة عشوائية موضعية. وفي المجرات الأبعد، فإنَّ سرعة التراجع (قانون هيل) تكون أكبر بكثير منها في حالة الحركة العشوائية. وبالتالي تكون سائدة. وهنا نقول إنه انزياح فلكي نحو الأحمر. ونستطيع أن نعزي ظهوره إلى تمدد الفضاء نفسه. وفي الواقع، يمكن التفكير بأنَّ الطول الموجي الأصلي المنبعث λ_0 قد تمدد، وأصبح أطول مع تمدد الفضاء حوله. وحتى وقت قريب، فإنَّ مقدار H فيه خطأ بحدود 20%. ويعتقد بأنَّه بين 50 و 80 km/s/Mpc. ولكن القياسات الحالية (2003) وضعت قيمة أكثر دقة تساوي

$$H = 71 \text{ km/s/Mpc}$$

(أي 71 km/s لكل ميغا فرسخ من المسافة). الخطأ في هذه القيمة نحو 5% أو $\pm 4 \text{ km/s/Mpc}$. إذا استخدمنا السنوات الضوئية للمسافات، فإنَّ $H = 22 \text{ km/s}$ لكل مليون سنة ضوئية من المسافات.

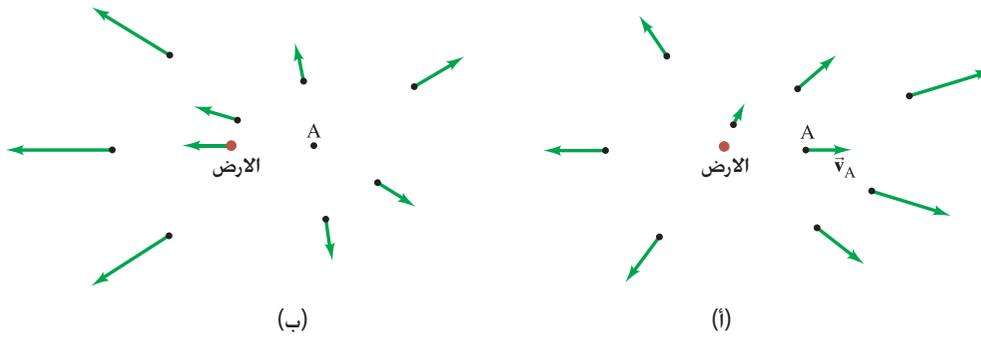
$$H \approx 22 \text{ km/s/Mly}$$

وبخطأ يساوي $\pm 1 \text{ km/s/Mly}$ تقريبًا.

قانون هيل

متغيرات هيل

ماذا يعني أن المجرات البعيدة تتحرك جميعها مبتعدة عنا. وبسرعة أكبر كلما كانت أبعد عنا؟ يظهر أننا سنقترح نوعاً من التمدد الانفجاري الذي بدأ على مسافة زمنية في الماضي. وللهولة الأولى. يبدو أننا في منتصف هذا الحدث. ولكننا لسنا كذلك. ويبدو التمدد نفسه من أي نقطة في الكون. وكي تفهم السبب: انظر إلى (الشكل 33 – 20). في (الشكل 33 – 20 أ). لدينا نظرة من الأرض (أو من مجرتنا). سرعة المجرات المحيطة والتي تمثل بالأسهم تشير بعيداً عنا. وهذه الأسهم أطول للمجرات الأبعد عنا. والآن. ماذا لو كنا على المجرة A في (الشكل 33 – 20 أ)؟ من الأرض. تبدو المجرة A متحركة إلى اليمين وبسرعة نسميها \vec{v}_A . وتمثل بسهم يشير نحو اليمين. وإذا كنا على المجرة A. فإن الأرض تبدو وكأنها تتحرك إلى اليسار بسرعة $-\vec{v}_A$. ولإيجاد السرعة للمجرات الأخرى بالنسبة إلى A: نقوم بالجمع الاتجاهي للمتجه \vec{v}_A للمتجهات الأخرى جميعها (المثلة بالأسهم) في (الشكل 33 – 20 أ). وهذا يعطينا (الشكل 33 – 20 ب). حيث نرى بوضوح أن الكون يتمدد بعيداً عن المجرة A كما هو متوقع. إضافة إلى أن سرعات المجرات المبتعدة عن A تتناسب مع بعدها عنها.



الشكل 20 – 33 يبدو توسع الكون من أي نقطة التوسع نفسه

إن تمدد الكون يبدو نفسه من أي نقطة فيه. لذا، فإن تمدد الكون يمكن أن يحدد كما يلي: تبتعد المجرات جميعها عن بعضها بمعدل يساوي 71 km/s تقريباً لكل ميغا فرسخ من المسافة بينها. تعدّ إشكالات هذه الفكرة صعبة ومتشعبة؛ ولهذا سنناقشها بعجالة.

هناك افتراض أساسي في علم الكونيات بمقياس كبير. وهو أن الكون نفسه يبدو للمشاهدين من أماكن مختلفة وفي الزمن نفسه. وبكلمات أخرى. فإن الكون موحد الخصائص (*isotropic*) (يبدو نفسه في الاتجاهات جميعها) ومتجانس (*homogeneous*) (يبدو نفسه إذا كنا في مكان آخر. مثلاً على مجرة أخرى). ويُسمّى هذا الافتراض **المبدأ الكوني**. في مقياس موضعي. في نظامنا الشمسي أو داخل مجرتنا. من الواضح أنه لا ينطبق (السماء تبدو مختلفة بالنظر إليها من أماكن مختلفة). ولكن يعتقد بأنه ينطبق إذا نظرنا إليه بمقياس كبير بما يكفي. حيث إن متوسط كثافة المجرات والعناقيد المجريّة تبدو نفسها في عدة مناطق في السماء. وهذا يبدو منطبقاً على مسافة تزيد على نحو 200 Mpc (700 Mly). إن تمدد الكون (الشكل 33 – 20) منسجم مع المبدأ الكوني. والأشعة الكونية الميكروويفية المنتظمة الموجودة بالقرب منا تعزز هذا الافتراض. يقترح تمدد الكون كما وصفه هبل بقوة أن المجرات كانت في الماضي أقرب لبعضها بما هي عليه الآن. وهذا هو في الواقع أساس نظرية الانفجار العظيم لأصل الكون. والتي تصوّر الكون بأنه يتمدد تمددًا غير لئلي. يبدأ من بداية منضغطة هائلة الحرارة. سنناقش نظرية الانفجار العظيم بالتفصيل. ولكن سنناقش أولاً عمر الكون.

المبدأ الكوني

إنّ إحدى الطرائق لتقدير عمر الكون هي باستخدام معامل هبل: حيث $H \approx 22 \text{ km/s}$ لكل 10^6 سنة ضوئية. فإنّ الزمن اللازم للمجرات للوصول إلى وضعها الانفصالي الحالي سيكون تقريباً (ابتداءً من $v = d/t$ وباستخدام قانون هبل. المعادلة 33 – 6):

$$t = \frac{d}{v} = \frac{d}{Hd} = \frac{1}{H} \approx \frac{(10^6 \text{ ly})(0.95 \times 10^{13} \text{ km/ly})}{(22 \text{ km/s})(3.16 \times 10^7 \text{ s/yr})} \approx 13.7 \times 10^9 \text{ yr,}$$

أو 13.6 بليون سنة. يسمّى عمر الكون المحسوب بهذه الطريقة زمن التمدد المميز أو ”عمر هبل“، وهذا حساب تقريبيّ على اعتبار أنّ معدل تمدد الكون ثابت (والذي يعتقد هذه الأيام بأنه غير صحيح). وهناك حسابات حديثة (2003) أعطت عمر الكون على أنّه $13.7 \times 10^9 \text{ yr}$ ، وهذه القيمة تعطي اتفاقاً كبيراً مع حسابات عمر هبل التقريبيّ.

عمر الكون

* نموذج ثبات الحالة

قبل أن نناقش نظرية الانفجار العظيم بتفاصيلها. سنشير إلى أحد بدائله وهو نموذج ثبات الحالة الذي يفترض أنّ الكون قديم أبدي الدهر. ويبدو الآن كما لو كان في أيّ وقت مضى (هذا يفترض الانتظام في كلّ من الزمان والمكان ويُسمّى المبدأ الكوني التام). واستناداً إلى نموذج ثبات الحالة. فإنّه لا توجد تغيرات في مقياس كبير قد حدثت في الكون كوحدة واحدة. أي لا يوجد انفجار عظيم. لتأكيد هذه النظرة مقابل ابتعاد المجرات عن بعضها. فإنّ قانون حفظ الكتلة – الطاقة يجب انتهاكه. أي أنّ المادة يجب أن تخلق باستمرار لتأكيد الانتظام. إنّ معدل خلق الطاقة المطلوب صغير جداً؛ نيوكليون واحد في المتر المكعب كلّ 10^9 سنة تقريباً.

لقد زوّد نموذج ثبات الحالة نموذج الانفجار العظيم بمنافسة مناسبة في منتصف القرن العشرين. ولكن اكتشاف أشعة الميكروويف الكونية الخلفية (البند اللاحق). بالإضافة إلى التمدد الملحوظ في الكون جعل نموذج الانفجار العظيم مقبولاً عالمياً تقريباً.

6-33 الانفجار العظيم وخلفية المايكروويف الكونية

يقترح تمدد الكون أنّ الأجسام العادية الموجودة في الكون كانت في وقت ما قريبة من بعضها أكثر مما هي عليه الآن. وهذا هو الأساس بالنسبة للفكرة التي تقول إنّ الكون بدأ قبل نحو 13.7 مليار عام. ثم تمدد من حالة تنصّف بكثافة ودرجة حرارة مرتفعة جداً تُسمّى الانفجار العظيم.

إنّ الانفجار العظيم ليس انفجاراً؛ لأنّ الانفجار ينثر قطعاً إلى الفراغ المحيط. ولكن بدلاً من ذلك. فإنّ الانفجار العظيم كان بداية لتمدد الكون نفسه. إنّ حجم الكون الذي نشاهده كان صغيراً جداً في البداية. ثم تمدد منذ ذلك الحين. ويجب ألا نعتقد أنّ الحجم الأصلي الدقيق لمادة كثافتها كبيرة جداً على أنه كتلة مركزة في وسط فضاء كبير يحيط بها. إنّ هذا الحجم الأصلي الدقيق والكثيف هو الكون: الكون كاملاً. ولم يكن هناك أيّ شيء آخر. وعندما نقول إنّ الكون كان في زمن ما أصغر مما هو عليه الآن. فإنّنا نقصد أنّ متوسط المسافة بين المجرات (أو الأجسام الأخرى) كان أقلّ. لذلك. فإنّ حجم الكون هو الذي ازداد منذ الانفجار العظيم.

إنّ المدلول الرئيس الذي يؤيد الانفجار العظيم هو الإشعاعات الخلفية للميكروويف الكونية (CMB) التي اكتشفت كما يلي:

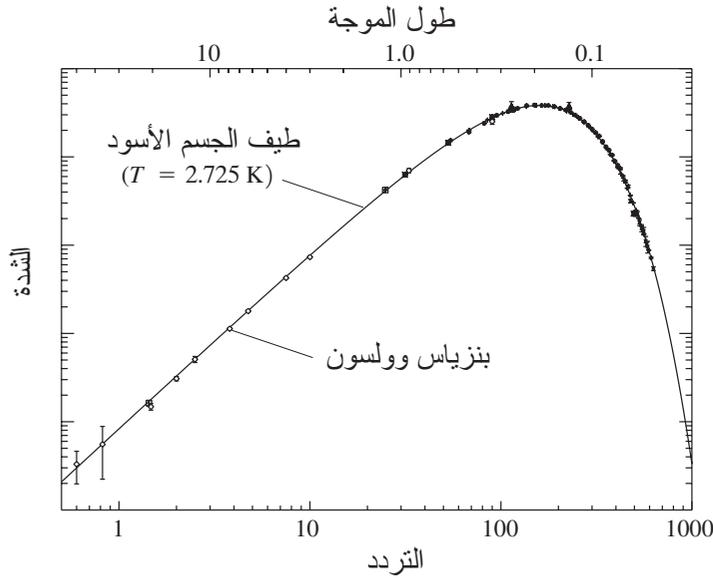
في عام 1964 كان العالمان أرنو بنزياس وروبرت ولسون يختبران مشكلة ما افترضاه التشويش الخلفي ”أو السكوني“ في التلسكوب اللاسلكي الخاص بهما (جهاز هوائي كبير للكشف عن موجات المذيع من السماء. الشّكل 33 – 21). وفي النهاية. اقتنعا أنّ هذا التشويش حقيقيّ. وأنّه قادم من خارج المجرة. لقد قاما بإجراء أقيسة دقيقة عند الطول الموجي $\lambda = 7.35 \text{ cm}$ الذي يقع ضمن منطقة المايكروويف من الطيف الكهرومغناطيسي (الشّكل 22 – 8). لقد وجدوا أنّ شدة هذه الإشعاعات لا تتغير في الأصل من النهار إلى الليل. أو أيّ وقت في السنة. كما أنها لا تعتمد على الاتجاه. إنها تأتي من الاتجاهات جميعها في الكون. وبالشدة نفسها. وبدقة أفضل من 1%. ويمكن الاستنتاج فقط أنّ هذه الإشعاعات تأتي من الكون كلّهُ.

الانفجار العظيم

الشّكل 33 – 21: روبرت ولسون (يساراً) وأرنو بنزياس وخلفهم الهوائي البوقي الذي صمماه.



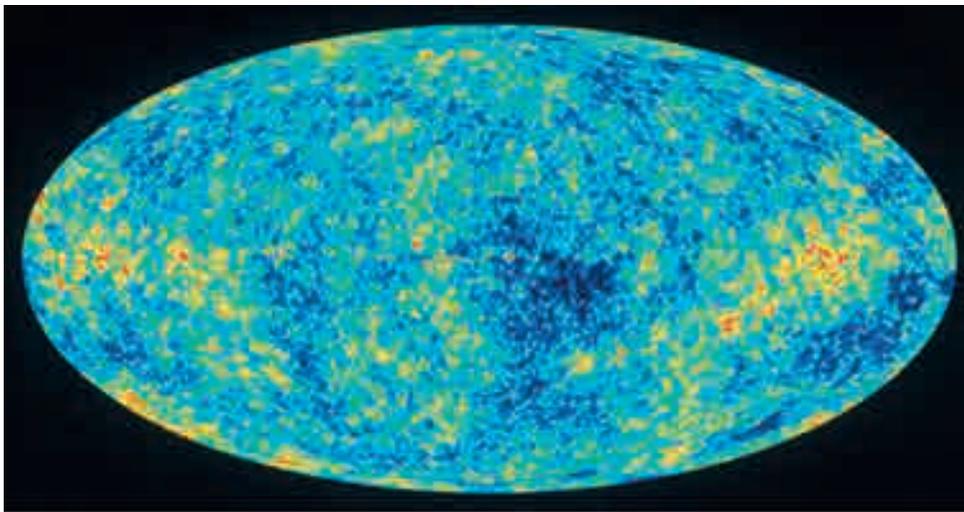
الخلفية الكونية لشعاع المايكروويف
2.73-k



الشكل 22 - 33 يبين طيف الإشعاعات الخلفية الكونية للمايكروويف، يرينا منحني الجسم الأسود والأقيسة التجريبية بما فيها تلك التي حصل عليها بنزياس وولسون. (الشكر لكل من سموت وسكوت. تمثل الخطوط الرأسية عدم اليقين في الأقيسة التجريبية.)

إنّ شدة إشعاعات خلفية المايكروويف الكونية هذه كما تم قياسها عند $\lambda = 7.35 \text{ cm}$ والتي تقابل إشعاعات الجسم الأسود (انظر البند 27 - 2) عند درجة الحرارة 3K تقريبًا. وعند قياس إشعاعات عند أطوال موجية أخرى، وجد أنّ شدتها تقع على منحني الجسم الأسود كما هو مبين في (الشكل 22 - 33). لتقابل درجة الحرارة 2.725 K تبدأ قوة جديدة. لقد كان الانتظام المميز لإشعاعات خلفية المايكروويف الكونية متوافقًا مع المبدأ الكوني. ولكن شعر علماء الفيزياء النظريّة بضرورة إلى وجود تباين قليل في الخصائص، أو نوع من عدم التجانس في CMB التي كونت البذور التي بدأت حولها تشكّل مجرة ما، وبالفعل، فقد وجد أنّ مناطق صغيرة ذات كثافة ودرجة حرارة مرتفعة قليلًا يمكن أن تتكون قد انكمشت تحت تأثير الجاذبيّة لتتشكّل نجومًا ومجرات. وقد اكتشفت هذه المناطق الصغيرة ذات الخصائص المتباينة أولًا بواسطة COBE (مسبار الكشف عن الخلفية الإشعاعية الكونية) وهو قمر صناعي استخدم في هذه التجربة عام 1992، ثم بواسطة تجارب لاحقة أكثر تفصيلًا وصلت ذروتها في عام 2003 عن طريق النتائج التي تم الحصول عليها من WMAP (مسبار تباين خصائص مايكروويف ويلكنسون). انظر (الشكل 23 - 33). حيث بين WMAP أن درجة حرارة CMB هي في حدود $2.725 \pm 0.002 \text{ K}$ وقد كانت درجة حرارة CMB دليلًا قويًا يؤيد الانفجار العظيم. كما أنها زودتنا بمعلومات حول الظروف السائدة في الكون المبكر جدًا. وفي الحقيقة، فقد قام جورج جامو ومساعدوه بإجراء حسابات في أواخر أربعينيات القرن الماضي تدلّ على أنّ نشأة الكون من الانفجار العظيم يجب أن تؤدي إلى إنتاج مثل هذه الإشعاعات الخلفية للمايكروويف الكونية.

أهمية CMB: الانفجار العظيم



الشكل 23 - 33 إشعاعات خلفية المايكروويف الكونية خلال السماء، تمثّل الدلالات اللونية الاختلافات في درجة الحرارة عن المتوسط 2.725 K: يتراوح التدرج اللوني بين $+200 \mu\text{K}$ (اللون الأحمر) و $-200 \mu\text{K}$ (اللون الأزرق الغامق). وتمثّل البقع الساخنة والباردة (والاختلافات في الكثافة أيضًا). تم الحصول على هذه النتائج من القمر الصناعي WMAP في عام 2003؛ يصل التحليل الزاوي إلى 0.2° . النسخة الأكبر من WMAP الموجودة في بداية هذا الفصل تم عملها عند حزمة تردد معينة، وتشتمل على مجرتنا التي تظهر في مقدمة الصورة (الشريط الأحمر). ولكنها أزيلت من الصورة الحالية.

الفوتونات منفصلة

وكي نفهم السبب: دعنا نتأمل في طبيعة الانفجار العظيم. في البداية، كانت درجة الحرارة مرتفعة جداً إلى الحد الذي لا يمكن أن تكون فيه أي ذرات في المراحل المبكرة للكون. وبدلاً من ذلك، كان الكون يحتوي على إشعاعات (فوتونات)، وبلازما من إلكترونات مشحونة، وجسيمات أولية أخرى فقط. كان الكون معتمًا؛ أي أنّ الفوتونات محصورة بحيث تنتقل مسافة قصيرة قبل أن تبعثر مرةً أخرى بشكل أساسي عن طريق الإلكترونات. وبالفعل، فإنّ تفاصيل الإشعاعات الخلفية للمايكروويف الكونية هي دليل قويّ على أنّ المادة والإشعاعات كانا في وقت ما في حالة اتزان عند درجة حرارة مرتفعة جداً. وكلما تمدد الكون، فإنّ الطاقة تنتشر على حجم يزداد بشكل كبير مما يؤدي إلى انخفاض درجة الحرارة. وبعد 380,000 سنة فقط عندما انخفضت درجة الحرارة إلى 3000K تقريباً، تمكنت الأنوية والإلكترونات من الاتحاد مع بعضها لتشكيل الذرات. ومع اختفاء الإلكترونات الحرة نتيجة اتحادها مع الأنوية لتشكيل الذرات، أصبحت الإشعاعات: أي أنّها أصبحت غير مقترنة بالمادة. ثم أصبح الكون شفافاً لأنّ الفوتونات الآن حرة، وتنتقل تقريباً دون إعاقة بخطّ مستقيم خلال الكون.

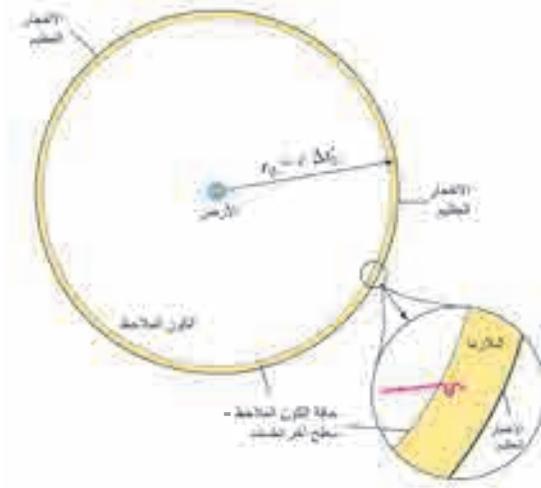
كلما تمدد الكون، فإنّ الأطوال الموجية للإشعاعات تطول أيضاً (يمكنك التفكير في الموجات الواقفة، البند 11 - 13). أي حدث إزاحة حمراء نحو الأطوال الموجية الأطول التي تقابل درجة حرارة منخفضة (تذكر قانون فين $I_p T = \text{ثابت}$ ، البند 27 - 2). حتى تصل إلى الإشعاعات الخلفية التي نشاهدها في الوقت الحاضر عند درجة الحرارة $2.7 K$.

* العودة إلى الماضي نحو الانفجار العظيم؛ الزمن الماضي

يبين (الشكل 33 - 24) الأرض كنقطة مراقبة. عند النظر في الاتجاهات جميعها إلى الماضي نحو الانفجار العظيم والفترة الزمنية الموجزة (تمتد إلى 380,000 سنة) عندما كانت الإشعاعات محصورة في البلازما المبكرة (الشريط الأصفر). يُسمّى الزمن الذي يستغرقه الضوء حتى يصل إلينا من حادثة ما (مثلاً قبل 5×10^9 سنة) **الزمن الماضي**. ويبين الجزء الأكبر من (الشكل 33 - 24) تبعثراً مكرراً لفوتون داخل البلازما ثم يخرج منها في خطّ مستقيم. إنّ الاتجاه الذي ننظر إليه ليس مهماً؛ لأنّ مراقبتنا للكون المبكر جداً تصطدم دائماً بهذا الحاجز من البلازما؛ يمكننا أن نرى فقط وبحد أقصى سطحه الذي يُسمّى "سطح آخر تبعثر" ولكن ليس ما في داخله.

لقد حدث للأطوال الموجية التي تصدر من هناك إزاحة حمراء بمقدار $z \approx 1000$. أما الزمن $\Delta t'$ في (الشكل 33 - 24) فيمثل الزمن الماضي (ليس الزمن الحقيقي الذي يشير إلى المستقبل).

الزمن الماضي



الشكل 33 - 24 عندما ننظر إلى السماء من سطح

الأرض، فإننا ننظر إلى الزمن الماضي. كما يستطيع أي ملاحظ في هذا الكون رؤية الشيء نفسه.

تستطيع رؤية سطح آخر تشتت حدث والذي يمثل CMB. وهذا الانفجار يمثل ال 380,000 التي قضيت من عمر الكون عندما كان مقيماً؛ حيث يظهر البروتون يتشتت عدة مرات ينفصل عند 380,000 سنة من الانفجار العظيم، حيث يصبح حراً للانتقال في خط مستقيم. ولولا لم يكن هذا البروتون متجه نحونا عندما "تحرر" فإن الكثير من البروتونات غيره قد فصلت. لم يتم اظهار المحررات ولكنها ستكون متكاتفه حول الأرض.

الشكل الفضاء

ملاحظة: الشكل ليس طريقة طبيعية. حيث تظهر الخرائط جزءاً من العالم كما يمكن رؤيته عند أي لحظة في الزمن. ولكن يظهر هذا الشكل الفضاء على صورة خريطة ولكن ليست جميع النقاط ضمن الزمن نفسه. حيث يحتاج الضوء القادم من نقطة تبعد مسافة (r) من الأرض إلى زمن مقداره $\Delta t' = r/c$ للوصول إلى الأض وبالتالي يظهر حدثاً حدث قبل ذلك الزمن $\Delta t' = r/c$ في الماضي وهذا ما نقصد بالنظر إلى الورا. حدث الانفجار العظيم عند مليون سنة ضوئية

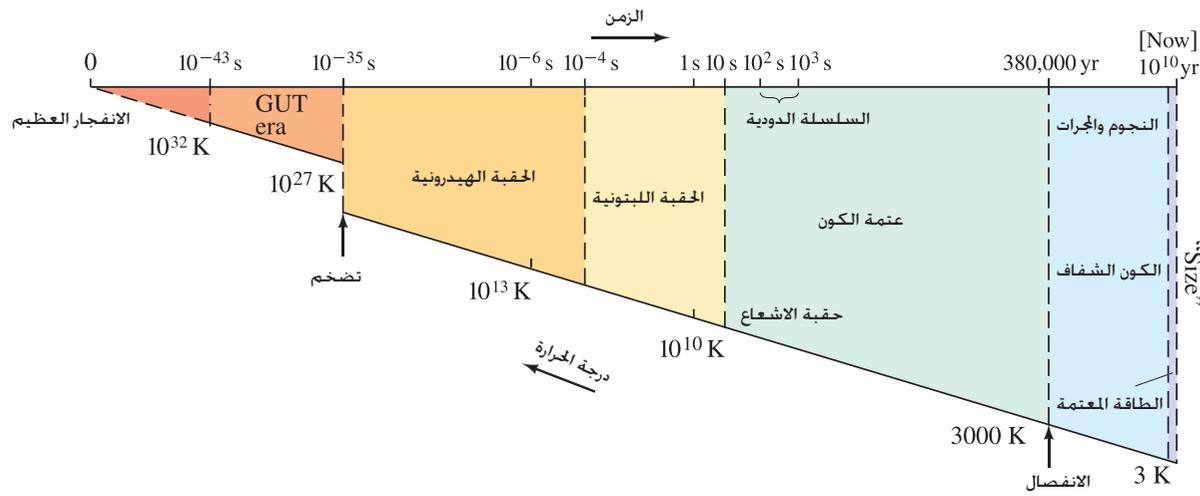
$$\Delta t'_0 = 13.7 \text{ Gyr}$$

7-33 النموذج الكوني؛ التاريخ المبكر للكون

لقد طوّرت نظرية مقنعة عن أصل الكون ونشأته في آخر عقد أو عقدين. وتُسمّى الآن **النموذج الكوني المعياري**. أو نموذج الانسجام أحياناً. يستند جزء من هذه التّطوّرات التّطوّرات التجريبية والحديثة في فيزياء الجسيمات الأولية. وبالفعل. فإنّ علم الكونيات وفيزياء الجسيمات الأولية يثري كلّ منهما الآخر إلى حدّ مذهل.

دعنا نعود إلى الأوقات المبكرة – قريباً قدر الإمكان من الانفجار العظيم – ونتتبع مسار النموذج المعياري للحوادث عندما تمدّد الكون. ثم يبرد بعد الانفجار العظيم. بداية. سنتحدث عن فترات زمنية صغيرة بالإضافة إلى درجات حرارة مرتفعة جداً. بعيداً وراء أيّ شيء في الكون الحالي. يبين (الشكل 33 – 25) تمثيلاً بيانياً مسطحاً لهذه الحوادث. وربما يستفاد منه لاحقاً.

الشكل 33 – 25: تمثيل بيانيّ مسطح لتطورات الكون بعد الانفجار العظيم وفق علم الكونيات الحديث. [المقياس الزمّني في الأغلب لوغاريتميّ كلّ معامل 10 في الزمن له المعاملة نفسها)، ما عدا عند البداية (ليس هناك $t = 0$ على المقياس اللوغاريتميّ). وبعد $t = 10^{-35}$ مباشرة (لتوفير متسع). الارتفاع العمودي عبارة عن فكرة تقريبية لحجم الكون، يقترح بشكل أساسيّ تمدد الكون].



التاريخ

نبدأ عند زمن صغير جداً يمثل جزءاً من الثانية 10^{-43} s بعد حدوث الانفجار العظيم. هذا الزمن قصير جداً، ولا يمكن تخيله. ولهذا، فإنّ التنبؤات يمكن أن تكون نوعاً من التخمين فقط. سابقاً. لم نتمكن من قول أيّ شيء لأننا ما زلنا لا نعرف تأثيرات التّطوّرات الكمية في الجاذبية، وهي ضرورية في حالة الكثافات ودرجات الحرارة المرتفعة جداً. يعتقد بأنه قبل 10^{-35} s. ربما قريباً 10^{-43} s. كانت القوى الأربع في الطبيعة موحدة: كانت هناك قوة واحدة فقط. إنّ درجة الحرارة في هذه الظروف يجب أن تكون في حدود 10^{32} K. وهي ما تجعل الجسيمات تتحرك في الاتجاهات جميعها بمتوسط طاقة حركية تساوي 10^{19} GeV (انظر إلى معادلة 8 – 13).

$$KE \approx kT \approx \frac{(1.4 \times 10^{-23} \text{ J/K})(10^{32} \text{ K})}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} \approx 10^{28} \text{ eV} = 10^{19} \text{ GeV}$$

(لاحظ أنّ المعامل $\frac{3}{2}$ في المعادلة 8 – 13، يهمل عادة عند إجراء حسابات لمثل رتبة هذا المقدار.) عند $t = 10^{-43}$ s يعتقد أنّ نوعاً من التحول الطّوري قد حدث. وفي خلاله انفصلت قوة الجاذبية كقوة مستقلة. هذا التحول الطّوري والتحويلات الطّورية المتعاقبة تشابه ذلك الذي يحدث للماء عندما يبرد من غاز ثم يتكاثف إلى سائل، ومن ثمّ يتحول إلى جليد بزيادة تبريده*. لقد انهار تماثل القوى الأربع. في حين بقيت القوى القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية موحدة. وأنّ الكون دخل في الحقبة الموحدة الكبرى (انظر إلى الفصل 32).

علم الكونيات الحديث "السيناريو" لتاريخ الكون بعد الانفجار العظيم القوى الأربعة جميعها موحدة.

القوة الأربعة جميعها مجتمعة

انكسار التماثل (تكاثف الجاذبية)

* ربما من المضحك ملاحظة أنّ قصتنا هنا عن الأصول تشبه حسابات قديمة تشير إلى "فراغ". "أرض فاحلة لم تتشكل". "هاوية" "فصلت المياه" (ربما حول طوري؟). لم تتم الإشارة إلى الظهور المفاجئ للضوء.

لم يكن هناك فرق بين الكواركات والليبتونات، ولم تكن أعداد البريون والليبتون محفوظة. وبعد ذلك بفترة قصيرة، عندما تمدد الكون بشكل ملحوظ، وانخفضت درجة الحرارة لتصل إلى نحو $10^{27}K$. كان هناك تحولٌ طوريٌّ آخر، وانفصلت القوة القوية عند $10^{-35}s$ تقريبًا بعد الانفجار العظيم. والآن، أصبح الكون مليئًا بسحاب كثيف من الليبتونات والكواركات. كانت الكواركات في البداية حرة، ولكنها بدأت بتشكيل جسيمات طبيعية سريعًا؛ النيوكليونات، وهادرونات أخرى، وجسيماتها المضادة. وهكذا، وحصر الكواركات مع حصر الكواركات دخل الكون حقبة الهادرون.

الانتفاخ

وفي ذلك الزمن، عندما كان عمر الكون في حدود $10^{-35}s$ فقط، ربما حدث شيء غريب وفقًا لعلماء الفيزياء النظرية. اقترحت هذه الفكرة العبقريّة في حدود عام 1980 حيث أشارت إلى أنّ الكون قد تمدد أُسّيًّا بشكل لا يصدق، وازداد حجمه بعامل 10^{40} أو 10^{50} خلال جزء دقيق جدًا من الثانية، ربما يصل إلى $10^{-34}s$. إنّ فائدة سيناريو الانتفاخ هذا، هو أنه يقدم حلاً للمشاكل الرئيسية في النماذج المبكرة للانفجار العظيم، كتفسير سبب استواء الكون، بالإضافة إلى التوازن الحراري الذي يعطى CMB* منتظم تقريبًا. وبعد الانتفاخ الآن ميزة مقبولة لنظرية الانفجار العظيم.

وبعد فترة الانتفاخ القصيرة جدًا، استقر الكون عائدًا إلى تمدده الطبيعي. ولقد أصبح الكون الآن عبارة عن سحابة كثيفة من الليبتونات والهادرونات. ويعتقد أنّ هذه السحابة الكثيفة خليط كبير من الجسيمات والجسيمات المضادة، بالإضافة إلى الفوتونات – جميعها متساوية تقريبًا في العدد – تتصادم مع بعضها بشكل متكرر، وتتبادل الطاقة.

وبحلول الوقت الذي أصبح عنده عمر الكون نحو $10^{-6}s$ كانت درجة حرارته قد انخفضت إلى $10^{13}K$ تقريبًا، وهي التي تقابل متوسط الطاقة الحركية 1 GeV ، واختفت الغالبية العظمى من الهادرونات. لمعرفة سبب ذلك؛ دعنا نركّز على الهادرونات المألوفة؛ النيوكليونات وجسيماتها المضادة. عندما كان متوسط الطاقة الحركية لجسيمات أعلى نوعًا ما من 1 GeV ، كانت النيوترونات والبروتونات وجسيماتها المضادة تنشأ بشكل مستمر من طاقات تصادمات تشتمل على فوتونات وجسيمات أخرى. مثل:

$$\text{مثال: } p + \bar{p} \rightarrow \text{فوتونات}$$

$$\rightarrow n + \bar{n}$$

ولكنّه يحدث بسرعة، الجسيمات والجسيمات المضادة تفنى، فعلى سبيل المثال:

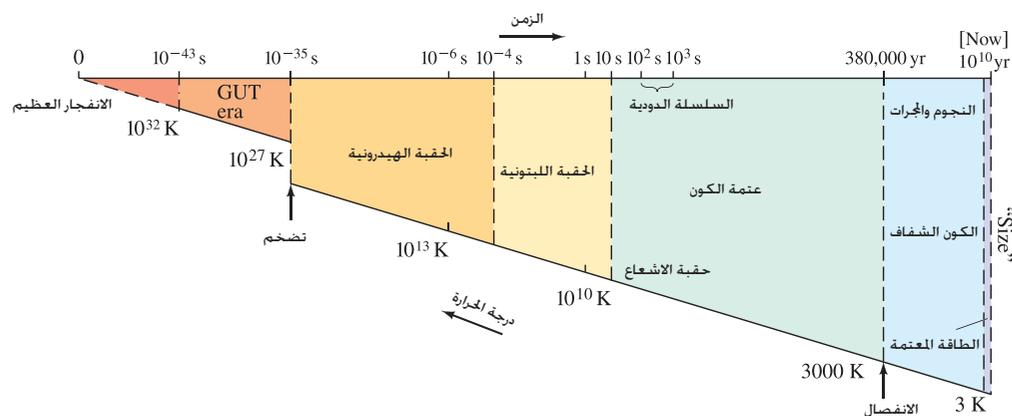
$$p + \bar{p} \rightarrow \text{فوتونات أو ليبتونات}$$

ولهذا، فإنّ عمليات خلق النيوكليونات وفنائها كانت متوازنة. لقد كانت أعداد النيوكليونات والنيوكليونات المضادة كبيرة – تقريبًا الأعداد نفسها التي كانت للإلكترونات، والبيوترونات، والفوتونات، ولكن عندما تمدد الكون وبرد، وانخفض متوسط الطاقة الحركية للجسيمات إلى أقلّ من 1 GeV وهو الحد الأدنى للطاقة الذي يحتاج إليه تصادم مثالي لخلق نيوكليونات ونيوكليونات مضادة (حوالي 940 MeV لكلّ منها) - فإنّ عملية خلق النيوكليونات لا يمكن أن تستمر. أما عملية الفناء، فيمكن أن تستمر على أيّ حال، حيث تلغي النيوكليونات المضادة النيوكليونات حتى تنتهي النيوكليونات كلّها تقريبًا. ولكن ليس نهائيًا تمامًا. ولتفسير عالمنا الحالي الذي يشمل بشكل أساسي مادة (نيوكليونات وإلكترونات) وكمية قليلة من الجسيمات المضادة؛ يجب أن نفترض تشكّل فائض من الكواركات أكثر من الكواركات المضادة في وقت مبكر من عمر الكون، ربما نحو $10^{-35}s$ بعد الانفجار العظيم.

إختفاء غالبية الهادرونات

لماذا توجد مادة الآن؟

* كيف يفسر الانتفاخ استواء الكون؟ يمكن أن يفهم هذا عن طريق التفكير في كرة؛ دعنا نفترض الكرة التي في الشكل (33 – 15) والتي يظهر انحناء سطحها؛ فإذا ازداد حجمها بشكل كبير، فإنّ سطحها يبدو في الأساس مستويًا بالنسبة لمشاهد عليها. يفسر الانتفاخ أيضًا سبب الانتظام القوي لـ CMB. دون الانتفاخ، كان الكون الدقيق عند اللحظة $10^{-35}s$ ما زال كبيرًا بالنسبة لأجزائه كلها حتى تكون متماسكة كي تصل إلى درجة الحرارة نفسها (لا يمكن أن تنتقل المعلومات بسرعة أكبر من سرعة الضوء c). افترض أنّ قطر الكون كان 1 cm تقريبًا عند اللحظة $10^{-36}s$ وفقًا للنظرية الأصلية للانفجار العظيم. عند تلك اللحظة، يقطع الضوء مسافة 10^{-27} m $\approx (10^{-36} / \text{s})(3 \times 10^8 \text{ m/s}) = d = ct$ ، وهي مسافة صغيرة بالنسبة لكون قطره 1 cm ليكون في حال تواصل بين أجزائه. ولكن إذا كان الكون أصغر بنحو 10^{40} و 10^{50} مرة، فيمكن عندها أن يكون متماسكًا ومتوازنًا حراريًا حتى ينجم عنه CMB منتظم تقريبًا كما نشاهده. لذلك، فإنّ الانتفاخ يسمح للكون المبكر جدًا قبل الانتفاخ ليكون صغيرًا جدًا بحيث تكون أجزاؤه جميعها متوازنة حراريًا، في حين يكون كبيرًا جدًا بعد الانتفاخ وصولًا إلى الكون الحاضر.



الشكل 33 - 25 (مكرر)

تمثيل بيانيّ مسطح للتطورات التي حدثت للكون بعد الانفجار العظيم وفقاً لعلم الكونيات الحديث.

وقد أدّى ذلك إلى وجود فائض قليل من النيوكليونات على النيوكليونات المضادة. وهذه النيوكليونات المتبقية أو الفائضة هي التي تتكوّن منها حاليّاً. لقد كان الفائض في النيوكليونات على النيوكليونات المضادة حوالي جزء من كل 10^9 . وفي وقت مبكر خلال حقبة الهادرون. كان عدد النيوكليونات مساوياً تقريباً لعدد الفوتونات. وبعد نهايتها، فإنّ النيوكليونات الفائضة تمثّل فقط نيوكليونا واحداً لكل 10^9 فوتون. وقد استمرت هذه النسبة حتى وقتنا الحاضر. عند اللحظة 10^{-6} s بعد الانفجار العظيم، انخفض عدد البروتونات والنيوترونات والجسيمات الثقيلة الأخرى كلّها بشكل هائل. وقد اختفت الهادرونات الأخف، والبيونات كما حصل للنيوكليونات؛ لأنّها أقلّ الهادرونات كتلة (140 MeV). وقد كانت آخر الهادرونات التي تختفي بعد نحو 10^{-4} s من الانفجار العظيم. أما الجسيمات الخفيفة التي تضم أيضاً الإلكترونات والنيوترينوات، فقد كانت الشّكل السائد للمادة. وهكذا، دخل الكون إلى حقبة الليبتون.

وبمرور الوقت، وبعد أن مرّت أول ثانية كاملة (أكثر ثانية مليئة بالأحداث في التاريخ) برد الكون إلى 10 مليارات درجة تقريبا، أي 10^{10} K . لقد كان متوسط الطاقة الحركية نحو 1 MeV . وما زالت هذه الطاقة كافية لخلق إلكترونات، وبوزترونات، وتوازن تفاعلات الفناء الخاصة بهم؛ لأنّ كتلتهما تقابل طاقة تصل إلى نحو 0.5 MeV . لذلك، فقد كان عدد e^+ و e^- مساوياً لعدد الفوتونات. ولكن خلال ثوانٍ أكثر قليلاً، انخفضت درجة الحرارة بشكل كبير بحيث لم يعد يتشكل e^+ و e^- . واستمرت عملية الفناء (فوتونات $e^+ + e^- \rightarrow$). وكما حدث للنيوكليونات من قبل، فقد اختفت الإلكترونات والبوزترونات جميعها من الكون باستثناء فائض بسيط من الإلكترونات (تشارك فيما بعد مع الأنوية لتشكيل الذرات). لذلك، بعد الانفجار العظيم بنحو 10 s، دخل الكون حقبة الإشعاع. لقد كانت المكونات الرئيسية فوتونات ونيوترينوات. ولكن النيوترينوات تشارك فقط في حالة القوة الضعيفة وهي نادرة التفاعل. لذا، فإنّ الكون منذ ذلك الحين يشتمل على كميات وفيرة من الطاقة في المادة والإشعاعات. وبهذا، فقد أصبح الآن تسوده الإشعاعات؛ كانت الإشعاعات تحتوي على طاقة بكميات أكثر بكثير من تلك التي في المادة. وقد دام ذلك لعشرات الآلاف من السنين (الشكل 33 - 25).

وفي غضون ذلك، وخلال الدقائق القليلة اللاحقة، حدثت وقائع مهمة. بداية بعد حوالي دقيقتين أو ثلاث دقائق بعد الانفجار العظيم بدأ الاندماج النووي بالحدوث. لقد انخفضت درجة الحرارة إلى نحو 10^9 K . وهو ما يقابل متوسط الطاقة الحركية $\overline{KE} \approx 100 \text{ keV}$ حيث يمكن للنيوكليونات مهاجمة بعضها لتندمج (بند 31 - 3). ولكنها بردت الآن بشكل كاف بحيث لا يمكن للأنوية المتشكلة حديثاً الانفصال إلى مكوناتها في الحال نتيجة للتصادمات المتوالية. ومن المحتمل الآن أن تكون أنوية الديوتيريوم، والهيليوم وكميات قليلة من الليثيوم قد تشكلت. ولكن الكون كان يبرد بسرعة والأنوية الكبيرة لم تتشكل بعد. وبعد دقائق قليلة فقط، ربما أقلّ من ربع ساعة بعد الانفجار العظيم، انخفضت درجة الحرارة بشكل كبير بحيث توقف تشكيل النيوكليونات، والذي لن يبدأ مرة أخرى لملايين السنين (في النجوم). لذا، بعد أول ساعة أو ما يقارب ذلك من عمر الكون، تكوّنت المادة بشكل أساسي من أنوية مجردة من الهيدروجين (نحو 75%) والهيليوم (25% تقريباً) والإلكترونات. أمّا الإشعاعات (الفوتونات) فما زالت هي السائدة.

* يتفق تنبؤ هذا النموذج المعياري بإنتاج 25% من الهيليوم مع ما نشاهده في الوقت الحاضر - يحتوي الكون على 25% من الهيليوم - وهو دليل قوي يدعم النموذج المعياري للانفجار العظيم. علاوة على ذلك، فإنّ النظرية تقول إنّ نسبة وفرة 25% من الهيليوم تتفق تماماً مع وجود ثلاثة أنواع للنيوترينو - وهو العدد الذي نشاهده في الوقت الحاضر. وقد وضعت حدّاً أعلى مقداره أربعة لأقصى عدد ممكن لأنواع النيوترينو. ولدنيا هنا حالة حيث قدم علم الكونيات تنبؤاً معيّنًا عن الفيزياء الأساسية.

حقبة الليبتون

كون يسوده الإشعاع

تشكّل أنوية He

ولادة الذرات المستقرة

المادة تسود الكون

لقد اكتمل موضوعنا تقريبًا. إنّ الحادثة المهمة التالية يفترض وقوعها بعد حوالي 380,000 سنة. حيث تمدد الكون إلى نحو $\frac{1}{1000}$ من حجمه الحالي. وانخفضت درجة الحرارة إلى 3000K تقريبًا. لقد كان متوسط الطاقة الحركية للأنوية والإلكترونات والفوتونات أقلّ من إلكترون فولت واحد. وبما أنّ طاقات تأيّن الذرات من رتبة الإلكترون فولت. وبعد أن انخفضت درجة الحرارة إلى أقلّ من ذلك. فإنّ الإلكترونات يمكن أن تدور حول الأنوية المجردة وتبقى هناك (دون أن يحدث لها انبعاث بواسطة التصادمات) وتتشكل الذرات. ومع ولادة الذرات. فقد أصبحت الفوتونات - التي كانت تتبعثر باستمرار من الإلكترونات الحرة - الآن حرّة تنتشر دون عوائق. تقريبًا. خلال الكون. وكما أشرنا في البند السابق. فإنّ الفوتونات أصبحت مفصولة عن المادة. لقد قلّت الطاقة الكلية الموجودة في الإشعاعات (الاستطالة في الطول الموجي كلّما تمدد الكون) وحتى قبل حدوث الانفصال (عند حوالي 56,000 سنة) كانت الطاقة الكلية الموجودة في المادة سائدة على تلك التي في الإشعاعات. لقد قيل إنّ الكون أصبحت تسوده المادة. كلما تمدد الكون. تبرد الإشعاعات الكهرومغناطيسية أكثر لتصل إلى 2.7 K في الواقع الحاضر لتتشكّل الخلفية الإشعاعية للمايكرويف الكونية التي نكشف عنها من أيّ مكان في الكون.

وبعد ولادة الذرات. بدأت النجوم والمجرات تتشكل - فرضيًا بواسطة الجاذبية الذاتية حول تكدّسات (غير متجانسة) الكتلة. وقد بدأت النجوم بالتكون بعد نحو 200 مليون سنة من الانفجار العظيم. أمّا المجرات. فقد تكونت تقريبًا بعد 10^9 سنة تقريبًا. وما زال الكون يتطور حتى يومنا هذا بعد 13.7 مليار سنة تقريبًا على نشأته.

* * *

لم يتم إثبات هذا الافتراض بأيّ طريقة كانت. ولكنه يعطي. وللمرة الأولى. صورة عملية عن كيفية بداية الكون وتطوره.

وهناك حادثة رئيسة اكتشفت حديثًا فقط. هي أنّ الكون عندما كان في منتصف عمره الحالي (قبل حوالي 5 - 7 مليارات سنة). بدأ تمدده يتسارع. وقد كان هذا مفاجأة كبيرة؛ لأنّه كان قد افترض أنّ تمدد الكون يجب أن يتباطأ بسبب التجاذب الكتلي للأجسام جميعها بين بعضها بعضًا. وبالفعل. فإنّ اكتشافًا آخر رئيسًا وحديثًا يدل على أنّ المادة المألوفة تشكل كمية قليلة جدًا من مجموع كتلة - طاقة الكون. (4% \approx). بالإضافة إلى ذلك. وكما سيناقش في البند التالي. فإنّ المساهمات الرئيسية لكثافة الطاقة الكونية هي المادة المظلمة والطاقة المظلمة كذلك.

إلى يمين (الشكل 33 - 25) هناك شريط رأسي ضيق يمثّل أحدث 5 إلى 7 مليارات سنة من عمر الكون. والتي يبدو خلالها أنّ الطاقة المظلمة هي السائدة.

8-33 المادة المظلمة والطاقة المظلمة

بناءً على النموذج المعياري للانفجار العظيم. فإنّ الكون يتطور ويتغير. حيث تخلق النجوم الفردية وتتطور. ثم تموت كأقزام بيض. أو نجوم نيوترونية. أو ثقوب سود. أحد الأسئلة المهمة هو. هل سيستمر الكون في التمدد إلى الأبد؟ لقد كان يعتقد حتى أواخر خمسينيّات القرن الماضي أنّ الكون تسوده المادة التي تتفاعل بواسطة الجاذبية. وقد كان هذا السؤال مرتبطًا بانحناء الفراغ - الزمن (البند 33 - 4). إذا كان للكون انحناء سالب. فإنّ تمدد الكون سوف لن يتوقف. على الرغم من أنّ معدل التمدد يجب أن يقلّ بسبب التجاذب (الكتلي) بين أجزائه. مثل هذا الكون يكون مفتوحًا ولا نهائيًا. فإذا كان الكون مستويًا (دون انحناء). فإنّ الكون ما يزال مفتوحًا ولا نهائيًا. ولكن معدل تمدده يقترب ببطء من الصفر. وأخيرًا. إذا كان للكون انحناء موجب. فيجب أن يكون مغلقًا ونهائيًا. ويكون للجاذبية تأثير قويّ فيه بشكل كافٍ. بحيث يتوقف التمدد أخيرًا. ويبدأ الكون بالانكماش. وينهار على نفسه مصدرًا صوتًا هائلًا.

يتفق هذا النموذج القياسي الذي يمثّل 25% من الهيليوم البدائي مع ما نلاحظه اليوم. فالكون يحتوي على 25% من تركيبة هيليوم. وهذا دليل قوي يدعم نموذج الانفجار العظيم القياسي. إضافة لذلك. تقول النظرية أن وجود 25% من الكون من مادة الهيليوم يتوافق مع وجود ثلاثة أنواع نيوتريون. وهذا هو العدد الذي نلاحظه. وهذا يضع الحد الأعلى لأنواع النيوتريون لتكون أربع. وهنا يوجد لدينا وضع في علم الكونيات يتوقع بصورة دقيقة حول الفيزياء الأساسية للكون.

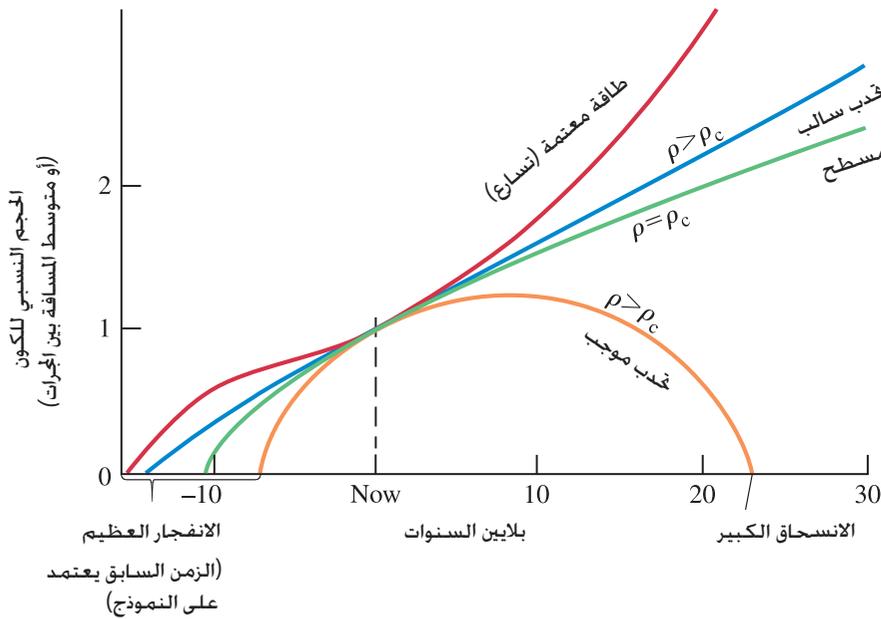
الكثافة الحرجة

وفقًا للسيناريو أعلاه (الذي لا يتضمن الاكتشاف الحديث لتسارع الكون) فإنّ نهاية الكون تعتمد على متوسط كثافة الكتلة في الكون. لمتوسط كثافة الكتلة التي تبلغ أكبر من قيمة حرجة تُسمّى **الكثافة الحرجة**. والتي قدرت بنحو

$$\rho_c \approx 10^{-26} \text{ kg/m}^3$$

كثافة الكون الحرجة

(أي، في المتوسط نيوكلونات قليلة لكل متر مكعب خلال الكون). ويجب أن تمنع الجاذبية استمرار تمدد الكون إلى ما لا نهاية. أخيرًا (إذا ما كانت $\rho > \rho_c$) فإنّ الجاذبية تجذب الكون إلى العكس بقوة ويكون انحناء "الزمان - المكان" موجبًا. إذا كانت الكثافة الحقيقية مساوية للكثافة الحرجة $\rho = \rho_c$ ، فإنّ الكون يكون مستويًا ومفتوحًا. أما إذا كانت الكثافة الحقيقية أقل من الكثافة الحرجة $\rho < \rho_c$ ، فإنّ انحناء الكون يكون سالبًا. انظر إلى (الشكل 33 - 26). في الوقت الحاضر نعتقد أنّ الكون قريب جدًا من أن يكون مستويًا. لكن الدليل الحالي يقترح أنّ الكون يتمدد بمعدل متسارع. كما سيناقش لاحقًا.



الشكل 33 - 26 ثلاثة احتمالات مستقبلية للكون اعتمادًا على كثافة المادة الاعتيادية، واحتمال رابع يتضمن الطاقة المظلمة. لاحظ أنه تم اختيار المنحنيات جميعها ليكون لها الآن الميل نفسه (معامل هبل، $H =$). بالعودة إلى الزمن الماضي حدث الانفجار العظيم حيثما لامس كل منحنى المحور الأفقي (الزمن).

المادة المظلمة

اقتنع العلماء من نتائج WMAP وتجارب أخرى أنّ الكون مستوي وأنّ $\rho = \rho_c$. ولكن هذه لا يمكن أن تكون فقط مادة باريونية عادية (99.9% من وزن الذرات هي بروتونات - بروتونات ونيوترونات). لقد حددت هذه التجارب الحديثة كمية المادة الباريونية العادية في الكون بـ 4% فقط من الكثافة الحرجة. ولكن، ما هي 96% الأخرى؟ هناك دليل قوي على وجود كمية مهمة من مادة غير مضيئة في الكون تُسمّى **المادة المظلمة**. فعلى سبيل المثال، تقترح مشاهدات دوران المجرات بأنها تدور كما لو أنّ كتلتها أكثر ضخامة مما يمكن رؤيته. تذكر من (الفصل 5).

(المثال 5 - 14) بالنسبة للقمر الصناعي الذي يدور حول الأرض (كتلتها M) أنّ:

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

وبالتالي فإنّ $v = \sqrt{GM/r}$. إذا طبقنا هذه المعادلة على النجوم في المجرة، فسنلاحظ أنّ سرعاتها تعتمد على كتلة المجرة. تبين المشاهدات أنّ النجوم البعيدة عن مركز المجرة تدور بشكل أسرع مما يتوقع من المادة المرئية، وهو ما يدل على وجود مادة غير مرئية ضخمة. وبالمثل، فإنّ مشاهدات حركة المجرات داخل التجمعات تقترح أيضًا أنّ لها كتلة أكثر ضخامة مما يمكن رؤيته. فماذا يمكن أن تكون هذه المادة المظلمة **الموجودة** في الكون؟ لا نعرف حتى الآن. لا يمكن أن تكون مكونة من مادة (باريونية) عادية. لذا، فإنّها تتكون من نوع آخر من الجسيمات الأولية.

تشكّل المادة المظلمة نحو 23% من كتلة - طاقة الكون وفقًا لأحدث التجارب. وهكذا، فإنّ "الكتلة - الطاقة" الكلية هي 23% مادة مظلمة زائد 4% بروتونات، ما يشكّل ما مجموعه 27%. وهذا لا يجعل ρ تقترب من ρ_c ما النسبة الباقية التي تشكل 73% لسنا متأكدين من ذلك أيضًا. ولكننا أسميناها "الطاقة المظلمة".

المادة المظلمة

الطاقة المظلمة – تسارع الكون

قبل عام 2000 بقليل، استقبل علماء الكونيات مفاجأة. لقد افترض أن الجاذبية هي القوة السائدة على نطاق واسع في الكون. وكان يعتقد أن تمدد الكون يجب أن يتباطأ مع الزمن لأن الجاذبية تعمل كقوة تجاذب بين الأجسام. لكن الأقيسة التي تمت على سوبرنوفات من النوع Ia (SN Ia) – أفضل الشمعات المعيارية – انظر البند 33 – 3) توضح بشكل غير متوقع أن SN Ia البعيدة (z مرتفعة) أكثر ظلمة من التوقعات. أي أنه إذا أعطيت مسافات البعيدة d كما تم تحديدها من إضاءاتها القليلة، وتم تحديد سرعاتها v من قيمة z المقاسة فإنها أقل مما هو متوقع حسب قانون هابل. وتدُل هذه النتيجة على أن المجرات القريبة تتحرك بعيداً عنا أسرع نسبياً من تلك البعيدة، وهذا يعني تسارع تمدد الكون في الحقب الحديثة. ويبدو أن (تسارع) هذا التمدد في الكون (بدلاً من التباطؤ المتوقع بسبب التجاذب الكتلي) قد بدأ قبل نحو 5 مليارات سنة (أي بعد الانفجار العظيم بحوالي 8×10^9 إلى 9×10^9 سنة).

تتسارع

ما الذي قد يجعل الكون يتسارع في تمدده بشكل مضاد لقوة التجاذب الكتلي؟ وهل فهمنا للجاذبية بحاجة إلى مراجعة؟ لا نعرف إجابات هذه الأسئلة؛ يقول العديد من العلماء إن الطاقة المظلمة هي أكبر لغز يواجهه العلم في الوقت الحاضر. هناك تخمينات عديدة. ولكن بطريقة أو بأخرى، فقد يبدو أنها تؤثر في المادة بقوة تنافر طويلة المدى مما يجعل الأجسام تتسارع بعيداً بعضها عن بعض بسرعة أكثر من أي وقت. ومهما تكن، فقد أعطيت اسم **الطاقة المظلمة**.

الطاقة المظلمة

وهناك فكرة أخرى هي نوع من المجال الكمي الذي أُعطي اسم "الجوهر". كما أن هناك احتمالية أخرى تقترح أن الطاقة كامنة في الفراغ نفسه (طاقة الفراغ) وترتبط بميزة من النسبية العامة تُسمى **الثابت الكوني** (Λ). وعندما طور آينشتاين معادلاته، وجد أنها لا تقدم حلولاً للكون الساكن. في تلك الأيام (1917) كان يعتقد أن الكون ساكن. أي أنه لا يتغير وأبدي. لقد أضاف آينشتاين ثابتاً إلى معادلاته لتعطي حلولاً للكون الساكن. وبعد عقد من الزمان عندما بين لنا هابل أن الكون يتمدد. أهمل آينشتاين الثابت الكوني فلم يعد هناك حاجة إليه ($\Lambda = 0$). أما الآن، فقد أخذ هذا الثابت بالحسبان، فلربما Λ لا يساوي صفرًا. أما المحاولات النظرية لحساب Λ فقد أعطت قيماً غير حقيقية.

الثابت الكوني

هناك دليل متزايد على أن تأثيرات نوع ما من الطاقة المظلمة هي حقيقية جداً. وتتفق البيانات التي تم الحصول عليها من WMAP وتجارب أخرى حديثة بشكل جيد مع نظريات ونماذج حاسوبية أدخلت فيها الطاقة المظلمة لتعطي 73% من "الكتلة – الطاقة" في الكون. وعندما يتساوى المجموع الكلي لكثافة "الكتلة – الطاقة" مع الكثافة الحرجة C_p .

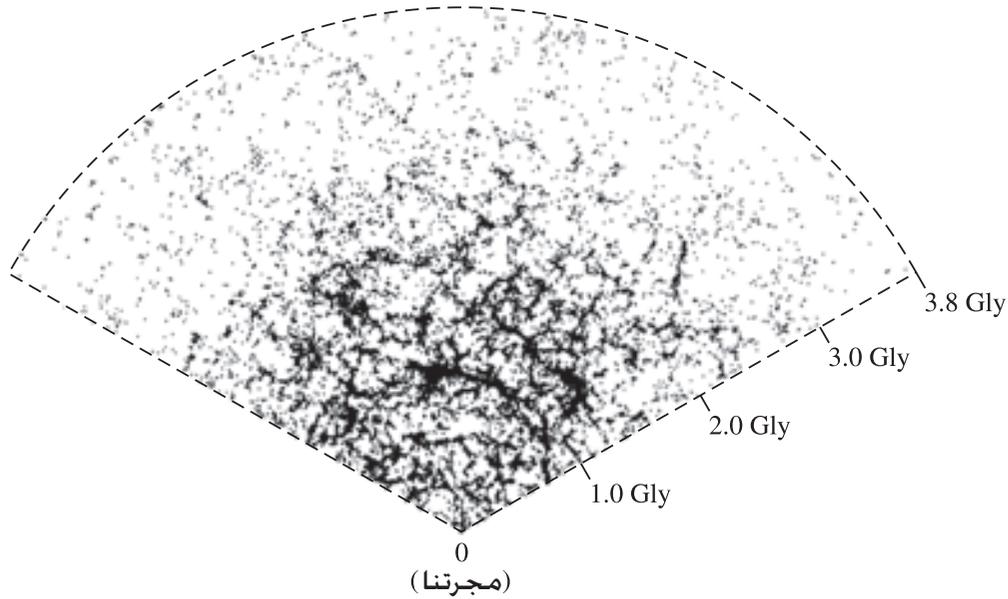
أفضل التخمينات في الوقت الحاضر عن كيفية توزيع الكتلة – الطاقة في الكون هي كما يلي:

أنواع الكتلة –
الطاقة في الكون
كنسب مئوية.

73%	طاقة مظلمة
27%	مادة، إضافة إلى قوة جاذبية معروفة من هذه النسبة البالغة 27%.
23%	مادة مظلمة
4%	بريونات (ما تتشكل منه الذرات) و $\frac{1}{10}$ من 4% مادة مرئية فقط: النجوم والمجرات (أي ما مجموعه 0.4%).

ومن الجدير بالملاحظة أن 0.4% فقط، من "كُل الكتلة – الطاقة" الموجودة في الكون مرئية مثل النجوم والمجرات.

تبدو فكرة أن الكون يسوده بالكامل شكل غير معروف من الطاقة أمرًا غريبًا. وعلى الرغم من ذلك، فإن الاتفاق الرائع بين النظرية ومشاهدات عدم انتظام CMB المقيسة، بالإضافة إلى بيانات تجريبية أخرى (مجمعات المجرات – انظر البند التالي) تبدو ذات معنى.



الشكل 27-33: توزيع 50,000 مجرة
 بزواوية 2.5° يمتد خلال نصف السماء تقريباً فوق خط الاستواء، كما تم قياسه بواسطة مسح السماء الرقمي (SDSS). تمثل كل نقطة مجرة. تم الحصول على بعد هذه المجرات عنا من الإزاحة الحمراء وقانون هابل، وقد أعطيت بوحدات 10^9 سنة ضوئية (Gly). وعند المسافات البعيدة، فإن بعض المجرات القليلة تكون إضاءتها كافية حتى يتم اكتشافها، وينتج من ذلك التباعد الظاهري للمجرات. النقطة 0 تمثلنا وهي نقطة المراقبة. لاحظ جدران وفراغات المجرات.

9-33 تركيب الكون على نطاق واسع

إنّ صور WMAP الرائعة التي التقطت للسماء (الشكل 33 – 23 والصورة الافتتاحية للفصل) تبين عدم تجانس قليل، ولكنه مهم في درجة حرارة CMB. إنّ عدم التجانس هذا يعكس انبساط البلازما الأصلية وتمدها قبل انفصالها لتتشكل منها النجوم، والمجرات والعناقيد المجرية. إنّ تحليل عدم الانتظام في WMAP بالمحاكاة الحاسوبية يتنبأ بتوزيع العناقيد المجرية والعناقيد المجرية الفائقة، وهو يشبه ما نراه في الوقت الحاضر (الشكل 33 – 27). وتعدّ هذه المحاكاة ناجحة جداً إذا اشتملت على الطاقة المظلمة والمادة المظلمة، التي يجب أن تكون باردة (فكر في المعادلة $8 - 13$ ، $\frac{1}{2}m\bar{v}^2 = \frac{3}{2}kT$ ، حيث T درجة الحرارة) بدلاً من أن تكون مادة مظلمة ساخنة مثل النيوتريونات التي تسير بسرعة الضوء أو قريباً منها. وبالفعل، فإنّ نموذج علم الكونيات الحديث يُسمّى نموذج Λ CDM حيث يشير الرمز (Λ) إلى التباين الكوني. في حين CDM إلى المادة المظلمة الباردة.

لقد اكتسب علماء الكونيات ثقة حقيقية في هذا النموذج الكونيّ بسبب التوافق الدقيق بين المشاهدات والتّنبؤات. كما يمكنهم أيضاً استخلاص قيم دقيقة جداً للمعاملات الكونية التي كانت معروفة في السابق بدقة قليلة. إنّ CMB الكونية مهمة وقابلة للمشاهدة بحيث يمكن بذل الجهد كلّه لاستخلاص المعلومات جميعها التي تحتويها. لقد تم إعداد بعثات فضائية كثيرة لمراقبة أدق التفاصيل، ويمكن لهذه البعثات إعطاء دليل تجريبيّ للانتفاخ، وربما اكتشاف موجات جاذبية تنبأت بها نماذج الانتفاخ (يمكن الكشف عنها بواسطة تأثيرها في CMB) بالإضافة إلى المعلومات التي قد تقدمها عن فيزياء الجسيمات الأولية عند طاقات لا تصلها المسارعات التي صنعها الإنسان.

النموذج الكونيّ Λ CDM.

10-33 أخيراً

عندما ننظر إلى السماء المظلمة نشاهد النجوم، وباستخدام أفضل التلسكوبات نرى المجرات إضافة إلى الأجسام الغريبة التي نوقشت سابقاً، ومنها السوبرنوفات النادرة. ولكن حتى باستعمال أفضل أجهزة المراقبة، فإننا لا نرى العمليات التي تحدث داخل النجوم أو السوبرنوفات التي افترضنا وجودها ونعتقد أيضاً بوجودها. إننا في الحقيقة نعلم على عابرة قدموا نظريات يمكن تطبيقها. وأفكاراً، بالإضافة إلى نماذج يمكن اختبارها. كما أننا نعلم على نماذج حاسوبية معقدة تتغير معالماتها حتى تتفق مخرجاتها مع خليلات وملاحظات جارب WMAP وغيرها.

وأخيراً، لدينا الآن فكرة دقيقة ومدهشة عن بعض صفات كوننا: إنه مستو، عمره 13.7 مليار سنة، ويحتوي على 4% فقط من مادة باريونية عادية (للذرات) وهكذا. وتشير هذه النتائج الدقيقة إلى أننا نعيش في وقت مثير جداً.

إن الأسئلة التي يطرحها علم الكونيات صعبة ويصعب فهمها أيضًا. ويمكن إغفالها في حياتنا اليومية الحقيقية. ويمكننا دائمًا القول: "إن الشمس تشع وتستمر في حرق الوقود إلى زمن طويل جدًا لا يمكن تخيله. وكل هذا جميل". وعلى الرغم من ذلك، فإن أسئلة علم الكونيات عميقة وتفتن العقل البشري. والصفة المثيرة على وجه الخصوص هي ما يلي: إن الحسابات التي أجريت على تشكّل الكون ونشأته غيرت على نحو متأنّ القِيَم - قليلًا فقط - لبعض الثوابت الفيزيائية الأساسية. والنتيجة هي أنّ الكون الذي عليه الحياة التي نعرفها كان من الممكن ألا يكون موجودًا. [على سبيل المثال. إذا كان الفرق في الكتلة بين البروتون والنيوترون صفرًا، أو قليلًا (أقل من كتلة الإلكترون $0.511 \text{ MeV}/c^2$) فيجب ألا تكون هناك ذرات: الإلكترونات التي تأسرها البروتونات سوف لن تتحرر مرة أخرى]. لقد أدت هذه النتائج إلى فكرة فلسفية تسمى "قاعدة الإنسان" (مبدأ الأنثروبي) التي تقول: لو أنّ الكون كان مختلفًا قليلًا عما هو عليه، لما كنا نحن هنا. ويبدو أنّ الكون مُعدّ بشكل متقن لكي يستضيفنا؛ فسبحان الله العظيم!

مبدأ الأنثروبي

ملخص

الشيء ذاته. تتنبأ النظرية بانحناء جاذبي لأشعة الضوء إلى درجة تتفق مع التجربة. تمت معالجة الجاذبية على أنها انحناء في الفضاء والزمن، ويكون الانحناء أكبر بالقرب من الأجسام الثقيلة. وقد يكون الكون كله منحنيًا. تجعل زيادة الكتلة انحناء الكون موجبًا ويقال إنّ الكون مغلق ومحدود، وإلا فإنه مفتوح ولا نهائي. يظهر في الخطوط الطيفية للمجرات البعيدة إزاحة نحو اللون الأحمر، تعرف بإزاحة دوبلر. يبدو أنّ الكون يتمدد، ومجراته تبتعد سريعًا عن بعضها بسرعة (v) تتناسب مع المسافة (d) التي تفصل بينها:

$$v = Hd \quad (6 - 33)$$

وهذا ما يعرف بقانون هابل (حيث H هو معامل هابل). هذا التمدد للكون يقترح أنه نشأ نتيجة للانفجار العظيم الذي حدث قبل نحو 13.7 مليار سنة.

- يفترض المبدأ الكوني أنّ الكون على نطاق واسع متجانس وخصائصه موحدة.

- يعدّ اكتشاف الخلفية الإشعاعية الكونية للميكرويف (CMB) التي تنطبق على منحنى الجسم الأسود عند درجة الحرارة 2.725 K الدليل المهمّ الذي يؤيد نموذج الانفجار العظيم للكون.

- يقدم النموذج المعياري للانفجار العظيم مقترحًا محتملًا عن كيفية تطور الكون عندما تمدد وبرد بعد الانفجار العظيم. بداية عند 10^{-43} بعد الانفجار العظيم، ووفقًا لهذا النموذج، كانت هناك سلسلة من التحولات الطورية انفصلت خلالها القوى التي كانت موحدة في الطبيعة واحدة تلو الأخرى.

- يفترض سيناريو الانتفاخ أنه خلال إحدى مراحل التحول هذه حدث للكون تمدد أسيّ سريع، ولكنه خاطف. حتى 10^{-35} s لم يكن هناك ما يميز بين الكواركات والليبتونات. ولكن بعد ذلك بوقت قصير، حصرت الكواركات في الهادرونات (حقب الهادرونات). وبعد الانفجار العظيم بنحو 10^{-4} s اختفت غالبية الهادرونات باتحادها مع الهادرونات المضادة لتنتج فوتونات وليبتونات وطاقة، تاركة الفوتونات والليبتونات حرة الحركة تهيئًا لحقب الليبتون.

بمرور الوقت، عندما أصبح عمر الكون نحو 10 s، اختفت غالبية الإلكترونات أيضًا، وذلك باتحادها مع جسيماتها المضادة؛ وسادت الإشعاعات الكون. وبعد دقيقتين، بدأ تركيب النيوكليونات، ولكنه لم يستمر إلا إلى دقائق معدودة فقط.

- تحتوي السماء في الظلام على عدد ضخم من النجوم بما فيها تلك التي في درب التبانة، التي هي "منظر جانبي" لمجرتنا ينظر إليها على طول مستوى القرص. تحتوي مجرتنا على 10^{11} نجم تقريبًا. أما بعد مجرتنا، فهناك مليارات من المجرات الأخرى.

- تُقاس الأبعاد الفلكية بالسنة الضوئية ($1 \text{ ly} \approx 10^{13} \text{ km}$). إنّ أقرب النجوم تقع على بعد 4 سنوات ضوئية، أما أقرب مجرة كبيرة فهي على بعد مليوني سنة ضوئية. يبلغ قطر قرص مجرتنا نحو 100,000 سنة ضوئية. تحدد المسافات عادة بالفراسخ الفلكية، حيث إنّ كلّ فرسخ فلكي = 3.26 سنة ضوئية.

- يعتقد أنّ حياة النجوم قد بدأت نتيجة لانهيال كتل من غاز الهيدروجين (نجوم بروتونية). وعندما انكمشت، ارتفعت حرارتها (تحولات الطاقة الكامنة إلى طاقة حركية). عندما وصلت درجة الحرارة إلى حوالي عشرة ملايين درجة، بدأ الاندماج النووي، وتكونت العناصر الثقيلة (تكون النيوكليونات) وخصوصًا الهيليوم الذي تشكل أولًا. تعمل الطاقة المتحررة خلال هذه التفاعلات على تسخين الغاز بحيث يوازن الضغط الخارجي قوة الجاذبية الداخلية، ويستقر النجم الصغير كنجم تسلسل أساسي. تصدر الإضاءة الهائلة للنجوم من الطاقة المتحررة خلال هذه التفاعلات النووية الحرارية. بعد مليارات السنين، عندما يتجمع الهيليوم في القلب ويستنفد الهيدروجين، ينكمش القلب وتزداد حرارته. يتمدد الغلاف الخارجي ويبرد، ويصبح النجم عملاقًا أحمر (قطر أكبر، لون أحمر). تعتمد المرحلة التالية من نشأة النجم على كتلته، الذي قد يكون فقد الكثير منها بسبب انفصال غلافه الخارجي وهروبه إلى الفضاء. فالنجوم التي كتلتها المتبقية أقل من حوالي 1.4 من كتلة الشمس تبرد، وتصبح قزمًا أبيض يتضاءل تدريجيًا، ومن ثمّ يخبو.

- تنكمش النجوم الثقيلة أكثر بسبب جاذبيتها الكبيرة: تقترب الكثافة من الكثافة النووية، ويرغم الضغط الهائل للإلكترونات على الاتحاد مع البروتونات لتشكيل نيوترونات، ويصبح النجم أساسًا نواة ضخمة من النيوترونات.

وهذا هو النجم النيوتروني، الطاقة المتحررة من الانهيال الأخير لقلبه يعتقد بأنها تنتج انفجارات السوبرنوفال. إذا كان النجم أكثر ثقلاً فإنه ينكمش كثيرًا، ويشكل ثقبًا أسود ذا كثافة كبيرة؛ بحيث لا يمكن لأي مادة أو ضوء الانفلات منه.

- ينص مبدأ التكافؤ في نظرية النسبية العامة على أنّ المشاهد لا يمكن أن يميز التسارع من المجال الجاذبي؛ أي أنّ الجاذبية وقصور الكتل هي

تشير المشاهدات الحديثة إلى أن الكون مستو بحيث إنه يحتوي على نوع غير معروف من **المادة المظلمة**، وتسوده **طاقة مظلمة** محيرة تؤثر بجاذبية سالبة، تجعل تمدد الكون متسارعاً. يشير الدليل في الوقت الحاضر إلى أن الكون مستو، وسيستمر في تمدده بشكل غير محدود. المساهمة الكلية من المادة (الطبيعية) الباريونية، والمادة المظلمة، والطاقة المظلمة، تضاف إلى **الكثافة الحرجة**.

12. تظهر المجرات جميعها وكأنها تتحرك بعيداً عنا. هل يدل ذلك على أننا في مركز الكون؟ فسّر ذلك.
13. إذا وضعت في مكان ما في مجرة بالقرب من حدّ الكون الذي يمكن مشاهدته، فهل تظهر المجرات التي فيه اتجاه درب التبانة مقتربة منك أم بعيدة عنك؟ فسّر ذلك.
14. قارن بين انفجار على الأرض مع الانفجار العظيم. افترض الأسئلة التالية: هل يجب أن ينتشر الحطام عند سرعات عالية للجسيمات البعيدة كما في الانفجار العظيم؟ هل يعود الحطام إلى السكون؟ ما نوع الكون الذي يماثل ذلك؛ مفتوح أم مغلق؟
15. إذا لم يقلت أي شيء من الثقب الأسود، حتى الضوء، فكيف يمكن إذن أن تقول إن أحداً هناك؟
16. ما الكتلة التي تعطي نصف قطر شوارزشيلد مساوٍ لذلك الذي لذرة الهيدروجين في حالتها الأرضية.
17. غالباً ما يقدر عمر الأرض على أنه 4 مليارات سنة. جد ذلك الزمن على (الشكل 33 – 25). مدة حياة الناس على الأرض في حدود المليون سنة. أين ذلك الزمن على (الشكل 33 – 25).
18. ما المقصود بالخلفية الإشعاعية الكونية للميكروويف عند درجة الحرارة 2.7 K؟ من أين جاءت؟ لم درجة حرارتها قليلة جداً الآن؟
19. لماذا كانت الذرات، على العكس من الأنوية المجردة، غير قادرة على الوجود حتى مرور مئات آلاف السنين على الانفجار العظيم.
20. ما الظروف التي بوجودها ينهار الكون أخيراً على نفسه؟

ثم يحتاج الكون إلى عدّة مئات من آلاف السنين قبل أن يبرد بشكل كاف بحيث تتحد الإلكترونات مع الأنوية لتشكيل الذرات. لقد تمددت الخلفية الإشعاعية وبردت كثيراً بحيث أصبحت الطاقة الكلية أقلّ من الطاقة في المادة، وسادت المادة بشكل متزايد على الإشعاعات. ثم تشكلت النجوم والمجرات منتجة كوناً لا يختلف كثيراً عما هو عليه الآن بعد 13 مليار سنة تقريباً.

أسئلة

1. كان يعتقد في وقت ما أن درب التبانة كثيرة الضباب أو أنها لبنية، أما الآن فتعدّ أنها مكونة من مصادر نقطية. فسّر ذلك.
2. يعدّ النجم متوازناً عندما يشع على سطحه الطاقة التي أنتجت في قلبه. ماذا يحدث عندما يبدأ بإنتاج طاقة أكثر مما يشع؟ طاقة أقل؟ فسّر ذلك.
3. صف نجماً عملاقاً أحمر، واذكر بعضاً من خصائصه.
4. اختيار نقطة ما على المخطط البياني $H - R$. حدد عدة اتجاهات بعيداً عن هذه النقطة. صف الآن التغيرات التي يجب أن تحدث في نجم يتحرك في كل اتجاه من هذه الاتجاهات.
5. هل يوحي المخطط البياني $H - R$ بأي شيء عن قلب النجم؟
6. لماذا تنتهي بعض النجوم إلى أقزام بيضاء، وبعضها الآخر إلى نجوم نيوترونية أو ثقوب سود؟
7. هل يمن القول عند النظر إلى المخطط البياني $H - R$ إن نجوم التسلسل الأساسي الساخنة ذات عمر قصير؟ فسّر ذلك.
8. إذا كنت تقوم بقياس التغيرات الظاهرية في موقع نجم ما من القمر بدلاً من الأرض، فما التعديلات التي يجب القيام بها؟ ما التغيرات التي يجب أن تحدث إذا كنت تقيس التغيرات الظاهرية في موقع النجم من المريخ؟
9. يتغير سطوع النجوم القيفاوية المتغيرة خلال مدة مثالية تبلغ عدة أيام. لقد وجد أن هذه المدة ترتبط بعلاقة محددة مع السطوع المطلق للنجم. كيف يمكن استخدام هذه النجوم في قياس المسافة إلى المجرات؟
10. ما المقصود بخط الجيوديسك؟ ما دوره في النظرية النسبية العامة؟
11. إذا اكتشفنا أن الإزاحة نحو اللون الأحمر التي تظهر في الخطوط الطيفية للمجرات كانت بسبب شيء آخر غير التمدد، فكيف تتغير نظرتنا للكون؟ هل يكون هناك تناقض مع الدليل؟ ناقش ذلك.

مسائل

8. (II) رأينا سابقاً (الفصل 14) أن معدل الطاقة الذي يصل الأرض من الشمس ("الثابت الشمسي") يساوي نحو $1.3 \times 10^3 \text{ W/m}^2$. (أ) ما البريق الظاهري (I) للشمس؟ (ب) ما السطوع المطلق (L) للشمس؟
9. (II) ما البريق النسبي للشمس كما ترى من المشتري مقارنة مع بريقها من الأرض؟ (يبعد المشتري عن الشمس 5.2 مرة من بعد الأرض عنها).
10. (II) قدر العرض الزاوي الذي تحصره مجرتنا إذا تمت مراقبتها من أقرب المجرات إلينا (الجدول 33 – 1). قارن العرض الزاوي للقمر عند مشاهدته من الأرض.
11. (II) عندما تصبح الشمس عملاقاً أحمر، فكم سيكون متوسط كثافتها إذا تمددت إلى مدار الأرض ($1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ من الشمس)؟

- 33 – 1 إلى 33 – 3 **النجوم، نشأة النجوم، والمسافات**
1. (I) استعمل تعريف كل من الفرسخ والسنة الضوئية لتبين أن 1 فرسخ = 3.26 سنة ضوئية.
2. (I) إذا أظهر نجم تغيراً ظاهرياً في موقعه يبلغ 0.38 ثانية من القوس، فكم بعده؟
3. (I) تبلغ زاوية التغير الظاهري في موقع نجم 0.00019° . كم بعد هذا النجم؟
4. (I) يبعد نجم مسافة 36 فرسخاً. ما زاوية التغير الظاهري في موقع النجم؟ عبر عن ذلك بـ: (أ) الثواني من القوس. (ب) الزوايا.
5. (I) ما زاوية التغير الظاهري في موقع نجم يبعد 55 سنة ضوئية؟ كم فرسخاً في هذه المسافة.
6. (I) إذا كان بعد نجم عنا يساوي ضعف ذلك الذي لنجم آخر، فهل زاوية التغير الظاهري في موقع النجم البعيد أكبر من تلك التي للنجم الأقرب أم أقل؟ بأي معامل؟
7. (I) يبعد نجم مسافة 35 فرسخاً. كم الوقت الذي يحتاج إليه الضوء الصادر عن هذا النجم حتى يصل إلينا؟

12. (II) عندما تصيح الشمس قزماً أبيض، يتوقع أن يكون حجمها مساوياً لحجم القمر. ما العرض الزاوي الذي تحصره من بعدها الحالي عن الأرض؟

13. (II) احسب كثافة قزم أبيض كتلته مساوية لكتلة الشمس، ونصف قطره مساو لنصف قطر الأرض. بكم مرة أكبر هذه الكثافة من تلك التي للأرض؟

23. (I) تشير الإزاحة الحمراء لمجرة إلى السرعة 3500 km/s . كم تبعد هذه المجرة؟

14. (II) نجم نيوتروني كتلته 1.5 كتلة الشمس، ونصف قطره 11 km . احسب متوسط كثافته، وقارنها مع تلك التي للقزم الأبيض (المسألة 13) ومع تلك التي للمادة النووية.

24. (I) قَدِّر سرعة مجرة (بالنسبة إلينا) تقع بالقرب من الحدّ الذي يمكن مشاهدته من الكون، افترض مسافة تقدر بـ 12 مليار سنة ضوئية.

15. (II) احسب قيم Q لتفاعلات حرق He في (المعادلة 33 - 2). كتلة غير المستقر جداً ${}^8\text{Be}$ تساوي 8.005305 u .

25. (II) قَدِّر الطول الموجي للخط 656 الذي يشاهد في سلسلة بالمر للهيدروجين في طيف مجرة تبعد عنا: (أ) 1.0×10^6 سنة ضوئية. (ب) 1.0×10^8 سنة ضوئية. (ج) 1.0×10^{10} سنة ضوئية.

16. (II) افترض أنّ نجمين لهما البريق الظاهري (I) نفسه، ويعتقد أيضاً أنّ لهما الحجم ذاته. يحتوي طيف أحدهما على قمم عند 800 nm في حين أنّ طيف الآخر يحتوي على قمم عند 400 nm . استعمل قانون فين (البند 27 - 2) ومعادلة ستيفان - بولتزمان (المعادلة 14 - 5) لتقدير بعديهما النسبي عن الأرض [مساعدة: انظر المثالين 4 - 33 و 5 - 33].

26. (II) قدر سرعة مجرة، والمسافة التي تبعتها عنّا، إذا علم أنّ الطول الموجي لخط الهيدروجين عند 434 nm تم قياسه على الأرض فكان 610 nm .

17. (III) هناك نجوم موجودة في تجمع معين يفترض أنها تقع على البعد نفسه عن الأرض. يظهر طيفاً نجمين منهما قمة عن $\lambda_1 = 500$ ، وعند $\lambda_2 = 700 \text{ nm}$ ، ونسبة البريق الظاهري لهما $I_1/I_2 = 0.091$ قدر حجميهما النسبيين (أعط النسبة بين قطريهما). [مساعدة: استعمل معادلة ستيفان - بولتزمان، معادلة 14 - 5].

27. (II) ما سرعة مجرة عندما يكون لها $z = 0.60$ ؟

18. (I) بين أنّ نصف قطر شوارزشيلد لنجم كتلته تساوي (أ) كتلة الشمس هو 2.95 km . (ب) كتلة الأرض 8.9 mm .

28. (II) كم يجب أن يكون معامل الإزاحة الحمراء z لمجرة تتحرك بعيداً عن الأرض بسرعة $v = 0.5c$ ؟

19. (II) ما نصف قطر شوارزشيلد لمجرة اعتيادية (كمجرتنا)؟

29. (II) ابدأ من (المعادلة 33 - 3) لتبين أنّ إزاحة دوبلر للطول الموجي تساوي $v/c \approx \Delta\lambda/\lambda_0$ (معادلة 33 - 5) عندما $v \ll c$. [مساعدة: استعمل نظرية ذات الحدين].

20. (II) صف مثلثاً رسم على سطح كرة مجموع زواياه: (أ) 359° . (ب) 180° .

30. (I) استعمل قانون فين لحساب الطول الموجي عند قمة التوزيع الإشعاعي للجسم الأسود عند درجة الحرارة 7K .

21. (II) ما أقصى مجموع لزوايا مثلث رسم على كرة؟

31. (II) كي يكون الكون مقفلاً؛ يجب أن تساوي الكثافة الحرجة ρ_c 10^{-26} kg/m^3 . عبر عن ρ_c بدلالة متوسط عدد النيوكليونات لكل متر مكعب.

32. (II) يعتقد أنّ مقياس الكون (متوسط المسافة بين المجرات) عند أي لحظة كان يتناسب عكسياً مع درجة الحرارة المطلقة. قدر حجم الكون مقارنة بحجمه الحالي، عند: (أ) $t = 10^6$ سنة ضوئية. (ب) $t = 1\text{s}$. (ج) $t = 10^{-6}\text{s}$. (د) $t = 10^{-35}\text{s}$.

33. (II) على نحو تقريبي، حدّد الزمن الذي برد فيه الكون إلى أقلّ من درجة حرارة العتبة اللازمة لإنتاج:

33 - 5 الإزاحة الحمراء، قانون هبل

(أ) كيونات ($M \approx 500 \text{ MeV}/c^2$).
(ب) Y ($M \approx 9500 \text{ MeV}/c^2$).
(ج) ميونات ($M \approx 100 \text{ MeV}/c^2$).

22. (I) إذا تحركت مجرة مبتعدة عنا بسرعة تساوي 1.0% من سرعة الضوء، فكم تبعد عنا هذه المجرة تقريباً؟

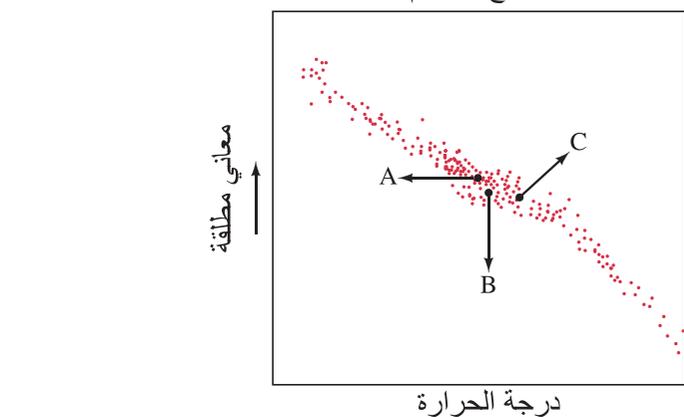
مسائل عامة

34. افترض أنّ ثلاثة من نجوم التسلسل الأساسي يمكن أن يحدث لها التغيرات الثلاثة التي تمثل بثلاثة أسهم؛ أ، ب، ج في المخطط البياني $H - R$ الموضح في (الشكل 33 - 28). صف التغيرات في درجة الحرارة، السطوع والحجم لكل حالة.

35. افترض أنّ السطوع المطلق الذي لأقرب النجوم يساوي ذلك الذي للشمس تقريباً. وعلى أيّ حال، فإنّ البريق الظاهري لهذه النجوم أقلّ من ذلك الذي للشمس بنحو 10^{11} مرة. من هذه المعلومات، قدر المسافة لهذه النجوم القريبة. (قام نيوتن بإجراء هذه الحسابات، على الرغم من أنه ارتكب خطأ حسابياً بمعامل من 100).

36. استعمل حفظ كمية التحرك الزاوية لتقدير السرعة الزاوية لنجم نيوتروني (قطره 20 km) نجم عن انهيار نجم كان نصف قطره مساوياً لنصف قطر الشمس ($7 \times 10^8 \text{ m}$)، وكتلته أكبر من كتلة الشمس بنحو 1.5 مرة، ويدور مرة كلّ شهر تقريباً كالشمس.

37. ما العامل الذي تتغير فيه طاقة الحركة الدورانية للنجم الوارد في (المسألة 36) عندما ينهار إلى نجم نيوتروني؟



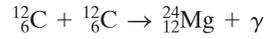
الشكل 33 - 28 (مسألة 34)

38. يعتقد أنّ نجماً نابضاً معيناً كان نجماً نيوترونياً كتلته أكبر من تلك التي للشمس بنحو 1.5 مرة، وقطره 20 km . لوحظ أنّ سرعته الدورانية 1 دورة/ثانية. فإذا فقد طاقة حركية دورانية بمعدل جزء من 10^9 لكل يوم، والتي تتحول إلى إشعاعات، فما القدرة الصادرة عن هذا النجم؟

45. قام علماء الفلك حديثاً بقياس دوران سحابة غازية حول ما يعتقد أنه ثقب أسود عملاق كتلته أكبر من الكتلة الشمسية بنحو مليارين، ويقع عند مركز المجرة. إذا كان نصف القطر من مركز المجرة إلى السحابة الغازية 60 سنة ضوئية تقريباً، فما إزاحة دوبلر $\Delta\lambda/\lambda_0$ التي شاهدها؟

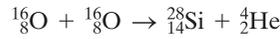
46. تتحرك مجرة بعيداً عن الأرض. ينبعث من المجرة خط الهيدروجين الأزرق عند 434 nm، ولكن قياسه على الأرض كان عند 650 nm. (أ) ما السرعة التي تتحرك بها المجرة؟ (ب) كم تبعد المجرة عن الأرض؟

47. في المراحل الأخيرة من نشأة نجم، بدا النجم (إذا كان ثقيلًا بما فيه الكفاية) بدمج أنوية الكربون ليتشكل، على سبيل المثال، المغنيسيوم:



(أ) كم كمية الطاقة التي تتحرر في هذا التفاعل (انظر الفهرس ب)
 (ب) كم الطاقة الحركية التي يجب أن تكون لكل نواة كربون (افترض أنهما متساويتان) في تصادم مباشر حتى يتلامسا فقط (استعمل المعادلة 30 – 1) بحيث تبدأ القوة القوية بالعمل؟ (ج) ما درجة الحرارة التي تناظر هذه الطاقة الحركية؟

48. افترض التفاعل التالي:



وأجب عن الأسئلة الواردة في (المسألة 47) نفسها.

49. كم سيكون حجم الشمس إذا كانت كثافتها مساوية للكثافة الحرجة التي للكون $\rho_c \approx 10^{-26} \text{ kg/m}^3$ ؟ عبر عن إجابتك بدلالة السنة الضوئية وقارنها مع المسافة بين الأرض والشمس، وكذلك مع حجم مجرتنا.

39. تبعد أقرب مجرة كبيرة عن مجرتنا $2 \times 10^6 \text{ kg}$ سنة ضوئية تقريباً. إذا كانت كتلة كل منهما $3 \times 10^{41} \text{ kg}$ ، فما قوة الجاذبية التي تؤثر بها كل مجرة في الأخرى؟

40. قدر كتلة سكون النيوتريينو (بوحدة eV) الذي تقدمه الكثافة الحرجة لإغلاق الكون. افرض أن كثافة النيوتريينو مثل الفوتونات، أكبر بنحو 10^9 مرة من تلك التي للنيوكليونات، وأن النيوكليونات تشكل فقط: (أ) 2% من الكتلة اللازمة. (ب) 5% من الكتلة اللازمة.

41. نجمان، أحدهما يظهر في طيفه قمة عند 600 nm، والآخر عند 400 nm، ويقع كل منهما على خط التسلسل الأساسي. استعمل قانون فين، ومعادلة ستيفان بولتزمان، والمخطط البياني H – R (الشكل 33 – 6) لتقدير النسبة بين قطريهما [مساعدة: انظر المثالين 33 – 4، و 33 – 5].

42. افرض أنه يمكننا قياس مسافات مع اختلاف مطلع في موقع نجم عند 100 فرسخ. ما الحد الأدنى لتحليلنا الزاوي (بالدرجات) بناء على هذه المعلومات؟

43. في أثناء تطابق ما، حدث أن تركيب خطوط بالمر من هيليوم أحادي التأين في نجم بعيد مع خطوط بالمر من الهيدروجين في الشمس (الشكل 27 – 22). ما السرعة التي يبتعد بها النجم عنا؟

44. ما درجة الحرارة المناظرة للتصادمات التي طاقتها 1.8 TeV في مصادم مختبر فيرمي؟ ما الحقبة الزمنية من التاريخ الكوني التي تناظر ذلك؟ [مساعدة: انظر الشكل 33 – 25].

إجابات التمارين

- (أ) أنفسنا؛ قبل سنتين.
 (ب) 600 سنة ضوئية (قدر L من الشكل 33 – 6 ليكون $L \approx 8 \times 10^{26} \text{ W}$ ؛ لاحظ أن 6000 K على المقياس اللوغاريتمي تكون أقرب إلى 7000 K منه إلى 5000 K).
 (ج) 1.4

ملحق أ

مراجعة رياضية

1-أ علاقات، وتناسب، ومعادلات

يُكمن أحد الأمور الفيزيائية المهمة في البحث عن العلاقات بين الكميات المختلفة: أي تحديد كيفية تأثير إحدى الكميات في أخرى. ومثال ذلك، كيفية تأثير درجة الحرارة في ضغط هواء عجل السيارة، أو كيفية تأثير القوة المحصلة في تسارع جسم ما. وفي بعض الأوقات، تتأثر كمية ما بكميتين أو أكثر: كارتباط تسارع جسم ما بكتلته والقوة المؤثرة فيه. وإذا شككت بوجود علاقة بين كميتين أو أكثر، فتستطيع عندئذ محاولة تحديد طبيعة هذه العلاقة بدقة. ويتم هذا عن طريق تغيير إحدى الكميات وقياس كيفية تغير الكميات الأخرى تبعاً لذلك. وإذا كانت هناك احتمالية تأثر إحدى الكميات بأكثر من معامل أو كمية، فيتم تغيير كمية واحدة في كل مرة، في حين تترك الكميات الأخرى ثابتة.*

وكمثال بسيط، وجد القدماء أنه إذا كان قطر دائرة ما ضعف قطر دائرة ثانية، فإن محيط الأولى سيعادل ضعف محيط الثانية أيضاً. وإذا كان نصف القطر أكبر من سابقه بثلاثة أضعاف، فإن المحيط سيكون أكبر بثلاثة أضعاف أيضاً. أي أن ازدياد القطر ينجم عنه ازدياد يتناسب مع ذلك في المحيط. وعندئذ نقول إن المحيط يتناسب طردياً مع القطر. ويمكن كتابة ذلك بدلالة الرموز كما يلي: $C \propto D$. حيث تعني "α": «متناسبة مع». ويشير كل من C و D إلى محيط دائرة ما وقطرها. على الترتيب. وتكون الخطوة التالية تغيير هذا التناسب إلى معادلة لتجعل إمكانية ربط الكميتين رقمياً أمراً ممكناً. ويستلزم هذا إضافة ثابت تناسب تحدد قيمته تجريبياً في حالات عديدة. (وفي حالات أخرى، يمكن اختياره عشوائياً، خاصة عندما يُعرّف وحدة جديدة). لقد وجد القدماء أن نسبة محيط الدائرة إلى قطرها تعادل العدد 3.1416 (عند استخدام عدد قليل من الخانات بعد الفاصلة). ورمز لهذا العدد بالحرف اللاتيني π . وهو ثابت التناسب في العلاقة $C \propto D$. وللحصول على معادلة، ندخل π في التناسب، ونضع π مكان α . وعليه، تصبح $C = \pi D$.

وتحدث كذلك حالات أخرى للتناسب. فعلى سبيل المثال، إذا تضاعف نصف القطر، فستصبح المساحة أكبر بمقدار أربعة أضعاف؛ وهكذا. وفي هذه الحالة، نستطيع أن نكتب $A \propto r^2$. حيث تمثل كل من A و r مساحة الدائرة ونصف قطرها على الترتيب.

وفي بعض الأحيان، ترتبط كميتان ببعضهما بطريقة ما بحيث تؤدي الزيادة في قيمة إحداهما إلى تناقص طردي في الأخرى. ويدعى هذا تناسباً عكسياً. ومثال ذلك، الزمن اللازم لقطع مسافة ما يتناسب عكسياً مع السرعة المستخدمة خلال قطع المسافة نفسها. وكلما ازدادت السرعة، أصبح الوقت المستغرق أقل. ونستطيع أن نعبر عن هذه العلاقة العكسية كما يلي: الزمن $\propto \frac{1}{\text{السرعة}}$.

وكلما ازداد مقام الكسر، نقصت قيمته ككل. وعلى سبيل المثال، فإن $\frac{1}{4}$ أقل من $\frac{1}{2}$. وعليه، إذا تضاعفت السرعة، نقص الزمن إلى النصف. وهو ما نريد التعبير عنه بعلاقة التناسب العكسي.

تناسب طردي

تناسب عكسي

* عندما تؤثر كمية ما في أخرى، فإننا نستخدم عبارة «دالة في أو اقتران» للدلالة على هذا الاعتماد؛ فنقول: إن الضغط داخل عجل السيارة هو دالة في درجة الحرارة.

أُتِيَّ تناسب صحيح، يمكن تغييره إلى معادلة بعد إضافة ثابت تناسب ملائم. وعندئذٍ يمكن التنبؤ أو استخدام عبارات كمية لوصف العالم الفيزيائي بدلالة هذه المعادلة.

أ-2 الأسس

عندما نكتب 10^4 ، فإننا نعني أن 10 ستضرب في نفسها أربع مراتٍ: $10^4 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10,000$. يُدعى الرمز العلوي 4 الأس. ويُقال إن 10 قد رفعت إلى القوة الرابعة. وأي عدد أو رمز يمكن أن يرفع إلى قوة ما، كما وتستخدم مُسميات خاصة عندما يكون الأس 2 (a^2 هي "مربعة" a) أو 3 (a^3 هي "مكعبة" a). ولأي أس آخر، فإننا نقول عن an "مرفوعة إلى القوة n ". أما إذا كان الأس 1، فإنه لا يذكر في الأغلب: $a^1 = a$. لعدم الحاجة إلى الضرب. ويُعبّر عن القواعد المتبعة في ضرب الأعداد المرفوعة إلى قوة كالتالي:

$$(1-أ) \quad (a^n)(a^m) = a^{n+m}$$

أي أن الأسس جُمع. ولكي نرى لماذا تم ذلك، نأخذ في الحسبان نتيجة ضرب 3^3 في 3^4 :

$$(3^3)(3^4) = (3)(3)(3) \times (3)(3)(3)(3) = (3)^7$$

وهنا يكون جمع الأسس هو $3 + 4 = 7$ ، وبذلك تتحقق قاعدة أ-1. ولاحظ أنّ هذه القاعدة تنطبق عندما تكون الأعداد الأساسية متشابهة (a في المعادلة أ-1). وعليه، فلن نستطيع استخدام قاعدة جمع الأسس هذه لـ $(6^3)(5^2)$ ؛ ويجب تحليل هذه الأرقام للوصول إلى الإجابة. ومع هذا، نستطيع كتابة قاعدة أخرى في حالة تشابه الأسس واختلاف الأعداد الأساسية:

$$(2-أ) \quad (a^n)(b^n) = (ab)^n$$

على سبيل المثال، $(5^3)(6^3) = (30)^3$ لأن

$$(5)(5)(5)(6)(6)(6) = (30)(30)(30)$$

وتتضمّن القاعدة الثالثة أس مرفوع إلى قوة أخرى: $(a^3)^2$ تعني $(a^3)(a^3)$ ، وهي تساوي $a^{3+3} = a^6$. لذا، تكون القاعدة العامة هي

$$(3-أ) \quad (a^n)^m = a^{nm}$$

وفي هذه الحالة، تضرب الأسس في بعضها.

تستخدم الأسس السالبة للأعداد المقلوبة. ولهذا

$$\frac{1}{a} = a^{-1}, \quad \frac{1}{a^3} = a^{-3}$$

وهكذا دواليك. إنّ السبب في استخدامنا للأسس السالبة يُعزى إلى التمكن من استخدام قواعد الضرب المبينة في الأعلى. فعلى سبيل المثال، $(a^5)(a^{-3})$ تعني

$$\frac{(a)(a)(a)(a)(a)}{(a)(a)(a)} = a^2$$

وتعطي (القاعدة أ-1) النتيجة ذاتها:

$$(a^5)(a^{-3}) = a^{5-3} = a^2$$

ماذا يعني الأسّ الصفرى؟ أي، ما معنى a^0 ؟ يعرف أي رقم مرفوع إلى الأسّ الصفرى على أنه يساوي 1:

$$a^0 = 1$$

ويستخدم هذا التعريف لأنّه ينتج من قواعد جمع الأسس.

وكمثال على ذلك،

$$a^3 a^{-3} = a^{3-3} = a^0 = 1$$

ولكن هل فعليًا $a^3 a^{-3}$ تساوي 1؟ والجواب على ذلك نعم؛ لأنّ

$$a^3 a^{-3} = \frac{a^3}{a^3} = 1$$

تستخدم الأسس الكسرية لتمثل الجذور. فعلى سبيل المثال، تعني $a^{\frac{1}{2}}$ جذر a التربيعي؛ أي أن

$$a^{\frac{1}{2}} = \sqrt{a}. \text{ وبالمثل، } a^{\frac{1}{3}} \text{ تعني جذره التكعيبي، وهكذا دواليك.}$$

جذر a الرابع يعني أنه عند ضرب جذر a الرابع في نفسه أربع مراتٍ، ستحصل مرة أخرى على a :

$$(a^{\frac{1}{4}})^4 = a$$

وهذا متطابق مع (القاعدة أ-3) لأن $(a^{\frac{1}{4}})^4 = a^{\frac{4}{4}} = a^1 = a$

3-أ- الرفع إلى القوة 10، أو المصطلح الأسّي

إنّ كتابة أعداد كبيرة جدًا أو صغيرة جدًا كبعد كوكب نبتون عن الشمس، $4.500.000.000 \text{ km}$ ، أو كقطر ذرة اعتيادية، 0.00000001 cm ، هو أمر غير مريح وعرضة للخطأ. كما أنه يترك تساؤلًا (انظر البند 1-4) عن عدد الأرقام المميزة. كم من الأصفار يعد مبرًا في العدد ($4.500.000.000 \text{ km}$?) ولذلك فنحن نستخدم "إلى القوة 10" أو المصطلح الأسّي. وعليه، يصاغ البعد من نبتون إلى الشمس كالتالي: $4.50 \times 10^9 \text{ km}$ (على افتراض أن القيمة مميزة حتى ثلاث خانات). وقطر الذرة $1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}$. وتعتمد طريقة الكتابة هذه على استخدام الأسس، حيث a^n تعني أن a مضروبة في نفسها n مرة. وعلى سبيل المثال، $10,000 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10^4$. لذا، فإن الأس (9 في هذه الحالة) هو فقط عدد الخانات التي ستتحركها الفاصلة إلى اليمين للحصول على الرقم مكتوبًا بالكامل وعند ضرب عددين (أو قسمتهما). تضرب أولاً (أو تقسم) الأجزاء البسيطة ثم تتبعها بـ الأرقام المرفوعة إلى القوة 10. لذا، 2.0×10^3 مضروبة في 5.5×10^4 يساوي $11 \times 10^7 = (10^3 \times 10^4) \times (2.0 \times 5.5)$ حيث استخدمنا قاعدة جمع الأسس (الفهرس أ-2). وبالمثل، 8.2×10^5 مقسومة على 2.0×10^2

$$\frac{8.2 \times 10^5}{2.0 \times 10^2} = \frac{8.2}{2.0} \times \frac{10^5}{10^2} = 4.1 \times 10^3$$

وللأرقام الأقل من 1 مثل 0.01، يكتب أس القوة 10 مع إشارة سالبة:

$0.01 = 1/100 = 1/10^2 = 1 \times 10^{-2}$ وبالمثل، $0.002 = 2 \times 10^{-3}$. حيث تم تحريك الفاصلة العشرية مرة أخرى بعدد الخانات المذكورة في الأسس. ولذلك، $0.020 \times 3600 = 72$ ، والمصطلح الأسّي $72 = 7.2 \times 10^1 = (3.6 \times 10^3) \times (2.0 \times 10^{-2})$. لاحظ أيضاً أن $1 = 10 \times 0.1 = 10^1 \times 10^{-1}$ ، وأن قانون الأس $10^0 = 10^1 \times 10^{-1}$ وعليه، $10^0 = 1$.

وعند كتابة عدد ما بدلالة المصطلح الأسّي، فإن من العادة أن يكون العدد البسيط بين 1 و 10. لذا من المتعارف عليه أن تكتب 4.5×10^9 بدلاً من 45×10^8 ، بالرغم من كونهما العدد نفسه.* كما يسمح هذا المصطلح التعبير عن الأرقام المميزة بوضوح. ونكتب 4.5×10^9 إذا كان هذا العدد دقيقاً إلى ثلاثة أرقام مميزة، في حين 4.5×10^9 إذا كانت دقته تصل إلى رقمين مميزين فقط.

4-أ- الجبر الخطي

يمكن تمثيل العلاقات الفيزيائية بين الكميات كمعادلات تحتوي على رموز (عادة أحرف أبجدية) تمثل هذه الكميات. إنّ استخدام هذه المعادلات يشكل مجال الجبر الخطي المستخدم بشكل واسع في الفيزياء. وتتضمن المعادلة إشارة مساواة، وهي تشير إلى أن الكميتين على جانبي الإشارة لهما القيمة نفسها. وكأمثلة على هذه المعادلات

$$3 + 8 = 11$$

$$2x + 7 = 15$$

$$a^2b + c = 6$$

تتضمن المعادلة الأولى أرقاماً فقط. لذا، فهي تدعى معادلة رياضية. وتدعى المعادلتان الأخيرتان جبريتين لاحتوائهما على رموز. وتعني الكمية a^2b ، في المعادلة الثالثة أن a مضروبة في a في

$$b: a^2b = a \times a \times b.$$

* اتفاق آخر مستخدم، خاصة في الحواسيب، أن الرقم البسيط هو ذلك الذي بين 0.1 و 1. لذا، نستطيع كتابة $4,500,000,000$ كالتالي: 0.450×10^{10} .

الحل لإيجاد مجهول

غالبًا ما نرغب في الحل لإيجاد رمز (أو أكثر). ونتعامل معه كمجهول. فعلى سبيل المثال. في المعادلة: $2x + 7 = 15$ فإن المجهول هو x : وهذه المعادلة صحيحة. فقط عندما $x = 4$. إن تحديد قيمة (أو قيم) المجهول (أو المجهولين) مع ضرورة تحقيق المعادلة (أو المعادلات) يدعى حل المعادلة. وعند حل المعادلة. يمكن استخدام القاعدة التالية:

ستبقى المعادلة صحيحة بعد تطبيق أي عملية على أحد جانبيها إذا طبقت العملية نفسها على جانبها الآخر أيضًا. فعلى سبيل المثال: (أ) جمع أو طرح عدد أو رمز: (ب) الضرب في أو القسمة على عدد أو رمز: (ج) رفع كل جانب من المعادلة إلى القوة نفسها. أو أخذ الجذر نفسه (كالجذر التربيعي).

مثال أ - 1 حل لإيجاد x في المعادلة

$$2x + 7 = 15$$

النهج: تجري العمليتين نفسيهما على جانبي المعادلة كي نعزل x لتكون المجهول الوحيد على الجانب الأيمن لإشارة المساواة.

الحل: نطرح أولاً 7 من الجانبين:

$$2x + 7 - 7 = 15 - 7$$

$$2x = 8$$

ثم نقسم الجانبين على 2 لنحصل على

$$\frac{2x}{2} = \frac{8}{2}$$

أو. بتنفيذ القسمة .

$$x = 4$$

وهذا يحل المعادلة

مثال أ - 2 (أ) حل المعادلة

$$a^2b + c = 24$$

لإيجاد المجهول a بدلالة كل من b و c . (ب) حل لإيجاد a على افتراض أن $b = 2$ و $c = 6$.

النهج: تجري عمليات لعزل a كمتغير وحيد على يمين إشارة التساوي.

الحل: (أ) سنحاول أن نحل لإيجاد a . لذا. نطرح أولاً c من الجانبين

$$a^2b = 24 - c$$

ثم نقسم على b

$$a^2 = \frac{24 - c}{b}$$

وأخيرًا نأخذ الجذر التربيعي

$$a = \sqrt{\frac{24 - c}{b}}$$

(ب) إذا أعطينا $b = 2$ و $c = 6$. فعندئذ

$$a = \sqrt{\frac{24 - 6}{2}} = 3$$

ملحوظة: في أي وقت نحسب الجذر التربيعي. يمكن للرقم أن يكون موجباً أو سالباً. لذا. $a = -3$ هي حلٌّ أيضًا. لماذا؟ السبب هو أن $(-3)^2 = 9$. تماماً مثل $(+3)^2 = 9$. ولهذا. فإننا نحصل بالفعل على حلين هما: $a = +3$ و $a = -3$.

ولاختبار حلّ ما، نعوض في المعادلة الأصلية (وهذا اختبار فعلي للتأكد من أن استخداماتنا صحيحة جميعها). ففي المعادلة

$$a^2b + c = 24$$

نعوض فيها $a = 3$ و $b = 2$ و $c = 6$ لنجد أن

$$(3)^2(2) + (6) \stackrel{?}{=} 24$$

$$24 = 24$$

وهي الإجابة الصحيحة.

التمرين أ : ضع $a = -3$ في المعادلة في (المثال أ-2). وأثبت إمكانية ذلك.

مجهولان أو أكثر

إذا كان لدينا مجهولان أو أكثر، فإنّ معادلة واحدة لن تكون كافية لتحديد هذه الجاهيل. وبشكل عام، إذا كان هناك n من الجاهيل، فإننا بحاجة إلى n من المعادلات المستقلة. فعلى سبيل المثال، إذا كان هناك مجهولان، فإننا بحاجة إلى معادلتين. وإذا دُعي المجهولان x و y : فإن من الإجراءات المعتادة أن نُحلّ معادلة واحدة لإيجاد x بدلالة y . ثم نعوض النتيجة في المعادلة الثانية.

مثال أ - 3 حل المعادلتين التاليتين لإيجاد كل من X و Y .

$$3x - 2y = 19$$

$$x + 4y = -3$$

النهج : لدينا مجهولان ومعادلتان : نستطيع أن نبدأ عن طريق حل المعادلة الثانية لإيجاد x بدلالة y . ثم نعوض نتيجة x هذه في المعادلة الأولى.

الحل : نطرح 4 y من طرفي المعادلة الثانية :

$$x = -3 - 4y$$

ثم نعوض هذه الصيغة لإيجاد x في المعادلة الأولى . ونبسّط

$$(-3 - 4y) - 2y = 19$$

$$(-3 - 4y) - 2y = 19 \quad (\text{تم الضرب في 3})$$

$$-9 - 12y - 2y = 19 \quad (\text{تم إضافة 9 إلى الجانبين})$$

$$-14y = 28 \quad (\text{قُسم الطرفين على -14})$$

$$y = -2$$

والآن بعد أن عرفنا أن $y = -2$. نعوض ذلك في الصيغة لإيجاد x

$$x = -3 - 4y$$

$$= -3 - 4(-2) = -3 + 8 = 5$$

حلنا هو $x = 5$ و $y = -2$. ونختبر هذا الحل بتعويض هذه القيم مرة أخرى في المعادلتين الأصليتين

$$3x - 2y \stackrel{?}{=} 19$$

$$3(5) - 2(-2) \stackrel{?}{=} 19$$

$$15 + 4 \stackrel{?}{=} 19$$

(حل صحيح)

$$19 \stackrel{?}{=} 19$$

$$x + 4y \stackrel{?}{=} -3$$

وأيضاً

$$5 + 4(-2) \stackrel{?}{=} -3$$

(حل صحيح)

$$-3 \stackrel{?}{=} -3$$

يمكن إيجاد طرق أخرى لحل معادلتين معاً أو أكثر. كطريقة إيجاد المحددات المستخدمة في كتب الجبر الخطي.

الصيغة التربيعية

نواجه في بعض الأحيان معادلات تحتوي على مجهول، لنقل x ، حيث يظهر مربع في المعادلة إضافة إلى أنه مرفوع إلى القوة الأولى. ويمكن كتابة هذه المعادلة التربيعية على النحو التالي:

$$ax^2 + bx + c = 0$$

وتكون الكميات a ، b و c عادة أعداداً أو ثوابت معطاة*. والحلان العامان لمعادلة من هذا النوع يعطيان بالصيغة التربيعية التالية:

$$(أ-4) \quad x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

توحي الإشارتان أن هناك حلين لـ x : يظهر أحدهما عند استخدام إشارة الموجب، والآخر عند استخدام الإشارة السالبة.

الصيغة التربيعية

مثال أ - 4 أوجد الحلين لـ x في المعادلة

$$3x^2 - 5x = 2$$

النهج: تظهر x هنا مرفوعة لكلٍّ من القوتين الأولى والثانية (تربيع). لذلك، سنستخدم المعادلة التربيعية.

الحل: نكتب أولاً هذه المعادلة بالصيغة التربيعية

$$ax^2 + bx + c = 0$$

وبطرح 2 من كلا الطرفين

$$3x^2 - 5x - 2 = 0$$

وفي هذه الحالة تأخذ a ، b و c في الصيغة النموذجية القيم التالية: $a = 3$ ، $b = -5$ و $c = -2$. ويصبح الحلان لـ x كما يلي:

$$x = \frac{+5 + \sqrt{25 - (4)(3)(-2)}}{(2)(3)} = \frac{5 + 7}{6} = 2$$

$$x = \frac{+5 - \sqrt{25 - (4)(3)(-2)}}{(2)(3)} = \frac{5 - 7}{6} = -\frac{1}{3}$$

ويكون الحلان في هذا المثال كالتالي: $x = 2$ و $x = -\frac{1}{3}$. وفي مسائل الفيزياء، قد يحصل أن أحد الحلين فقط يمثل حالة حقيقية عملية؛ وفي هذه الحالة يهمل الحل الآخر. وفي حالات أخرى، قد يرتبط الحلان بالواقع الفيزيائي.

لاحظ، مصادفةً هنا، أن b^2 يجب أن تكون أكبر من $4ac$ ، بحيث إن $\sqrt{b^2 - 4ac}$ تفضي إلى عدد حقيقي. أما إذا كان $(b^2 - 4ac)$ أصغر من الصفر (سالِب)، فلن يكون هناك حل حقيقي. ويدعى الجذر التربيعي للعدد السالب بالتخالي.

تمتلك المعادلة من الدرجة الثانية حلين عندما يكون أعلى قوة فيها 2. أما المعادلة من الدرجة الثالثة المحتوية على x^3 فتمتلك ثلاثة حلول. وهكذا دواليك.

أ-5 الممتدة ثنائية الحدود

تواجهنا في بعض الأوقات كمية صيغتها $(1+x)^n$. أي الكمية $(1+x)$ مرفوعة إلى الأس n . ويمكن كتابتها كجمع غير منته من الحدود، يعرف كمتتالية ممتدة، كالتالي:

$$(أ-5) \quad (1+x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)}{2!}x^2 + \dots$$

وهذه الصيغة مفيدة لنا بشكل رئيس عندما تكون x صغيرة جداً مقارنة مع الواحد ($x \ll 1$). وفي هذه الحالة، يكون كل حدٍ نالٍ أصغر بكثير من سابقه.

* أو حد واحد أو أكثر منهم يمكن أن يكون متغيراً، وفي هذه الحالة سنحتاج إلى معادلات إضافية.

وعلى سبيل المثال. إذا كان $x = 0.01$ و $n = 2$. فسنقول. إذا كان الحد الأول يساوي 1. فإن الحد الثاني هو $nx = (2)(0.01) = 0.02$. ويكون الحد الثالث $(0.01)^2 / 2 = 0.0001$. وهكذا دواليك. ولهذا. عندما تكون x صغيرة. نستطيع إهمال الحدود جميعها عدا أول حدين (أو ثلاثة). ونستطيع كتابة

$$(1 + x)^n \approx 1 + nx. \quad (أ - 6)$$

ويسمح لنا هذا التقريب غالباً بحل المعادلة بسهولة. وبدونه قد يكون الحل صعباً جداً.

$$(1 + x)^2 \approx 1 + 2x$$

$$\frac{1}{1 + x} = (1 + x)^{-1} \approx 1 - x$$

$$\sqrt{1 + x} = (1 + x)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{1}{2}x$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 + x}} = (1 + x)^{-\frac{1}{2}} \approx 1 - \frac{1}{2}x$$

حيث $x \ll 1$.

وكمثال رقمي. دعنا نقيم $\sqrt{1.02}$ باستخدام المتعددة الثنائية. بسبب أن $x = 0.02$. وهي أصغر بكثير من 1:

$$\sqrt{1.02} = (1.02)^{\frac{1}{2}} = (1 + 0.02)^{\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{1}{2}(0.02) = 1.01.$$

ونستطيع أن نختبر هذا بواسطة الآلة الحاسبة (وربما ليس بسرعة أكبر من ذلك) حيث $\sqrt{1.02} \approx 1.01$

6-أ علم الهندسة السطحية

نراجع هنا عدداً من النظريات المفيدة في الفيزياء والمتضمنة زوايا ومثلثات.

الزوايا المتساوية.

1. تتساوى زاويتان إذا كان أي من الظروف التالية صحيحاً. إذا:

(أ) كانتا زاويتين رأسيتين (الشكل أ-1)؛ أو

(ب) كان الجانب الأيسر لإحدهما موازياً للجانب الأيسر للآخرى. والجانب الأيمن موازياً للجانب الأيمن للآخرى الجانبان الأيسر والأيمن كما يشاهدان من الزاوية الرأسية حيث يلتقي الضلعان: (الشكل أ-2)؛ أو

(ج) كان الجانب الأيسر لإحدهما عمودياً على الجانب الأيسر للآخرى. وكذلك الجانبان الأيمنان متعامدين بالمثل (الشكل أ-3).

2. مجموع الزوايا في أي مثلث هو 180° .

3. المثلثات المتشابهة. يقال عن مثلثين أنهما متشابهان إذا كانت زواياهما الثلاث جميعها متساوية في (الشكل أ-4). $\theta_1 = \phi_1, \theta_2 = \phi_2, \theta_3 = \phi_3$. وعليه. تمتلك المثلثات المتشابهة الشكل البسيط نفسه مع احتمال أن تكون مختلفة الحجم والاتجاهات.

هناك نظريتان مفيدتان للمثلثات المتشابهة:

(أ) يتشابه المثلثان إذا كانت أي زاويتين من زوايا أحدهما تساوي مثلثيهما في المثلث الآخر. (وهذا صحيح لأن الزاوية الثالثة في كليهما يجب أن تكون مساوية للآخرى؛ لأن مجموع الزوايا الداخلية لأي مثلث هي 180°).

(ب) تكون نسب أطوال أضلاع مثلثين متشابهين متساوية. في (الشكل أ-4):

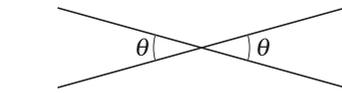
$$\frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2} = \frac{a_3}{b_3}.$$

4. المثلثات المتطابقة. يتطابق المثلثان إذا أمكن وضع أحدهما فوق الآخر تماماً. أي أنهما مثلثان متشابهان ولهما الحجم نفسه. ويكون المثلثان متطابقين إذا توافر أي مما يلي:

(أ) تساوي الأضلاع الثلاثة في المثلثين.

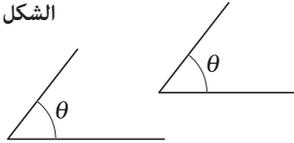
(ب) تساوي ضلعين والزاوية المحصورة بينهما (ضلع - زاوية - ضلع).

(ج) تساوي زاويتين والضلع المحصور بينهما (زاوية - ضلع - زاوية).

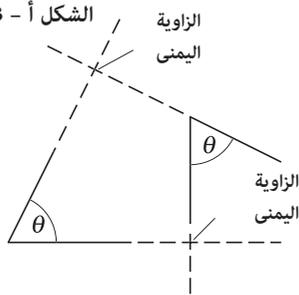


الشكل أ - 1

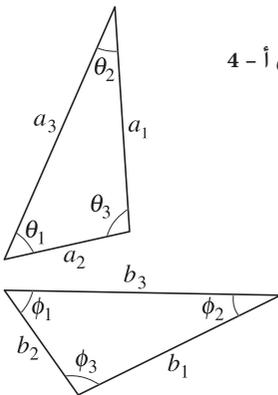
الشكل أ - 2



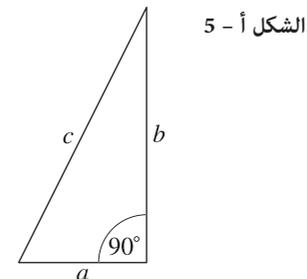
الشكل أ - 3



الشكل أ - 4



4. مثلثات قائمة. يمتلك المثلث القائم زاوية واحدة مقدارها 90° (زاوية قائمة): أي أنّ الضلعين المتقيين عند الزاوية القائمة متعامدان (الشكل أ - 5). كما أنّ مجموع الزاويتين الأخيرتين (الحادتين) في المثلث قائم الزاوية هو 90° .
5. نظرية فيثاغورس. مربع الوتر (الضلع المقابل للزاوية القائمة) في أيّ مثلث قائم الزاوية يساوي مجموع مربعي الضلعين الآخرين. في (الشكل أ - 5).
- $$c^2 = a^2 + b^2.$$



الشكل أ - 5

7-أ- الاقترانات المثلثية والتمثالات

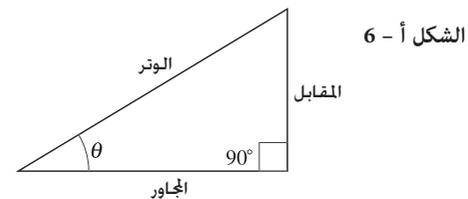
تعرف الاقترانات المثلثية لأي زاوية θ بوساطة إنشاء مثلث قائم حول تلك الزاوية كما هو مبين في الشكل أ - 6: المقابل والمجاور هما طول الضلعين المقابل والمجاور للزاوية θ . والوتر هو طول الوتر

$$\sin \theta = \frac{\text{المقابل}}{\text{الوتر}} \quad \csc \theta = \frac{1}{\sin \theta} = \frac{\text{الوتر}}{\text{المقابل}}$$

$$\cos \theta = \frac{\text{المجاور}}{\text{الوتر}} \quad \sec \theta = \frac{1}{\cos \theta} = \frac{\text{الوتر}}{\text{المجاور}}$$

$$\tan \theta = \frac{\text{المقابل}}{\text{المجاور}} = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \quad \cot \theta = \frac{1}{\tan \theta} = \frac{\text{المجاور}}{\text{المقابل}}$$

المجاور² + المقابل² = الوتر² (نظرية فيثاغورس).



الشكل أ - 6

يظهر (الشكل أ - 7) الإشارتين (+ و -) التي تظهرها كل من جيب (\sin) وجيب تمام (\cos) وظل (\tan) الزوايا θ في الأرباع الأربعة (0° إلى 360°). لاحظ أن الزوايا تقاس مع اتجاه معاكس لاجتاه دوران عقارب الساعة ابتداءً من المحور السيني كما هو مبين: تقاس الزوايا السالبة من أسفل المحور السيني x باتجاه دوران عقارب الساعة: فعلى سبيل المثال $+330^\circ = -30^\circ$. وهكذا دواليك. وفيما يلي بعض التمثالات المفيدة من ضمن الاقترانات المثلثية:

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$$

$$\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$$

$$\cos 2\theta = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta = 2 \cos^2 \theta - 1 = 1 - 2 \sin^2 \theta$$

$$\tan 2\theta = \frac{2 \tan \theta}{1 - \tan^2 \theta}$$

$$\sin(A \pm B) = \sin A \cos B \pm \cos A \sin B$$

$$\cos(A \pm B) = \cos A \cos B \mp \sin A \sin B$$

$$\tan(A \pm B) = \frac{\tan A \pm \tan B}{1 \mp \tan A \tan B}$$

$$\sin(180^\circ - \theta) = \sin \theta$$

$$\cos(180^\circ - \theta) = -\cos \theta$$

$$\sin(90^\circ - \theta) = \cos \theta$$

$$\cos(90^\circ - \theta) = \sin \theta$$

$$\sin \frac{1}{2}\theta = \sqrt{\frac{1 - \cos \theta}{2}}$$

$$\cos \frac{1}{2}\theta = \sqrt{\frac{1 + \cos \theta}{2}}$$

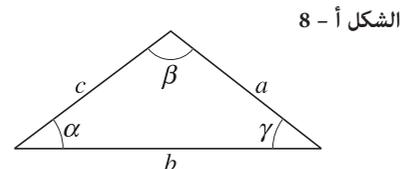
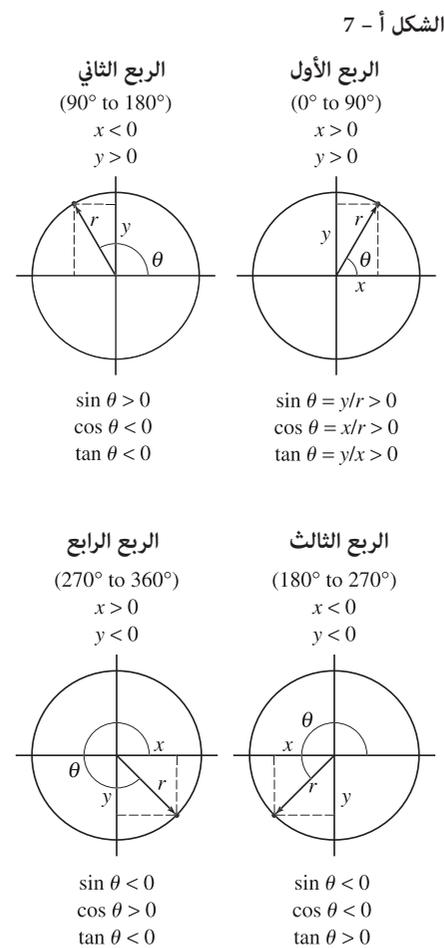
$$\tan \frac{1}{2}\theta = \sqrt{\frac{1 - \cos \theta}{1 + \cos \theta}}$$

$$\sin A \pm \sin B = 2 \sin \left(\frac{A \pm B}{2} \right) \cos \left(\frac{A \mp B}{2} \right).$$

لأي مثلث (انظر الشكل أ - 8):

(قانون الجيوب) $\frac{\sin \alpha}{a} = \frac{\sin \beta}{b} = \frac{\sin \gamma}{c}$

(قانون جيبوس التمام) $c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma$



الشكل أ - 8

جدول المثلثات : قيم رقمية للجيب (sin)، وجيب التمام (cos)، والظل (tan)

الزاوية بالدرجات	الزاوية بالرديان	الجيب	الجيب التمام	الظل	الزاوية بالدرجات	الزاوية بالرديان	الجيب	الجيب التمام	الظل
0°	0.000	0.000	1.000	0.000					
1°	0.017	0.017	1.000	0.017	46°	0.803	0.719	0.695	1.036
2°	0.035	0.035	0.999	0.035	47°	0.820	0.731	0.682	1.072
3°	0.052	0.052	0.999	0.052	48°	0.838	0.743	0.669	1.111
4°	0.070	0.070	0.998	0.070	49°	0.855	0.755	0.656	1.150
5°	0.087	0.087	0.996	0.087	50°	0.873	0.766	0.643	1.192
6°	0.105	0.105	0.995	0.105	51°	0.890	0.777	0.629	1.235
7°	0.122	0.122	0.993	0.123	52°	0.908	0.788	0.616	1.280
8°	0.140	0.139	0.990	0.141	53°	0.925	0.799	0.602	1.327
9°	0.157	0.156	0.988	0.158	54°	0.942	0.809	0.588	1.376
10°	0.175	0.174	0.985	0.176	55°	0.960	0.819	0.574	1.428
11°	0.192	0.191	0.982	0.194	56°	0.977	0.829	0.559	1.483
12°	0.209	0.208	0.978	0.213	57°	0.995	0.839	0.545	1.540
13°	0.227	0.225	0.974	0.231	58°	1.012	0.848	0.530	1.600
14°	0.244	0.242	0.970	0.249	59°	1.030	0.857	0.515	1.664
15°	0.262	0.259	0.966	0.268	60°	1.047	0.866	0.500	1.732
16°	0.279	0.276	0.961	0.287	61°	1.065	0.875	0.485	1.804
17°	0.297	0.292	0.956	0.306	62°	1.082	0.883	0.469	1.881
18°	0.314	0.309	0.951	0.325	63°	1.100	0.891	0.454	1.963
19°	0.332	0.326	0.946	0.344	64°	1.117	0.899	0.438	2.050
20°	0.349	0.342	0.940	0.364	65°	1.134	0.906	0.423	2.145
21°	0.367	0.358	0.934	0.384	66°	1.152	0.914	0.407	2.246
22°	0.384	0.375	0.927	0.404	67°	1.169	0.921	0.391	2.356
23°	0.401	0.391	0.921	0.424	68°	1.187	0.927	0.375	2.475
24°	0.419	0.407	0.914	0.445	69°	1.204	0.934	0.358	2.605
25°	0.436	0.423	0.906	0.466	70°	1.222	0.940	0.342	2.747
26°	0.454	0.438	0.899	0.488	71°	1.239	0.946	0.326	2.904
27°	0.471	0.454	0.891	0.510	72°	1.257	0.951	0.309	3.078
28°	0.489	0.469	0.883	0.532	73°	1.274	0.956	0.292	3.271
29°	0.506	0.485	0.875	0.554	74°	1.292	0.961	0.276	3.487
30°	0.524	0.500	0.866	0.577	75°	1.309	0.966	0.259	3.732
31°	0.541	0.515	0.857	0.601	76°	1.326	0.970	0.242	4.011
32°	0.559	0.530	0.848	0.625	77°	1.344	0.974	0.225	4.331
33°	0.576	0.545	0.839	0.649	78°	1.361	0.978	0.208	4.705
34°	0.593	0.559	0.829	0.675	79°	1.379	0.982	0.191	5.145
35°	0.611	0.574	0.819	0.700	80°	1.396	0.985	0.174	5.671
36°	0.628	0.588	0.809	0.727	81°	1.414	0.988	0.156	6.314
37°	0.646	0.602	0.799	0.754	82°	1.431	0.990	0.139	7.115
38°	0.663	0.616	0.788	0.781	83°	1.449	0.993	0.122	8.144
39°	0.681	0.629	0.777	0.810	84°	1.466	0.995	0.105	9.514
40°	0.698	0.643	0.766	0.839	85°	1.484	0.996	0.087	11.43
41°	0.716	0.656	0.755	0.869	86°	1.501	0.998	0.070	14.301
42°	0.733	0.669	0.743	0.900	87°	1.518	0.999	0.052	19.081
43°	0.750	0.682	0.731	0.933	88°	1.536	0.999	0.035	28.636
44°	0.768	0.695	0.719	0.966	89°	1.553	1.000	0.017	57.290
45°	0.785	0.707	0.707	1.000	90°	1.571	1.000	0.000	∞

أ-8 اللوغاريتمات

تُعرّف اللوغاريتمات على الشكل التالي:

$$\text{إذا كانت } y = A^x \text{، فإن } x = \log_A y.$$

أي أن لوغاريتم العدد y للأساس A هو ذلك العدد. كالأس A ، يعيد لنا العدد y . ولللوغاريتمات العامة، فإن الأساس هو 10. وعليه.

$$\text{إذا كانت } y = 10^x \text{، فإن } x = \log y.$$

الرمز السفلي 10 في \log_{10} يحذف عادة عند التعامل مع اللوغاريتمات العامة. وتستخدم أحياناً أخرى القاعدة الأسية $e = 2.718\cdots$. رقم طبيعي. وتُدعى هذه باللوغاريتمات الطبيعية وتكتب \ln . ولهذا.

$$\text{إذا كانت } y = e^x \text{، فإن } x = \ln y.$$

ولأي عدد y ، فإن العلاقة بين نوعي اللوغاريتم هي

$$\ln y = 2.3026 \log y$$

بعض قوانين اللوغاريتمات البسيطة هي كالتالي:

$$(7-أ) \quad \log(ab) = \log a + \log b$$

وهذا صحيح لأنه إذا كانت $a = 10^n$ و $b = 10^m$ فعندئذ $ab = 10^{n+m}$. ومن تعريف اللوغاريتم، $\log a = n$ ، $\log b = m$ ، وعليه

$$\log(ab) = n + m = \log a + \log b.$$

وبشكل مائل، نستطيع إثبات أن

$$(8-أ) \quad \log\left(\frac{a}{b}\right) = \log a - \log b$$

$$(9-أ) \quad \log a^n = n \log a$$

وهذه القوانين الثلاثة تنطبق على اللوغاريتمات العامة إضافة إلى أي لوغاريتم سواء أكان طبيعيًا أم لا. لقد استخدمت اللوغاريتمات في السابق كطريقة لتبسيط بعض أنواع الحسابات. وبسبب تطور الحاسبات الإلكترونية والحواسيب، لم يعد استخدامها أمراً شائعاً. ومع هذا، فإن اللوغاريتمات لا تزال تظهر في بعض المعادلات الفيزيائية. لذا، من المفيد معرفة كيفية التعامل معها. إذا كنت لا تملك آلة حاسبة يمكنك استخدامها لحساب اللوغاريتمات، فإنك تستطيع بسهولة استخدام الجدول اللوغاريتمي. كالجدول الصغير المبين هنا (الجدول أ-1). أعطي العدد N إلى خانتيين (بعض الجداول تعطي N إلى ثلاث خانتيين أو أكثر): الخانة الأولى في العمود الرئيس إلى اليسار، والخانة الثانية في الصف الأفقي على الامتداد العلوي. وعلى سبيل المثال، يشير الجدول إلى أن $\log 1.0 = 0.000$ ، و $\log 1.1 = 0.41$ ، و $\log 4.1 = 0.613$. ولا يحتوي (الجدول أ-1) على الفاصلة العشرية - وهو أمر مفهوم. ويعطي الجدول اللوغاريتمات للأعداد بين 1.0 و 9.9؛ وللأعداد الأكبر أو الأصغر، نستخدم (القاعدة أ-7)

$$\log(ab) = \log a + \log b$$

على سبيل المثال

$$\log(380) = \log(3.8 \times 10^2) = \log(3.8) + \log(10^2).$$

ومن الجدول، $\log 3.8 = 0.580$ ؛ ومن القاعدة أ-9،

$$\log(10^2) = 2 \log(10) = 2$$

بما أن $\log(10) = 1$ ، وهذا يتبع من تعريف اللوغاريتم: إذا كان من الممكن كتابة القاعدة الأسية e كمتتالية لا نهائية.

$$e = 1 + \frac{1}{1} + \frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3} + \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} + \cdots$$

اللوغاريتمات العامة

اللوغاريتمات الطبيعية

الجدول أ-1 تحضير اللوغاريتمات الشائعة

N	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1	000	041	079	114	146	176	204	230	255	279
2	301	322	342	362	380	398	415	431	447	462
3	477	491	505	519	531	544	556	568	580	591
4	602	613	623	633	643	653	663	672	681	690
5	699	708	716	724	732	740	748	756	763	771
6	778	785	792	799	806	813	820	826	833	839
7	845	851	857	863	869	875	881	886	892	898
8	903	908	914	919	924	929	935	940	944	949
9	954	959	964	968	973	978	982	987	991	996

$10 = 10^1$. فإن $\log(10) = 1$ لذلك .

$$\begin{aligned}\log(380) &= \log(3.8) + \log(10^2) \\ &= 0.580 + 2 \\ &= 2.580.\end{aligned}$$

وبالمثل.

$$\begin{aligned}\log(0.081) &= \log(8.1) + \log(10^{-2}) \\ &= 0.908 - 2 = -1.092.\end{aligned}$$

ونحتاج في بعض الأوقات إلى القيام بالعملية العكسية: أي إيجاد العدد N المصاحب للوغاريتم 2.670 كمثال. ويدعى هذا "أخذ اللوغاريتم المعاكس". للقيام بذلك، نفضل الرقم 2.670 إلى جزأين، ونجعل الفاصل عند الفاصلة العشرية كما يلي:

$$\begin{aligned}\log N = 2.670 &= 2 + 0.670 \\ &= \log 10^2 + 0.670\end{aligned}$$

ثم ننظر إلى (الجدول أ-1) لمعرفة العدد الذي لوغاريتمه يساوي 0.670 فلا نجد. لذا، نلجأ إلى التقريب: نجد $\log 4.6 = 0.663$ ، وأن $\log 4.7 = 0.672$ وعليه، فإن العدد الذي نبحث عنه هو ما بين 4.6 و 4.7 . وهو أقرب إلى العدد الأخير بمقدار $\frac{7}{9}$. ونستطيع القول إن $\log 4.68 = 0.670$ تقريبا.

تقريب

إذا كان اللوغاريتم سالبا، وليكن -2.180 . نكمل كالتالي:

$$\begin{aligned}\log N = -2.180 &= -3 + 0.820 \\ &= \log 10^{-3} + \log 6.6 = \log 6.6 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

لذا، $N = 6.6 \times 10^{-3}$. لاحظ أننا أضفنا إلى اللوغاريتم المعطى العدد الصحيح الأكبر الذي يليه (3 في هذه الحالة) ليكون لدينا عدد صحيح. إضافة إلى عدد عشري بين 0 و 1.0 يمكن البحث عن لوغاريتمه المضاد في الجدول.

ملحق ب

نظائر مختارة

(7)	(6)	(5)	(4)	(3)	(2)	(1)
نصف العمر (إذا كان مشعاً)	الوفرة % (أو نمط الاضمحلال الإشعاعي النشط)	الكتلة الذرية *	العدد الكتلي A	الرمز	العنصر	العدد الذري نشطاً Z
10.24 min	β^-	1.008665	1	n	(Neutron)	0
	99.9885%	1.007825	1	H	Hydrogen	1
	0.0115%	2.014102	2	d or D	Deuterium	
12.33 yr	β^-	3.016049	3	t or T	Tritium	
	0.000137%	3.016029	3	He	Helium	2
	99.999863%	4.002603	4			
	7.59%	6.015122	6	Li	Lithium	3
	92.41%	7.016004	7			
53.29 days	EC, γ	7.016929	7	Be	Beryllium	4
	100%	9.012182	9			
	19.9%	10.012937	10	B	Boron	5
	80.1%	11.009306	11			
20.39 min	β^+ , EC	11.011434	11	C	Carbon	6
	98.93%	12.000000	12			
	1.07%	13.003355	13			
5730 yr	β^-	14.003242	14			
9.965 min	β^+ , EC	13.005739	13	N	Nitrogen	7
	99.632%	14.003074	14			
	0.368%	15.000109	15			
122.24 s	β^+ , EC	15.003065	15	O	Oxygen	8
	99.757%	15.994915	16			
	0.205%	17.999160	18			
	100%	18.998403	19	F	Fluorine	9
	90.48%	19.992440	20	Ne	Neon	10
	9.25%	21.991386	22			
2.6019 yr	β^+ , EC, γ	21.994437	22	Na	Sodium	11
	100%	22.989770	23			
14.951 h	β^- , γ	23.990963	24			
	78.99%	23.985042	24	Mg	Magnesium	12
	100%	26.981538	27	Al	Aluminum	13
	92.2297%	27.976927	28	Si	Silicon	14
157.3 min	β^- , γ	30.975363	31			

* الكتلة المبينة في الجدول (5) هي للذرات المتعادلة من الألكترونات عددها Z

(7)	(6)	(5)	(4)	(3)	(2)	(1)
نصف العمر (إذا كان مشعاً)	الوفرة % (أو نمط الاضمحلال الإشعاعي النشط)	الكتلة الذرية	العدد الكتلي A	الرمز	العنصر	العدد الذري نشطاً Z
	100%	30.973762	31	P	Phosphorus	15
14.262 days	β^-	31.973907	32			
	94.9%	31.972071	32	S	Sulfur	16
87.38 days	β^-	34.969032	35			
	75.78%	34.968853	35	Cl	Chlorine	17
	24.22%	36.965903	37			
	99.600%	39.962383	40	Ar	Argon	18
	93.258%	38.963707	39	K	Potassium	19
	0.0117%	39.963999	40			
1.277×10^9 yr	$\beta^-, EC, \gamma, \beta^+$					
	96.94%	39.962591	40	Ca	Calcium	20
	100%	44.955910	45	Sc	Scandium	21
	73.72%	47.947947	48	Ti	Titanium	22
	99.750%	50.943964	51	V	Vanadium	23
	83.789%	51.940512	52	Cr	Chromium	24
	100%	54.940363	55	Mn	Manganese	25
	91.75%	55.934942	56	Fe	Iron	26
	100%	58.933200	59	Co	Cobalt	27
5.2708 yr	β^-, γ	59.933822	60			
	68.077%	57.935348	58	Ni	Nickel	28
	26.223%	59.930791	60			
	69.17%	62.929601	63	Cu	Copper	29
	30.83%	64.927794	65			
	48.6%	63.929147	64	Zn	Zinc	30
	27.9%	65.926037	66			
	60.108%	68.925581	69	Ga	Gallium	31
	27.5%	71.922076	72	Ge	Germanium	32
	36.3%	73.921178	74			
	100%	74.921596	75	As	Arsenic	33
	49.6%	79.916522	80	Se	Selenium	34
	50.69%	78.918338	79	Br	Bromine	35
	57.00%	83.911507	84	Kr	Krypton	36
	72.17%	84.911789	85	Rb	Rubidium	37
	9.86%	85.909262	86	Sr	Strontium	38
	82.58%	87.905614	88			
28.79 yr	β^-	89.907738	90			
	100%	88.905848	89	Y	Yttrium	39
	51.4%	89.904704	90	Zr	Zirconium	40
	100%	92.906378	93	Nb	Niobium	41
	24.1%	97.905408	98	Mo	Molybdenum	42
4.2×10^6 yr	β^-, γ	97.907216	98	Tc	Technetium	43
	31.55%	101.904350	102	Ru	Ruthenium	44
	100%	102.905504	103	Rh	Rhodium	45
	27.33%	105.903483	106	Pd	Palladium	46
	51.839%	106.905093	107	Ag	Silver	47
	48.161%	108.904756	109			

(7)	(6)	(5)	(4)	(3)	(2)	(1)
نصف العمر (إذا كان مشعاً)	الوفرة % (او نمط الاضمحلال الإشعاعي النشط)	الكتلة الذرية	العدد الكتلي A	الرمز	العنصر	العدد الذري نشطاً Z
	28.7%	113.903358	114	Cd	Cadmium	48
4.41×10^{14} yr	95.71%; β^-	114.903878	115	In	Indium	49
	32.58%	119.902197	120	Sn	Tin	50
	57.21%	120.903818	121	Sb	Antimony	51
$> 5.6 \times 10^{22}$ yr	34.1%; $\beta^- \beta^-$	129.906223	130	Te	Tellurium	52
	100%	126.904468	127	I	Iodine	53
8.0207 days	β^-, γ	130.906124	131			
	26.89%	131.904155	132	Xe	Xenon	54
$> 3.6 \times 10^{20}$ yr	8.87%; $\beta^- \beta^-$	135.907220	136			
	100%	132.905447	133	Cs	Cesium	55
	11.232%	136.905821	137	Ba	Barium	56
	71.70%	137.905241	138			
	99.910%	138.906348	139	La	Lanthanum	57
	88.45%	139.905434	140	Ce	Cerium	58
	100%	140.907648	141	Pr	Praseodymium	59
	27.2%	141.907719	142	Nd	Neodymium	60
17.7 yr	EC, α	144.912744	145	Pm	Promethium	61
	26.75%	151.919728	152	Sm	Samarium	62
	52.19%	152.921226	153	Eu	Europium	63
	24.84%	157.924101	158	Gd	Gadolinium	64
	100%	158.925343	159	Tb	Terbium	65
	28.2%	163.929171	164	Dy	Dysprosium	66
	100%	164.930319	165	Ho	Holmium	67
	33.6%	165.930290	166	Er	Erbium	68
	100%	168.934211	169	Tm	Thulium	69
	31.8%	173.938858	174	Yb	Ytterbium	70
	97.41%	174.940768	175	Lu	Lutetium	71
	35.08%	179.946549	180	Hf	Hafnium	72
	99.988%	180.947996	181	Ta	Tantalum	73
$> 4 \times 10^{18}$ yr	30.64%; α	183.950933	184	W	Tungsten (wolfram)	74
4.35×10^{10} yr	62.60%; β^-	186.955751	187	Re	Rhenium	75
15.4 days	β^-, γ	190.960928	191	Os	Osmium	76
	40.78%	191.961479	192			
	37.3%	190.960591	191	Ir	Iridium	77
	62.7%	192.962924	193			
	33.832%	194.964774	195	Pt	Platinum	78
	100%	196.966552	197	Au	Gold	79
	16.87%	198.968262	199	Hg	Mercury	80
	29.9%	201.970626	202			
	70.476%	204.974412	205	Tl	Thallium	81
	24.1%	205.974449	206	Pb	Lead	82
	22.1%	206.975881	207			
	52.4%	207.976636	208			
22.3 yr	β^-, γ, α	209.984173	210			
36.1 min	β^-, γ	210.988731	211			
10.64 h	β^-, γ	211.991887	212			
26.8 min	β^-, γ	213.999798	214			

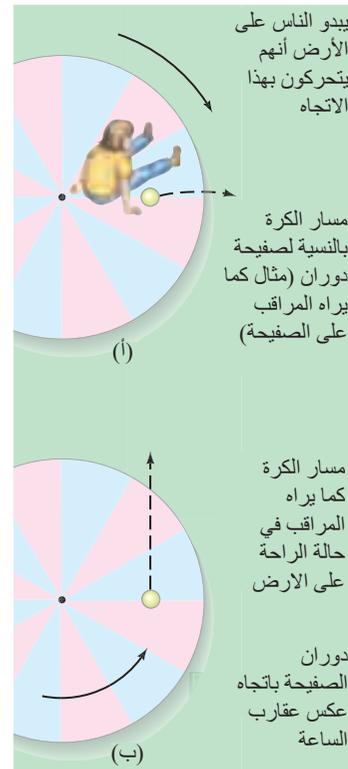
(7)	(6)	(5)	(4)	(3)	(2)	(1)
نصف العمر (إذا كان مشعاً)	الوفرة % (أو نمط الاضمحلال الإشعاعي النشط)	الكتلة الذرية	العدد الكتلي A	الرمز	العنصر	العدد الذري Z نشطاً
	100%	208.980383	209	Bi	Bismuth	83
2.14 min	α, γ, β^-	210.987258	211			
138.376 days	α, γ, EC	209.982416	210	Po	Polonium	84
164.3 μ s	α, γ	213.995186	214			
1.5 s	α, β^-	218.008681	218	At	Astatine	85
3.8235 days	α, γ	222.017570	222	Rn	Radon	86
22.00 min	β^-, γ, α	223.019731	223	Fr	Francium	87
1600 yr	α, γ	226.025403	226	Ra	Radium	88
21.773 yr	β^-, γ, α	227.027747	227	Ac	Actinium	89
1.9116 yr	α, γ	228.028731	228	Th	Thorium	90
1.405×10^{10} yr	100%; α, γ	232.038050	232			
3.276×10^4 yr	α, γ	231.035879	231	Pa	Protactinium	91
68.9 yr	α, γ	232.037146	232	U	Uranium	92
1.592×10^5 yr	α, γ	233.039628	233			
7.038×10^8 yr	0.720%; α, γ	235.043923	235			
2.342×10^7 yr	α, γ	236.045562	236			
4.468×10^9 yr	99.274%; α, γ	238.050783	238			
23.45 min	β^-, γ	239.054288	239			
2.144×10^6 yr	α, γ	237.048167	237	Np	Neptunium	93
2.3565 days	β^-, γ	239.052931	239			
24,110 yr	α, γ	239.052157	239	Pu	Plutonium	94
8.00×10^7 yr	α	244.064198	244			
7370 yr	α, γ	243.061373	243	Am	Americium	95
1.56×10^7 yr	α, γ	247.070347	247	Cm	Curium	96
1380 yr	α, γ	247.070299	247	Bk	Berkelium	97
898 yr	α, γ	251.079580	251	Cf	Californium	98
471.7 days	α, EC, γ	252.082970	252	Es	Einsteinium	99
100.5 days	α, γ	257.095099	257	Fm	Fermium	100
51.5 days	α, γ	258.098425	258	Md	Mendelevium	101
58 min	α, EC	259.10102	259	No	Nobelium	102
3.6 h	$\alpha, EC, fission$	262.1097	262	Lr	Lawrencium	103
10 min	fission	263.11831	263	Rf	Rutherfordium	104
34 s	$\alpha, fission, EC$	262.11415	262	Db	Dubnium	105
21 s	$\alpha, fission$	266.1219	266	Sg	Seaborgium	106
0.44 s	α	264.1247	264	Bh	Bohrium	107
9 s	α	269.1341	269	Hs	Hassium	108
0.07 s	α	268.1388	268	Mt	Meitnerium	109
0.06 ms	α	271.14608	271	Ds	Darmstadtium	110
1.5 ms	α	272.1535	272	Uuu		111
0.24 ms	α	277	277	Uub		112

ملحق ج

دوران الأطر المرجعية القوى القصورية؛ أثر كوريولس

الأطر المرجعية القصورية وغير القصورية

اختبرنا في الفصلين 5 و 8 حركة الأجسام بما فيها الدائرية والدورانية من الخارج كمراقبين ثابتين على الأرض. وفي بعض الأحيان يكون من الملائم أن نضع أنفسنا (نظريًا، إن لم يكن فعليًا) في إطار مرجعي دوار. ودعنا نختبر حركة الأجسام من وجهة نظر أو من الإطار المرجعي. لأشخاص يجلسون على منصة دوّارة كمنصة العجلة الدوّارة. سيبدو لهم وكأنّ بقية العالم تدور من حولهم. ولكن لنركز على ما سيلاحظون عندما يضعون كرة طاولة على أرضية المنصة الدوّارة، والتي نفترضها ملساء. إذا وضعوا الكرة على الأرضية الدوّارة بتأنٍ، دون أي دفع، فإنهم سيلاحظون تسارعها من السكون إلى الخارج كما هو مبين في (الشكل ج - 1 أ). ووفق قانون نيوتن الأول، يبقى الجسم الساكن ساكنًا إن لم تؤثر فيه قوة خارجية.



الشكل ج - 1 مسار كرة تركت على طاولة دوّارة كما هو مبين في (أ) إطار الطاولة المرجعي ثابت على الأرض، وفي (ب) بالنسبة لإطار مرجعي ثابت على الأرض

ولكن وفق المراقبين على المنصة الدوارة، فإن الكرة بدأت في التحرك على الرغم من عدم وجود قوة تؤثر فيها. وللمراقبين على الأرض، فإن هذا كله في غاية الوضوح: كانت الكرة تمتلك سرعة ابتدائية لحظة خرها (بسبب حرك المنصة). وببساطة فهي تستمر في الحركة في مسار خطي - منتظم كما هو مبين في (الشكل ج - 1 ب). وفق قانون نيوتن الأول.

ولكن ماذا يجب أن نعمل بالنسبة لإطار المراقبين المرجعي على المنصة الدوارة؟

من الواضح أن قانون نيوتن الأول، قانون القصور، لا ينطبق في هذا الإطار المرجعي الدوار. ولهذا السبب، يُسمّى إطار كهذا إطاراً مرجعياً لا قصوري. والإطار المرجعيّ القصورى كما تمت مناقشته في (الفصل 4) هو إطارٌ ينطبق فيه قانون القصور أو قانون نيوتن الأول. وكذلك قانونا نيوتن الثاني والثالث. وفي إطار مرجعيّ لا قصوريّ، كمنصتنا الدوارة، لن ينطبق قانون نيوتن الثاني فيه أيضاً. وعلى سبيل المثال في الحالة الموصوفة في الأعلى، لا توجد محصلة قوة على الكرة؛ ومع هذا فبالنسبة للمنصة الدوارة، فإن الكرة تتسارع.

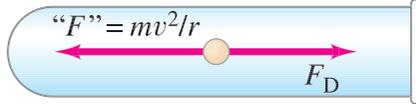
قوى (قصورية) وهمية

بسبب عدم تماسك قوانين نيوتن عند أخذ الملاحظات بالنسبة إلى الإطار المرجعي الدوار، يمكن حسابات الحركة أن تكون معقدة. ومع هذا، فلا يزال بإمكاننا تطبيق قوانين نيوتن في إطار مرجعي كهذا إذا استخدمنا الحيلة. تطير الكرة الموضوعة فوق المنصة الدوارة في (الشكل ج - 1 أ) إلى الخارج عندما تترك لثباتها (كما لو أنّ هناك قوة تؤثر فيها - على الرغم من أنه كما رأينا في الأعلى، ليست هناك قوة فعلية تقوم بذلك)؛ لذا فإن الحيلة التي سنستعملها هنا هي كتابة المعادلة $\Sigma F = ma$ كما لو أنّ قوة تساوي mv^2/r (or $m\omega^2 r$) تؤثر في اتجاه ماسي إلى الخارج في الجسيم بالإضافة إلى أي قوى أخرى قد تؤثر فيه أيضاً. تدعى هذه القوة الإضافية، والتي قد يرمز لها "كقوة مركزية" لأنها تبدو وكأنها تعمل إلى الخارج، القوة الوهمية أو القوة غير الحقيقية. وهي قوة تخيلية. (وهمية أو غير حقيقية) بسبب عدم وجود أي جسيم يؤثر فيها. إضافة إلى ذلك، عند متابعة هذا الأثر من إطار مرجعي قصوري، لن نجد له أي أثر نهائي. ولقد اخترعنا هذه القوة الوهمية لكي نتمكن من عمل حسابات في إطار لا قصوري باستخدام قانون نيوتن الثاني $\Sigma F = ma$. وعليه، فإن المراقب في الإطار اللاقصوري في (الشكل ج - 1 أ) يستخدم قانون نيوتن الثاني لحركة الكرة إلى الخارج مفترضاً أن قوة تساوي mv^2/r تؤثر فيها. وتسمى هذه القوى الوهمية أيضاً بالقوة القصورية لأن نشوءها ينجم فقط عن كون الإطار المرجعي غير قصوري. ونستطيع أن نختبر حركة جسيم ما في جهاز طرد مركزي (البند 5 - 5) من الإطار المرجعي لأنبوب الاختبار الدوار. وفي هذا الإطار المرجعي، تتحرك الجسيمات إلى درجة في مسار مستقيم نحو أسفل الأنبوب. (ومن إطار الأرض المرجعي، فإن الجسيمات تبقى تدور وتدور). ويمكن حساب تسارع الجسيم نسبة إلى الأنبوب الدوار باستخدام $F = ma$ وفي حالة إضافة قوة وهمية، "F"، تساوي $m\omega^2 r = m(v^2/r)$ وتؤثر باتجاه أسفل الأنبوب بالإضافة إلى قوة الانزياح F_D التي يؤثرها المائع في الجسيم (الشكل ج - 2) نحو أعلى الأنبوب. ناقشنا في (البند 5 - 3) القوى على شخص ما في سيارة تدور حول منعطف (الشكل 5 - 11) من وجهة نظر إطار قصوري. أما السيارة، على الوجه الآخر، فهي ليست إطاراً قصورياً. وقد يفسّر الركاب في سيارة كهذه أنهم قد ضغطوا إلى الخارج كنتيجة لتأثير قوة مركزية. ولكنهم يحتاجون إلى إدراك أنها قوة وهمية لعدم وجود ما يسببها. وهذا الأثر ناجم عن وجودهم في إطار مرجعي لا قصوري.

تدور الأرض أيضاً حول محورها. لذا، وبالتحديد، فإن قوانين نيوتن غير صحيحة على الأرض. ومهما يكن، فإن أثر دوران الأرض في العادة صغير جداً لدرجة يمكن عندها إهماله. مع أنه يؤثر في حركة الكتل الهوائية الكبيرة وتيارات المحيط. وبسبب دوران الأرض، تركزت مادة الأرض أكثر قليلاً عند خط الاستواء. ولذلك، فإن الأرض ليست كرة مثالية ولكنها أكثر امتلاءً عند خط الاستواء مقارنةً بما هي عليه عند قطبيها.

قوة وهمية (قوة غير حقيقية)

قوة قصورية



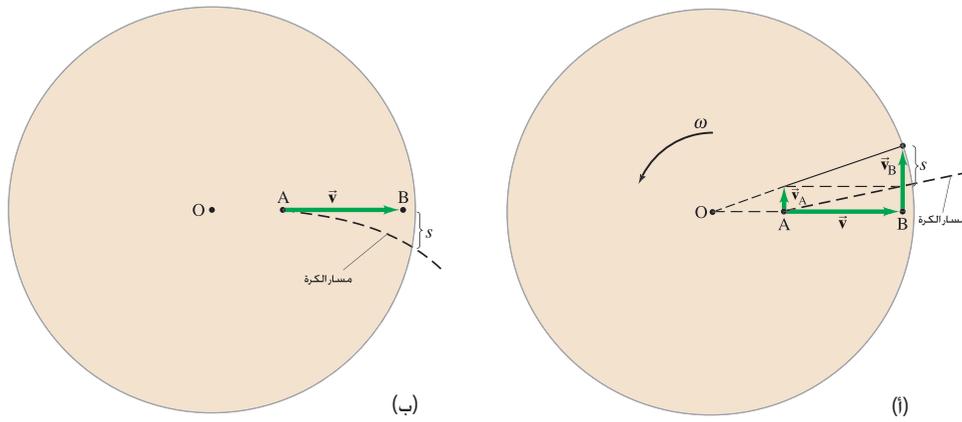
الشكل ج - 2 القوى على جسيم في أنبوب اختبار يدور في جهاز طرد مركزي، كما يشاهد في الإطار المرجعي لأنبوب الاختبار.

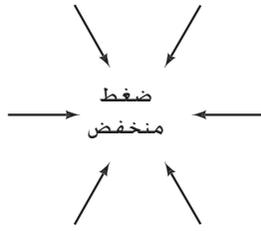
أثر كوريوليس

توجد قوة أخرى وهمية تُسمَّى قوة كوريوليس في إطار مرجعي يدور بسرعة زاوية مرجعية ω (نسبة إلى إطار قصوري). وتظهر هذه القوة وكأنها تعمل على جسم ما في إطار مرجعي دوار فقط إذا كان الجسم يتحرك نسبة إلى ذلك الإطار المرجعي، وهي تعمل على انحراف الجسم بالاتجاه الجانبي. كما أنها ناتجة من كون الإطار المرجعي لا قصوري. ولهذا، يشار إليها كقوة قصورية. ولعرفة كيفية نشوء قوة كوريوليس، خذ في الحسبان شخصين A و B، في وضع السكون على منصة تدور بسرعة زاوية ω ، كما هو مبين في (الشكل ج - 3 أ). وهما موضوعان عند بعدين: r_A و r_B على الترتيب من محور الدوران (عند 0). تقذف السيدة عند A الكرة بسرعة \vec{v} (في إطارها المرجعي) قطريا على امتداد نصف القطر إلى الخارج باتجاه الرجل B قرب الحافة الخارجية للمنصة. في (الشكل ج - 3 أ)، ننظر إلى هذه الحالة من إطار مرجعي قصوري. تمتلك الكرة سرعة ابتدائية \vec{v} قطرية على امتداد نصف القطر إلى الخارج، ولها أيضا سرعة ماسية \vec{v}_A ناجمة عن دروان المنصة. والآن، تشير (المعادلة 8 - 4) إلى أن $v_A = r_A \omega$. حيث r_A هو البعد القطري للسيدة عن محور الدوران عند 0. وإذا كان الرجل B له السرعة v_A نفسها، فستصله الكرة تماما. لكن سرعته أكبر من v_A (الشكل ج - 3 أ) لأنه أكثر بعدا عن محور الدوران. سرعته $v_B = r_B \omega$ ، وهي أكبر من v_A لأن $r_B > r_A$. لذا، عندما تصل الكرة إلى حافة المنصة الخارجية، فإنها تمر من نقطة يكون قد مر عليها سابقا الرجل B لأن سرعته في ذلك الاتجاه أعلى من سرعة الكرة. وعليه، فإن الكرة ستتم من خلفه.

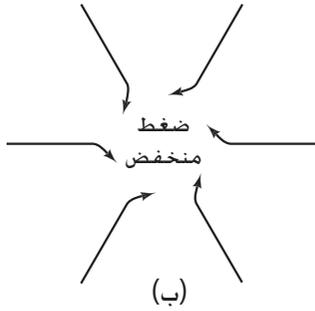
يظهر (الشكل ج - 3 ب) الحالة كما تشاهد من المنصة الدوارة كإطار مرجعي. A و B ساكنان، وقذفت الكرة بسرعة \vec{v} باتجاه B، ولكنها تنحرف إلى اليمين كما هو مبين وتمر من خلف B كما ورد سابقا. وهذا ليس أثر قوة مركزية، لأن القوة الطاردة من المركز تعمل على امتداد القطر إلى الخارج، وبدلا من ذلك، يعمل هذا الأثر جانبيًا، عموديًا على . ويدعى تسارع كوريوليس، ويقال إنه ناتج من قوة كوريوليس، وهي قوة قصورية وهمية. تفسيرها كما شوهد من نظام قصوري أعطي قبل قليل: إنه الأثر الناتج من الوجود في نظام دوار، حيث تمتلك النقاط الأبعد عن محور الدوران سرعات خطية أعلى. وعلى الجانب الآخر، عندما تشاهد من النظام الدوار، نستطيع أن نصف الحركة باستخدام قانون نيوتن الثاني، $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ ، وذلك عندما نضيف حد "القوة التي" تعود لأثر كوريوليس. وسنحدد الآن قيمة تسارع كوريوليس للحالة البسيطة الموصوفة في الأعلى. (نفترض أن v كبيرة والمسافات قصيرة، لكي نستطيع إهمال الجاذبية).

الشكل ج - 3 الأصل في أثر كوريوليس. بالنظر نحو الأسفل إلى المنصة الدوارة، (أ) كما تشاهد من نظام قصوري غير دوار. (ب) كما تشاهد من منصة دوارة كإطار مرجعي.





(i)



(ب)



(ج)

الشكل ج - 4 (أ) ستنتاب الرياح (الكتل الهوائية المتحركة) مباشرة باتجاه منطقة ضغط منخفض في حال عدم دوران الأرض؛ (ب) و (ج) : بسبب دوران الأرض، تنحرف الرياح إلى اليمين في نصف الكرة الأرضية الشمالي (كما في الشكل ج - 3) كما لو أن هناك قوة وهمية (كوريولس) تفعل ذلك.

ونجري الحسابات من الإطار المرجعي القصوري (الشكل ج - 3 أ). تتحرك الكرة قطرياً إلى الخارج مسافة $r_B - r_A$ بسرعة v خلال زمن ما t يعطى كما يلي:

$$r_B - r_A = vt.$$

وخلال هذا الزمن، تتحرك الكرة إلى الجانب مسافة s_A تعطى على النحو الآتي:

$$s_A = v_A t.$$

وفي هذا الزمن، يتحرك الرجل B مسافة

$$s_B = v_B t.$$

ولذلك تمر الكرة من خلفه مسافة s (الشكل ج - 3 أ) تعطى كالتالي:

$$s = s_B - s_A = (v_B - v_A)t.$$

ولقد رأينا سابقاً أن $v_B = r_B \omega$ و $v_A = r_A \omega$ لذا

$$s = (r_B - r_A)\omega t.$$

ونعوض $r_B - r_A = vt$ (انظر إلى الأعلى) لنحصل على

$$s = \omega vt^2.$$

(ج - 1)

وهذه s نفسها تساوي الإزاحة الجانبية كما تشاهد من النظام الدوار (ج - 1) اللا قصوري (الشكل ج - 3 ب).

ونرى مباشرة أن المعادلة ج - 1 تعود إلى حركة بتسارع ثابت. كما رأينا في الفصل 2 (انظر المعادلة

2 - 11 ب). $y = \frac{1}{2}at^2$ (مع سرعة ابتدائية صفر في الاتجاه الصادي y). لذا، إذا كتبنا

المعادلة ج - 1 على الشكل $s = \frac{1}{2}a_{Cor}t^2$ فسنرى أن تسارع كوريولس a_{Cor} هو

(ج - 2)

$$a_{Cor} = 2\omega v.$$

هذه العلاقة صحيحة لأي سرعة في السطح الدوار؛ أي في السطح العمودي على محور الدوران (في الشكل ج - 3. المحور خلال النقطة O عمودي على الصفحة).

إنّ أثر كوريولس له بعض الأهمية الظاهرة على الأرض بسبب دورانها. فهو يؤثر في حركة الكتل الهوائية، وعليه يؤثر في الطقس. وعند غياب أثر كوريولس هذا، سيسرع الهواء مباشرة إلى المناطق ذات الضغط المنخفض كما يشاهد في الشكل ج - 4 أ. ولكن بسبب هذا الأثر، تنحرف الرياح إلى اليمين في النصف الشمالي للكرة الأرضية (الشكل ج - 4 ب). بسبب دوران الأرض من الغرب إلى الشرق، لذا، هناك ميل لوجود نمط من الرياح التي تتحرك بعكس دوران اتجاه عقارب الساعة حول المناطق ذات الضغط المنخفض. وعكس ذلك صحيح في النصف الجنوبي للكرة الأرضية. لذلك، فإن الأعاصير تدور بعكس دوران اتجاه عقارب الساعة في نصف الكرة الشمالي، ولكنها مع اتجاه عقارب الساعة في نصفها الجنوبي. كما أنّ الأثر نفسه يفسر الرياح الشرقية قرب خط الاستواء؛ أي رياح متجهه جنوباً نحو خط الاستواء ستتحرف نحو الغرب (كما لو أنها قادمة من الشرق).

يعمل أثر كوريولس أيضاً على الجسم الساقط: الجسم الذي يترك ليسقط من أعلى برج لن يصطدم بالأرض مباشرة أسفل نقطة سقوطه، بل سينحرف قليلاً نحو الشرق عندما يشاهد من إطار قصوري. وسبب ذلك يعود إلى دوران قمة البرج بسرعة أعلى بقليل من سرعة دوران قاعدته.

ملحق د

الحرارتان النوعيتان الموليتان للغازات، والقسمة المتساوية للطاقة

الحرارتان النوعيتان الموليتان للغازات

تعتمد قيمة الحرارتين النوعيتين للغازات على طريقة تنفيذ العملية الديناميكية الحرارية. ومن هذه العمليات عمليتان مهمتان يتم خلالهما إبقاء الحجم أو الضغط ثابتا. أمّا طريقة اختلافهما عن بعضهما فيظهرها (الجدول د - 1).

وتم توضيح الاختلاف بين الحرارتين النوعيتين بطريقة مناسبة بدلالة القانون الأول في الديناميكا الحرارية والنظرية الحركية. نستخدم للغازات عادة الحرارتين النوعيتين، C_P و C_V . واللتين عُرِّفتا على أنهما الحرارة اللازمة لرفع مول واحد من الغاز درجة مئوية واحدة 1°C عند ثبات الحجم والضغط على الترتيب. وبالمقارنة مع (المعادلة 14 - 2). تكون الحرارة Q اللازمة لرفع درجة حرارة n مول من الغاز بمقدار ΔT هي

الحرارة النوعية

$$Q = nC_V \Delta T \quad \text{[حجم ثابت] (د - 1 أ)}$$

$$Q = nC_P \Delta T \quad \text{[ضغط ثابت] (د - 1 ب)}$$

وهو واضح من تعريف الحرارة النوعية المولية (مقارنة بين المعادلة 14 - 2، والمعادلة د - 1) $C_P = Mc_P$ و $C_V = Mc_V$

حيث تمثل M كتلة الغاز الجزيئية ($M = m/n$ بدلالة g/mol). قيم الحرارة النوعية المولية موجودة في (الجدول د - 1).

وهذه القيم هي بالتقريب نفسها للغازات المختلفة التي تمتلك عدد الذرات نفسه في الجزيء. ونستخدم الآن النظرية الحركية للغازات لمعرفة سبب أنّ قيم الحرارة النوعية للغازات عند عمليات الضغط - الثابت أعلى منها عند عمليات الحجم - الثابت.

الجدول د - 1 الحرارة النوعية للغازات عند 15°C					
$C_P - C_V$ (cal/mol · K)	الحرارة النوعية المولية (cal/mol · K)		الحرارة النوعية (kcal/kg · K)		غاز
	C_V	C_P	c_V	c_P	
					أحادي الذرة
1.99	2.98	4.97	0.75	1.15	He
1.99	2.98	4.97	0.148	0.246	Ne
					ثنائي الذرة
1.99	4.96	6.95	0.177	0.248	N ₂
2.00	5.03	7.03	0.155	0.218	O ₂
					ثلاثي الذرة
2.03	6.80	8.83	0.153	0.199	CO ₂
2.00	6.20	8.20	0.350	0.482	H ₂ O (100°C)
					متعدد الذرة
2.05	10.30	12.35	0.343	0.412	C ₂ H ₆

تخيّل أنّه سُخِّنَ غاز مثالي ببطء خلال هاتين الطريقتين: أولاً عند ثبات الحجم، ومن ثمّ عند ثبات الضغط. وفي كلتا العمليتين، ندى درجة الحرارة تزداد بالمقدار نفسه، ΔT . وخلال عملية ثبات الحجم، لا يبذل أي شغل لأن $\Delta V = 0$. لذا، ووفق القانون الأول في الديناميكا الحرارية، فإنّ الحرارة المضافة (يرمز لها Q_V) بمجملها تؤدي إلى زيادة في الطاقة الداخلية للغاز

$$Q_V = \Delta U.$$

أمّا في عملية ثبات الضغط، فإنّ هناك شغلاً يُبذل. وعليه، فإنّ الطاقة المضافة، Q_P ، يجب أن تزيد من مقدار الطاقة الداخلية إضافة إلى أنّها تستخدم في بذل الشغل $W = P \Delta V$. لذا، ولأجل ΔT نفسها، علينا إضافة مقدار آخر من الحرارة خلال العملية عند ثبات الضغط مقارنة معها عند ثبات الحجم. ومن القانون الأول في الديناميكا الحرارية عند ثبات الضغط

$$Q_P = \Delta U + P \Delta V.$$

وبما أن ΔU هي نفسها في العمليتين (نحن من اختار ΔT متساوية)، نستطيع أن نجمع المعادلتين السابقتين كالتالي:

$$Q_P - Q_V = P \Delta V.$$

ومن قانون الغاز المثالي، $V = nRT/P$ ، ينتج لأجل عملية عند ثبات الضغط $\Delta V = nR \Delta T/P$ وعند تعويض هذا في المعادلة السابقة في الأعلى، وباستخدام (المعادلتين د - 1، د - 1ب). نحصل على

$$nC_P \Delta T - nC_V \Delta T = P \left(\frac{nR \Delta T}{P} \right)$$

أو بعد الحذف

$$C_P - C_V = R. \quad (2 - د)$$

وبما أنّ ثابت الغاز $R = 8.315 \text{ J/mol} \cdot \text{K} = 1.99 \text{ cal/mol} \cdot \text{K}$ ، فإنّنا نتنبأ بأن C_P ستكون أكبر من قيمة C_V بمقدار $1.99 \text{ cal/mol} \cdot \text{K}$. وبالفعل، إن هذا قريب جدّاً مما حصلنا عليه عملياً. كما يظهر آخر عمود في (الجدول د - 1).

والآن، نحسب الحرارة النوعية المولية لغاز أحادي الذرة باستخدام النظرية الحركية. ولعملية أجريت عند ثبات الحجم، عندما لا يبذل أي شغل، فإن القانون الأول في الديناميكا الحرارية يشير إلى أنّ

$$\Delta U = Q_V.$$

ولغاز مثالي أحادي الذري، فإن الطاقة الداخلية U هي الطاقة الحركية الكلية للجزيئات جميعها

$$U = N \left(\frac{1}{2} m \bar{v}^2 \right) = \frac{3}{2} nRT$$

كما رأينا في (الجزء 14 - 2). وعندئذٍ، وباستخدام (المعادلة د - 1 أ)، نكتب $\Delta U = Q_V$ على الصورة الآتية:

$$\Delta U = \frac{3}{2} nR \Delta T = nC_V \Delta T \quad (3 - د)$$

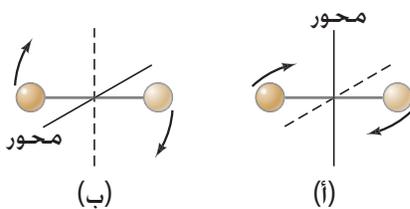
أو

$$C_V = \frac{3}{2} R. \quad (4 - د)$$

وبما أنّ $R = 8.315 \text{ J/mol} \cdot \text{K} = 1.99 \text{ cal/mol} \cdot \text{K}$ ، فإن النظرية الحركية تتنبأ بأن $C_V = 2.98 \text{ cal/mol} \cdot \text{K}$ للغاز المثالي أحادي الذرة. وهذا قريب جدّاً من القيم العملية للغازات كالهليوم والنيون (الجدول د - 1). ومن (المعادلة د - 2)، فإن قيمة C_P ، المتوقعة هي نحو $4.97 \text{ cal/mol} \cdot \text{K}$. وهذا متوافق مع التجربة أيضاً (الجدول د - 1).

القسمة المتساوية للطاقة

الشكل د - 1 يستطيع الجزيء ثنائي الذرة الدوران حول محورين مختلفين.



تزداد الحرارتان النوعيتان الموليتان المقيستتان للغازات الأكثر تعقيداً (الجدول د - 1). كالغازات ثنائية الذرة (ذرتان) وثلاثية الذرات - مع ازدياد عدد الذرات في الجزيء. ونستطيع تفسير هذا بافتراض احتواء الطاقة الداخلية على الطاقة الحركية الانتقالية، وكذلك الأشكال الأخرى للطاقة. وعلى سبيل المثال، في الغاز ثنائي الذرة (الشكل د - 1)، تستطيع الذرتان الدوران حول محورين مختلفين (أما الدوران حول محور ثالث يمر خلال الذرتين فلا يولد أي طاقة، لأنّ عزم القصور الذاتي صغير للغاية). ويمكن للجزيئات أن تمتلك طاقة حركية دورانية إضافة إلى الطاقة الحركية الانتقالية. يولد أي طاقة، لأنّ عزم القصور الذاتي صغير للغاية. ويمكن للجزيئات أن تمتلك طاقة حركية دورانية إضافة إلى الطاقة الحركية الانتقالية.

درجات الحرية

من المفيد أن نقدم فكرة درجات الحرية التي نعني بها عدد الطرق المستقلة التي تستطيع من خلالها الجزيئات امتلاك الطاقة. ومثال ذلك امتلاك الغاز أحادي الذرة ثلاث درجات من الحرية؛ لأن الذرة تستطيع أن تمتلك سرعة على امتداد المحاور x و y و z . وتعدّ هذه ثلاث حركات مستقلة لأن أيّ تغير في أيّ من المركبات لن يؤثر في الأخرتين. وللجزيء ثنائي الذرة لدرجات الحرية الثلاث نفسها المرتبطة بالطاقة الحركية الانتقالية إضافة إلى درجتين أخريين مرتبطتين بالطاقة الحركية الدورانية (الشكل د - 1). بمجموع خمس درجات من الحرية.

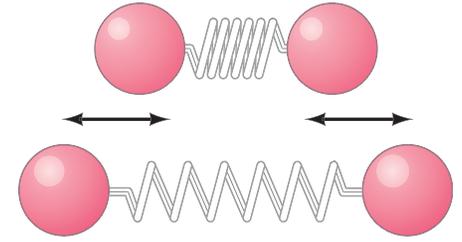
يشير (الجدول د - 1) إلى أن C_V للغازات ثنائية الذرة هي نحو ضعف التي للغازات أحادية الذرة - أي بالنسبة نفسها لدرجات الحرية. وهذا ما قاد الفيزيائيين في القرن التاسع عشر إلى مبدأ تقسيم الطاقة المتساوي الذي ينص على أنّ درجات الحرية الفاعلة تتشارك بالطاقة بالتساوي. وكلّ درجة حرية نشطة للجزيء تمتلك بالمتوسط طاقة تساوي $\frac{1}{2}kT$. لذا، فإن متوسط طاقة الغاز أحادي الذرة هي $\frac{3}{2}kT$ (والتي عرفناها سابقاً) لغاز ثنائي الذرة $\frac{5}{2}kT$. وعليه، فإن الطاقة الداخلية للغاز ثنائي الذرة ستكون

$$U = N\left(\frac{5}{2}kT\right) = \frac{5}{2}nRT$$

أحادية الذرة. سنرى أن الحرارة النوعية المولية للغازات ثنائية الذرة عند ثبات الحجم ستساوي $\frac{5}{2}R = 4.97 \text{ cal/mol} \cdot \text{K}$. وفق القيم المقیسة. وبما أن الجزيئات الأكثر تعقيداً تمتلك درجات حرية أكثر من ذلك فإنها تمتلك حرارة نوعية مولية أعلى.

وعلى الرغم من ذلك، أظهرت الأقيسة للغازات ثنائية الذرة عند درجات حرارة منخفضة جداً قيمة بها هي $\frac{3}{2}R$ فقط. كما لو أنّ هناك ثلاث درجات من الحرية فقط. وعند درجات الحرارة المرتفعة جداً، فإنّ قيمة C_V هي $\frac{7}{2}R$ تقريباً، كما لو أنّ هناك سبع درجات من الحرية. وتفسير ذلك أنّه عند درجات الحرارة المنخفضة تمتلك الجزيئات جميعها تقريباً طاقة حركية انتقالية فقط. لذا، لن تكون هناك طاقة متوافرة للطاقة الدورانية وهناك فقط ثلاث درجات من الحرية "نشطة". وعند درجات حرارة مرتفعة جداً، تكون درجات الحرية الخمس جميعها نشطة إضافة إلى درجتين أخريين، نفسهما على أنهما مرتبطتان مع ذرتين مهترتين، كما لو أنّهما موصلتان بزنبك (الشكل د - 2). هناك درجة حرية واحدة ناجمة من الطاقة الحركية للحركة الاهتزازية وتأتي الأخرى من طاقة الوضع للحركة الاهتزازية ($\frac{1}{2}kx^2$). وعند درجة حرارة الغرفة، فإن هاتين الدرجتين لا تكونان نشطتين كما يظهر. وقد فسّر آينشتاين سبب قلة أعداد درجات الحرية "النشطة" عند درجة حرارة الغرفة باستخدام نظرية الكم.

تقسيم الطاقة المتساوي

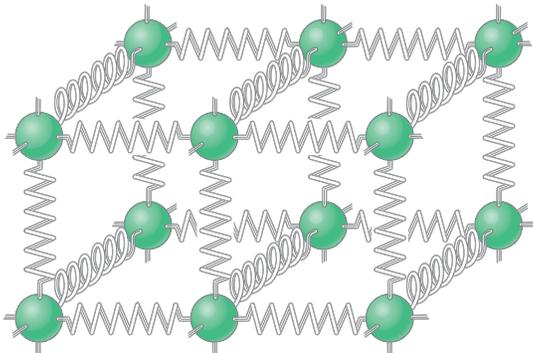
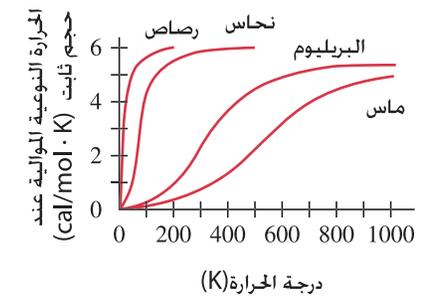


الشكل د - 2 يستطيع الجزيء ثنائي الذرة الاهتزاز كما لو أنّ الذرتين متصلتان بزنبك، وبالطبع فهما ليستا كذلك، ولكنهما تؤثران في بعضهما بقوة ذات طبيعة كهربائية - بصورة تمثل قوة الزنبك.

المواد الصلبة

يمكن تطبيق مبدأ التقسيم المتساوي للطاقة على المواد الصلبة أيضاً. تقترب الحرارة النوعية لأيّ مادة صلبة عند درجات حرارة عالية من $3R$ ($6.0 \text{ cal/mol} \cdot \text{K}$) (الشكل د - 3). ويُدعى هذا قيمة ديولنج وباتيت، وسُمّيت هكذا على أسماء العالِمَيْن اللذين كانا أول من قاساها في 1819. لاحظ أن (الجدول 14 - 1) يظهر قيم الحرارة النوعية لكل كيلو غرام، وليس لكل مول. وعند درجات الحرارة المرتفعة، فمن الظاهر أنّ لكل ذرة ستّ درجات من الحرية، على الرغم من أنّ بعضها لا يكون نشطاً عند درجات الحرارة المنخفضة. ويمكن لكل ذرة في المواد الصلبة البلورية أن تهتز حول موضع اتزانها كما لو أنّها موصولة بزنبك مع كل من جيرانها (الشكل د - 4). لذا، فيمكن لها أن تمتلك ثلاث درجات من الحرية للطاقة الحركية وثلاث درجات أخرى مرتبطة بطاقة الوضع في كل من الاتجاهات الثلاثة: x و y و z . استناداً إلى القيم المقیسة.

الشكل د - 3 الحرارة النوعية المولية للمواد الصلبة كاقتران في درجة الحرارة.



الشكل د - 4 تستطيع الذرات في المادة الصلبة البلورية الاهتزاز حول مواضع اتزانها كما لو أنّها كانت موصولة بجاراتها بواسطة زنبركات. (القوى بين الذرات كهربائية في طبيعتها).

ملحق هـ

تحويلات أو تحويلات جاليليو ولورنتز

نختبر الآن بالتفصيل الرياضيات التي تربط الكميات في إطار مرجعي قصوري إلى مثيلاتها في إطار آخر. وبالتحديد. سنرى كيفية تغير المواضع والسرعات عند انتقالها من إطار مرجعي إلى آخر. ونبدأ مع وجهة نظر تقليدية منسوبة إلى جاليليو. خذ في الحسبان إطارين مرجعيين: S و S' يتميز كل منهما بمجموعة محاور إحداثية (الشكل هـ - 1). يشير المحوران x و y (z غير ظاهر) إلى S. في حين يشير المحوران x' و y' إلى S'. ويتداخل المحوران x و x' مع بعضهما. ونفترض أن الإطار S' يتحرك إلى اليمين (في اتجاه x) بسرعة v نسبة إلى S. ونفترض للسهولة تطابق نقطتي الأصل عند الزمن t = 0.

وخذ في الحسبان حدثاً يقع عند نقطة ما. ولتكن P (الشكل هـ - 1) ممثلة بالإحداثيات x', y', z' في الإطار المرجعي S' عند الزمن t'. ما هي إحداثيات P بالنسبة إلى S؟ بما أن S و S' يتداخلان في البداية تحديدًا. فإن S' بعد زمن t. ستكون قد تحركت مسافة vt'. ولذا. عند زمن t'. أما المحوران y, z على الوجه الآخر فلم يتأثرا بالحركة على امتداد محور x. وعليه. فإن y = y' & z = z'. وفي النهاية. بما أنه تم افتراض زمن مطلق وفق فيزياء جاليليو - نيوتن. فإن الساعات في الإطارين ستتفقان مع بعضهما. لذا. t' = t. ونلخص هذا في معادلات جاليليو للتحويل كالتالي:

$$x = x' + vt'$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = t'$$

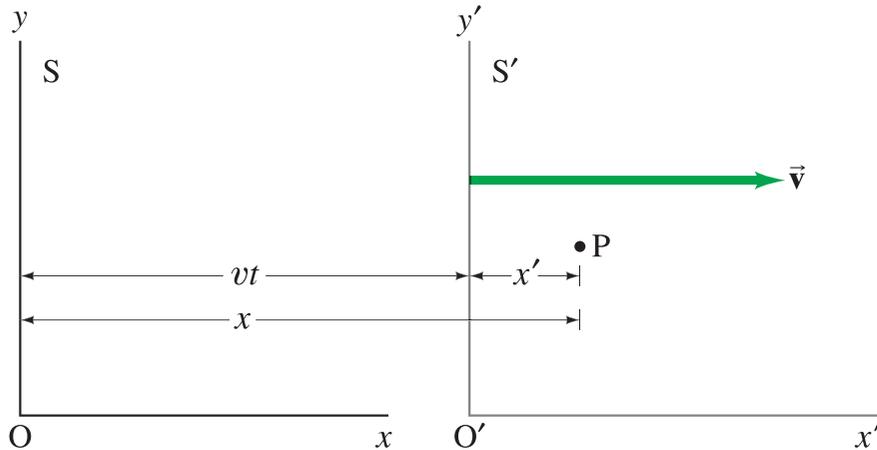
تحويلات جاليليو

(هـ - 1)

وتعطي هذه المعادلات إحداثيات حدث في إطار S عند معرفة إحداثياته في إطار S'. وإذا عرفنا تلك الإحداثيات في النظام S. فسنحصل على إحداثيات S' من

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t.$$

هذه المعادلات الأربع هي التحويل "المعاكس". ويمكن الحصول عليها بسهولة من مجموعة (المعادلات هـ - 1). لاحظ أن الأثر هو. فقط. استبدال الكميات المعلمة وغير المعلمة وإحلال -v مكان v. وهذا بديهي لأن من الإطار S'. فإن S تتحرك إلى اليسار (اتجاه x السالب) بسرعة v.



الشكل هـ - 1 الإطار المرجعي القصوري S' يتحرك إلى اليمين بسرعة v بالنسبة إلى الإطار القصوري S.

والآن، افترض أن النقطة P في (الشكل هـ - 1) تمثل جسمًا متحركًا، وافترض أن مركبات سرعتها في هي u'_x, u'_y, u'_z و u (نستعمل هنا لنميزها عن السرعة النسبية للإطارين v). والآن $u'_z = \Delta z' / \Delta t'$ ، وعلى سبيل المثال، إذا كان موضع الجسم عند زمن t'_1 هو x'_1 ، وبعد ذلك بوقت قصير، t'_2 ، هو x'_2 فإن

$$u'_x = \frac{x'_2 - x'_1}{t'_2 - t'_1} = \frac{\Delta x'}{\Delta t'}$$

والآن، ستمتلك سرعة P كما تشاهد من الإطار S المركبات u_x, u_y, u_z ، ونستطيع معرفة كيفية ارتباط هذه المركبات مع مركبات السرعة في الإطار S' عن طريق استخدام (المعادلات هـ - 1). ومثال ذلك ما يلي:

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{(x'_2 + vt'_2) - (x'_1 + vt'_1)}{t'_2 - t'_1} \\ &= \frac{(x'_2 - x'_1) + v(t'_2 - t'_1)}{t'_2 - t'_1} \\ &= \frac{\Delta x'}{\Delta t'} + v = u'_x + v. \end{aligned}$$

أما بالنسبة للمركبات الأخرى $u'_y = u_y$ و $u'_z = u_z$ فيصبح لدينا

$$\begin{aligned} u_x &= u'_x + v, \\ u_y &= u'_y, \\ u_z &= u'_z. \end{aligned} \quad \text{(هـ - 2)}$$

تحولات سرعة جاليليو

وتُعرف هذه بمعادلات تحولات سرعة جاليليو. ونرى أن مركبتي السرعة y و z لم تتغيرا، مع أن المركبة x اختلفت بمقدار v . وهذا ما استخدمناه قبل ذلك عند التعامل مع السرعة النسبية. وعلى سبيل المثال، إذا كانت S' تمثل قطارا S وتمثل الأرض، وكان القطار يتحرك بسرعة v بالنسبة إلى الأرض، فإن شخصًا ما يتحرك باتجاه مقدمة القطار بسرعة u'_x ستكون سرعته بالنسبة إلى الأرض هي $u_x = u'_x + v$

النظرية النسبية

إن تحولات جاليليو؛ (المعادلتين هـ - 1 و هـ - 2)، صحيحتان فقط عندما تكون السرعات المعنية غير نسبية (الفصل 26): أي أقل بكثير من سرعة الضوء، c . ونستطيع أن نرى، كمثال على ذلك، أن المعادلة ثابتة في الأطر القصورية المرجعية جميعها (مسلمة أساسية في نظرية النسبية). أي أن سرعة الضوء المنتقل في الإطار S' بسرعة $u'_x = c$ ستكون $c + v$ في الإطار S ، استنادا إلى (المعادلة هـ - 2). في حين تصرّ نظرية النسبية على أن السرعة يجب أن تكون c في الإطار S . لذا، هناك حاجة ماسة إلى مجموعة جديدة من معادلات التحويل للتعامل مع السرعات النسبوية. وسنشتق المعادلات اللازمة بطريقة بسيطة. وبالنظر إلى (الشكل هـ - 1) مرة أخرى، نفترض أن التحويل خطي. وبأخذ الشكل التالي:

$$x = \gamma(x' + vt'), \quad y = y', \quad z = z'.$$

أي أننا نعدل المعادلة الأولى من (المعادلات هـ - 1) بالضرب في المعامل γ الذي سيتم تحديده لاحقًا. ونفترض بقاء المعادلتين y و z غير متغيرتين لتوقعنا عدم وجود أي تقلص للطول في هذين الاتجاهين. ولن نفترض أي شكل لـ t ، ولكن سنشتقه. ويجب أن تمتلك المعادلات العكسية (المقلوبة) الشكل ذاته مع استبدال v بـ $-v$. (مبدأ النسبية يفرضها. لأن تحرك S' إلى اليمين بالنسبة إلى S يكافئ تحرك S إلى اليسار نسبة إلى S'). وعليه،

$$x' = \gamma(x - vt).$$

والآن، إذا غادرت نبضة ضوئية نقطة الأصل المشتركة لـ S' و S عند الزمن $t = t' = 0$ فستكون قد انتقلت بعد زمن t على امتداد محور x السيني مسافة (في S) مقدارها $x = ct$ أو (في S') $x' = ct'$.

لذلك، من المعادلات بدلالة x و x' كما ورد :

$$ct = \gamma(ct' + vt') = \gamma(c + v)t'$$

$$ct' = \gamma(ct - vt) = \gamma(c - v)t$$

ونعوض t' من المعادلة الثانية في الأولى لنجد

$$ct = \gamma(c + v)\gamma(c - v)(t/c) = \gamma^2(c^2 - v^2)t/c$$

ونلغي t من الجانبين، ونحل لإيجاد γ حيث

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

والآن، وبعد أن وجدنا γ ، فإننا بحاجة إلى إيجاد العلاقة بين t و t' ، ولنعمل ذلك، نربط

$$x' = \gamma(x - vt) \text{ مع } x = \gamma(x' + vt')$$

$$x' = \gamma(x - vt) = \gamma[\gamma(x' + vt') - vt]$$

ونحل لإيجاد t ، فنجد أن $t = \gamma(t' + vx'/c^2)$ وباختصار

$$x = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}(x' + vt')$$

(هـ - 3) تحويلات لورنتز

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\left(t' + \frac{vx'}{c^2}\right)$$

وتدعى هذه معادلات تحويل لورنتز. وكان قد اقترحها لورنتز عام 1904 بشكل مغاير نوعاً ما لتفسير النتيجة الخاوية لتجربة مايكلسون - مورلي، ولجعل معادلات ماكسويل تأخذ الصيغة نفسها في أنظمة القصور جميعها. وبعد ذلك بعام، اشتق أينشتاين هذه المعادلات بناءً على نظريته في النسبية. لاحظ أن كلا من المعادلتين السينية x والزمنية t قد عدلتا مقارنة مع تحويل جاليليو. وبالفعل، نشاهد بطريقة مباشرة في المعادلة الأخيرة وكذلك الأولى من قبلها كيفية اندماج إحداثيات كل من الفضاء والزمن.

وقد تمّ الحصول على معادلات السرعة النسبوية الصحيحة. فعلى سبيل المثال، باستخدام المعادلات هـ - 3 (ندع $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$)

$$u_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\gamma(\Delta x' + v \Delta t')}{\gamma(\Delta t' + v \Delta x'/c^2)} = \frac{(\Delta x'/\Delta t') + v}{1 + (v/c^2)(\Delta x'/\Delta t')}$$

$$= \frac{u'_x + v}{1 + vu'_x/c^2}$$

ويمكن الحصول على باقي المعادلات بالطريقة نفسها، ونعرضها هنا كما يلي:

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + vu'_x/c^2}$$

$$u_y = \frac{u'_y \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 + vu'_x/c^2}$$

$$u_z = \frac{u'_z \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 + vu'_x/c^2}$$

تحويلات السرعة النسبوية

(هـ - 4)

وأول هذه المعادلات هي (المعادلة 26 - 9)، التي استخدمناها في (البند 26 - 11) حيث ناقشنا كيف أن السرعات لا تجمع كما هو متوقع حسب المنطق (طريقة جاليليو)، وذلك بسبب الحد $(1 + vu'_x/c^2)$ ونستطيع الآن أن نرى كيف تتغير وتعتمد كل من مركبتي السرعة الصادية y والعينية z على المركبة السينية x .

مثال هـ - 1 تقلص الطول.

اشتق صيغة تقلص الطول. (المعادلة 26 - 2). من معادلات انتقال لورنتز.
الحل : افرض أنّ جسمًا ما طوله L_0 في حالة سكون على محور x السيني في S . وأنّ نهايتيه عند الإحداثيين x_1 و x_2 . بحيث يكون $x_2 - x_1 = L_0$. وستصبح النهايتان عند أيّ لحظة في S' . عند x'_1 و x'_2 كما هو معطى بمعادلات لورنتز للتحويل. الطول المقيس في S هو $L = x'_2 - x'_1$. ويقيس مراقب ما هذا الطول في S' بوساطة قياس x'_2 و x'_1 في الوقت نفسه (في إطار S'). لذلك، $t'_2 = t'_1$. وعندئذ، من (المعادلة هـ - 3).

$$L_0 = x_2 - x_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} (x'_2 + vt'_2 - x'_1 - vt'_1).$$

وبما أن $t'_2 = t'_1$ نجد أن

$$L_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} (x'_2 - x'_1) = \frac{L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

أو

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

وهي (المعادلة 26 - 2).

مثال هـ - 2 اتساع الزمن.

اشتق صيغة اتساع الزمن. (المعادلة 26 - 1). من معاملات انتقال لورنتز.
الحل : يقاس الزمن Δt_0 بين حدثين يقعان في الموضع نفسه ($x'_2 = x'_1$) في S' ليكون $\Delta t_0 = t'_2 - t'_1$. وبما أن $x'_2 = x'_1$. من المعادلة الأخيرة في (هـ - 3). يكون الزمن Δt بين حدثين كما قيس في S كما يلي:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \left(t'_2 + \frac{vx'_2}{c^2} - t'_1 - \frac{vx'_1}{c^2} \right)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} (t'_2 - t'_1)$$

$$= \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

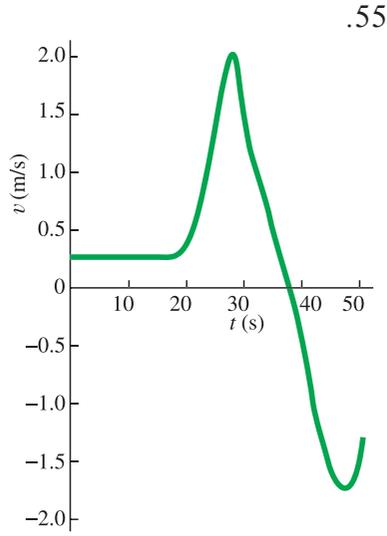
والتي هي (المعادلة 26 - 1). لاحظ أنّنا اخترنا S' لتكون الإطار الذي يحدث به الحدثان في الموضع نفسه. لتكون $x'_2 = x'_1$. و تلغى الحدود المحتوية على x'_2 و x'_1 .

الفصل 1

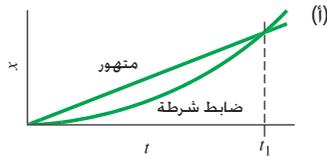
1. (i) 1.4×10^{10} سنة
- (ب) 4.4×10^{17} s
3. (i) 1.156×10^0
- (ب) 2.18×10^1
- (ج) 6.8×10^{-3}
- (د) 2.7635×10^1
- (هـ) 2.19×10^{-1}
- (و) 4.44×10^2
5. (i) 1%
7. (i) 4%
- (ب) 0.4%
- (ج) 0.07%
9. 1.7 m
11. 9%
13. (i) 1 ميغافولت.
- (ب) 2 ميكرومتر.
- (ج) 6×10^3 يوم .
- (د) 18 ورقة من 100 دولار.
- (هـ) 8 قطع منمنمة
15. (i) 1.5×10^{11} m
- (ب) 150 غيغامتتر.
17. 3.8 s
19. 3.76 m
21. 7.3%
23. (i) 3.80×10^{13} m²
- (ب) 13.4
25. $7 \times 10^5 \approx$ كتاب
27. ≈ 11 hr
29. 8×10^4 cm³
31. 4×10^8 kg/yr
33. (i) لا يمكن أن يكون صحيحًا.
- (ب) يمكن أن يكون صحيحًا
- (ج) يمكن أن يكون صحيحًا.
35. 50,000 دقيقة.
37. 2×10^{-4} m
39. (i) 10^{12} بروتون أو نيوترون
- (ب) 10^{10} بروتون أو نيوترون .
- (ج) 10^{29} بروتون أو نيوترون.
- (د) 10^{68} بروتون أو نيوترون.
41. 1500 كرة علكة.
43. ≈ 3 ft
45. ≈ 3500 km
47. 15 m ارتفاع، 25 m عرض.
- 150 m طول.
- 6×10^4 m³
49. 210 yd, 190 m

الفصل 2

51. 49.3 قمر، 2.21×10^{19} m³
53. (i) 3%, 3%
- (ب) 0.2%, 0.7%
1. 72.3 km/h
3. 61 m
5. -2.5 cm/s
7. 2.6×10^2 km (i)
- (ب) 77 km/h
9. 4.3 m/s (i)
- (ب) 0 m/s
11. 2.7 min
13. 6.8 h, 8.7×10^2 km/h
15. 6.73 m/s
17. 7.41 m/s² (i)
- (ب) 9.60×10^4 km/h²
19. -5.5 m/s², -0.56 g's
21. 2.0 m/s², 114 m
23. 1.8×10^2 m
25. 63.0 m
27. -36 g's
31. 3.1 s
33. 51.8 m
35. 8.8 s (i)
- (ب) 86 m/s
37. 15 m/s, 11 m
39. 5.61 s
43. 4.1×10^{-2} s
45. 46 m
47. 5.20 s (i)
- (ب) 38.9 m/s
- (ج) 84.7 m
49. 48 s (i)
- (ب) 90s - 108 s
- (ج) 0 s - 38 s, 65 s - 83 s,
- 90 s - 108 s
- (د) 65 s - 83 s
51. 0 s - 18 s (i)
- (ب) 27 s
- (ج) 38 s
- (د) كلا الاتجاهين.
53. 4 m/s² (i)
- (ب) 3 m/s²
- (ج) 0.35 m/s²
- (د) 1.6 m/s²

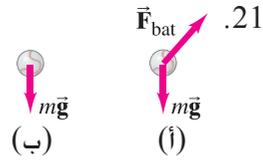


57. (i) -150 m/s²
- (ب) رخي.
59. 1.3 m
61. (ب) 14 m
- (ج) 39.4 m
63. 31 m/s
65. 8.8 min (i)
- (ب) 7.5 min
67. 4.9 m/s - 5.7 m/s, 6.0 m/s
- 6.9 m/s. المجال الأصغر للسرعات الابتدائية.
69. 29.0 m
71. 5.1×10^{-2} m/s²
73. 3.3 min; 5.2 km; 23.3 s, 0.61 km
75. 88 m/s (i)
- (ب) 27 s
- (ج) 1590 m
- (د) 36 s
- (هـ) -177 m/s
- (و) 54 s

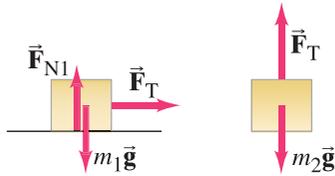


- (ب) 23 s
- (ج) 3.0 m/s²
- (د) 67 m/s
79. 18 m/s
81. 2.9 برغر /min, 0.44 m/min.
83. 12 m/s

- (ب) $1.29 \times 10^3 \text{ N}$
 (أ) 47.0 N
 (ب) 17.0 N
 (ج) 0 N

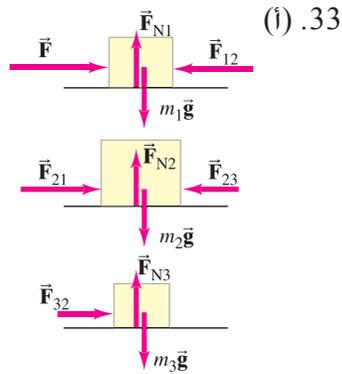


- (ب) $1.41 \times 10^3 \text{ N}$
 (أ) 25 N, 31 N
 (ب) 36 N, 73 N
 (أ) $8.9 \times 10^3 \text{ N}$, $6.9 \times 10^3 \text{ N}$
 (أ) 320 N
 (ب) 1.5 m/s^2
 (أ) 31



$$a = g \frac{m_2}{m_1 + m_2}, \text{ (ب)}$$

$$F_T = m_1 a = g \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$



$$a = \frac{F}{m_1 + m_2 + m_3}, \text{ (ب)}$$

$$F_{1 \text{ net}} = \frac{m_1 F}{m_1 + m_2 + m_3}, \text{ (ج)}$$

$$F_{2 \text{ net}} = \frac{m_2 F}{m_1 + m_2 + m_3},$$

$$F_{3 \text{ net}} = \frac{m_3 F}{m_1 + m_2 + m_3};$$

$$F_{12} = F_{21} = \frac{(m_2 + m_3)F}{m_1 + m_2 + m_3}, \text{ (د)}$$

$$F_{23} = F_{32} = \frac{m_3 F}{m_1 + m_2 + m_3};$$

- (هـ) 2.67 m/s^2 ; 32.0 N, 64.0 N, 32.0 N

- عندما تصل الهدف.
 (أ) 10.4 s
 (ب) 541 m

- (ج) 51.9 m/s , -63.1 m/s
 (د) 81.7 m/s
 (هـ) 50.6° below the horizon
 (و) 78.1 m
 (ز) 76°

- (أ) 481 m
 (ب) 8.37 m/s أسفل.
 (ج) 97.4 m/s
 (أ) 1.80 m/s , 19° بالنسبة إلى ضفة النهر.
 (أ) 2.59 m/s , 28° من الشاطئ.
 (ب) 3.60 m باتجاه سريان النهر 6.90 m

- بعرض النهر.
 (أ) 543 km , 7.61° جنوب شرق.
 (ب) 17 km
 (أ) 1.41 m/s
 (أ) 1.24 m/s
 (ب) 2.28 m/s
 (أ) 67 m
 (ب) 170 s

- (أ) 42.2° شمال غرب.
 (أ) 114 km/h
 (أ) 6.2°
 (أ) 2.8 m/s^2 أسفل. (عكس حركة الشاحنة) 4.7 m/s^2 يسار.
 (أ) $v_T / \tan \theta$

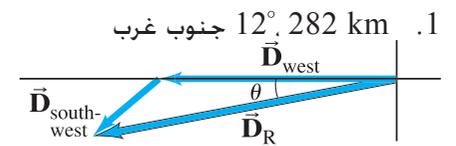
- (أ) 180 s, 4.8 km; 21.2 s, 0.56 km
 (أ) 1.9 m/s^2
 (أ) 1.9 m/s , 2.7 s
 (أ) 49.6°
 (أ) 66° فوق الأفق.
 (أ) 11.0 m/s - 108 m/s
 (أ) 36 m/s
 (ب) 20 m/s
 (أ) 7.0 m/s , 97°
 (أ) 39 m

الفصل 4

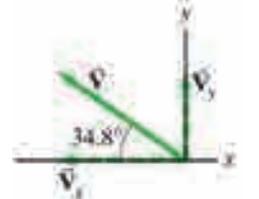
- (أ) 75.0 N
 (أ) $1.15 \times 10^3 \text{ N}$
 (أ) 196 N, 196 N
 (ب) 294 N, 98.0 N
 (أ) 68.4 N
 (أ) 780 N للخلف.
 (أ) 2.00 g/s , $9.51 \times 10^3 \text{ N}$
 (أ) $4.43 \times 10^4 \text{ N}$, $5.08 \times 10^4 \text{ N}$
 (أ) 2.5 m/s^2 أسفل.
 (أ) 7.4 m/s^2 أسفل.

- (أ) قرب منتصف الفترة الزمنية.
 (ب) A
 (ج) عند اللحظات التي يتقاطع عندها المنحنيان. سرعة الدراجة B عند التقاطع الأول أكبر من سرعة الدراجة A. أمامند التقاطع الثاني فسرعة الدراجة A أكبر من سرعة الدراجة B.
 (د) A
 (هـ) لهما متوسط السرعة نفسه.

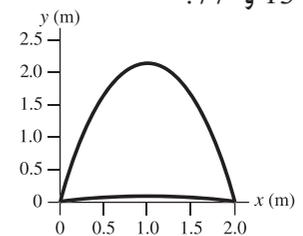
الفصل 3



- (أ) 282 km , 12° جنوب غرب
 (أ) $\vec{v}_2 - \vec{v}_1$
 (أ) 58 m , 48°
 (أ) $\vec{v}_R = \vec{v}_1 + \vec{v}_2 + \vec{v}_3$
 (أ) 7



- (ب) 8.16 وحدة. -11.7 وحدة;
 (ج) 14.3 وحدة. 34.8° فوق محور -x.
 (أ) 550 km/h, 487 km/h
 (ب) 1650 km, 1460 km
 (أ) 64.6 , 53.1°
 (أ) 62.6 , 329°
 (ب) 77.5 , 71.9°
 (ج) 77.5 , 251.9°
 (أ) -2450 m, 3870 m, 2450 m; 5190 m
 (أ) 4.0 m
 (أ) 13° و 77°



- (أ) 7.92 m/s
 (أ) 12.9 m
 (أ) 6 مرات
 (أ) 5.71 s
 (أ) 29
 (أ) 0.76 m وهي على ارتفاع أقل

- .73 (i) $2.2 \times 10^3 \text{ m}$
 (ب) $5.4 \times 10^3 \text{ N}$
 (ج) $3.8 \times 10^3 \text{ N}$
 75 (i) $\theta = \tan^{-1} m_M R_{\text{Earth}}^2 / M_{\text{Earth}} D_M^2$
 (ب) $5 \times 10^{13} \text{ kg}$
 (ج) $(8 \times 10^{-4})^\circ$
 .77 $5.07 \times 10^3 \text{ s}$
 .79 26.9 m/s
 .81 كتلة الشمس $2.6 \times 10^9, 5.2 \times 10^{39}$
 .83 (i) $3.86 \times 10^3 \text{ m/s}$
 (ب) $4.36 \times 10^4 \text{ s}$
 .85 (i) $\approx 12 \text{ h}$
 (ب) $1.8 \times 10^3 \text{ m}$
 .87 $5 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$
 .89 $3.8 \times 10^{-10} \text{ N}$ للأعلى
 .91 $1.6 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$
 .93 $v_{\min} = v_0 \sqrt{\frac{(1 - \mu_s Rg/v_0^2)}{(1 + \mu_s v_0^2/Rg)}}$
 $v_{\max} = v_0 \sqrt{\frac{(1 + Rg\mu_s/v_0^2)}{(1 - \mu_s v_0^2/Rg)}}$

الفصل 6

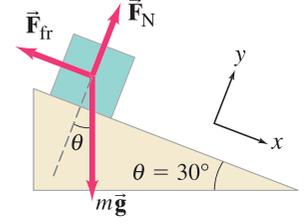
- .1 $7.27 \times 10^3 \text{ J}$
 .3 (i) $9.2 \times 10^2 \text{ J}$
 (ب) $5.2 \times 10^3 \text{ J}$
 .5 $4.9 \times 10^2 \text{ J}$
 .9 (i) 1.10 Mg
 (ب) 1.10 Mgh
 .11 $5.0 \times 10^3 \text{ J}$
 .13 $8.4 \times 10^{-2} \text{ J}$
 .15 484 m/s
 .17 $-1.64 \times 10^{-18} \text{ J}$
 .19 44 m/s
 .21 2.25
 .23 1.1 N
 .25 (i) $3.24 \times 10^3 \text{ N}$
 (ب) $9.83 \times 10^3 \text{ J}$
 (ج) $7.13 \times 10^4 \text{ J}$
 (د) $-6.14 \times 10^4 \text{ J}$
 (هـ) 8.31 m/s
 .27 82 J
 .29 $8.1 \times 10^4 \text{ N/m}$
 .31 (i) $9.2 \times 10^5 \text{ J}$
 (ب) $9.2 \times 10^5 \text{ J}$
 (ج) نعم
 .33 1.4 m لا إلا إذا كانت المسافة $> 0.7 \text{ m}$
 .35 5.14 m/s
 .37 (i) 9.2 m/s
 (ب) -0.31 m

- .89 $5.3 \times 10^2 \text{ N}, 2.6 \times 10^2 \text{ N}$

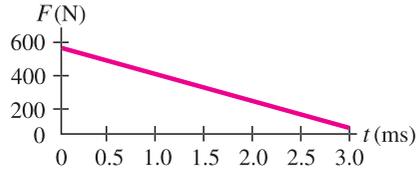
الفصل 5

- .1 (i) 1.42 m/s^2
 (ب) 35.5 N
 .3 $5.97 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2, 3.56 \times 10^{22} \text{ N}$
 الشمس
 .5 $0.9 \text{ g}^2 \text{ s}$
 .7 (i) 3.73 N
 (ب) 9.61 N
 .9 نعم 25 m/s
 .11 $30.4 \text{ m/s}, 0.403 \text{ rev/s}$
 .13 8.5 m/s
 .15 11 rpm
 .17 $3.38 \times 10^4 \text{ rpm}$
 .21 0.22
 .23 $4\pi^2 f^2 (m_1 r_1 + m_2 r_2), 4\pi^2 m_2 r_2 f^2$
 .25 $3.5 \times 10^3 \text{ N}, 5.0 \times 10^2 \text{ N}$
 .27 (i) 1.27 m/s
 (ب) 3.05 m/s
 .29 (i) $21.0 \text{ kg}, 21.0 \text{ kg}$
 (ب) $206 \text{ N}, 252 \text{ N}$
 .31 4.4 m/s^2
 .33 $3.9 \text{ kg}, 0.1 \text{ kg}$
 .35 $2.02 \times 10^7 \text{ m}$
 .37 $4.38 \times 10^7 \text{ m/s}^2$
 .39 $3.2 \times 10^{-8} \text{ N}$ نحو مركز المربع
 .41 $6.4 \times 10^{23} \text{ kg}$
 .43 $6.32 \times 10^3 \text{ m/s}$
 .45 10 s/rev
 .47 $7.90 \times 10^3 \text{ m/s}$
 .49 $2.0 \times 10^4 \text{ s}, 7.1 \times 10^4 \text{ s}$
 .51 (i) 21 N نحو القمر
 (ب) $2.0 \times 10^2 \text{ N}$ بعيداً عن القمر
 .53 (i) $5.4 \times 10^2 \text{ N}$
 (ب) $5.4 \times 10^2 \text{ N}$
 (ج) $7.2 \times 10^2 \text{ N}$
 (د) $3.6 \times 10^2 \text{ N}$
 (هـ) 0 N
 .55 (ب) $5.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
 .57 $1.62 \times 10^{11} \text{ m}$
 .59 بلوتو. نعم $2690 \times 10^6 \text{ km}$
 .61 (i) $1.90 \times 10^{27} \text{ kg}$
 (ب) $1.90 \times 10^{27} \text{ kg}, 1.89 \times 10^{27} \text{ kg}$
 نعم $1.90 \times 10^{27} \text{ kg}$
 .63 $671 \times 10^3 \text{ km}, 1070 \times 10^3 \text{ km}$
 $1880 \times 10^3 \text{ km}$
 .65 9.0 d
 .67 $2.64 \times 10^6 \text{ m}$
 .69 0.344%
 .71 2.6 m/s^2 للأعلى

- .35 $1.74 \text{ m/s}^2, 22.6 \text{ N}, 20.9 \text{ N}$
 .37 (i) 0.98
 (ب) 0.91
 .39 7.8 m/s^2
 .41 $73 \text{ N}, 0.59$
 .43 (i)



- (ب) لا تغيير.
 (ج) يجب أن يعكس اتجاه قوة الاحتكاك.
 .45 40 N
 .47 4.1 m
 .49 -7.4 m/s^2
 .51 0.40
 .53 (i) 1.2 m
 (ب) 1.6 s
 .55 $101 \text{ N}, 0.719$
 .57 (i) 0.58
 (ب) 5.7 m/s
 (ج) 15 m/s
 .59 0.36
 .61 $5.3 \times 10^2 \text{ N}$
 .63 (i) $g \frac{(m_1 \sin \theta - m_2)}{(m_1 + m_2)}$
 (ب) $m_1 \sin \theta > m_2$ أسفل المستوى
 $m_1 \sin \theta < m_2$ إلى أعلى المستوى
 .65 $1.3 \times 10^2 \text{ N}$
 .67 1.3 m
 .69 $1.54 \times 10^3 \text{ N}$
 .71 (i) 16 m/s
 (ب) 13 m/s
 .73 نعم 3.8 m/s
 .75 82 m/s
 .77 5.9°
 .79 $940 \text{ N}, 79^\circ$ فوق الأفق
 .81 (i) $9.43 \times 10^4 \text{ N}$
 (ب) $1.33 \times 10^4 \text{ N}$
 (ج) $1.33 \times 10^4 \text{ N}$
 .83 12 m/s
 .85 (i) $45 \text{ N} (10 \text{ lb})$
 (ب) $37 \text{ N} (8.4 \text{ lb})$
 (ج) ليس عندما يسحب عمودياً.
 .87 (i) $4.1 \text{ m/s}^2, 3.2 \text{ m/s}^2$
 (ب) $4.1 \text{ m/s}^2, 3.2 \text{ m/s}^2$
 (ج) 3.5 m/s^2



75. (أ)

- (ب) 0.93 N.s
 (ج) 4.2×10^{-3} kg
 77. 6.7×10^3 m/s
 79. -4.4 m/s, 4.0 m/s (أ)
 (ب) 2.0 m
 81. -29.6 km/s

الفصل 8

1. 0.52 rad, $\pi/6$ rad (أ)
 (ب) 0.99 rad, $19\pi/60$ rad
 (ج) 1.57 rad, $\pi/2$ rad
 (د) 6.28 rad, 2π rad
 (هـ) 7.33 rad, $7\pi/3$ rad
 3. 5.3×10^3 m
 5. 7.4×10^{-2} m
 7. 2.6×10^2 rad/s (أ)
 (ب) 46 m/s, 1.2×10^4 m/s²
 9. 1.99×10^{-7} rad/s (أ)
 (ب) 7.27×10^{-5} rad/s
 11. 3.6×10^4 rpm
 13. $\omega_1/\omega_2 = R_2/R_1$
 15. 2.8×10^4 rev
 17. 4.0×10^1 rev/min² (أ)
 (ب) 4.0×10^1 rpm
 19. -0.42 rad/s² (أ)
 (ب) 210s
 21. -4.1 rad/s² (أ)
 (ب) 7.6 s
 23. 41 m·N (أ)
 (ب) 29 m·N
 25. mg($L_2 - L_1$) عقارب الساعة.
 27. 1.81 kg·m²
 29. 0.94 kg·m²(أ)
 (ب) 2.4×10^{-2} m·N
 31. 6.1 kg·m² (أ)
 (ب) 0.61 kg·m²
 (ج) المحور العمودي
 33. 20 N
 35. 62 m·N
 37. 993 rev, 10.9 s
 39. 92 rad/s²(أ)
 (ب) 7.9×10^2 N

13. 6.9×10^3 m/s بعيداً عن الأرض .
 4.7×10^3 m/s بعيداً عن الأرض .
 (ب) 5.9×10^8 J
 15. 2.0 kg.m/s (أ)
 (ب) 5.8×10^2 N
 17. 2.1 kg.m/s نحو اليسار.
 19. 3.8×10^2 kg.m/s (أ)
 (ب) -3.8×10^2 kg.m/s
 (ج) 3.8×10^2 kg.m/s
 (د) 5.1×10^2 N
 21. 69 m
 23. 2.00 m/s شرق. 1.00 m/s غرب.
 25. 2.23 m/s و 0.88 m/s كلاهما باتجاه الحركة الابتدائية لكرة التنس.
 27. 3.62 m/s, 4.42 m/s (أ)
 (ب) -4.0×10^2 kg.m/s
 4.0×10^2 kg.m/s
 29. 0.35 m, 1.4 m
 31. $v_2 = \sqrt{2} v_1$
 33. $-M/(m + M)$ (أ)
 (ب) -0.96
 35. 23 m/s
 37. $e = \sqrt{h'/h}$
 39. 1.7 m/s (أ) لكليهما.
 (ب) -2.1 m/s, 7.4 m/s
 (ج) 4,3 معقول.
 (د) 2.8 m/s, 0 غير معقول.
 (هـ) -4,0 m/s, 10.3 m/s غير معقول.
 41. A, 6.7 m/s بالنسبة إلى الصفر
 60°
 43. 141°
 45. 39.9u
 47. 6.5×10^{-11} m
 49. بالنسبة (1.040 m, -1.04 m) إلى مركز الطوف
 51. (1.2l, 0.9l) بالنسبة إلى الزاوية اليسرى الخلفية.
 53. 17% من الكتلة الكلية للجسم.
 55. 7.6 cm عمودي, 21.7 cm أفقي.
 57. 4.66×10^6 m من مركز الأرض.
 59. 24.8 cm
 61. $vm/(m + M)$ يقف البالون للأعلى.

63. $v'_x = \frac{3}{2}v_0, v'_y = -v_0$
 65. 0.194 m/s (أ)
 (ب) 8.8×10^2 N
 67. $m_B = \frac{5}{3}m$
 69. 4.00 m
 71. 3.8×10^2 m/s
 73. 2.5×10^{-13} m/s (أ)
 (ب) 1.7×10^{-17}
 (ج) 0.19 J

39. 8.3 m/s (أ)
 (ب) 3.64 m
 41. $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kx_0^2$
 43. 26 m/s, 12 m/s, 20 m/s
 45. 12 Mg/h
 47. 5.3×10^6 J
 49. 21 m/s (أ)
 (ب) 2.4×10^2 m
 51. 25% (أ)
 (ب) 5.4 m/s
 (ج) حرارة, صوت, تشكيل غير مرين.
 53. 23 m/s
 55. 0.40
 57. 1.1×10^3 km/h (أ)
 (ب) 2×10^3 N
 59. 5.5×10^2 N
 61. 0.10 hp (ب)
 63. 2.2×10^4 W, 3.0×10^1 hp
 65. 480 W
 67. 1.0×10^3 W
 69. 18°
 71. 9.0×10^2 W
 73. 1.5×10^3 J
 75. 2.5r (أ)
 (ب) 11 mg
 (ج) 5 mg
 (د) mg
 77. $\sqrt{2gL}$ (أ)
 (ب) $\sqrt{1.2gL}$
 79. 2.5×10^5 J (أ)
 (ب) 23 m/s
 (ج) -1.56 m
 81. 4.0×10^1 m/s (أ)
 (ب) 3.0×10^5 W
 83. 1.4×10^3 m (أ)
 (ب) 1.6×10^2 m/s
 85. 4.2×10^4 N
 87. 3.9×10^2 W
 89. 2 k
 91. 4.6 s
 93. 1×10^2 m/s (أ)
 (ب) 4×10^7 W

الفصل 7

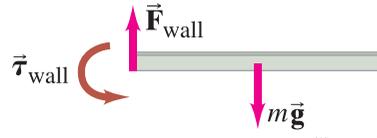
1. 0.24 kg.m/s
 3. 4.40×10^3 N نحو القاذف.
 5. 6.0×10^7 N للأعلى.
 7. 12.6 m/s
 9. 8×10^2 N, $F_{wind} > F_{fr} \approx 7 \times 10^2$ N
 11. 4.2×10^3 m/s

- .69 (i) $\mu_s < l/2 h$
 (ب) $\mu_s > l/2 h$
 71 (i) $F_{\text{يسار}} = 3.3 \times 10^2 \text{ N}$ أعلى.
 $F_{\text{يمين}} = 2.3 \times 10^2 \text{ N}$ أسفل.
 (ب) 0.65 m
 (ج) 1.2 m
 73 $F_{\text{يسار}} = 1.0 \times 10^2 \text{ N}$
 $F_{\text{يمين}} = 1.9 \times 10^2 \text{ N}$
 75. متوسط القوة لكل وحدة مساحة
 $= 4.5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
 77 (i) $3.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
 (ب) سوف تكسر العظمة.
 (ج) $8.2 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ لن تكسر العظمة.
 79 2.34 m

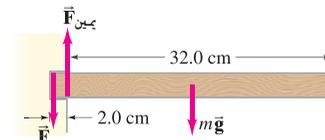
الفصل 10

1. $3 \times 10^{11} \text{ kg}$
 2. $5.8 \times 10^2 \text{ kg}$
 3. 0.8477
 4. $7 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ (i)
 5. $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (ب)
 6. $4.7 \times 10^5 \text{ N}$ (i)
 7. $4.7 \times 10^5 \text{ N}$ (ب)
 8. $2.2 \times 10^3 \text{ kg}$
 9. 13 m
 10. $1.60 \times 10^4 \text{ m}$
 11. $9.6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (i)
 12. 98 m (ب)
 13. $1.41 \times 10^5 \text{ Pa}$ (i)
 14. $9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$ (ب)
 15. $1.06 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, أعلى 3%
 16. 0.199
 17. 920 kg
 18. حديد أو فولاذ.
 19. $7.4 \times 10^5 \text{ N}$ (i)
 20. $1.0 \times 10^4 \text{ N}$ (ب)
 21. $1.03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ (i)
 22. $\rho_{\text{liquid}} = \rho_{\text{object}}(m_{\text{object}} - m_{\text{apparent}})/m_{\text{object}}$ (ب)
 23. 0.105
 24. 0.90 m/s
 25. $4.4 \times 10^5 \text{ s}$ (5.1 days)
 26. $5.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
 27. $1.9 \times 10^5 \text{ N}$
 28. $9.7 \times 10^4 \text{ Pa}$ ($\approx 0.96 \text{ atm}$)
 29. 0.24 m/s (ب)
 30. $2\sqrt{h_1(h_2 - h_1)}$ (i)
 31. $h_1 = h_2 - h_1$ (ب)

- 23 (i) 0.78 N
 (ب) 0.98 N
 25 55.2 N, 63.7 N
 27 0.50
 29 $1.0 \times 10^2 \text{ N}$
 31 $9.9 \times 10^2 \text{ N}$
 33 $2.7 \times 10^3 \text{ N}$
 35 2.4ω
 37 (ب) نعم. بنحو 1/24 من طول الطوبة.
 (ج) $D = \sum_{i=1}^n \frac{L}{2i}$
 (د) 35 طوبة.
 39 $2.0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (i)
 (ب) 4.1×10^{-6}
 41 $1.4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (i)
 (ب) 6.9×10^{-7}
 (ج) $6.5 \times 10^{-6} \text{ m}$
 43 $9.6 \times 10^6 \text{ N/m}^2$
 45 $(-2 \times 10^{-2})\%$
 47 (i) $1.1 \times 10^2 \text{ m}\cdot\text{N}$ عقارب الساعة.
 (ب) الجدار.



- 49 (i) 393 N
 (ب) أسمك.
 51 $4.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ (i)
 (ب) $2.7 \times 10^{-3} \text{ m}$
 53 $1.2 \times 10^{-2} \text{ m}$
 55 12 m
 57 $2.94 \times 10^{-1} \text{ kg}$, $2.29 \times 10^{-1} \text{ kg}$
 59 (i) $Mg\sqrt{h/(2R - h)}$
 (ب) $Mg\sqrt{h(2R - h)/(R - h)}$
 61 (i)



- (ب) $F_{\text{يسار}} = 3.7 \times 10^2 \text{ N}$
 $F_{\text{يمين}} = 4.2 \times 10^2 \text{ N}$
 $mg = 49 \text{ N}$
 (ج) 8.3 m.N
 63 29°
 65 $7.7 \times 10^{-6} \text{ m}$
 67 (i) 0.29 mg
 (ب) 0.58 mg
 (ج) أفقيًا عند النقطة الأدنى. 60° فوق الأفق عند نقاط الترابط.

- 41 $a = \frac{(m_2 - m_1)}{(m_1 + m_2 + I/r^2)} g < a_{I=0}$
 $a_{I=0} = \frac{(m_2 - m_1)}{(m_1 + m_2)} g$
 43 $1.40 \times 10^4 \text{ J}$
 45 56 J
 47 $1.42 \times 10^4 \text{ J}$
 49 3.22 m/s
 51 $2.64 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$
 53 (i) يزداد القصور الذاتي الدوراني له.
 (ب) 1.6
 55 $0.77 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ عن طريق سحب ذراعها نحو مركز جسمها.
 57 $14 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ (i)
 (ب) $-2.7 \text{ m}\cdot\text{N}$
 59 $\omega/2$
 61 (i) 1.2 rad/s
 (ب) $1.8 \times 10^3 \text{ J}$, $1.1 \times 10^3 \text{ J}$
 63 $5 \times 10^{-2} \text{ rad/s}$, $2 \times 10^4 \text{ KEi}$
 65 $(2.7 \times 10^{-16})\%$
 67 -0.30 rad/s
 69 8.21×10^{-6}
 71 53 m.N
 73 (i) $\omega_R/\omega_F = N_F/N_R$
 (ب) 4.0
 (ج) 1.5
 75 (ب) $2.2 \times 10^3 \text{ rad/s}$ (ج) 25 min
 77 (i) 4.3 m
 (ب) 5.2 s
 79 $Mg\sqrt{2Rh - h^2}/(R - h)$
 81 2.8 m.N من عضلات ذراعها.
 83 $7.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ (i)
 (ب) 3.9 m.N
 (ج) 2.9 rad/s
 85 $2.7R - 1.7r$

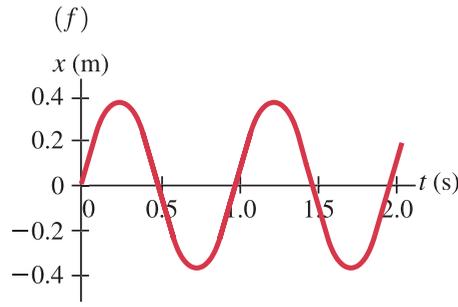
الفصل 9

- 1 $1120^\circ.430 \text{ N}$ باتجاه عقارب الساعة من \vec{F}_A
 2 6.52 kg
 3 $1.1 \times 10^3 \text{ N}$
 4 $5.8 \times 10^3 \text{ N}$, $8.1 \times 10^3 \text{ N}$
 5 2.3 m (i) من الرجل.
 (ب) 2.5 m من الرجل.
 6 $2.6 \times 10^3 \text{ N}$, $3.1 \times 10^3 \text{ N}$
 7 0.32 m
 8 $6.1 \times 10^3 \text{ N}$, $5.9 \times 10^3 \text{ N}$
 9 34.6 N
 10 $9.05 \times 10^{-1} \text{ m}$
 11 $4.25 \times 10^2 \text{ N}$ (i)
 (ب) $4.25 \times 10^2 \text{ N}$, $3.28 \times 10^2 \text{ N}$

- .69 (i) 3.2×10^{-2} m
 (ب) 1.5 m
 .71 (i) 1.8×10^4 N/m
 (ب) 0.71 s
 .73 220 Hz
 .75 (i) $1.22 f$
 (ب) $0.71 f$
 (i) .77
 G: 784 Hz, 1180 Hz; A: 880 Hz
 1320 Hz;
 (ب) 1.26
 (ج) 1.12
 (د) 0.794
 .79 (i) 3.0 m/s
 (ب) 5.0×10^3 m/s²
 .81 $\lambda = 4L/(2n-1)$, $n = 1, 2, 3, \dots$
 .82 الفترة الأفقية أطول بعامل يساوي
 $\sqrt{1 + l_0 k/mg}$
 .85 6.44 m من مكان نشوء النبضة
 الأولى.
 .87 0.40 s

الفصل 12

- .1 3.4×10^2 m
 (i) .3 17 cm - 17 cm
 (ب) 3.4×10^{-5} m
 .5 55 m
 .7 (i) 8%
 (ب) 4%
 .9 63 dB
 .11 114 dB
 .13 (i) 9×10^{-6} W
 (ب) 1×10^7 نسمة
 .15 (i) 122 dB, 114 dB
 (ب) لا
 .17 1.3
 .19 4
 .21 25 dB
 .23 (i) 10^9
 (ب) 10^{12}
 .25 (i) 76.6 Hz, 230 Hz, 383 Hz, 536 Hz
 (ب) 153 Hz, 306 Hz, 459 Hz
 .27 8.6 mm - 8.6 m
 .29 (i) 0.18 m
 (ب) 1.1 m
 (ج) 440 Hz, 0.78 m
 .31 -2.6%
 .33 (i) 0.583 m
 (ب) 1.71 m
 .35 (i) 55 Hz
 (ب) 2.0×10^2 m/s
 .37 (i) 248 نغمة توافقية
 (ب) 249 نغمة توافقية.



- .23 (i) 0.490 s, 2.04 Hz
 (ب) 0.231 m
 (ج) 37.9 m/s²
 (د) $y = (0.231 \text{ m}) \sin(4.08 \pi t)$
 (هـ) 3.31 J
 .27 114 N/m, 19.4 m
 .29 0.99 m
 .31 (i) 1.8 s
 (ب) لن يهتز البندول.
 .33 يقصر طول البندول بنحو 0.7 mm
 .35 (i) -11°
 (ب) 15°
 (ج) 15°
 .37 1.31 m
 .39 (i) 1.4×10^3 m/s
 (ب) 4.1×10^3 m/s
 (ج) 5.1×10^3 m/s
 .41 0.35 s
 .43 2.1×10^3 m
 .45 0.99 m
 .47 (i) 4.6×10^9 W/m²
 (ب) 2.3×10^{10} W
 .49 1.73
 .51 (i)



- (ب)
 (ج) الطاقة حركية كلها.
 .53 441 Hz
 .55 9.7×10^{-2} m
 .57 290 Hz, 580 Hz, 870 Hz
 .59 (i) 1.3 kg
 (ب) 0.32 kg
 (ج) 5.2×10^{-2} kg
 .61 1.1 m/s
 .63 25°
 .65 44°
 .67 10 min

- .51 الزمن الجديد = 0.13 (الزمن السابق).
 .53 9.9×10^2 Pa
 .55 0.9 Pa/cm
 .57 (i) $Re = 2500$ لذلك فهو مضطرب.
 (ب) $Re = 5000$ لذلك فهو مضطرب.
 .59 3.6×10^{-2} N/m
 .61 لا 8.3×10^{-6} kg أقصى كتلة يمكن حملها.
 .63 (i) 0.75 m
 (ب) 0.65 m
 (ج) 0.24 m
 .65 150 N - 220 N
 .67 0.047 atm
 .69 0.6 atm
 .71 0.142 m
 .73 1.3×10^2 N
 .75 1.1 m
 .77 0.33 kg
 .79 1.1 W
 .81 4.6 m
 .83 (i) 9.1 m/s
 (ب) 0.26 L/s
 (ج) 0.91 m/s
 .85 4.0×10^{-4} m³/s
 .87 4.2×10^{-3} Pa·s

الفصل 11

- .1 0.72 m
 .3 1.5 Hz
 .5 3.8 Hz
 .7 (i) 0.16 N/m
 (ب) 2.8 Hz
 .9 2.5 m/s
 (ب) ± 1.6 m/s
 (ج) 1.8 J
 (د) $x = (0.13 \text{ m}) \cos(6.0 \pi t)$
 .11 $\pm \frac{1}{2} x_0$
 .13 (i) 6.0×10^{-2} m
 (ب) 0.58 m/s
 .15 (i) 4.2×10^2 N/m
 (ب) 3.3 kg
 .17 $\pm 0.707 A$
 .19 (i) $y = (0.18 \text{ m}) \cos(2\pi t/0.65 \text{ s})$
 (ب) 0.16 s
 (ج) 1.7 m/s
 (د) 17 m/s² عند نقطة الانطلاق.
 .21 (i) 0.38 m
 (ب) 1.03 Hz
 (ج) 0.967 s
 (د) 0.92 J
 (هـ) 5.1×10^{-2} J, 0.86 J

97. يقل بـ 6% .

99. 3.0 kg .

الفصل 14

1. 1.0×10^7 J .1

2. 1.0×10^7 J (i) .3

3. 2.9 kWh (ب) .

4. (ج) لا \$0.29 لكل يوم .

5. 220 kg/h .

7. 100 kcal .

9. 2.0×10^3 J/kg.C ° .

11. 401°C .

13. (1.9×10^2) °C .

15. 425 s .

17. 2.3×10^3 J/kg.C° .

19. 0.32C° .

21. 5.0×10^6 J .

23. 1.3 kg .

25. 9.90×10^{-3} kg .

27. 4.7×10^3 kcal .

29. 1.12×10^4 J/kg .

31. 1.7 g .

33. 83 W .

35. 95 W (i) .

37. 33 W (ب) .

37. 23 مصباحا .

39. (1.6×10^2) °C .

41. 10°C .

$$\frac{Q}{t} = A \frac{(T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^n l_i/k_i} \text{ (ب) } .43$$

45. 6.4 كالوري .

47. 4×10^{15} J .

49. 3.2×10^{26} W (i) .

51. 1.1×10^3 W/m² (ب) .

53. 0.80°C .

55. 46 W (i) .

57. 7.3×10^3 W (ب) .

59. 20 W فقط نحو 9% من معدل

الحرارة التي يجب أن يفقدوها .

57. 44 C° (i) .

61. (ب) لن تنصهر الرصاص .

59. 4.1 g/h .

61. 1.2×10^{18} J (i) .

$$Q_{\text{Sun}} = 1.3 \times 10^4 Q_{\text{interior}} \text{ (ب) } .63$$

63. خليط من الماء والبخار عند درجة

الحرارة 100°C بحيث تساوي كتلة الماء

ضعفي كتلة البخار .

17. (ب) (زيادة 0.57%) 5.7×10^{-3} .

21. 6.1 cm (i) .

$$\delta L = \frac{V_0^{\text{bulb}}}{\pi r_0^2} (\beta_{\text{Hg}} - \beta_{\text{glass}}) \Delta T \text{ (ب) } .17$$

23. 3.5×10^7 N/m² .

25. 27°C (i) .

27. 4.3×10^3 N (ب) .

27. -459.67°F .

29. 1.07 m³ .

31. 1.43 kg/m³ .

33. 14.8 m³ (i) .

35. 1.83×10^5 Pa (ب) .

35. 2.40×10^8 Pa .

37. 37°C .

39. 3.43 atm .

41. 2.69×10^{25} molecules/m³ .

43. 7×10^{22} (i) مول .

45. 4×10^{46} جزيء .

45. 19 جزيء/نفس .

47. 6×10^3 m/s .

49. 899°C .

51. 25.9°C .

55. 3.9×10^2 m/s .

57. 3.34×10^{-9} m .

61. (i) صلب أو بخار .

61. $5.11 \text{ atm} \leq P \leq 73 \text{ atm}$, (ب)

$-56.6^\circ\text{C} \leq T \leq 31^\circ\text{C}$.

63. 14°C .

65. 91°C .

67. 1.1×10^3 Pa .

69. 3.1 kg .

71. $0.28 \text{ s}, v_{\text{diffuse}} = 5.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$,

$v_{\text{rms}} = 3.1 \times 10^2 \text{ m/s}$,

$v_{\text{diffuse}}/v_{\text{rms}} = 1.7 \times 10^{-7}$.

73. (i) أقل .

73. $(1.7 \times 10^{-2})\%$ (ب) .

75. 0.21 .

77. 260 m/s, 4×10^{-22} atm .

79. 11 L لا ينصح .

81. 1.29, 1.65 .

83. 1.1×10^{44} جزيء .

85. 15 ساعة .

87. 0.66×10^3 kg/m³ , -3.5% .

89. 1.6×10^{-3} cm .

91. 2.20×10^3 L (i) .

91. 92 min (ب) .

93. 30 min (ج) .

93. 6.8 s/كرة .

95. 1.7×10^3 Pa (i) .

95. 7.0×10^2 Pa (ب) .

39. ± 0.50 Hz .

41. 28.5 kHz .

43. 3.0 Hz .

45. $f_A = 438$ Hz أو 444 Hz .

$f_C = 437$ Hz أو 445 Hz .

$f_{\text{beat}} = 1$ Hz أو 7 Hz .

47. 130.5 Hz, 133.5 Hz (i) .

49. (ب) يزداد بـ 2.3% يقل بـ 2.2% .

49. 1690 Hz (i) .

51. 1410 Hz (ب) .

51. 2087 Hz و 2091 Hz (i) .

51. 2870 Hz و 3550 Hz (ب) .

53. 3750 Hz و 16,000 Hz (ج) .

53. 4.32×10^4 Hz .

55. 2 Hz .

57. 0.171 m/s .

59. 110 m/s (i) .

61. 260 m/s (ب) .

61. 120 (i) .

65. 0.48° (ب) .

65. 0.3 s .

67. 57 Hz, 69 Hz, 86 Hz, 110 Hz, (i) .

170 Hz .

69. 88 dB .

71. 15 W .

73. 50 dB .

75. 2.8×10^2 m/s, 48 N (i) .

77. 0.195 m (ب) .

77. 880 Hz, 1320 Hz (ج) .

77. 7.4×10^2 N .

79. 504 Hz .

81. 17 m/s .

83. 2.84 m .

85. 2.29×10^3 Hz .

87. 11.5 m .

89. 34 Hz, 43 Hz, 61 Hz .

91. 10^6 .

93. 17 km/h .

الفصل 13

1. 3.3×10^{22} ذرة .

3. 20° C (i) .

5. 3300°F (ب) .

5. 5°F (i) .

7. -26°C (ب) .

7. 4.3×10^{-3} m .

9. 8×10^{-2} m .

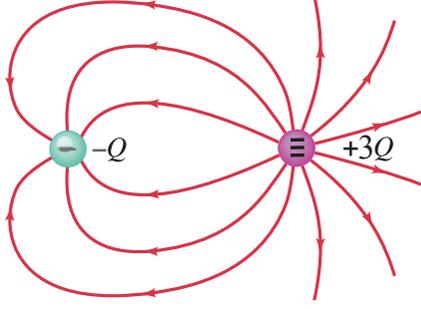
11. 981 kg/m³ .

13. 5.12 mL .

15. -140°C (i) .

15. 180°C (ب) .

27. $1.32 \times 10^{14} \text{ m/s}^2$ اتجاه التسارع
معاكس لاتجاه المجال
29.



31. $6.54 \times 10^{-10} \text{ N/C}$ جنوبًا
33. $4.70 \times 10^6 \text{ N/C}$ at 45°
35. $\frac{4kQxa}{(x^2 - a^2)^2}$ إلى اليسار
37. $\frac{\sqrt{3} kQ}{r^2}$ 240° (i)
(ب) $\frac{kQ}{r^2}$, 330°
39. $1/4$
41. $7.49 \times 10^6 \text{ m/s}$ (i)
43. $1.28 \times 10^{-8} \text{ C}$
45. $-1.1 \times 10^5 \text{ N.m}^2/\text{C}$ (i)
(ب) 0
47. $1.15 \times 10^{-9} \text{ C}$
49. 0 (i)
(ب) 0
(ج) $3.27 \times 10^3 \text{ N/C}$
(د) $8.74 \times 10^2 \text{ N/C}$
(هـ) ليس هناك اختلاف
51. $4.6 \times 10^{-10} \text{ N}$ (i)
(ب) $7.1 \times 10^{-10} \text{ N}$
(ج) $6 \times 10^{-5} \text{ N}$
53. $1/(3.5 \times 10^9)$
55. $6.8 \times 10^5 \text{ C}$ سالب
57. 1.0×10^7 شحنة الإلكترون
59. $2.1 \times 10^{-10} \text{ m}$
61. 0.115 m (i)
(ب) $2.14 \times 10^{-8} \text{ s}$
63. $\frac{1.08 \times 10^7}{[3.00 - \cos(12.5t)]^2}$ N/C للأعلى
65. $5 \times 10^{-9} \text{ C}$
67. $7.8 \times 10^{-7} \text{ C}$ موجب
69. $-7.0 \times 10^8 \text{ C}$, 0 C
71. $x = \frac{d}{\sqrt{2} - 1} \approx 2.41d$
73. $-7.66 \times 10^{-6} \text{ C}$ غير مستقر

الفصل 17

1. $4.2 \times 10^{-4} \text{ J}$
3. $3.7 \times 10^{-15} \text{ J}$, $2.3 \times 10^4 \text{ eV}$
5. $3.8 \times 10^4 \text{ V/m}$
7. $3.0 \times 10^{-2} \text{ m}$
9. $7 \times 10^{-5} \text{ m}$

27. 250°C

29. 5.7

31. -21°C

33. 76 L

35. $-1.5 \times 10^3 \text{ J/K}$

37. $-1.22 \times 10^6 \text{ J/K}$

39. 0.15 J/K

41. $4.35 \times 10^{-2} \frac{\text{J/K}}{\text{s}}$

43. 1.1 J/K

45. $1/9$ (i)

(ب) $1/18$

47. $5/16$ (i)

(ب) $1/64$

49. $1.32 \times 10^6 \text{ kWh}$ (i)

(ب) $7.09 \times 10^4 \text{ kW}$

51. نعم، المحرك المقترح يعمل بكفاءة

أعلى من الكفاءة المثالية.

53. $4.0 \times 10^4 \text{ J/s}$ (i)

(ب) $1.6 \times 10^5 \text{ J/s}$

(ج) 220 s

55. 0.077 (i)

57. 45°C (i)

(ب) 0.58 J/K

59. 0.24

61. $\frac{1}{2}(P_C + P_A)(V_C - V_A)$ (i)

(ب) $P_A(V_C - V_A)$

(ج) $P_C(V_C - V_A)$

63. 5.3°C (i)

(ب) $77 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

65. 200 J

67. 180 W

الفصل 16

1. 13 N

3. $2.7 \times 10^{-3} \text{ N}$

5. $5.5 \times 10^3 \text{ N}$

7. 4.88 cm

9. $-5.4 \times 10^7 \text{ C}$

11. $q_1 = q_2 = 0.5Q_T$ (i)

(ب) $q_1 = 0, q_2 = Q_T$

13. الشحنة العلوية:

83.7 N , 90° الشحنة السفلية إلى

اليسار: 83.7 N , 210° الشحنة السفلية

إلى اليمين: 83.7 N , 330°

15. $2.96 \times 10^7 \text{ N}$ نحو مركز المربع

17. $\vec{F}_1 = 0.30 \text{ N}$ at 265° , $\vec{F}_2 = 0.26$

N at 139° , $\vec{F} = 0.26 \text{ N}$ at 30°

19. 0.371 , $0.40Q_0$ من $-Q_0$ باتجاه $-3Q_0$

21. $69.9 \times 10^{-6} \text{ C}$, $22.1 \times 10^{-6} \text{ C}$ (i)

(ب) $104.4 \times 10^{-6} \text{ C}$

$-14.4 \times 10^{-6} \text{ C}$

23. $3.78 \times 10^{-16} \text{ N}$ غرب

25. $9.5 \times 10^5 \text{ N/C}$ أعلى

65. $3.1 \times 10^7 \text{ J}$ (i)

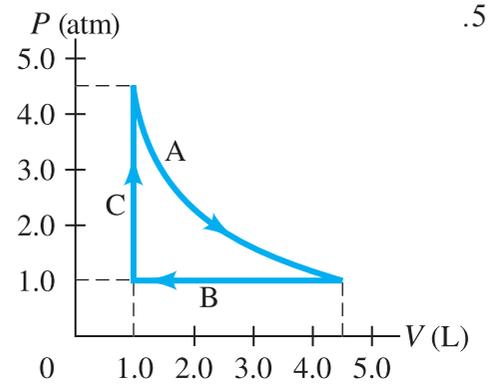
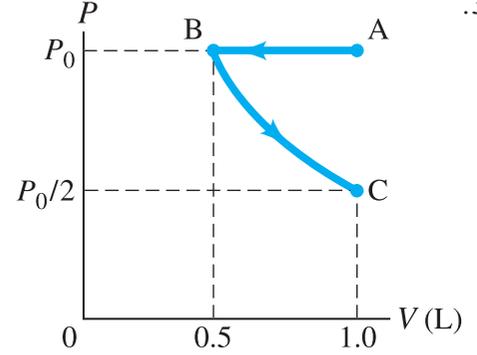
(ب) $3.3 \times 10^3 \text{ s}$

الفصل 15

1. 0 J (i)

(ب) $3.40 \times 10^3 \text{ J}$

3.

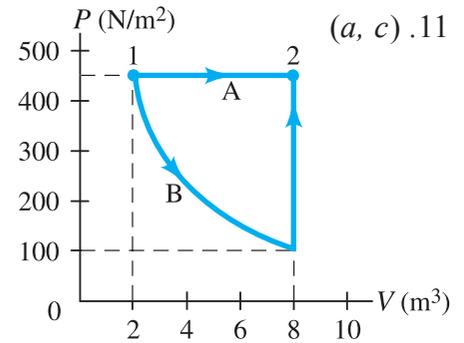


7. 0 J (i)

(ب) 1850 J

(ج) rise

9. $-4.0 \times 10^2 \text{ K}$



(ب) $2.73 \times 10^3 \text{ J}$, $4.10 \times 10^3 \text{ J}$

(د) $4.10 \times 10^3 \text{ J}$

13. 25 J (i)

(ب) 63 J

(ج) -95 J

(د) -120 J

(هـ) -15 J

15. 162 W

17. 0.28

19. 0.23

21. $1.6 \times 10^{13} \text{ J/h}$

23. 440°C

25. $9.0 \times 10^2 \text{ MW(MJ/s)}$

- 2.9 × 10⁻⁴ m .59
 1200 \$ لكل ساعة لكل متر .61
 1/4 .63
 3.8 × 10⁻³ m .65
 1500 W (i) .67
 12 A (ب) .69
 2: 1 .69
 26 Ω (i) .71
 26 s (ب) .71
 (ج) 0.17 سنناً .73
 2.58 × 10⁻⁴ m, 38.8 m .73
 1.4 × 10¹² بروتون .75
 1.8 × 10⁻⁴ m .77
 I_A = 0.33 A, I_B = 3.3 A (i) .79
 R_A = 360 Ω, R_B = 3.6 Ω (ب) .81
 Q_A = 1.2 × 10³ C (ج) .83
 Q_B = 1.2 × 10⁴ C .83
 E_A = E_B = 1.4 × 10⁵ J (د) .83
 B (هـ) .83
 1.34 × 10⁻⁴ Ω .81
 2200°C .83

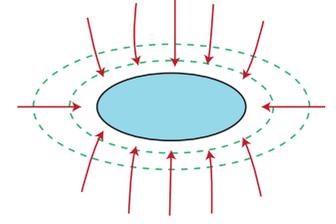
الفصل 19

- 8.41 V (i) .1
 8.49 V (ب) .1
 0.048 Ω, 0.11 Ω .3
 960 Ω, 60 Ω .5
 9.3 V .7
 2820 Ω (i) .9
 300 Ω (ب) .9
 720 Ω جميعها على التوالي .11
 80 Ω جميعها على التوازي .360 Ω
 (اثنتان على التوازي، على التوالي مع
 الثالثة). 160 Ω (اثنتان على التوالي
 على التوازي مع الثالثة)
 14 V (i) .13
 28 Ω, 6.9 Ω (ب) .13
 27 Ω .15
 840 Ω (i) .17
 V₄₇₀ = 6.7 V (ب) .17
 V₆₈₀ = V₈₂₀ = 5.3 V .17
 (i) V₁, V₂ يزداد .19
 يقل V₃, V₄
 (ب) I₁, I₂ يزداد
 يقل I₃, I₄
 (ج) يزداد
 (د) قبل: I₁ = 0.117 A, I₂ = 0
 I₃ = I₄ = 0.059 A
 بعد: I₁ = 0.132 A
 نعم، I₂ = I₃ = I₄ = 0.044 A

- 9 × 10⁻¹⁶ m .67
 23 J (i) .69
 3.4 × 10⁵ W (ب) .69
 1.03 × 10⁶ m/s .71
 2.5 × 10⁻¹⁰ C .73
 4.2 × 10⁻¹¹ C (i) .75
 4.2 × 10⁻¹¹ C (ب) .75
 18 V (ج) .75
 1.3 × 10⁻¹⁰ J (د) .75
 2.7 × 10³ m/s (i) .77
 2.2 × 10³ m/s (ب) .77

الفصل 18

- 8.13 × 10¹⁸ إلكترون/ ثانية .1
 5.5 × 10⁻¹¹ A .3
 950 V .5
 25 A (i) .7
 7.5 × 10⁴ C (ب) .7
 2.8 × 10⁻³ V .9
 20 Ω (i) .11
 430 J (ب) .11
 3.3 × 10⁻² Ω .13
 نعم، قطر التنجستن = 4.6 mm .15
 22 C° .17
 1800 C° .19
 3.8 × 10⁻⁴ Ω (i) .21
 1.5 × 10⁻³ Ω (ب) .21
 6.0 × 10⁻³ Ω (ج) .21
 58.3 C° .23
 R_{carbon} = 2090 Ω .25
 R_{Nichrome} = 2610 Ω .25
 0.96 W .27
 190 Ω, 0.63 A (i) .29
 33 Ω, 3.7 A (ب) .29
 850 W (i) .29
 17 Ω (ب) .29
 12 Ω (ج) .29
 0.14 kWh, 20 سنناً/ شهرياً .33
 6.7 Ω, 1.4 W (i) .35
 4 (ب) .35
 18 مصباحاً .37
 7500 W .39
 10 A (i) .41
 1.2 Ω (ب) .41
 0.39 A, 0.55 A .43
 390 V .45
 4500 W (i) .47
 13 A (ب) .47
 5.1 × 10⁻¹⁰ m/s .49
 2.6 A/m² شمالاً .51
 35 m/s .53
 5.4 × 10⁻⁹ W .55
 6.2 A .57



$$\frac{\sqrt{2KQ}}{2L} .19$$

- 4.8 × 10³ m/s .21
 6.9 × 10⁻¹⁸ J .23
 4.2 × 10⁶ V .25
 27 V (i) .27
 2.2 × 10⁻¹⁸ J, 14 eV (ب) .27
 -2.2 × 10⁻¹⁸ J, -14 eV (ج) .27
 2.2 × 10⁻¹⁸ J, 14 eV (د) .27
 3.6 × 10⁻² V (i) .29
 2.5 × 10⁻² V (ب) .29
 -2.5 × 10⁻² V (ج) .29
 2.9 × 10⁻⁶ F .31
 7.9 × 10⁻¹³ F .33
 5.0 × 10⁷ m² .35
 2.63 × 10⁻⁸ C .37
 4.5 × 10⁴ V/m .39
 C_{2.50}: 712 V, 1.78 × 10⁻³ C .41
 C_{6.80}: 712 V, 4.84 × 10⁻³ C .41
 1.5 × 10⁻¹⁰ F .43
 4.82 × 10⁻⁹ F, 0.283 m² .45
 9.6 × 10⁻⁵ F .47
 7 × 10⁻¹² F (i) .49
 7 × 10⁻¹¹ C (ب) .49
 200 V/m (ج) .49
 3 × 10⁻¹⁰ J (د) .49
 (هـ) المواسعة، الطاقة، الشحنة .49
 (i) أربعة أضعاف .51
 (ب) ضعيفة .51
 2.9 × 10⁵ V/m .53
 6.3 KeV (i) .55
 42.8: 1 (ب) .55
 1.0 × 10⁻⁷ J/m³ .57
 620 V .59
 11 cm (i) من الشحنة السالبة .61
 على الجانب المقابل للشحنة السالبة من
 الشحنة الموجبة
 (ب) 0.7 cm من الشحنة السالبة .61
 على جانب الشحنة السالبة نفسه كما
 الشحنة الموجبة: 5.2 cm من الشحنة
 السالبة على الجهة المقابلة للشحنة
 السالبة من الشحنة الموجبة
 6.5° .65

- (ب) شمال
70 u, 72 u, 73 u, 74 u .61
2.5 m .63
41 T .65
3.0 T .67 للأعلى
0.25 N شمالاً 68° فوق الأفق .69
1.12 × 10⁻⁶ m/s .71 غرب
1.6 A .73 للأسفل
 $\frac{ILB_r}{m}$ (i) .75
(ب) $(\frac{ILB}{m} \mu_k g)r$
(ج) شرق
48 MeV (ج) .77
9.1° .79 سوف يفقدون الأنبوب الثاني.
1 × 10⁹ A .81
2.1 × 10⁻³ T (i) .83
(ب) خارج من المستوى الذي تشكله
السرعة والمجال الكهربائي
5.8 × 10⁷ Hz (ج) .85
1.3 × 10⁴ لفة .85
5.3 × 10⁻⁵ m, 3.3 × 10⁻⁴ m .87

الفصل 21

- 420 V .1
3. نحو اليسار
8.5 × 10⁻² V .5
8.8 × 10⁻³ Wb (i) .7
(ب) 55°
(ج) 5.1 × 10⁻³ Wb
9. (أ) مع اتجاه عقارب الساعة
(ب) عكس اتجاه عقارب الساعة
(ج) مع اتجاه عقارب الساعة
(د) لا يوجد تيار مستحث
6.1 × 10⁻² V (i) .11
(ب) مع اتجاه عقارب الساعة
13. (أ) مع اتجاه عقارب الساعة
(ب) 4.3 × 10⁻² V
(ج) 1.7 × 10⁻² A
0.548 N .15
0.17 V (i) .17
(ب) 6.1 × 10⁻³ A
(ج) 6.4 × 10⁻⁴ N
5.86 C .19
28 V .21
2.08 rev/s .23
99.0 A (i) .25
(ب) 1.3 × 10⁻² m²
100 V .27
13 A .29
0.375, 2.67 .31 خفض
50, 4.8 V .33
(أ) رفع
(ب) 2.8
48 kV (rms) (i) .37
0.056 (ب)

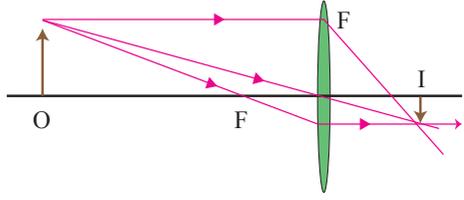
- 3.3 Ω (i) .81
2.2 V (ب)
100 Ω .83
7.6 Ω (i) .85
(ب) 0.33 A
(ج) 0.33 A
(د) 0.95 W
7.2 Ω .87

الفصل 20

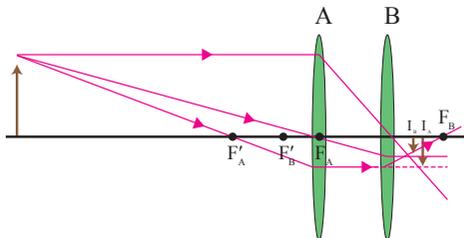
- 7.6 N/m (i) .1
(ب) 5.3 N/m
1.95 A .3
0.264 T .5
7. (أ) القطب الجنوبي
(ب) 4.1 A
(ج) 6.4 × 10⁻² N
1.3 T .9
11. (أ) يسار
(ب) يسار
(ج) للأعلى
(د) للداخل
(هـ) لا توجد قوة
(و) للأسفل
13. حركة دائرة مع اتجاه عقارب الساعة
بنصف قطر
2.77 × 10⁻⁵ m
1.6 T .15 غرب
2.7 × 10⁻² m (i) .17
(ب) 3.8 × 10⁻⁷ s
6.20 × 10⁻⁷ m .23
45° (i) .25
(ب) 3.5 × 10⁻³ m
69 A .27
13 A .29 للأعلى.
2.5 A .31
up 1.1 × 10⁻⁴ T .33
4.1 × 10⁻⁵ T, 11° .35
(أ) (I - 15A) (2.0 × 10⁻⁵ T/A) .37
(ب) (I + 15A) (2.0 × 10⁻⁵ T/A)
39. السلك القريب: 4.5 × 10⁻² N
جاذب السلك البعيد: 2.2 × 10⁻² N
تنافر: 2.2 × 10⁻² N
41. نحو السلك المستقيم
2.6 × 10⁻⁶ N
4.1 × 10⁻⁵ T .43
M: 5.8 × 10⁻⁴ N/m, 90° .45
N: 3.4 × 10⁻⁴ N/m, 300°
P: 3.4 × 10⁻⁴ N/m, 240°
47. الاتجاه y. $\frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{d-x} \right)$
94.3 A .49
51. قصير وسميك
61.6 μA .55
0.88 .57
4.01 × 10⁻⁵ m.N (i) .59

21. (أ) V_{left} يقل, V_{middle} يزداد, V_{right}
يقتر من 0
(ب) I_{left} يقل, I_{middle} يزداد, I_{right}
يقتر من 0
(ج) يزداد
(د) 14.1 V
(هـ) 14.3 A
23. 0.41 A
25. (أ) -25.7 V
(ب) $V_{80} = 77.4$ V, $V_{45} = 43.3$ V
27. $I_1 = 0.68$ A يسار, $I_2 = 0.40$ A يسار
29. $I_1 = 0.13$ A يمين
31. $I_2 = 0.31$ A يسار
 $I_3 = 0.18$ A أعلى
31. 2 Ω: 0.26 A, 6 Ω: 0.028 A
8 Ω: 0.29 A, 10 Ω: 0.26 A
12 Ω: 0.29 A
33. 1.30 A
35. (أ) 28.2 μF
(ب) 0.78 μF
37. 3.71 μF
39. 7300 pF نعم
41. $C_1 + \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3}$
43. $Q_1 = 48.0$ μC, $Q_3 = 24.0$ μC;
 $V_1 = 3.00$ V, $V_2 = 1.50$ V,
 $V_3 = 1.50$ V; $V = 3.00$ V.
45. (أ) $V_{0.40} = 5.4$ V, $V_{0.60} = 3.6$ V;
(ب) $Q_{0.40} = Q_{0.60} = 2.2 \times 10^{-6}$ C;
(ج) $V_{0.40} = V_{0.60} = 9.0$ V,
 $Q_{0.40} = 3.6 \times 10^{-6}$ C,
 $Q_{0.60} = 5.4 \times 10^{-6}$ C.
47. على التوازي. 500 pF
49. 1.0 × 10⁶ Ω
51. 9.3 × 10⁻² s
53. 7.5 × 10⁻² Ω
55. (أ) 5.0 × 10⁻⁵ Ω على التوازي
(ب) 5.0 × 10⁶ A على التوازي
57. 1000 Ω على التوازي. 100 Ω/V
59. 5.52 × 10⁻³ A
61. 10 V
63. 10.4 V, 2.6 Ω
65. (ب) 290 Ω, 140 Ω
67. 7 × 10⁻³ A
69. 1.1 × 10⁻⁵ Ω
(أ) $R_x = R_2 R_3 / R_1$
(ب) 65.7 Ω
73. $\frac{1}{4} C, \frac{2}{5} C, \frac{3}{5} C, \frac{3}{4} C, C, \frac{4}{3} C, \frac{5}{2} C, 4 C$
75. 50.1 V, 1.25 Ω
77. هناك إجابتان لأن اتجاه التيار خلال
المقاومة 4.0-kΩ إلى غير معلوم.
52.3 V, -28.3 V
79. (أ) 6.7 × 10⁻⁵ A للأعلى
(ب) -16 V

- 46.8° .29
4.6 m .31
81.1° .33
1.35 .37
 $n \geq 1.5$.39
(i) .43



- 390 mm (ب)
45. عدسة لامة . 41.1 cm حقيقي
-72 cm (i) .47
4.0 (ب)
80.6 mm (i) .49
82.2 mm (ب)
87.0 mm (ج)
24 cm عند (د) واحدة عند
3.0 cm (i) .51 بعيداً عن العدسة
0.5 cm (ب) باتجاه العدسة
75.0 mm (i) .53
25.0 mm (ب)
-2.54 mm . 15.2 cm (i) .55 حقيقي
ومقلوب
2.02 cm, -12.1 cm (ب) وهمي
ومعتدل
49.2 cm, 16.8 cm .57
7.41 cm .59 خلف العدسة المفرقة
7.14 cm (i) .61 إلى يمين العدسة B
-0.357 (ب)
(ج)



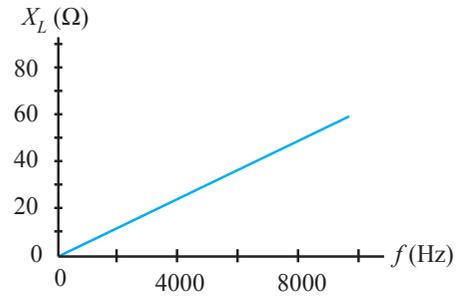
- 16 cm (i) .63 إلى يسار العدسة اللامة
1.8 cm (ب) إلى يمين العدسة المفرقة
1.54 .67
-36.1 cm .69
5.6 m .71
5.16 m .73
 $r = \infty$ (i) .75
 $d_o = -d_i$ (ب)
+1 (ج)
(د) نعم
77. الجسم وهمي وأقرب إلى العدسة من

- 261 s (i) .13
1260 s (ب)
 2.1×10^6 rev/s .15
الطول الموجي .17
 3.54×10^{-15} s . 9040
 1.21×10^7 s (≈ 140 يوم) .19
 0.95 W/m² . 19 V/m .21
 3.80×10^{26} W .23
280 J (i) .25
 2.6×10^9 V/m (ب)
3.41 m - 2.78 m (i) .27
561 m - 176 m (ب)
AM أطول بنحو 100 مرة .29
330 pF .31
 2.6×10^{-9} H - 3.9×10^{-9} H .33
1.5 V/m .35
499 s (8.31 min) .37
1.28 s (i) .39
260 s (4.3 min) (ب)
0.07 V/m (i) .41
8 km (ب)
469 V/m .43
150 m (i) .45
75 m (ب)
 1.8×10^{-10} J (i) .47
 8.7×10^{-6} V/m, 2.9×10^{-14} T (ب)
(i) التوازي .49
8.9 pF - 11 pF (ب)
1.1 mH (ج)
 4.0×10^{-7} J (i) .53
 1.2×10^{-2} V/m (ب)
 1.2×10^{-2} V (ج)

الفصل 23

- 5.0 m .1
5° .3
 5.9×10^{-6} m² .5
36.0 cm .7
2.09 cm .9 خلف السطح الأمامي للمكرة.
معتدل. وهمي
5.66 cm .11 مقعرة.
1.0 mm (ج) .-6.7 cm (ب) .13
عند مركز الانحناء (i) .15
(ب) حقيقي
(ج) مقلوب
(د) -1
21. (i) محدبة
(ب) 22 cm خلف المرآة
(ج) -98 cm
(د) -196 cm
 1.97×10^8 m/s (i) .23
 1.99×10^8 m/s (ب)
 2.21×10^8 m/s (ج)
1.49 .25
64.0° .27

- 7.7 V .39
0.14 H .41
 1.7×10^{-2} H (i) .43
(ب) 81 لفة
 $\mu_0 N_1 N_2$ A/l .45
29 J .47
 5.1×10^{15} J .49
2.3 (i) .51
4.6 (ب)
6.9 (ج)
368 Ω (i) .53
 2.21×10^{-2} Ω (ب)
9.90 Hz .55
.57



- 4.97×10^{-2} H .59
30 k Ω (i) .61
31 k Ω (ب)
1700 Ω .63
8.78 k Ω , -7.62°, 8.26×10^{-2} A .65
 6.65×10^{-2} A (i) .67
4.19° (ب)
119.7 V, 8.77 V (ج)
 3.63×10^5 Hz .69
 1.32×10^{-7} F (i) .71
34.1 A (ب)
 7.05×10^{-3} J .73
280 kV .75
41 kV (i) .77
 3.1×10^7 W (ب)
 8.8×10^5 W (ج)
 3.0×10^7 W (د)
81. ضع محث 120-mH على التوالي مع الجهاز
102 V .83
0.10 H .85
 7.5×10^{-2} H, 14 Ω .87
 2.5×10^{-6} H, 2.9×10^{-2} Ω (ب) .89

الفصل 22

- 7.9×10^{14} V/m/s .1
5.25 V/m .3
 1.88×10^{10} Hz .5
 3.11×10^{-7} m .7 فوق البنفسجية
499 s (8.31 min) .9
 4.0×10^{16} m .11

0.245 nm .55

1 (i) .57

1 - 2,7 (ب)

16 .59

100 mm , 200 mm .61

2.9× , 4.1× الشخص ذو العين

الطبيعية .

-2.3× (i) .65

+4.5 D (ب)

34 cm .67

-19× .69

48 cm, -11× 4.0-cm عدسات (i) .71

180 cm (ب)

1.7 m .73

الفصل 26

42.6 m .1

1 - 2.2 × 10⁻⁹ (i) .3

0.9998 (ب)

0.980 (ج)

0.31 (د)

0.20 (هـ)

0.0447 (و)

2.32 × 10⁸ m/s .5

26 سنة .7

7 × 10⁻⁸% .9

2.7 (i) سنة .11

9.2 (ب) سنة

6.39 m, 1.25 m (i) .13

15.0 s (ب)

0.660c (ج)

15.0 s (د)

8.1 × 10⁻¹⁹ kg.m/s .15

0.38c .17

310% (i) .19

140% (ب)

4 × 10⁻²⁸ kg .21

938 MeV/c² .23

9.0 × 10¹³ J, 3.7 × 10¹⁰ kg .25

0.60c .27

942 MeV, 1630 MeV/c .29

0.437c .31

0.30c .33

0.866c (i) .35

0.745c (ب)

5.5 × 10¹⁹ J (i) .37

3.3% (ب)

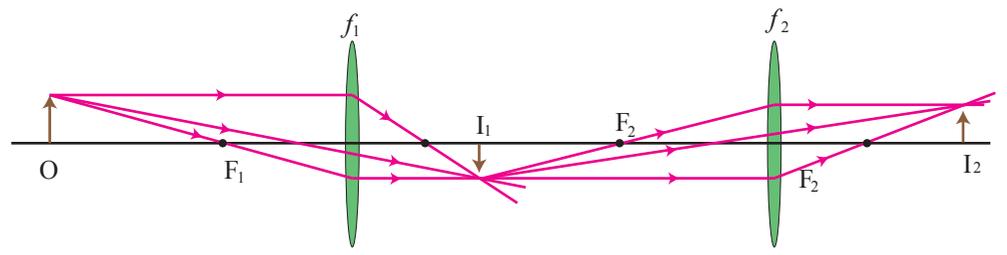
237.0483 u .39

(i) .41

(ب) هدام

360 nm .65

31° .67



590 nm .69

71. الأطوال الموجية من 600 nm إلى

700 nm لطيف الدرجة الثانية تتراكم

مع الأطوال الموجية من 400 nm إلى

467 nm التي لطيف الدرجة الثالثة

0.7 m .73

810 nm .75

160 nm, 320 nm .77

36.9° .79

0.086 (i) .81

(ب) لا شيء

48 km .83

240 nm .85

4.8° (i) .87

8.7° (ب)

الفصل 25

2.5 mm - 39 mm .1

1/62.5 s ≈ 1/60 s .3

17 mm .5

50 mm .7

0.16 s .9

11. يجب أن تكون النظارات أفضل

-8.3 D, -7.1 D .13

20.6 cm (ب) النظر. (i) .15

0.2 cm .17

1.9 cm (ب) : 2.0 cm (i) .19

2.1 .21

10 cm (ب) : 17 cm (i) .23

12.0 mm (ب) : 3.63 (i) .25

6.88 cm (ج)

3.3 x (ب) :-64 cm (i) .27

-27, 79 cm .29

22 cm .31

-110× .33

-94× .35

f_e=0.76 cm .f_o=124 cm .37

480× .39

610× .41

230× (ب) : 0.85 cm (i) .43

14.4 cm : 137×(i) .45

0.71 mm (د) : 1.7 cm (ج)

9.1 cm, 6.1 × 10⁻⁶ rad .49

1.7 × 10¹¹ m .51

نعم .53

البؤرة

49° .79

(i) .81

(ب) 21 cm إلى يمين العدسة الثانية.

0.65

0.106 m , 2.7 m .83

85. حقيقي ومعتدل. حقيقي ومعتدل

0.26 mm (i) .87

(ب) قطره 0.47 mm

(ج) قطره 1.3 mm

(د) 0.56, 2.7

20.0 cm .89

7.5 cm, 10 cm .91

20.0 cm عدسة لامة .93

الفصل 24

4.9 × 10⁻⁷ m .1

6.2 × 10⁻⁷ m , 4.8 × 10¹⁴ Hz .3

1.4 × 10⁻⁴ m .5

610 nm .7

9. يعكس النمط الاعتيادي للشق الثنائي

2.7 × 10⁻³ m .11

533 nm .13

0.22° .15

1.51° .17

2.51 m .19

3.6 × 10⁻⁶ m .21

9.53 × 10⁻⁷ m .23

2.6 cm .25

4.43° .27

خط/1640 cm .29

2.20 × 10⁻⁶ m, 53.3° .31

534 nm, 612 nm, 760 nm .33

خط/7140 cm .35

خط/5.79 × 10⁵ cm .37

643 nm .39

169 nm .41

8.5 × 10⁻⁶ m .43

113 nm , 225 m .45

471 nm .47

699 nm .49

2.50 × 10⁻⁴ m .51

0.089 .53

61.2° .55

35.3° (i) .57

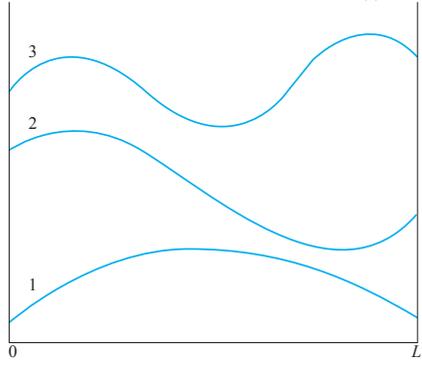
(ب) 63.4°

44.5% .59

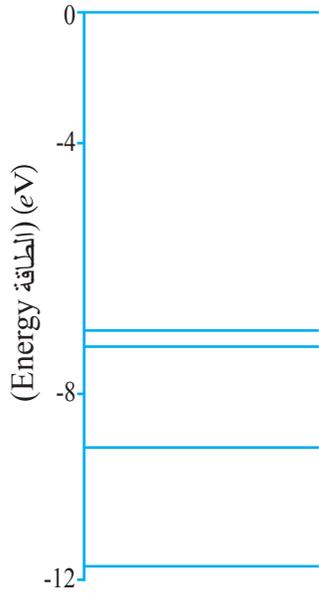
0.031I₀ .61

(i) بناء .63

59. -27.2 eV, -13.6 eV
61. نعم, $0.999973c$, 7.3×10^{-3}
63. (i)



- (ج) 2.4×10^{-17} J, 150 eV
(د) 1.6×10^{-66} J, 4.7×10^{-33} m/s
(هـ) 1.3×10^{-10} m
65. 3.27×10^{15} Hz
67. 4.7×10^{26} فوتون/s
69. 5.3×10^{18} فوتون/s
71. 0.39 MeV لكل واحدة
73. 4.7×10^{-14} m
75. (4.4×10^{-40}) , نعم
77. 0.64 V
79. 6.7 N
81. 1.0 eV, سوف لن يتدفق التيار
83. (i)

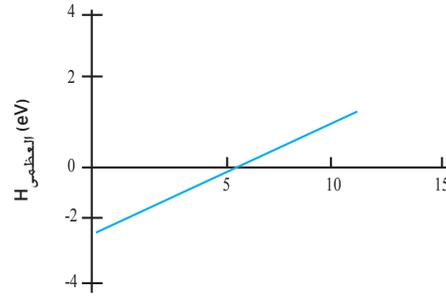


- (ب) الحالة الأرضية, 0.4 eV, 2.2 eV
2.5 eV, 4.7 eV, 5.1 eV
85. 1.8×10^{11} C/kg
87. $E_n = -\frac{3 \times 10^{165} \text{ J}}{n^2}$
 $\lambda \cdot r_n = n^2 (5 \times 10^{-129}) \text{ m}$

الفصل 28

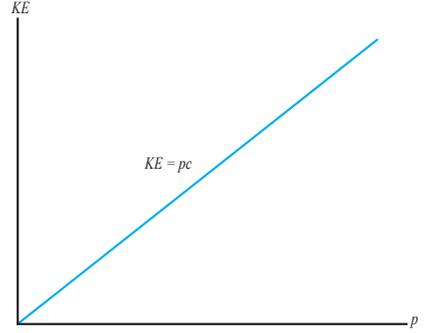
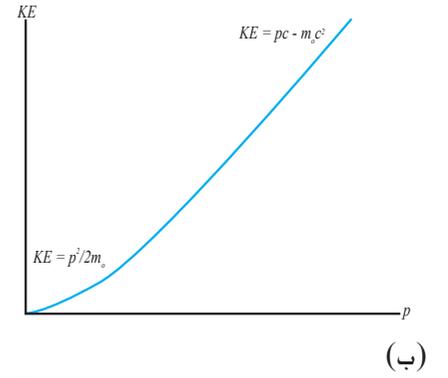
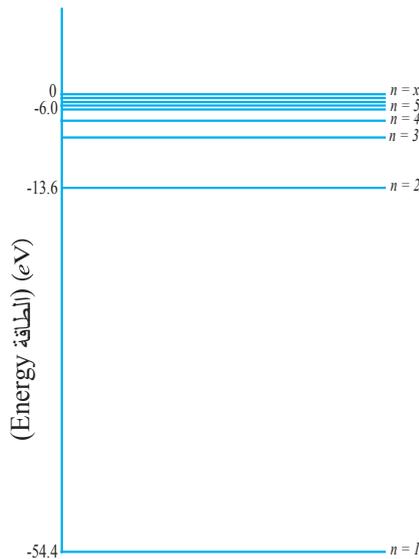
1. 3.6×10^{-7} m
3. 5.3×10^{-11} m
5. 10^{-7} eV
7. 3.00×10^{-10} eV/c²
9. $\Delta x_{\text{electron}} = 1.4 \times 10^{-3}$ m

11. من 2.7×10^{-19} إلى
 5.0×10^{-19} J من 1.7 eV إلى 3.1 eV
13. 2.4×10^{-13} Hz, 1.2×10^{-5} m
15. 6.6×10^{-23} kg.m/s
(أو 0.12 MeV/c)
17. 6.5×10^{14} Hz
19. نحاس وحديد
21. 0.63 eV
23. 2.95 eV
25. 1.9 eV, 43 kcal/mol
27.



التردد (10^{14} Hz)

- (i) 6.7×10^{-34} J.s
(ب) 5.5×10^{14} Hz
(ج) 2.30 eV
(i) 2.42×10^{-12} m
(ب) 1.32×10^{-15} m
(i) 55 eV
(ب) 0.105 nm
33. 6.61×10^{-16} m
35. 0.51 MeV, 0.51 MeV/c
37. 2.9×10^{-32} m
39. 26 V
41. 1.3×10^{-24} kg.m/s (i)
(ب) 1.5×10^6 m/s
(ج) 6.0 V
45. 4.7×10^{-38} m/s, 6.3×10^{38} مرة أصغر
47. 2.48×10^{-11} m
49. 3.40 eV
51. 122 eV
55. 5.26×10^{-8} m
57.

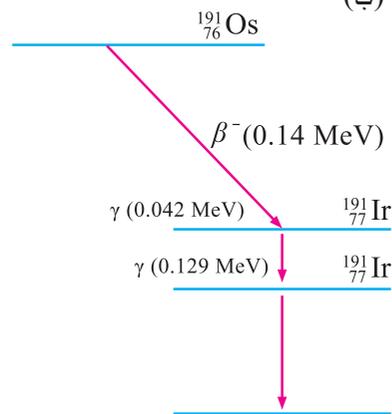


43. $0.80c$
45. (i) $0.98c$
(ب) $0.42c$
47. $0.92c$
(i) $0.73c$
(ب) 5.9 سنة
(i) 0.77 m/s
(ب) 0.21 m
53. 1.02 MeV (أو 1.64×10^{-13} J)
55. 234 MeV
57. 4×10^9 kg/s (i)
(ب) 4×10^7 سنة
(ج) 1×10^{13} سنة
59. 28.3 MeV (أو 4.53×10^{-12} J)
61. 2470 MeV/c (i)
(ب) 0
(ج) 1.40×10^4 MeV/c
63. 2.5×10^7 kg
65. نعم بالنسبة لإطار إسناد مخزن الجيوبولكن ليس بالنسبة لإطار إسناد الولد.
67. $0.96c$
69. c
71. 68.6×10^{21} J, مرة أكبر أو ضعف
73. (i) 1.17 s
(ب) 2.68 s

الفصل 27

1. 6.2×10^4 C/kg
3. 5 إلكترونات
5. (i) 1.06×10^{-5} m تحت الحمراء
(ب) 8.29×10^{-7} m تحت الحمراء
(ج) 7.25×10^{-4} m ميكروويف
(د) 1.06×10^{-3} m ميكروويف
7. 5.4×10^{-20} J, 0.34 eV
9. 9.35×10^{-6} m

- $^{234}_{90}\text{Th}$ (i) .23
 234.04367 u (ب)
 0.0855 MeV .25
 $^{32}_{16}\text{S}$ (i) .27
 31.97152 u (ب)
 0.862 MeV .29
 0.9602 MeV, 0.9602 MeV, 0 MeV .31
 5.31 MeV .33
 $1.5 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ (i) .37
 2.3 h (ب)
 1/16 أو (0.0625) .39
 1.31×10^{-20} نواة .41
 3.13×10^{12} /s اضمحلال (i) .43
 3.12×10^{12} /s اضمحلال (ب)
 4.26×10^5 /s اضمحلال (ج)
 0.77 g .45
 $1.68 \times 10^{-13} \text{ kg}$.47
 2.6 min .49
 $2.58 \times 10^{-3} \text{ g}$.51
 $T_{1/2} = (^{218}_{84}\text{Po}):T_{1/2} (^{214}_{84}\text{Po}) = (1.2 \times 10^6):1$.53
 $^{232}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{228}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{228}_{89}\text{Ac} \rightarrow$.55
 $^{228}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{224}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{220}_{86}\text{Rn}$
 $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{231}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{231}_{91}\text{Pa} \rightarrow$
 $^{227}_{89}\text{Ac} \rightarrow ^{227}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{223}_{88}\text{Ra}$.
 $N_D = N_0 (1 - e^{-\lambda t})$.57
 $2.3 \times 10^4 \text{ yr}$.59
 41 yr .61
 6.64 أعمار - النصف .63
 98% (ب) .65
 $^{191}_{77}\text{Ir}$ (i) .67
 (ب)



- $550 \text{ MeV}, 2.5 \times 10^{12} \text{ J}$.69
 $2.4 \times 10^5 \text{ yr}$ (i) .71
 $2.5 \times 10^5 \text{ yr}$; التأريخ بالكربون
 غير مفيد للأوقات التي في حدود 10
 سنوات أو أكثر.
 (i) .73
 $\text{KE}_\alpha : \text{KE}_\beta = 5.48 \times 10^{-4}:1$
 1.6% (i)
 0.67% (ب)
 0.18 /s اضمحلال أو 0.11 /min اضمحلال .77

- $1.8 \times 10^{-32} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ (ب)
 3600 C°/min .47
 $2870 \text{ m}^{-1/2}$.49
 $\sqrt{2} h$ أو $L_{\text{Bohr}} = 2h$, $L_{\text{QM}} = 0$.53
 $6.3 \times 10^{-14} \text{ s}$.55
 $\Delta P_{\text{proton}} : \Delta P_{\text{electron}} = 43:1$.57
 10^{34} s , نعم, $1.8 \times 10^{-35} \text{ m/s}$.59
 61. نحاس.

الفصل 29

- 5.1 eV .1
 4.6 eV .3
 $1.10 \times 10^{-10} \text{ m}$.7
 $1.5 \times 10^{-2} \text{ eV}, 8.2 \times 10^{-5} \text{ m}$ (i) .9
 $3.0 \times 10^{-2} \text{ eV}, 4.1 \times 10^{-5} \text{ m}$ (ب)
 $4.6 \times 10^{-2} \text{ eV}, 2.7 \times 10^{-5} \text{ m}$ (ج)
 720 N/m (i) .11
 $2.0 \times 10^{-6} \text{ m}$ (ب)
 $2.82 \times 10^{-10} \text{ m}$.13
 $1.1 \times 10^{-6} \text{ m}$.17
 1.1×10^6 إلكترون .19
 5×10^6 .21
 1.9 eV .23
 13 mA .25
 2.4 mA (i) .27
 4.8 mA (ب)
 8.1 mA (i) .29
 5.7 mA (ب)
 13 eV .31
 -5.3 eV (i) .33
 5.1 eV (ب)
 $1.94 \times 10^{-46} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.35
 5.50 eV .37
 $9.4 \times 10^{-2} \text{ eV}$ (i) .39
 $6.3 \times 10^{-10} \text{ m}$ (ب)
 $6.47 \times 10^{-4} \text{ eV}$.41
 $146 \text{ V} \leq V_{\text{supply}} \leq 362 \text{ V}$ (i) .43
 $3.34 \text{ k}\Omega \leq R_{\text{load}} < \infty$ (ب)

الفصل 30

- 0.149 u .1
 $3726 \text{ MeV}/c^2$.3
 $2.58 \times 10^{-10} \text{ m}$ (ب) .180 m .5
 6×10^{26} .6 لا، الكثافة النووية نفسها للأتوية
 جميعها .
 340 MeV .9
 2.224 MeV .11
 7.799 MeV .13
 $^{23}_{11}\text{Na}$: 8.11 MeV/نيوكليون .15
 $^{24}_{11}\text{Na}$: 8.06 MeV/نيوكليون
 17. (ب) مستقر
 0.783 MeV .19
 β^+ (i) .21
 $^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow ^{22}_{10}\text{Ne} + e^+ + \nu$ (ب)
 1.819 MeV

$$\Delta x_{\text{baseball}} = 9.1 \times 10^{-33} \text{ m}$$

$$\Delta x_{\text{electron}} \approx (1.5 \times 10^{29}) \Delta x_{\text{baseball}}$$

0, 1, 2, 3, 4, 5 .13
 14 إلكترون .15
 (i) .17

n	l	m_l	m_s
1	0	0	$\pm \frac{1}{2}$
1	0	0	$-\frac{1}{2}$
2	0	0	$\pm \frac{1}{2}$
2	0	0	$-\frac{1}{2}$
2	1	1	$\pm \frac{1}{2}$
2	1	1	$-\frac{1}{2}$

هناك مجموعات أخرى محتملة للأعداد
 الكمية التي لآخر إلكترونين.
 (ب)

n	l	m_l	m_s
1	0	0	$\pm \frac{1}{2}$
1	0	0	$-\frac{1}{2}$
2	0	0	$\pm \frac{1}{2}$
2	0	0	$-\frac{1}{2}$
2	1	1	$\pm \frac{1}{2}$
2	1	1	$-\frac{1}{2}$
2	1	0	$\pm \frac{1}{2}$
2	1	0	$-\frac{1}{2}$
2	1	-1	$\pm \frac{1}{2}$
2	1	-1	$-\frac{1}{2}$
3	0	0	$\pm \frac{1}{2}$
3	0	0	$-\frac{1}{2}$

19.
 $n \geq 5: m_l = 4, 3, 2, 1, 0, -1, -2, -3, -4$;
 $m_s = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$
 $n \geq 4: l \geq 3: m_s = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$.21
 $1s^2 2s^2 p^6 3s^2 3p^6 3d^7 4s^2$; (i) .23
 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d-$ (ب)
 $^{10}4s^2 4p^6$;
 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d-$ (ج)
 $^{10}4s^2 4p^6 5s^2$;
 $n = 6$ (i) .25
 -0.378 eV (ب)
 $L = 0, l = 0$ (ج)
 $m_l = 0$ (د)
 $5f, 5p, 4f, 4p, 3p, 2p$ (i) .29
 (ب) أربعة أطوال موجية
 41 kV .31
 0.18 nm .33
 0.061 nm .35 حجب جزئي للنواة
 بواسطة القشرة $n = 2$.
 فوتون 6.1×10^{16} , $1.9 \times 10^{-2} \text{ J}$.37
 $5.64 \times 10^{-4} \text{ rad}$.39
 170 m (i)
 $2.2 \times 10^5 \text{ m}$ (ب)
 $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ نفسه، نصف قطر
 بور.
 $L_{\text{min}} = 0$.43
 $L_{\text{max}} = 4.72 \times 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$.
 $3.1 \times 10^{-34} \text{ m}$ (i) .45

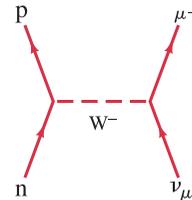
الفصل 31

1. $^{28}_{10}\text{Al}, \beta^-, ^{28}_{14}\text{Si}$
 2. محتمل
 3. 5.701 MeV كمية الطاقة المنبعثة.
 4. (أ) نعم
 5. (ب) 19.85 MeV
 6. 4.730 MeV
 7. $n + ^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{14}_6\text{C} + p, 0.626$ MeV
 8. ^3_2He (أ) تلتقط نيوترون
 9. (ب) $^{11}_6\text{C}$
 10. (ج) 1.856 MeV. طارد للحرارة
 11. 18.000953 u
 12. 173.3 MeV
 13. 1/1100
 14. 3.7×10^{-7} kg
 15. 630 kg
 16. 1.3 keV أو 2.1×10^{-16} J
 17. 6.0×10^{23} MeV/g
 18. 4.9×10^{23} MeV/g
 19. 2.1×10^{24} MeV/g
 20. 5.1×10^{23} MeV/g
 21. 0.38 g
 22. 5.3×10^3 kg/h
 23. 26.73 MeV (ب)
 24. (ج) 1.94 MeV, 2.22 MeV, 7.55 MeV
 25. 7.30 MeV, 2.75 MeV, 4.97 MeV
 26. (د) تنافر أكبر من الأنوية التي عددها
 27. الذري Z أكبر
 28. 4.0 Gy
 29. 250 قدا
 30. 200 counts/s
 31. 2.5 يوم
 32. 8.25×10^{-7} Gy/day
 33. $^{131}_{53}\text{I} \rightarrow ^{131}_{54}\text{Xe} + e^- + \bar{\nu}$ (أ)
 34. (ب) 27 يوما
 35. (ج) 8×10^{-12} kg
 36. $^{218}_{84}\text{Po}$ (أ)
 37. (ب) مشع
 38. α decay: $^{218}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{214}_{82}\text{Pb} + ^4_2\text{He}$
 39. β decay: $^{218}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{218}_{85}\text{At} + e^-$
 40. 3.1 min كلاهما
 41. (ج) يتفاعل كيميائيا
 42. (د) 5.7×10^6 اضمحلال
 43. 2.5×10^4 اضمحلال
 44. $^{12}_6\text{C}$ (أ)
 45. (ب) 5.701 MeV
 46. $v_{235} : v_{238} = 1.0043 : 1$
 47. 5.1×10^{-2} rem/yr
 48. 4.7 m
 49. 1300 kg (أ)
 50. (ب) 4.1×10^6 Ci
 51. (أ) 4.0×10^{26} W (أ)
 52. (ب) 0.38 A
 53. (ب) 1.0×10^2 m/s
 54. (أ) 1.022 MeV
 55. (ب) 1876.6 MeV
 56. (أ) ممنوع بواسطة حفظ الشحنة.
 57. (ب) محتمل بواسطة التفاعل القوي.
 58. (ج) ممنوع بواسطة حفظ الغرابة للتفاعل القوي. محتمل بواسطة التفاعل الضعيف.

- (ب) 3.7×10^{38} بروتون/s
 (ج) 1.0×10^{11} yr
 63. (أ) 3700 اضمحلال/s.
 (ب) 5.2×10^{-4} Sv/yr. نحو 15% من الخلفية.
 65. 7.274 MeV
 66. 96 yr
 69. 3 mCi

الفصل 32

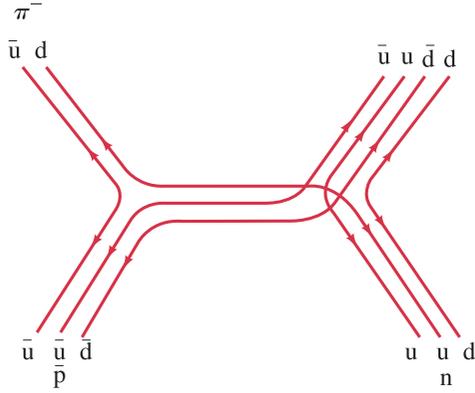
1. 7.29 GeV
 2. 1.8 T
 3. 13 MHz
 4. جسيمات ألفا
 5. حجم النيوكليون $\lambda_{\alpha} = 2.2 \times$
 6. حجم النيوكليون $\lambda_{\alpha} = 4.4 \times$
 7. 1.8×10^{-19} m
 8. 5.5 T
 9. 33.9 MeV
 10. 1879.2 MeV
 11. 67.5 MeV
 12. 2.3×10^{-18} m
 13. (أ) الشحنة. (والغرابة)
 14. (ب) الطاقة
 15. (ج) عدد البريون والغرابة
 16. 69.3 MeV
 17. $KE_{\Lambda^0} = 8.6$ MeV, $KE_{\pi} = 57.4$ MeV
 18. 52.3 MeV
 19. 7.5×10^{-21} s
 20. 1.3 keV (أ)
 21. 8.9 keV (ب)
 22. (أ) ممنوع. الطاقة غير محافظة
 23. (ب) ممنوع. عدد البيتون غير محافظ
 24. (ج) محتمل
 25. (أ) p
 26. (ب) $\bar{\Sigma}^-$
 27. (ج) K^-
 28. (د) π^-
 29. (هـ) $D\bar{S}$
 30. $D\bar{S} = c\bar{S}$
 31. 43



- (أ) 0.38 A
 (ب) 1.0×10^2 m/s
 (أ) 1.022 MeV
 (ب) 1876.6 MeV

49. (أ) ممنوع بواسطة حفظ الشحنة.
 (ب) محتمل بواسطة التفاعل القوي.
 (ج) ممنوع بواسطة حفظ الغرابة للتفاعل القوي. محتمل بواسطة التفاعل الضعيف.

- (د) ممنوع بواسطة حفظ الغرابة للتفاعل القوي. محتمل بواسطة التفاعل الضعيف.
 (هـ) محتمل بواسطة التفاعل الضعيف.
 53. -135.0 MeV, -140.9 MeV
 55. 64 فيرميونا أساسيا
 57. (ب) 10^{29} k
 59. 6.59×10^{-5} m
 61.



الفصل 33

1. 4.8 ly
 2. 0.059", 17 pc
 3. 110 yr
 4. 3.7×10^{-2}
 5. 1.4×10^{-4} kg/m³
 6. 1.83×10^{-9} kg/m³. أكبر بنحو
 7. 3.33×10^5 مرة
 8. -0.092 MeV, 7.366 MeV
 9. $d_1/d_2 = 0.15$
 10. 4×10^{14} m
 11. 540°
 12. 1.6×10^8 ly
 13. 656 nm (أ)
 14. 661 nm (ب)
 15. 1670 nm (ج)
 16. 0.44c
 17. 6 نيوكليون/m³
 18. 10^{-5} s (أ)
 19. 10^{-7} s (ب)
 20. 10^{-4} s (ج)
 21. 5 ly
 22. 5×10^9
 23. 2×10^{28} N
 24. d_{400} nm / d_{600} nm ≈ 1.4
 25. 0.88c
 26. 2×10^{-3}
 27. 13.933 MeV (أ)
 28. 4.7 MeV (ب)
 29. 3.7×10^{10} K (ج)
 30. ≈ 400 ly أكبر بنحو 2×10^7 مرة.
 31. أصغر ب 100 مرة.

فهرست

of hydrogen, 367	للبيروجين	in stars, 936	الزخم الزاوي في النجوم	Air bags, 29	أكياس الهواء	fn	الاختصار defn تعني: الصفحة المعنية تعطي تعريف الحدة
Atomic mass number, 836	العدد الكتلي الذري	Angular quantities, 195–200,215–16	الكميات الزاوية الطبيعية الاتجاهية للكميات الزاوية	Air circulation, underground,274	دورة الهواء تحت سطح الأرض	pr	تعني المرجع في ملاحظة أسفل الصفحة؛ تعني موجود في مسألة أو سؤال؛ ff تعني أيضًا الصفحات التالية
Atomic mass unit, 9, 353, 837, 838	العدد الذري	vector, nature of, 215–16	السرعة الزاوية	Air columns, vibrations of,329–34	اهتزاز الأعمدة الهوائية	A	(atomic mass number), 836 (العدد الذري الكتلي)
Atomic number, 797, 836	العدد الذري	Angular velocity, 196 ff, 215–16	السرعة الخطية	Air conditioner, 421–23	شدة صوت الطائرة	Aberration	زيع:
determined from X-ray analysis, 800–802	محددًا بالأنشطة السنوية	linear velocity and, 197, 199	فناء مصعد	Air pollution, 430	جناح الطائرة	astigmatism, 702, 710	اللانقطية
Atomic spectra, 771–73	أطياف ذرية	Annihilation, 765, 949	هوائي مبدأ طابع البشر	Airport metal detector, 595	كاشفات المعادن في المطار	chromatic, 710	لوني
fine structure of, 786, 795	التركيب الدقيق	Anode, 485, 754, 755	ضد المادة	Airport runway, 27	منرج المطار	of eye, 702–3, 710	العين
Atomic structure:	التركيب الذري	Antenna, 615, 621, 626, 627–28	ضديد النيوتريون	Airy disk, 712	قرص إيرري	of lenses, 710–11	العدسات
Bohr model of, 773–79	نموذج بوهر	Anthropic principle, 955	ضديد الجسم	Algebra, review of, A-3–A-6	مختصر جبري	monochromatic, 710–11	وحيد اللون
of complex atoms, 797–98	للذرات المركبة (المعقدة)	Antilock brakes, 113	ضديد البروتون	Alkali metals, 799	الفلزات القوية	spherical, 636, 710	كروي
Atomic structure:	التركيب الذري	Antimatter, 921, 923 pr	ضديد الكوارك	Allowed transition, 797, 823	انتقال مسموح	Absolute luminosity, 930 and ff	المعان المطلق
Bohr model of, 773–79	نموذج بوهر	Antineutrino, 846	البريق الظاهري	Alpha decay, 842–44	انحلال ألفا	Absolute space and time, 729	الحيز المطلق والزمن
of complex atoms, 797–98	للذرات المركبة (المعقدة)	Antinodes, 310, 333	الوزن الظاهري	and tunneling, 855	عبور ألفا	Absolute temperature scale, تدرج الحرارة المطلق, 362–63	تدرج الحرارة المطلق
early models of, 769–70	النماذج الأولية لـ	Antiparticle, 846, 910	ضديد الجسيم	Alpha particles (or rays), 770,842, 844	جسيمات ألفا	Absolute zero, 362	الصفر المطلق
of hydrogen atoms, 771–85,794–97	لذرة الهيدروجين	Antiproton, 910	ضديد البروتون	Alternating current (ac),506–8, 603–8	تيار متناوب (ac)	Absorbed dose, 889	الجرعة الممتصة
quantum mechanics of,786–807	ميكانيكا الكم	Antiquark, 916–17	ضديد الكوارك	Alternators, 593	المتناوبات	Absorption lines, 679, 777	خطوط الامتصاص
shells and subshells of,798–99, 800	القشرات ودون القشرات	Apparent brightness, 930–31,937	حسابات تقريبية	AM, 626, 627	تضمين الاتساع	Absorption spectrum, 679, 771–72	طيف الامتصاص
Atomic theory, 352–54, 769–81	النظرية الذرية	Apparent weight, 265	المساحة تحت المنحنى	Amino acids, 819–20	أحماض أمينية	Abundances, natural, 836	الوفرة الطبيعية
(see also Atom;Atomic structure; theory)	انظر الذرة والترتيب الذري	Approximate calculations,12–14	المساحات والحجوم	Ammeter, 541–45	أميتر	Ac circuits, 506–8, 520 fn, 603–5	دارات AC
Atomic weight, 353 fn	الوزن الذري	Arabidopsis thaliana, 881	أرسطو ذراع لانقطية	Amorphous material, 824	مادة لابلورية	Ac generator, 592–93	مولد التيار المتناوب
Atomizer, 272	البخاخ	Arago, Francois, 673	فرانكوس أراغو	Ampère, André, 496, 568, 616	أندريه أمبير	Ac motor, 572	محرك التيار المتناوب
ATP, 817	الخميرة	Arches, 243–45	أقواس	Ampere (unit), 496, 566	أمبير (وحدة)	Accademia del Cimento, 355	أكاديمية سيمنتو
Attack angle, of wing, 272–73	زاوية الهجوم، للجناح	Archimedes, 263, 265	أرخميدس	operational definition of,566	أندريه أمبير	Acceleration, 23–27, 75–77, 106–9	التسارع
Atwood machine, 88, 221 pr	آلة أتود	Archimedes' principle, 255,263–67	مبدأ أرخميدس	Ampère's law, 568–69, 616	قانون أمبير	angular, 196–99, 201	الزاوي
Audible range, 323	المدى السمعي	Architecture, 4, 243–45	معماري	Amplifiers, 830, 831	مكبرات	average, 23, 24	المتوسط
Aurora borealis, 563	الشفق القطبي	Area under a curve or graph,37, 141	المساحة تحت المنحنى	Amplitude: of vibration, 288	اتساع الاهتزازة	centrifuge, 201	الطرد المركزي
Autofocusing camera, 324	القمرة آلية التبيير	Areas and volumes, A-1	المساحات والحجوم	of wave, 302, 305, 306–7, 314, 327	اتساع الموجة	centripetal, 107 ff, 194, 198, 200	المركزي
Autoradiography, 892–93	التصور الإشعاعي الآلي	Aristotle, 2, 73	أرسطو	Amplitude modulation (AM), 626, 627	تضمين الاتساع	Coriolis, A-18–A-19	كوروليوليس
Average angular acceleration,197	التسارع الزاوي المتوسط	Armature, 571, 592, 594	ذراع لانقطية	Amusement park rides, 111, 194, 198, 199	متنزه التسلية	cosmic, 953	كوني
Average angular velocity, 196	السرعة الزاوية المتوسطة	Astigmatism, 702, 710	لانقطية	Analog information, 598	معلومات مناظرة	of gravity, 33 ff, 121 in g's, 35	في الجاذبية
Average speed, 21	السرعة المتوسطة	Astronomical telescope, 706–7	مقرب (تلسكوب)	Analyzer (of polarized light), 685	محلّل (الضوء المستقطب)	instantaneous, 24	لحظي
Avgadro,Amedeo, 366	أميدو أفوجادرو	Asymptotic freedom, 919	فيزياء فلكية	of reflection, 308, 633	محلّل (الضوء المستقطب)	of the Moon, 109, 118	في القمر
Avogadro's hypothesis, 366–67	أميدو أفوجادرو	Atmosphere, scattering of light by, 690	الحرية المقاربة	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	motion at constant, 26–44	حركة ثابتة
Avogadro's number, 366–67	عدد أفوجادرو	Atmosphere (unit), 259, 261	تنشتت الضوء	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	relationship with force, 75–77	نصف قطري
Axis of lens, 647	محور العدسة	Atmospheric pressure, 259, 261	وحدة ضغط جوي	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	of simple harmonic oscillator, 295	علاقة مع القوة
Axis of rotation, 195	محور الدوران	Atom, 352–54, 441, 769–81 (see also Atomic structure; Kinetic theory)	الضغط الجوي	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	of simple harmonic oscillator, 295	المهتز التوافقي البسيط
forces tilting, 206	قوى الميلان	binding energy, 776	ذرة	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	oscillator, 295	مماسي
Audible range, 323	المدى السمعي	Bohr model of, 773–79	تركيب الذرة	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	tangential, 115–16, 198	متنظم
Autofocusing camera, 324	الشفق القطبي	complex, 797–98	النظرية الحركية	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	uniform (constant), 26–44	متنظم (ثابت)
Autoradiography, 892–93	القمرة آلية التبيير	distance between, 354	الزخم الزاوي	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Accelerators, 902	مسارعات
Average angular acceleration,197	التسارع الزاوي المتوسط	early models, 769–70	طاقة الربط	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Acceptance of theories, 2–3	قبول النظريات
Average angular velocity, 196	السرعة الزاوية المتوسطة	electric charge in, 441	نموذج بوهر	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Acceptor level, 828	مستوى المتقبل
Average speed, 21	السرعة المتوسطة	energy levels in, 775–76, 794–96, 799, 800	معقد	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Accommodation of eye, 702	تكيف العين
Avgadro,Amedeo, 366	أميدو أفوجادرو	hydrogen, 771–85, 794–97	المسافة بين	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Accuracy, precision vs., 5 fn	الدقة
Avogadro's hypothesis, 366–67	أميدو أفوجادرو	ionization energy of, 776	النماذج القديمة	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Achilles tendon, 250 pr	وتر آشيل
Avogadro's number, 366–67	عدد أفوجادرو	neutral, 837	الشحنة الكهربائية	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Achromatic doublet, 711	مزدوج لا لوني
Axis of lens, 647	محور العدسة	packing of, 824	مستويات الطاقة	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Actinides, 800	الاكتينيدات
Axis of rotation, 195	محور الدوران	planetary (nuclear) model of,770	الهيدروجين	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Action potential, 512–13	جهد الفعل
forces tilting, 206	قوى الميلان	probability distributions in,794, 797, 813	طاقة التآين	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Action-reaction (Newton's third law), 77–80	الفعل ورد الفعل (قانون نيوتن)
Audible range, 323	المدى السمعي	quantum theory of, 773–811	متعادلة	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Activation energy, 371, 816	طاقة التنشيط
Aurora borealis, 563	الشفق القطبي	shells and subshells in,798–99, 800	النموذج الفلكي (للنواة)	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Active galactic nuclei (AGN), 930	أنوية المجرات النشطة
Autofocusing camera, 324	الشفق القطبي	stationary states in, 773 ff	توزيع الاحتمالات	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Active matrix LCD, 689	المصفوفة النشطة
Autoradiography, 892–93	القمرة آلية التبيير	theoretical, 773–811	النظرية الكمية	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Activity of nuclear radiation, 849	نشاط الإشعاع النووي
Average angular acceleration,197	التسارع الزاوي المتوسط	shells and subshells in,798–99, 800	القشرات ودون القشرات	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Addition of velocities, 62–64,748	جمع السرعات
Average angular velocity, 196	السرعة الزاوية المتوسطة	stationary states in, 773 ff	القشرات	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Adenine, 460–61	الأدينين
Average speed, 21	السرعة المتوسطة	theoretical, 773–811	الحالة المستقرة	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Adhesion (defn), 277	التصاق
Avgadro,Amedeo, 366	أميدو أفوجادرو	shells and subshells in,798–99, 800	القفلة الذرية	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Adiabatic process, 411–12	عملية كظيمة
Avogadro's hypothesis, 366–67	أميدو أفوجادرو	stationary states in, 773 ff	مجهر القوة الذرية	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	ADP, 817	الهواء
Avogadro's number, 366–67	عدد أفوجادرو	theoretical, 773–811	كتلة الذرة	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	Air:	الطفو
Axis of lens, 647	محور العدسة	shells and subshells in,798–99, 800	كثافة الهواء في الدارات	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	buoyancy of, 267	الطفو
Axis of rotation, 195	محور الدوران	stationary states in, 773 ff	كثافة الهواء في الغرفة	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	mass of in room, 365	كتلة الهواء في الغرفة
forces tilting, 206	قوى الميلان	theoretical, 773–811	محتوى الماء	of refraction, 312, 643	محلّل (الضوء المستقطب)	water content of, 374–76	محتوى الماء

Center of gravity, 183–84	مركز الجاذبية 183–84	Bubble chamber, 857	غرفة الفقاعات	Body balance, 236	توازن الجسم	قاعدة ترانزستور
Center of mass, 182–86	مركز الكتلة 182–86	Building materials, thermal	ممتصات الصدمات في المباني	Body parts, CM of, 184–85		كمية أساسية
for human body, 184–85	لجسم الإنسان 184–85	properties of, 397		Body temperature, 356, 395	درجة حرارة الجسم	كرة القاعدة
and translational motion, 185–86	والحركة الانتقالية 185–86	Bulk modulus, 238, 240–41	مواد البناء	Bohr model, 773–79, 786–87		
Centigrade (see Celsius temperature scale)	مئوي			Bohr, Niels, 766, 773, 793	نموذج بوهر في الذرة	
Centipoise (unit), 275	وحدة سينتوز	Buoyancy, 263–67	المعامل الجرمي	Bohr radius, 774		كرة السلة
Centrifugal (pseudo) force, 110, A-17–A-18	مضخة الطرد المركزي	Buoyant force, 263–67	قوة الطفو	Bohr theory, 773–79, 786–87		بطارية
Centrifugal pump, 278	الطرد المركزي	Cable TV, 628–29	التلفاز بالكابل	Boiling, 374–75, 414 pr	غليان	رمز البطارية
Centrifuge, 116–17	تسارع مركزي	Calculator errors, 7	أخطاء آلة الحاسبة	Boiling point, 355 fn, 373, 375		أعمدة
Centripetal acceleration, 107 ff, 194, 198–99, 201	قوة مركزية	Caloric theory, 385	نظرية الكالوري	table, 392	درجة الغليان	تردد الضربات
Centripetal force, 109	متغيرات	related to the joule, 385	وحدة الكالوري	Boltzmann, Ludwig, 428		الضربات
Cepheid variables, 937	نظام للوحدات cgs	working off, 386	الكالوريمتر	Boltzmann's constant, 367, 833pr	لودفيغ بولتزمان	هنري بكريل
CERN, 905	شادوليك, جيمس	Calorimeter, 390, 857	القياسات الحرارية	Bomb calorimeter, 390	ثابت بولتزمان	بكريل (وحدة)
Cgs system of units, 9	تفاعل متسلسل	Calorimetry, 388–91	القمرة	Bond energy, 813, 817	مسعر القنبلة	بيل (وحدة)
Chadwick, James, 836	نهاية شاندراسيار	Camera, 697–701	خط القمر	Bonding:	طاقة الرابطة	
Chain reaction, 879–81	تغير الحالة (الطور)	adjustments to, 698–700	تنبير آلي	in molecules, 812–15	الربط في الجزيئات	Bernoulli, Daniel, 270
Chandrasekhar limit, 934		autofocusing, 324	رقمي	in solids, 824		Bernoulli's equation, 270–71
Change of phase (or state), 371–73, 391	شحنة	digital, 697	وحدة الوميض	Bonds, 812–15, 824	الربط في المواد الصلبة	Bernoulli's principle, 270 ff
Charge (see Electric charge)	إدارة ازدواج الشحنة	flash unit, 484	مكافيء	covalent, 813, 815, 816, 824	الروابط	applications of, 272–74
Charge-coupled device (CCD), 697	شحنة البطارية	Cantilever, 231	مقاومة مواسع	dipole, 818–19	التشارك	Beta decay, 845–47
Charging a battery, 521 fn, 532–33	شارل, جاك	Capacitance, 480–82, 533–35	مواسع	hydrogen, 818–20	التناطلي	Beta particle, or ray, 842,
Charles, Jacques, 362	قانون شارل	equivalent, 534	في دارارت التيار المتناوب	ionic, 814, 815, 817, 824	الهيدروجين	جسيمات بيتا
Charles's law, 363	جميل, الكوارك	Capacitive reactance, 605	الشحنة والجهد	metallic, 824	أيونية	845–46 (see also Electron)
Charm, and charmed quark, 915, 916–17	روابط كيميائية	Capacitor, 480–81	الطاقة المختزنة	molecular, 812–15	فلزية	Bethe, Hans, 885
Chemical bonds, 812–15	ليزرات كيميائية	in ac circuits, 604–5	كمرشح	partial ionic and covalent, 815	جزيئية	Bias voltage, 828
Chemical lasers, 805	تفاعلات كيميائية	charge and voltage on, 535	متوازي الصفيحتين	in solids, 824	أيونية تشاركية	Biceps, and torque, 205, 221
Chemical reactions, temperature effect, 371	أثر درجة الحرارة	energy stored in, 484–85	في دارة RC	strong (defn), 817	الصلبة	Big Bang theory, 944 ff
Chernobyl, 882	شيرنوبل	as filter, 605	ممانعة	van der Waals, 817–21	قوية	
Chimney smoke, 274	دخان المدخنة	parallel-plate, 482	في التوالي	weak, 817–21, 824	فان دي فالز	Big crunch, 951, 952
Chip, 812, 831	شيب	in RC circuit, 535–37	والتوازي	Bone density, measurement of, 764	ضعيفة	Bimetallic-strip thermometer, 355
Chromatic aberration, 710–11	الزيج اللوني	reactance (impedance) of, 603–5	ميكروفون المواسع	Born, Max, 788	كثافة العظام وقياسها	ميزان المزودج الحراري
Chromosome (see DNA)	كروموسوم	in series and parallel, 533–34	المواسع	Bosons, 797 fn, 913, 917, 918	ماكس بورن	Binary system, 935, 941
Circle of confusion, 699, 710	دائرة الارباك	uses of, 605	المواسعة	Bottom quark, 916–17	البوزونات	Binding energy, 753 pr, 813,
Circle of least confusion, 710	دائرة الاربك	Capacitor microphone, 546 pr	الأنابيب الشعرية	Boundary layer, 273	الطبقة الحدية	816–17, 838–41
Circuit (see Electric circuit)	دارة كهربائية	Capacitor, 546 pr	الشعرية	Bow wave, 342	موجة القوس	in atoms, 775
Circuit breaker, 505–6, 599	قاطع كهربائي	Capacity (see Capacitance)	الشعرية	Boyle, Robert, 362	روبرت بويل	of molecules, 813, 816–17
magetic, 567	حركة دائرية	Car:	سيارة	Boyle's law, 362, 363, 368	قانون بويل	of nuclei, 838–41
Circular motion, 292	حركة دائرية غير منتظمة	air bags, 29	أكياس هوائية	Bragg equation, 717	معادلة براغ	Binding energy per nucleon, 839
nonuniform, 115–16	حركة دائرية غير منتظمة	brakes, 260	كوابح	Bragg, W. H., 717	براغ	طاقة الربط لكل نوية
uniform, 106–15	مضخات دوائر	force that accelerates, 79	القوة المسارعة	Bragg, W. L., 717	المكايح الهيدروليكية	Binoculars, 646, 708
Circulating pumps, 278–79	فيزياء كلاسيكية (727, defn)	forces on a curve, 112	القوى عن المنحني	Brake, hydraulic, 260	الكبح	Binomial expansion, 737, A-6–A-7 (see also inside back cover)
Classical physics, 1, (defn, 727)	نص كلاسيوس للقانون الثاني	power needs of, 159	احتياجات القدرة	Braking	الكبح	التمدد ثنائي الحدود
Clausius, R. J. E., 416, 422	معضلة الساعة (معضلة التوائم)	skidding, 113	الانزلاق	of car, 30, 113, 144	للسيارة	Biological damage by
Clausius statement of second law, 416, 422	معدلات دوران	stopping distance of, 30, 144	مسافة الوقوف	eddy currents for, 594	للتيارات الدوامية	radiation, 888
Clock paradox (see Twinparadox)	بنود الساعة	Car starters, 567	دورة الكربون	LED lights to signal, 830	كسر الساق	Biological evolution and
Clock, pendulum, 297	أنبوب مغلق	Carbon cycle, 885	التأريخ الكربوني	Breaking a leg, 174	نقطة الكسر	التطور الحيوي
Closed tube, 332, 333	خصائص عزل الملابس	Carbon dating, 853–55	دورة كارنوت	Breaking point, 237	التنفس	development, 427
Clothing, insulating properties of, 397	مجرة الغيوم	Carnot cycle (engine), 419–21	كفاءة كارنوت	Breath, molecules in, 367	المفالات بريدنر	Bit speed, 200
Cloud chamber, 857	جزء أول أكسيد الكربون	Carnot efficiency, 420	كارنوت, سادي	Breeder reactor, 882	مفاعلات بريدنر	Black holes, 930, 935, 941
CO molecule, 822–23	طلاء العدسات, ضوء	Carnot, Sadi, 419	تردد الحامل	Brewster, David, 687	اشعاع الكبح	Blackbody radiation, 756–58
Coating of lenses, optical, 682		Carrier frequency, 626	الكاترات	Brewster's angle and law, 687	زاوية بروستر	Blood flow, 269, 275–76, 590
Coaxial cable, 580 pr, 621		Cassegrainian focus, 707	الكاتراتية	Bridge circuit, 551 pr	دارة القطرنة	convection by, 399
		CAT scan, 719		Bridge collapse, 299		Doppler blood-flow meter, 341
		Catalysts, 817		Brightness, apparent, 930–31, 937		مقياس دوبلر لجران الدم
		Cathedrals, 244–45		British system of units, 9 (see also name of unit)		Doppler weather forecasting,
		Cathode, 485, 754		Brogie (see de Broglie, Louis)		تنبؤ
		Cathode rays, 485, 754–55 (see also Electron)		Bronchoscopes, 646		دوبلر الجوي
		Cathode-ray tube (CRT), 485–86, 628		Brown, Robert, 353	بروجلي لونس	341
		Causality, 128, 792–93		Brownian motion, 353	منظار التقصبات	TIAs and, 273
		Cavendish, Henry, 119		Brunelleschi, Filippo, 245		Blood pressure, measuring, 279
		CD player, 805, 806		Brushes, 571	الحركة البراونية	قياس ضغط الدم
		Cell, electric, 494–95		BSCCO, 510		زرقة السماء
		Cell phones, 314, 621, 628		Btu (unit), 385	وحدة حرارة بريطانية	الانزياح نحو الأحمر
						Bobsled acceleration, 75
						Body
						heat loss from, 399, 400
						metabolism, 414–15
						جسيم
						فقد الجسم للحرارة
						التمثيل الغذائي للجسم

Current (see Electric current)	تيار	Convex mirror, 635, 641–42	مرآة محدبة	stress on, 361	تكثيف	COBE, 946	كابل محوري
Current sensitivity of meters,	حساسية المقاييس للتيار	Cooling	تبريد	Condensation, 374	تكثيف	Coefficient of performance, 422	معامل الأداء
542		by evaporation, 374, 395	التبريد بالتبخير	Condensed-matter physics (see Solid-state physics)	فيزياء الحالة المكثفة	Coefficient (see name of)	
Currents, ocean, 397	تيارات بحرية	by radiation, 400	التبريد بالإشعاع	Condenser (see Capacitor)	مكثف	Coherent source of light, 671, 803	مصدر ضوئي مترابط
Curvature of field, 710	انحناء المجال	Coordinate systems, 20	نظام إحداثيات	Conductance, 518 pr	ناقلة	Cohesion, 277	التصاق
Curvature of space, 938–41, 951	انحناء الفضاء	Copenhagen interpretation, of	تفسير كوبنهاجن لميكانيكا الكم	Conduction, 518 pr	توصيل	Coil (see Inductor)	
Curvature of universe, 938–41, 951	انحناء الكون	quantum mechanics, 793		Conduction: electric, 441–42, 493–513, 825	توصيل كهربائي	Collapse: of bridges, 299	انهيار الجسور
Curveball, throwing a, 273	ضرب كرة الانحناء	Core, of reactor, 881	كوبرنيلكس	heat, 395–97	حرارة	of building, 242	البنائيات
Curves, car on, 112–15	السيارة على المنحنيات	Coriolis acceleration,	تسارع كوريوليس	nerve, 510–13	عصب	of star, 215	النجم
Cutoff wavelength, 802	طول موجة القطع	A-18–A-19		Conduction band, 825, 828	حزمة التوصيل	Collector (of transistor), 830–32	الجامع (ترانزستور)
Cycle (defn), 288	دورة	Coriolis effect, A-18–A-19	أثر كوريوليس	Conduction current (defn), 617	تيار التوصيل	Colliding beams, 906–7	حزم متصادمة
Cyclotron, 582 pr, 903–5	جهاز سيكلوترون	Coriolis force, A-18–A-19	قوة كوريوليس	Conductivity, thermal, 396	التوصيل	Collisions, 173–81	تصادمات
Cyclotron frequency, 903–4	تردد السيكلوترون	Cornea, 701, 702	قرنية	Conductors: electrical, 441–42, 456–57, 475–76, 493–513, 590–91, 825	الموصلات الكهربائية	elastic, 175–77	مرن
Cytosine, 460–61, 818	سيوتوسين	Corrective lenses, 701–4	عدسات مصححة	heat, 396	حرارة	inelastic, 175–76, 178–79	غير مرن
da Vinci, Leonardo, 3	لويون، دي بروجي	Correspondence principle, 749, 779, 787	مبدأ التطابق (التشابه)	Confinement, 887, 918	تعزيز	in two or three dimensions, 179–81	في بعدين أو ثلاثة
Damped harmonic motion, 298	حركة توافقية متخامدة	Cosmic acceleration, 953	تسارع كوني	of quarks, 949	في الكواركات	Color:	لون
Dampening, eddy currents for,		Cosmic Background Explorer,	كاشف الخلفية الأرضية الكونية	Conservation laws:	قوانين الحفظ	of quarks, 918–20	لون الكوارك
594		946		of angular momentum,	للزخم الزاوي	related to wavelength, 670,671	مرتبطة بطول الموجة
Dampers on building, 298	ممتصات الصدمة في المباني	Cosmic microwave background	خلفية أشعة كونية ميكرووية	213–15		of sky, 690	بالسما
Dark matter, 951–53	المادة السوداء	radiation, 945–47	حلفية أشعة كونية ميكرووية	apparent violation of in beta	انتهاك ظاهري كما في انحلال بيتا	Color charge, 918–19	شحنة اللون
Dart gun, 153		Cosmic rays, 902	أشعة كونية	decay, 846		Color force, 918–20	قوة اللون
Dating, radioactive, 853–55	التأريخ الإشعاعي	Cosmological constant, 953	ثابت كوني	of electric charge, 440–41, 523, 528–29	انتهاك عدد الباريون انتهاك حفظ الشحنة	Coma, 710	عيوية
Daughter nucleus (defn), 842	الأبنة، نواة دايفيسون	Cosmological principle, 944	المبدأ الكوني	in elementary particle	في الجسيمات الأولية	Comfort, room, 400–401	غرفة ملائمة
Davisson, C. J., 767	دايفيسون	Cosmological redshift, 943	الانزياح الكوني الأحمر	interactions, 910–12	في التفاعلات	Communications, fiber optics in, 1	646
de Broglie, Louis, 766, 780–81, 787	لويون، دي بروجي	Cosmology, 921, 926–55	علم الكون	149–55, 389 ff, 409,529		of energy,	571, 592–93
de Broglie's hypothesis, 780–81	نظرية دي بروجي	Coulomb, Charles, 444	شارل كولومب	of lepton numbers, 911, 912	في أعداد ليبتون	Compass, magnetic, 556, 564	بوصلة، مغناطيسية
de Broglie's wavelength, 766, 780–81, 890	طول موجة دي بروجي	Coulomb force (defn), 447	قوة كولومب	of linear momentum, 170–73 and ff	في الزخم الخطي	Complementarity, principle of,	765–66
Debye (unit), 479–80	ديباي (وحدة)	Coulomb (unit), 445	وحدة الكولومب	in nuclear processes, 846		Complete circuit, 496, 497	دائرة كاملة
Decay:	انحلال	operational definition of, 566		of nucleon number, 848, 911	في العمليات النووية	Completely inelastic collision,	178–79
alpha, 842–44, 848, 855	ألفا	Coulomb's law, 444–47, 458, 774	قانون كولومب	of strangeness, 915	في عدد النيوكليونات في الغريبة	Complex atoms, 797–98	تصادم عديم المرونة ذرات معقدة
beta, 842, 845–47	بيتا	Counter emf, 593–94	قوة دافعة كهربائية	Conservative force, 148–49	قوة محافظة	Components of vector, 49–53	مركبات متجه
of elementary particles, 901 ff	الجسيمات الأولية	Counter torque, 593–94	عزم عكسي	Conserved quantity, 149	كمية محفوظة	Compound lenses, 711	عدسات مركبة
gamma, 842, 847–48	جاما	Counterweight, 88	وزن مضاد	Constant angular acceleration,	تسارع زاوي ثابت	Compound microscope, 708–9	مجهر مركب
rate of, 848–51	معدل	Covalent bond, 813, 815, 816, 824	رابطة تساهمية	201		Compound nucleus, 878	نواة مركبة
types of radioactive, 842, 848	أنواع الانحلال	Creativity, in science, 1–2	الإبداع في العلم	Constants, fundamental (see inside front cover)	ثوابت أساسية	Compounds (defn), 353 fn	مركبات
Decay constant, 848	ثابت الانحلال	Credit card swipe, 599	بطاقة ائتمانية	Constant-volume gas	حجم الغاز الثابت	Compression (longitudinal wave), 303	انضغاط
Decay series, 852–53	سلسلة الانحلال	Crick, F. H. C., 718	زاوية حرجة	thermometer, 356–57	ميزان حرارة	Compression waves (P waves), 304	موجات انضغاطية
Deceleration (defn), 25	تباطؤ	Critical angle, 645	زاوية حرجة	Constructive interference,	تداخل بناء	Compressive stress, 239–40	جهد انضغاطي
Decibel (dB) (unit), 325–27	ديسبل (وحدة)	Critical damping, 298	تخامد حاد	308–9, 335–37, 668	قوة ثابتة	Compton, A. H., 763	كومبتون
Declination, magnetic, 556	الميل (مغناطيسي)	Critical density of universe,	الكثافة الحرجة في الكون	Contact force, 81, 450		Compton effect, 763–64	أثر كومبتون
Decommissioning nuclear		951 ff		Contact lenses, 702, 703–4		Compton wavelength, 763	موجة كومبتون
plant, 870		Critical mass, 880	الكتلة الحرجة	Continental drift, 267	انزياح قاري	Computerized axial	التصوير المحوري
Decoupled photons, 935, 939	فوتونات منفصلة	Critical point, 372	النقطة الحرجة	Continuity, equation of, 268–69	معادلة الاستمرارية	tomography, 719	حاسبات
Defibrillator, 485, 538 fn		Critical reaction, 881	تفاعل حرج	Continuous laser, 805	ليزر مستمر	Computers, 598	حسابات
Definition, operational, 10	تعريف عملي	Critical temperature, 372, 510	درجة حرارة حرجة	Continuous spectrum, 679, 756	طيف متصل	digital information and, 598	بيانات رقمية
Degradation of energy, 427		Crossed Polaroids, 686	درجات حرارة حرجة	Contrast in microscope images,	تمايز في صور المجهر	hard drive, 200	
Degrees of freedom, A-22	درجات الحرية	CRT, 485–86, 628	مستقطبات متخامدة	716		keyboards, 482	
Dehumidifier, 438 pr	مزيل الرطوبة	Crystal lattice, 824	شبكة بلورية	Control rods, 880, 881	قضبان التحكم	monitors, 485–86	
Delayed neutrons, 869 fn	نيوترونات مثبطة	Crystallography, 717	علم تصوير البلورات	Convection, 397–99	حمل	Concave mirror, 635 ff, 639–40	مرآة مقعرة
Democritus, 352	ديمقراط	Crystals, liquid, 256, 688–89	بلورة سائلة	of blood, 399	الدم	Concentration gradient, 377	تدرج التركيز
Demodulator, 627	مزيل التصبن	CT scan, 718–21		on hiking trail, 398		Concordance model, 948	
Dendrite, 511		Cucurbita melopepo, 893	ماري كوري	Conventional current (defn),		Concrete:	خرسانة
		Curie, Marie, 841–42	بيير كوري	497		prestressed and reinforced,242	خرساء سابقة الاجهاد
		Curie, Pierre, 841–42		Conventions, sign, 638–39, 651	اصطلاح		
		Curie temperature, 574	درجة حرارة كوري	Converging lens, 647, 648, 653	عدسة مجمعة		
		Curie (unit), 889	وحدة كوري	Conversion factors, 10–11 (see also inside front cover)	معاملات التحويل		

leakage, 541	تسريب	Earthquakes, 304, 305, 306, 313	الزلازل الأرضية	Disintegration energy, 843	طاقة الانحلال	Density, 256	كثافة
magnetic force on, 558–59	قوة مغناطيسية	ECG, 487	تحديد الصدى	Disorder and order, 424, 426	النظام وعدم النظام	and floating, 263, 266	الطفو
measuring, 541–45	قياس	Echolocation, 304	التيارات الدوامية	Dispersion, 671–73	التفريق اللوني	of universe, 940–41	عمق المجال
microscopic view of, 509–10	منظر مجهري	Eddy currents (eddies), 268,		Displacement, 20–21, 37,	إزاحة	Depth of field, 699	
and Ohm's law, 498–500	وقانون أوم	594–95		46–47, 50–53		Derived quantity, 10	كميات اشتقاقية (مشتقة)
peak, 506–7	قمة	Edison, Thomas, 485	توماس أديسون	in vibrational motion, 288		Derived units, SI (see inside front cover)	وحدات اشتقاقية
produced by changing magnetic field, 584 ff	ينتج عن تغير المجال المغناطيسي	Effective dose, 878	الجرعة الفعالة	of wave, 314		Destructive interference,	تداخل هدام
produces magnetic field, 557	ينتج مجالاً مغناطيسياً	Effective values, 507	القيم الفعالة	Displacement current, 617		308–9, 310, 335–36, 668	
rms, 507	جذر متوسط المربع	Efficiency, of heat engine, 160,	فعالية المحرك الحراري	Dissipative forces, 156–58		Detectors, 627	كواشف
Electric dipole, 455, 479–80, 818	ثنائطي كهربائي	418		Dissociation energy, 813		of particles and radiation,	للجسيمات والإشعاع
Electric energy, 470–87	طاقة كهربائية	Carnot, 420	كارنوت	Distances, astronomical,		856–58	
production of, 430	إنتاج	Einstein, Albert, 3, 353, 727–49,	ألبرت اينشتاين	924–25		Detergents, 277	ملوثات
storage of, 484–85	تخزين	758, 871, 914, 926		Distortion (lenses), 710		Determinism, 792–93	التحديد
Electric field, 450–54	مجال كهربائي	EKG, 487		Diverging lens, 647, 648, 650,		Deuterium, 864, 868, 872,	دوتيريوم
and conductors, 456–57	والموصلات	Elastic collisions, 175–77	تصادمات مرنة	653		873–74	
Coulomb's law to determine, 458	قانون كولوم	Elastic limit, 237	حد المرونة	Diving, spins in, 214		Deuteron, 864	ديوترون
in dielectric, 482–83	في العازلات	Elastic modulus, 238	معامل المرونة	DNA, 460–62, 679, 718, 818–21,		Dew point, 376	نقطة الندى
617–19	في موجات EM	and speed of sound, waves,	وسرعة الصوت، موجات	DNA		Diamagnetism, 574 ff	الديامغناطيسية
energy stored in, 485	الطاقة المخزنة	304		876, 881		Diamonds, 672	الأحجار الكريمة
and equipotential lines, 474–75	خطوط تساوي الجهد	Elastic potential energy, 147,	طاقة وضع المرونة	structure and replication of,		Diastolic pressure, 279	الضغط الدياستولي
Gauss's law to determine, 458	قانون غاوس	289		460–62		Dielectric constant, 482	ثابت العازلية
lines of, 454–56	خطوط المجال المغناطيسي	Elastic region, 237	المنطقة المرنة	Domains, magnetic, 573–75		Dielectric strength, 482	متانة العازل
magnetic field produced by changing, 616 ff	النتائج عن تغير المجال المغناطيسي	Elastic spring, 147	زنبرك مرن	Domes, 243–45		molecular description of, 483	وصف جزيئي
of point charge, 451	شحنة نقطية	Elasticity, 237–41	المرونة	Donor level, 828		Diffraction, 313–14, 665–66,	
produced by changing magnetic field or flux, 591, 617 ff	ينتج عن تغير التدفق المغناطيسي	Electric battery, 494–97,	بطارية كهربائية	Doorbells, 567		673–75, 711–18	حيود
relation to electric potential, 474	العلاقة مع الجهد الكهربائي	520–21		Doping, of semiconductors, 827–28		by circular apertures, 711–13	بواسطة فتحات دائرية
Electric field lines, 454–56	خطوط المجال الكهربائي	Electric cell, 494–95	خلية كهربائية	حقن غرس أشباه الموصلات		of electrons, 767	للإلكترونات
Electric flux, 457–58, 617	التدفق الكهربائي	Electric charge, 439 ff	شحنة كهربائية	Doppler blood-flow meter, 341		of light, 665–66, 673–75	للضوء
Electric force, 439 ff	القوة الكهربائية	accelerating, gives rise to EM wave, 619	التسارع يؤدي إلى موجة كهرومغناطيسية	Doorbells, 567		as limit to resolution, 711–13	كحد للتحليل
Coulomb's law for, 444–47	قانون كولوم	in atom, 441	في الذرة	Doppler effect, 338–42, 930		of matter, 767	للمادة
Electric field (cont.)	المجال الكهربائي	calculating, 535	حساب	for light, 341–42		by single slit, 673–75	لفتحة منفردة
relation to electric potential, 474	العلاقة مع الجهد الكهربائي	conservation of, 440–41, 523, 528–29, 848, 898	حفظ	Doppler, J. C., 338 ff		of water waves, 313–14	لموجات الماء
Electric field lines, 454–56	خطوط المجال الكهربائي	of electron, 445, 754–56	للإلكترون	Doppler techniques in medicine, 341		X-ray, 717–18	للأشعة السينية
Electric flux, 457–58, 617	التدفق الكهربائي	elementary, 445	أولي	طرق دوبلر في الطب		Diffraction equation, 674	معادلة الحيود
Electric force, 439 ff	القوة الكهربائية	induced, 442–43	تأثيري	715		Diffraction grating, 676–78	محززة الحيود
Coulomb's law for, 444–47	قانون كولوم	motion of in magnetic field,	حركة في مجال مغناطيسي	Diffraction limit, for resolution, 715		Diffraction pattern (defn), 673	حد الحيود، للتحليل
in molecular biology, 460–62, 479, 818–21	في علم الحياة الجزيئي	560–63		of circular opening, 711–13		of electrons, 767	لفتحة دائرية
Electric generator, 473, 520, 584, 592–93	مولد كهربائي	point, 446, 450–51, 476–79	نقطة	of single slit, 673–75		of light, 665–66, 673–75	للإلكترونات
Electric hazards, 538–41	أضرار كهربائية	quantization of, 445	تكميم	X-ray, 717–18		as limit to resolution, 711–13	للضوء
Electric motor, 571–72	محرك كهربائي	”test,” 450	دائرة كهربائية	Diffraction spot, 673, 712		of matter, 767	بقعة الحيود
counter emf in, 593–94	قوة دافعة عكسية	Electric circuit	تيار متناوب	Diffuse reflection, 633		by single slit, 673–75	انعكاس غير منتظم
Electric potential, 470–87 (see also interference)	Potential difference	ac, 506–8, 603–8	كامل	Diffusion, 376–78		Diffraction equation, 674	معادلة الحيود
of dipole, 479–80	فرق الجهد	complete, 496, 497	تحتوي مقاومات تيار مباشر رقمي تأريخ	Diffusion constant, 377		for light, 341–42	معدلة الانتشار
relation to electric field, 474	ثنائطي	containing capacitors, 533–35, 603–8	قوانين كيرشوف	Diffusion equation, 377		Doppler, J. C., 338 ff	المعادلة الرقمية
of single point charge, 476–79	العلاقة مع المجال الكهربائي	containing resistors, 498 ff, 520–45	LC	Doppler weather forecasting, 341		Doppler techniques in medicine, 341	بيانات رقمية
Electric power, 502–5	شحنة منفردة	dc, 493 ff, 520–45	LR	التنبؤ الجوي لظاهرة دوبلر		طرق دوبلر في الطب	نمط الحيود
in ac circuits, 606	قدرة كهربائية	digital, 831	LRC	جرعة		of electrons, 767	لفتحة دائرية
in household circuits, 506–7	في الدارات المنزلية	grounding, 539–41	LRC	مقياس الجرعات		of light, 665–66, 673–75	للإلكترونات
transmission, 595–97	نقل	household, 505	LRC	تجربة الشق المزدوج للإلكترونات		as limit to resolution, 711–13	للضوء
Electric power generation, 430–31	توليد القدرة الكهربائية	integrated, 830–31	LRC	في الضوء		of matter, 767	للمادة
Electric shocks, 538–41	الصددمات الكهربائية	and Kirchhoff's rules, 528 ff	LRC	ظاهرة (دوبلر)		by single slit, 673–75	لفتحة منفردة
Electrical shielding, 457	العزل الكهربائي	LC, 608, 627	LRC	في الضوء		X-ray, 717–18	للأشعة السينية
Electricity, 439–545, 584 ff, 615 ff	الكهرباء	LR, 602–3	LRC	القيادة حول منحني		Diffraction spot, 673, 712	بقعة الحيود
Gauss's law, 457–59	قانون غاوس	LRC, 606–7	LRC	خلية جافة		Diffuse reflection, 633	انعكاس غير منتظم
static, 440–41	سكوني	open, 496	LRC	الجليد الجاف		Diffusion, 376–78	الانتشار
		rectifier, 829	LRC	الإزدواجية، موجة - جسيم		Diffusion constant, 377	ثابت الانتشار
		resonant, 608	LRC			Diffusion equation, 377	معادلة الانتشار
		time constants of, 536, 602	LRC			Digital camera, 697	الكاميرا الرقمية
		Electric current, 493 and ff	LRC			Digital circuits, 831	دارات رقمية
		alternating (ac), 506–8, 603–8	LRC			Digital information, 598	بيانات رقمية
		conduction (defn), 617	LRC			Digital meter, 544–45	مقياس رقمي
		conventional (defn), 497	LRC			Diodes, 828–30	الثنائطيات
		direct (dc) (defn), 506	LRC			Diopter, 648	ديوبتر
		dicement, 617	LRC			Dipole:	ثنائطي
		hazards of, 538–41	LRC			electric, 455, 479–80, 818	كهربائي
		induced, 584	LRC			magnetic, 570	مغناطيسي
			LRC			Dipole bonds, 818–19	روابط قطبية
			LRC			Dipole moment, 479	عزم ثنائطي
			LRC			Dipole-dipole bonds, 818	روابط قطبية - قطبية
			LRC			Dipole-induced dipole bonds,	روابط قطبية تأثيرية
			LRC			818	
			LRC			Dirac, P.A. M., 795	ديراك
			LRC			Direct current (dc) (defn), 506 (see also Electric current)	تيار مباشر
			LRC			Direct proportion, A-1	تناسب ثابت
			LRC			Discharge tube, 754, 771	أنبوب تفريغ

Glucos, 890, 897, 906–7	Galilean transformation, A-23–A-26	van der Waals, 817–21 weak, 128, 841 ff, 846, 897 ff	فان دير والز ضعيف	Florence cathedral, 245	كاتدرائية فلورنسا
Gophers, air supply, 274	Galilean velocity transformations, A-2, A-24–A-25	work done by, 137 ff	الشغل الناتج عن	Flow of fluids, 268–74	جريان الموائع
GPS, 17 pr, 134 pr, 739	Galilean-Newtonian relativity, A-23–A-24, A-27–30, A-72	Force diagram, 84 ff, 228	مخطط القوة	laminar (defn), 268	خط الجداول
Gradient: concentration, 377	Galileo, 2, 19, 31–32, 54–55, 73–74, 297, 354, 622, 633, 706 fn, 708, 727, 728, 742, 915	Force pump, 278	مضخة	in tubes, 275–76	في أنابيب
temperature, 396	نسبية غاليليو - نيوتن	Forced convection, 397	الحمل القسري	turbulent, 268	اضطرابي
velocity, 27	جاليليو	Forced vibrations, 299	الاهتزاز القسري	Flow rate, 268–69, 275	معدل الجريان
Glashow, S., 919	Galvani, Luigi, 4, 494	Formulas, mathematical (see in cover)	side back	Fluids, 255–85 (see also Gases)	
Glasses, eye, 701–4	Galvanometer, 541–44, 571	Forward biased diode, 828	صغير رياضية	longitudinal wave speed in, 304	موانع سرعة الموجة الطولية فلورة
Global positioning system (GPS), 739	Gamma camera, 881	Fossil-fuel power plants, 430, 431, 592	ثنائي القطب منحااز للأمام	Fluorescence, 802–3	
Global warming, 430	Gamma decay, 842, 847–48	Foucault, Jean, 666–67	محطات وقود أحفورية	Fluorescent light bulbs, 803	
Global warming, 430	Gamma rays, 620, 842, 847–48	Four-dimensional space-time, 742, 928	فوكولت، جين	Flux:	
Glueballs, 918 fn	Gamow, George, 726, 934	Four-stroke-cycle engine, 417	حيز رباعي الأبعاد - الزمن	electric, 617	كهربائي
Gluino, 922	Gas constant, 364	Fourier analysis, 334	تحليل فوريير	magnetic, 586, 591	مغناطيسي
Gluons, 902, 909, 918–19	Gas lasers, 805	Four-stroke-cycle engine, 417	محرك الأشواط الأربعة	Flying buttress, 244	دعامة (كثف)
Gophers, air supply, 274	Gas laws, 361–67	Fovea, 701	نقرة	FM radio, 627	طائرة FM راديو
فهود، سناجب الأرض، مخزون الهواء	Gas tank overflow, 359	Fractions (see inside back cover)	أجزاء تقصف	Focal length, 636, 641, 648, 650–51, 656	البعد البؤري المستوى البؤري
Gradient: concentration, 377	Gases, 255, 353–54, 361–73, 410–14	Fracture, 237, 241–43	الغازات	Focal plane, 648	
temperature, 396	change of phase, 371–73, 391–92	Frame of reference (see Reference frames)	تغير الطور	Focal point, 636, 641, 647	
velocity, 274	definition, 255, 353, 372	Free fall, 124	تعريف	Focus, 636	النقطة البؤرية
Gram (unit), 9, 76	ideal, 363–67	Free space, permittivity of, 445	مثالي	Focusing, of camera, 698–99	البؤرة
Grand unified era, 949	light emitted by, 771–73	Free-body diagram, 84 ff, 228	الضوء المنبعث	Football, 58, 61, 66 pr, 67 pr	تبنير الكاميرا
Grand unified theory, 128, 920–21	molar specific heats for, A-20–A-21	Freedom, degrees of, A-22	الحرارة النوعية	Foot-pound (unit), 137, 143	كرة قدم
النظرية الموحدة العظمى	real, 371–73	Freezing point (defn), 355 fn, 373	المولية	Forbidden energy gap, 825	وحدة Esu
Graphical analysis:	work done by, 410–14	table of, 392	حقيقي	Forbidden transition, 797,803 fn	فجوة الطاقة الممنوعة
تحليل تخطيطي	Gauge bosons, 901, 905, 907	beat, 337	الشغل المبذول	Force, 72–105, (defn, 73, 76),128	انتقال ممنوع (محظور)
للحركة الخطية	Gauge pressure, 259	carrier, 626	للعمل	Electric force; Gravitational force)	(see also
of linear motion, 36–37	Gauge theory, 907	cyclotron, 892	محظوظ الجسم الحر	buoyant, 263–67	قوة (قوة جاذبية)
for work, 141	Gauges, pressure, 260–62	fundamental, 310, 311, 330–34	درجات الحرية	centrifugal, 110	قوة طفو
Grating, diffraction, 676–78	Gauss, Karl Friedrich, 457	infrasonic, 324	نقطة التجمد	centripetal, 109	طرد مركزي
محززة، حبيد	Gauss' Law, 457–59, 616	of light, 620	قوة التجمد	color, 906–8	مركزية
Gravitation, universal law of, 117–20, 445, 938	Gauss (unit), 559	natural, 299, 310	انتقال ممنوع (محظور)	conservative, 148 ff	لون
قانون الجذب الكوني	Gay-Lussac, Joseph, 363	resonant, 299, 310, 329, 608	انتقال ممنوع (محظور)	contact, 81, 128, 450	محافظة
Gravitational collapse, 941	Gay-Lussac's law, 363	of rotation, 200	انتقال ممنوع (محظور)	Coriolis, A-18–A-19	تماس
انهيار جذبي	Geiger counter, 856–57	ultrasonic, 343	قوة التجمد	Coulomb (defn), 447 (see also Electric force)	كوريوليس
Gravitational constant, 119	Gell-Mann, M., 904	of vibration, 286	قوة التجمد	Force, 72–105, (defn, 73, 76),128	كولومب
ثابت الجذب	General theory of relativity, 914, 926–29	of wave, 302, 305, 306–7	قوة التجمد	Electric force; Gravitational force)	مضبوطة
Gravitational field, 456, 938–41	Generator, electric, 430, 473, 520, 584, 592–93	Frequency modulation (FM), 627	قوة التجمد	buoyant, 263–67	مرنة
مجال الجاذبية	Genetic code, 820	Fresnel, Augustin, 673	قوة التجمد	centrifugal, 110	كهربائية
Gravitational force, 80–83, 117–28, 909, 938–41	Genetic damage, 876, 878	Friction, 73–74, 90–95, 112–14	قوة التجمد	color, 906–8	محافظة
قوة الجذب	Geodesic, 928	coefficients of, 90, 91	قوة التجمد	conservative, 148 ff	تماس
Gravitational mass, 938–39	Geological time scale dating, 854–55	kinetic, 90 ff	قوة التجمد	contact, 81, 128, 450	كوريوليس
كتلة الجذب	Geometric optics, 632–56, (defn, 632)	in rolling, 90, 211–12	قوة التجمد	Coriolis, A-18–A-19	كوريوليس
Gravitational potential energy, 144–45	Geometry, plane, A-7–A-8 (see back cover)	static, 90, 91–92, 211–12	قوة التجمد	Coulomb (defn), 447 (see also Electric force)	كولومب
طاقة الجاذبية الكامنة	Geometry (review), A-7–A-8	Fringes, interference (defn), 668	قوة التجمد	dissipative, 156–58	مضبوطة
Gravitational slingshot effect, 193 pr	Geophysical applications, 122	Frisch, Otto, 866	قوة التجمد	elastic, 147, 237–41	مرنة
أثر المقلع الجاذبي	Geosynchronous satellite, 123	Full-wave rectifier, 829	قوة التجمد	electric, 439 ff	كهربائية
جراقيون	Germanium, 826, 827	Fundamental constants (see inside front cover)	قوة التجمد	electromagnetic, 128, 895 ff	كهرومغناطيسية
Graviton, 909, 922	Germer, L. H., 767	Fundamental frequency, 310, 311, 330–34	قوة التجمد	in equilibrium, 226–55	في التزان
جراقيون	GeV (see Electron volt (unit))	Fuse, 505–6	قوة التجمد	exerted by inanimate objects, 79	نتيجة عن أجسام جامدة
جراقيون	جيجا إلكترون فولت (وحدة)	Fusion bomb, 874	قوة التجمد	Force, 72–105, (defn, 73, 76),128	قوة (قوة جاذبية)
جراقيون	جلاس	Fusion, heat of, 392	قوة التجمد	Electric force; Gravitational force)	قوة طفو
جراقيون	Glashow, S., 907	Fusion, nuclear, 871–75	قوة التجمد	buoyant, 263–67	طرد مركزي
جراقيون	Glasses, eye, 701–4	in stars, 872, 873, 921, 938	قوة التجمد	centrifugal, 110	مركزية
جراقيون	نظارات، نظر	Galaxies, 915–18, 940	قوة التجمد	color, 906–8	لون
جراقيون	نظارات، نظر	clusters, 917–18	قوة التجمد	conservative, 148 ff	محافظة
جراقيون	نظارات، نظر	mass of, 916	قوة التجمد	contact, 81, 128, 450	تماس
جراقيون	نظارات، نظر	Galilean telescope, 708	قوة التجمد	Coriolis, A-18–A-19	كوريوليس
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Coulomb (defn), 447 (see also Electric force)	كولومب
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	dissipative, 156–58	مضبوطة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	elastic, 147, 237–41	مرنة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	electric, 439 ff	كهربائية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	electromagnetic, 128, 895 ff	كهرومغناطيسية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	in equilibrium, 226–55	في التزان
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	exerted by inanimate objects, 79	نتيجة عن أجسام جامدة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Force, 72–105, (defn, 73, 76),128	قوة (قوة جاذبية)
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Electric force; Gravitational force)	قوة طفو
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	buoyant, 263–67	طرد مركزي
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	centrifugal, 110	مركزية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	color, 906–8	لون
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	conservative, 148 ff	محافظة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	contact, 81, 128, 450	تماس
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Coriolis, A-18–A-19	كوريوليس
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Coulomb (defn), 447 (see also Electric force)	كولومب
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	dissipative, 156–58	مضبوطة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	elastic, 147, 237–41	مرنة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	electric, 439 ff	كهربائية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	electromagnetic, 128, 895 ff	كهرومغناطيسية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	in equilibrium, 226–55	في التزان
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	exerted by inanimate objects, 79	نتيجة عن أجسام جامدة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Force, 72–105, (defn, 73, 76),128	قوة (قوة جاذبية)
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Electric force; Gravitational force)	قوة طفو
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	buoyant, 263–67	طرد مركزي
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	centrifugal, 110	مركزية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	color, 906–8	لون
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	conservative, 148 ff	محافظة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	contact, 81, 128, 450	تماس
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Coriolis, A-18–A-19	كوريوليس
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Coulomb (defn), 447 (see also Electric force)	كولومب
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	dissipative, 156–58	مضبوطة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	elastic, 147, 237–41	مرنة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	electric, 439 ff	كهربائية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	electromagnetic, 128, 895 ff	كهرومغناطيسية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	in equilibrium, 226–55	في التزان
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	exerted by inanimate objects, 79	نتيجة عن أجسام جامدة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Force, 72–105, (defn, 73, 76),128	قوة (قوة جاذبية)
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Electric force; Gravitational force)	قوة طفو
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	buoyant, 263–67	طرد مركزي
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	centrifugal, 110	مركزية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	color, 906–8	لون
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	conservative, 148 ff	محافظة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	contact, 81, 128, 450	تماس
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Coriolis, A-18–A-19	كوريوليس
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Coulomb (defn), 447 (see also Electric force)	كولومب
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	dissipative, 156–58	مضبوطة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	elastic, 147, 237–41	مرنة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	electric, 439 ff	كهربائية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	electromagnetic, 128, 895 ff	كهرومغناطيسية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	in equilibrium, 226–55	في التزان
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	exerted by inanimate objects, 79	نتيجة عن أجسام جامدة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Force, 72–105, (defn, 73, 76),128	قوة (قوة جاذبية)
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Electric force; Gravitational force)	قوة طفو
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	buoyant, 263–67	طرد مركزي
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	centrifugal, 110	مركزية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	color, 906–8	لون
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	conservative, 148 ff	محافظة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	contact, 81, 128, 450	تماس
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Coriolis, A-18–A-19	كوريوليس
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Coulomb (defn), 447 (see also Electric force)	كولومب
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	dissipative, 156–58	مضبوطة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	elastic, 147, 237–41	مرنة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	electric, 439 ff	كهربائية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	electromagnetic, 128, 895 ff	كهرومغناطيسية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	in equilibrium, 226–55	في التزان
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	exerted by inanimate objects, 79	نتيجة عن أجسام جامدة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Force, 72–105, (defn, 73, 76),128	قوة (قوة جاذبية)
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Electric force; Gravitational force)	قوة طفو
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	buoyant, 263–67	طرد مركزي
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	centrifugal, 110	مركزية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	color, 906–8	لون
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	conservative, 148 ff	محافظة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	contact, 81, 128, 450	تماس
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Coriolis, A-18–A-19	كوريوليس
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Coulomb (defn), 447 (see also Electric force)	كولومب
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	dissipative, 156–58	مضبوطة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	elastic, 147, 237–41	مرنة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	electric, 439 ff	كهربائية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	electromagnetic, 128, 895 ff	كهرومغناطيسية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	in equilibrium, 226–55	في التزان
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	exerted by inanimate objects, 79	نتيجة عن أجسام جامدة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Force, 72–105, (defn, 73, 76),128	قوة (قوة جاذبية)
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Electric force; Gravitational force)	قوة طفو
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	buoyant, 263–67	طرد مركزي
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	centrifugal, 110	مركزية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	color, 906–8	لون
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	conservative, 148 ff	محافظة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	contact, 81, 128, 450	تماس
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Coriolis, A-18–A-19	كوريوليس
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	Coulomb (defn), 447 (see also Electric force)	كولومب
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	dissipative, 156–58	مضبوطة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	elastic, 147, 237–41	مرنة
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	electric, 439 ff	كهربائية
جراقيون	نظارات، نظر		قوة التجمد	electromagnetic, 128, 895 ff	كهرومغناطيسية

Inertial reference frame, 74, 727, A-16–A-17	الكتلة القصورية	Ice, 360–61, 373, 393, 422	ثلج	Helium nuclei, 950	نواة هيليوم	Hadron, 914, 916–17, 949	هادرون
Instantaneous angular acceleration, 197	إطار مرجعي قصوري	Ice skating, action-reaction pair in, 78	تزلج على الجليد، زوج الفعل ورد الفعل في الغاز المثالي	Helium-neon laser, 805	ليزر هيليوم نيون	Hadron era, 949	حقبة الهادرون
Instantaneous angular velocity, 196	تسارع زاوي لحظي	Ideal gas, 368	الغاز المثالي	Henry, Joseph, 584, 600	هنري جوزيف	Hahn, Otto, 878	هان أوتو
Instruments electrical, 541–45	سرعة زاوية لحظية	internal energy of, 368, 386–87	الطاقة الداخلية لـ	Henry (unit), 600	هنري (وحدة)	Hair dryer, 508	مجفف الشعر
musical, 329–35	آلات كهربائية	Ideal gas law, 363–67	قانون الغاز المثالي	Hertz, Heinrich, 619–20	هيرتز، هاينز تشر	Half-life, 848 ff	نصف العمر
Insulation, thermal, 396–97	موسيقية	Identities, trigonometric, A-7 (see also inside back cover)	متوافقات، علم المتثلثات (أنظر أيضاً داخل الغلاف الخلفي)	Hertz (unit), 200, 288	هيرتز (وحدة)	Half-wave rectification, 829	مقوم نصف موجة
Insulators:	عزل، حراري	Image distance, 634, 638	بعد الصورة	Russell diagram, 932 ff	مخطط هابر تشر برنج	Halley's comet, 133 pr	شهاب هالي
electrical, 441–42, 825	عوازل كهربائية	Image formation, 637	تشكل الصورة	Higgs boson, 920	- روسيل	Halogens, 799	هالوجين
thermal, 396	حرارية	Images, 634	تصوير	Higgs field, 920	هيجز بوزون	Hammer:	مدقة
Integrated circuits, 830–31	دارات تكاملية	CAT scan, 719	مسح طبقي	High jump, 185	قفز عالي	action-reaction pair in striking, 78	الفعل ورد الفعل في التصادم
Intensity:	شدة:	fiber optic, 645–46	ليف ضوئي	High-energy physics, 901–22	فيزياء الطاقة العالية	work done by, 143	شغل مبذول بواسطة
of EM waves, 624	الأمواع الكهرومغناطيسية	formed by lens, 647–50	تشكلت بواسطة عدسة	High-temperature superconductors, 510	الموصلات المثالية عالية درجة الحرارة	Hard drive and bit speed, 200	القرص الصلب وسرعة المعلومة
of general waves, 305, 306–7	للأمواج العامل	formed by plane mirror, 633–35	تشكلت بواسطة مرآة مسطحة	Highway buckling, 361	ربط حزام الأمان	Harmonic motion:	حركة توافقية
of light, 671	للضوء	formed by spherical mirror, 635–42	تشكلت بواسطة مرآة دائرية	Highway mirages, 667	على الطرق السريعة	damped, 298	خامدة
of sound, 325–27	للصوت	NMR, 894–96	دقة الصورة	Hiking trail, convection, 398–99	السراب	forced, 299	مرغمة
Intensity level, 325, 328–29	مستوى الشدة	PET and SPET, 893–94	حقيقي	Holes (in semiconductor), 826, 827	مسار الرحلات السيارة، الحمل	simple, 287–97	بسيطة
Interference, 308–9, 335–36, 668 ff	التداخل	picture sharpness, 700	طبي	Hologram and holography, 806–7	تقوب (في شبه الموصل)	Harmonics, 310, 311, 330 fn, 332–33	التوافقات
constructive, 308–9, 335–36, 668	بناء	real (defn), 634, 637, 649	حقيقي	Hooke and holography, 806–7	التقوب والتصوير التجسيمي	Hazards of electricity, 538–41	الأخطار الكهربائية
destructive, 308–9, 310, 335–36, 668	هدامة	tomographic, 719	طبي	Hooke, Robert, 237, 680 fn	هوك، روبرت	Head, magnetic, 598	رأس مغناطيس
of electrons, 788–89	للإلكترونات	virtual (defn), 634, 640, 650	(تعريف) تخيلي	Hooke's law, 147, 237, 287 ff	قانون هوك	Hearing	السمع
668 ff	للأمواج الصوتية	X-ray, 718–19	أشعة إكس	Horsepower (unit), 158	قانون هوك	in humans, 325, 328–29	عند البشر
of sound waves, 335–37	للأمواج الصوتية	Imaging:	تصوير	Hot wires, 540	القوة الحصانية (وحدة)	threshold of, 329	العتبة
thin film, 679–83	أغشية رقيقة	medical, 718–20, 892–93	طبي	H-R diagram, 932 ff	أسلاك كهربية	Heart, defibrillator for, 538 fn	قلب، موقف الضربات
in time, 336–37	خلال الزمن	thermography, 402	ثيرموغرافي	Hubble age, 945	مخطط H-R	Heart, human, 278–79	قلب، بشري
of water waves, 309	للأمواج المائية	ultrasound, 343–45	فوق صوتي	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	and blood flow, 269, 275–76	وانسياب الدم
of waves on a string, 308	للأمواج على الوتر	Impedance, 606–7	مقاومة	Hubble space telescope, 134 pr, 713, 935	تلسكوب هبل الفضائي	ECG, 487	منظم ضربات القلب
Interference fringes, 668 ff	أهداب متداخلة	Impulse, 173–75	نبضة	Hub-ble space telescope, 134 pr, 713, 935	ثابت هبل	as pump, 278–79	مضخة
Interference microscope, 716	مايكروسكوب تداخل	Incidence, angle of, 308, 312, 633, 643	زاوية السقوط	Hubble's constant, 943	Hub-ble space telescope, 134 pr, 713, 935	Heartbeats, number of, 13	ضربات القلب، عدد
Interferometer, 684	جهاز التداخل	Incident wave, 308	الموجة الساقطة	Hubble's law, 942–54 and ff	قانون هبل	Heat, 384–407, (defn, 385)	حرارة
Internal combustion engine, 416–17	آلة احتراق داخلي	Inclines, motion on, 94–95, 211–12	سطوح مائلة، الحركة على	Hubble's law, 942–54 and ff	قانون هبل	compared to work, 408	مقارنة بالشغل
Internal conversion, 847–48	التحويل الداخلي	Incoherent sources of light, 671	671	Human body:	الجسم البشري	conduction, convection, radiation, 395–402	إيصال، حمل، إشعاع
Internal energy, 386–87, 408–15	الطاقة الداخلية	Indeterminacy principle (see Uncertainty principle)	مبدأ اللاتحديد (أنظر مبدأ عدم اليقين)	balance and, 236	الانتران في	distinguished from internal energy and temperature, 386	مميزة عن الطاقة الداخلة ودرجة الحرارة
Internal reflection, 645–46	الانعكاس الداخلي	Index of refraction, 642, 672	معامل الانكسار	center of mass for, 184–85	مركز الكتلة لـ	in first law of thermodynamics, 408 ff	في القانون الأول في الديناميكا
Internal resistance, 521	المقاومة الداخلية	Induced charge, 584–85	شحنة محاثية	energy, metabolism of, 414–15	طاقة، أيض	as flow of energy, 385–86	انسياب الطاقة
Interneuron, 511	النيورون الداخلي	Induced electric charge, 442–43	شحنة كهربائية محاثية	radiative heat loss of, 400	الطاقة الضائعة المشعة لـ	and human metabolism, 414–15	الأيض البشري
Intervertebral disc, 235	لوح بين الفقرات	Induced emf, 584 ff	قوة محرركة كهربائية محاثية	temperature, 356, 395	درجة الحرارة	latent, 391–95	كامن
Intrinsic semiconductor, 826, 827	شبه موصل ذاتي	in generator, 592–95	في المولد	Human ear, 325, 328–29	أذن البشرية	loss through windows, 396	فقد خلال النوافذ
Inverse proportion, A-1	تناسب عكسي	in transformer, 595–97	في المحول	Humidity, 375–76	رطوبة	lost by body, 399, 400	الفقد من الجسم
Inverted population, 803	أيون (تعريف)	Inductance, 600–601	محث	partial pressure and, 375–76	نسبة إلى	mechanical equivalent of, 385	المكافئ الميكانيكي
Ion (defn), 441	أيون (تعريف)	in ac circuits, 603–4	متبادل	relative, 375–76	نسبة إلى	specific, 387–88	نوعي
in axons, 511	أكسون	mutual, 600	متبادل	Huygens, Christiaan, 665	هايجين كريستان	Heat capacity, 405 pr (see also Specific heat)	السعة الحرارية
Ionic bonds, 814, 815, 817, 824	الرابطة الأيونية	self, 600–601	نفس	Huygens' principle, 665–66	مبدأ هايجيني	Heat death, 426–27	الموت الحراري
Ionization energy, 775, 778	طاقة التأين	solenoid, 601	سولينويد	Hydraulic brakes, 260	مكابح هيدروليكية	Heat engines, 416–21, 430	الآلة الحرارية (كفاءة)
Ionizing radiation (defn), 876	الإشعاع الأيوني	Induction:	الحث	Hydraulic lift, 260	مصعد هايدروليكي	efficiency of, 418	فرق درجة الحرارة
IR radiation, 399, 620, 671	إشعاع تحت أحمر	electromagnetic, 584 ff	الكهرباء المغناطيسية	Hydrodynamics, 268 ff	الديناميكا المائية	temperature difference and, 417	فرق درجة الحرارة
Iris, 701	حرقة العين	Faraday's law of, 586 ff	قانون فارادي	Hydroelectric power, 431	القدرة المائية	and thermal pollution, 430	التلوث الحراري
Irreversible process (defn), 419	عملية غير مقلوبة	pulse, 595	قانون فارادي	Hydrogen atom:	ذرة الهيدروجين	Heat of fusion, 392	حرارة الانصهار
Isobaric process, 411	عملية أحادية الضغط (عند ضغط ثابت)	Induction stove, 588	فرن حتي	Bohr theory of, 773–79	نظرية بور لـ	Heat of vaporization, 392	حرارة التبخر
Isochoric (isovolumetric) process, 411	عملية أحادية الحجم (عند حجم ثابت)	Inductive reactance, 604	مقاومة محاثية	ground state and excited state of, 775	الحالة الأرضية والمثارة لـ	Heat pump, 423	مضخة حرارية
Isomer, 847–48	أوسومر	Inductor, 600 ff	محاث	mass of, 367	كتلة	Heat reservoir (defn), 410	خزان حراري
Isotherm, 410	خط أحادي درجة الحرارة	Inelastic collisions, 175–76, 178–79	تصادمات غير مرنة	quantum mechanics, 794–97	الميكانيكا الكمية	Heat transfer, 395–402	انتقال الحرارة
Isothermal process, 410, 412	عملية عند درجة حرارة ثابتة	Inertia, 74	القصور	spectrum of, 771–73	الغنيبة الهيدروجينية	Heating, convection, house, 398	تسخين، حمل، بيت
		law of, 74	قانون	Hydrogen bomb, 886	الرابعة الهيدروجينية	Heating duct, 269	مجرى حراري
		moment of, 206 and ff, (defn, 207)	عزم لـ (تعريف)	Hydrogen molecule, 813–16, 823	جزيئ هيدروجيني	Heavy elements, 934	العناصر الثقيلة
		rotational, 206–8	دوراني	Hydrometer, 266–67	عداد قياس مائي	Heavy water, 880	الماء الثقيل
		Inertial confinement, 887	قوى قصورية	Hyperopia, 702	طول البصر	Heisenberg uncertainty principle, 789–92	مبدأ (هاينزبرج) عدم اليقين
		Inertial forces, A-17		Hysteresis, 573–75	التخلفية	Heisenberg, Werner, 787, 790	هاينزبرغ ويرنر
		Inertial mass, 938–39		Hysteresis loop, 575	دائرة تخلفية		

Lubricants, 73	دارة مواسع محات مقاومة مشحومات، مرنيات	gravitational deflection of, 927	انحراف الجاذبية لـ تحت الحمراء شدة الضوء لـ التداخل لـ	Lattice, 824	شبكة	Isotopes, 573, 836, A-12–A-15	نظائر
Lorentz transformation, A-25–A-26	تحول لورنتز	infrared (IR), 620, 671	intensity of, 671	Laue, Max von, 717	ماكس فون، لوي لورنس	mean life of, 850	متوسط العمر
Los Alamos laboratory, 883	مختبر لوس الاموس	interference of, 668–71	monochromatic (defn), 668	Laws, 4–5 (see also specific name of law)	قوانين (أنظر أيضاً اسم القانون تحديداً)	in medicine, 880–81	في الطب
Loudness, 323, 325, 328–29 (see also Intensity)	مستوى لـ	monochromatic (defn), 668	photon theory of, 758–61	LC circuit, 608, 627	دائرة مواسع - محات اهتزازات مواسع محات	Iterative technique, 720	تقنية مكررة
Loudspeaker, 295, 326, 335, 336, 501, 508, 572	مكبر صوت	polarized, 684–87	ray model of, 632 ff	LC oscillations, 608	شاشة بلورية سائلة تيارات	Jeweler's loupe, 705	عدسة المجهراتي
LR circuit, 602–3	دائرة محات مقاومة	reflection of, 632, 633 ff	refraction of, 642 ff	LCD screen, 688–89	رجل، كسر طول مناسب	Joints: expansion, 354	مفاصل التمدد
LRC circuit, 606–7	دائرة محات مقاومة مواسع	scattering of, 690	spectrum of visible, 671–73	Leakage current, 541	نموذج الأشعة لـ انعكاس الانحراف لـ تشتت لـ	human, forces in, 234–35	البشري، القوة داخل
Lubricants, 73	مشحومات، مرنيات	speed of, 8, 619, 622–23, 729–31, 743	speed of, 8, 619, 622–23, 729–31, 743	Leg, break, 174	الطيف المرئي سرعة فوق بنفسي غير مستقطب مرئي	Joule, James Prescott, 385	بريسكوت جيمس، جول
Luminosity, of stars and galaxies, 930 ff	سطوح، النجوم والمجرات	ultraviolet, 620, 671	ultraviolet, 620, 671	Length	ظلال	Joule (unit), 137, 143, 204 fn, 385	جول (وحدة)
Lyman series, 772, 776–77	سلسلة لايمان	unpolarized (defn), 684	unpolarized (defn), 684	proper, 740	معدلة لونياً مركب متصل	Jumping, impulse on landing after, 174–75	قفز، النبض عند الانزال بعد
Mach, Ernst, 342 fn	ماخ، ارنست	visible, 620, 671–73	visible, 620, 671–73	standard of, 8	مجموعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Junction diode, 828–29	صيغة كيلر بلانك
Mach number, 342	عدد ماخ	wave theory of, 664–95	wave theory of, 664–95	Length contraction, 740–41	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Junction rule (see Kirchhoff's rules)	القانون الثاني
Macroscopic (defn), 353	حالة جاهرية	wavelengths of, 620, 670	wavelengths of, 620, 670	Length contraction, 740–41	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Junction transistor, 830	تقني ترانزستوري
Magellanic clouds, 929 fn	غيوم ماجيلانية	wave-particle duality of, 765–68	wave-particle duality of, 765–68	converging, 647, 648, 653	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Jupiter, 133	المشتري
Magnet, 554–57, 573–75	مغناطيس	white, 670	white, 670	corrective, 701–4	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	K lines, 800	خطوط K
domains of, 573–75	حقول كهربائي دائم	Light bulb: fluorescent, 803	Light bulb: fluorescent, 803	diverging, 647, 648, 650, 653	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	K 2, cover, 10, 11	غلاف K2
electro-, 567	كهربائي	incandescent, 495	incandescent, 495	of eye, 701	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Kant, Immanuel, 917	كوان
permanent, 574	دائم	Light pipe, 646	Light pipe, 646	eyeglass, 701–4	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Kaon, 901	كاون
Magnetic confinement, 887	ولادة مغناطيسية	Light emitting diode, 830	Light emitting diode, 830	eyepiece, 706–7	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	K-capture, 847	اصطياد K
Magnetic damping, 610 pr	خمود مغناطيسي	Lightning, 470, 504	Lightning, 470, 504	focal length of, 648, 650, 651–52, 656	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Kelvin temperature scale, 355, 362–63	تدرج درجة الحرارة بالكلفن
Magnetic declination, 556	ميلان مغناطيسي	distance to, 323	distance to, 323	magnetic, 768	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Kelvin (unit), 362	كلفن (وحدة)
Magnetic dipole, 570	ثنائطي مغناطيسي	Light-year (unit), 915	Light-year (unit), 915	magnification of, 650–53, 704–8	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Kelvin-Planck statement of second law of thermodynamics, 421	البيان الثاني
Magnetic domains, 573–75	حقول مغناطيسية	Linac, 894	Linac, 894	normal, 701	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Kepler, Johannes, 125	كبلر
Magnetic field, 554–75	مجال مغناطيسي	Line spectrum, 678–79, 771	Line spectrum, 678–79, 771	objective, 706	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Keplerian telescopes, 706	تيليسكوبات كبلرية
of circular loop, 557	لدائرة دائرية	Linear accelerator, 894	Linear accelerator, 894	positive and negative, 651	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Kepler's laws, 125–28	قوانين كبلر
definition of, 558	تعريف لـ	Linear expansion, coefficient of, 357–58	Linear expansion, coefficient of, 357–58	power of (diopters), 648	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Kicked football, 58, 61, 66 pr, 67 pr	كرة مقذوفة
of, 568–69	من الأرض	Linear momentum (see Momentum)	Linear momentum (see Momentum)	resolution of, 711–13	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Kilocalorie (unit), 385	كيلو سعر (وحدة)
of Earth, 556	من الأرض	Linear velocity, 197, 199	Linear velocity, 197, 199	telephoto, 701	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Kilogram (unit), 9, 75	كيلو جرام (وحدة)
electric current produces, 557	تيار كهربائي ينتج في الموجة الكهرومغناطيسية	Linearly polarized light, 684	Linearly polarized light, 684	thin (defn), 647 ff	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Kilowatt-hour (unit), 164, 504	كيلو وات ساعة (وحدة)
in EM wave, 617–19	في الموجة الكهرومغناطيسية	Lines of force, 454–56	Lines of force, 454–56	used in combination, 654–55, 710 ff	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Kinematic equations, 27, 56, 201	معادلات الحركة
energy stored in, 602	طاقة مخزنة في	Liquefaction, 371	Liquefaction, 371	wide-angle, 701	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Kinematics: for rotational motion, 201–3	علم الحركة
force on electric charge and electric current, when in, 558–63	القوة على الشحنة الكهربائية والتيار الكهربائي، وهي داخل تحت قوة محرك كهربائية عند تغيير خطوط لـ	Liquid, 255, 353	Liquid, 255, 353	zoom, 701	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	translational motion, 19–71	الحركة الدورانية
lines of, 555	خطوط لـ	Liquid crystal display (LCD), 688–89	Liquid crystal display (LCD), 688–89	Lens aberrations, 710–11	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	for uniform circular motion, 106–9	الحركة الانتقالية حركة الدورانية المنتظمة
motion of charged particles in, 560–63	حركة الجسيمات المشحونة في	Liquid crystals, 256, 688–89	Liquid crystals, 256, 688–89	Lens elements, 711	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Kinetic energy, 141–44, 210–13, 744–47	النظرية الحركية في التصادمات
produced by changing electric field, 616 ff	أنتجت بواسطة مجال كهربائي متغير	Liquid scintillators, 857	Liquid scintillators, 857	Lens equation, 650–53	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	in collisions, 175–79	تعريف
produced by electric current, 557, 616–17	أنتجت بواسطة تيار كهربائي	Liquid-drop model, 866	Liquid-drop model, 866	in Newtonian form, 663 pr	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	definition, 142	جزئي
produces electric field, 558–59	ينتج مجال كهربائي	Liquid-in-glass thermometer, 355	Liquid-in-glass thermometer, 355	Lensmaker's equation, 656	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	molecular, 370	نسوي
electric current, emf, 584 ff, 616 ff	تيار كهرباء، قوة محرك كهربائية	Logarithms, A-10–A-11 (see also inside back cover)	Logarithms, A-10–A-11 (see also inside back cover)	Lepton era, 938	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	rotational, 210–13	دوراني
of solenoid, 567	للسولينويد	Long-range force, 841	Long-range force, 841	Lepton numbers, 899, 900	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	translational, 142 ff	انتقالي
of straight wire, 564	لسلك مستقيم	Longitudinal wave, 303 ff	Longitudinal wave, 303 ff	Leptons, 890, 895, 901, 904–5, 907, 908	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Kinetic friction, 90 ff	الاحتكاك الحركي
Magnetic field lines, 555	خطوط المجال المغناطيسي	Lookback time, 935	Lookback time, 935	Lever, 162 pr, 229	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Kinetic theory, 352, 367–71, 395	نظرية الحركية، مسلمتات
Magnetic flux, 586, 591	التدفق المغناطيسي	Loop rule (see Kirchhoff's rules)	Loop rule (see Kirchhoff's rules)	Lever arm, 203	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	postulates of, 368	كيرشوف
changing, produces electric field, 591	تغير، ينتج مجال كهربائي	Lorentz transformation, A-25–A-26	Lorentz transformation, A-25–A-26	Lid, opening when tight, 359	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Kirchhoff's rules, 528–31	قاعدة كيرشوف
Magnetic force, on electric current, 558–59	قوة مغناطيسية، على التيار الكهربائي	Los Alamos laboratory, 871	Los Alamos laboratory, 871	Life under ice, 360	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Lake, volume of, 12–13	بحيرة، حجم
on moving electric charge, 560–63	على الشحنة الكهربائية المتحركة	Loudness, 323, 325, 328–29 (see also Intensity)	Loudness, 323, 325, 328–29 (see also Intensity)	Lifetimes, 901, 902, 905 (see also Half-life)	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Laminar flow (defn), 268	انسداد صفائحي (تعريف)
Magnetic head, 598	رأس مغناطيسي	level of, 328	level of, 328	Lift, dynamic, 272–3	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Laminated armatures, 594	دروع صفائحية
Magnetic lens, 768	عدسة مغناطيسية	Loudspeaker, 295, 326, 335, 336, 501, 508, 572	Loudspeaker, 295, 326, 335, 336, 501, 508, 572	Light, 632–738	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Laminated iron cores, 595	لب حديدي صفائحي
Magnetic moment, 570	العزم المغناطيسي	LR circuit, 602–3	LR circuit, 602–3	coherent and incoherent	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Land, Edwin, 685	ادوين - لاند
Magnetic monopole, 555	قطب مغناطيسي أحادي	LRC circuit, 606–7	LRC circuit, 606–7	sources of, 671	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Landing, impulse on, 174–75	نيرة على اللانثانيدات
Magnetic permeability, 564, 574	الاحتمالية المغناطيسية			color of, and wavelength, 670, 671	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Lanthanides, 800	طابعة ليزرية
				diffraction of, 665–66, 673–75	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Laser printer, 463	ليزرات
				dispersion of, 671–73	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Lasers, 803–6	ليزرات
				Doppler effect for, 341–42	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية	Latent heats, 391–95	الحرارات الكامنة
				as electromagnetic wave, 619–22, 664 ff	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية		
				emission of, 632	مجمعة، لامة تصحيحي أسطواني مشتتة للعين نظارة طبية عدسة عينية		

Magellanic Clouds	917		
Magnet	554- 45, 573 - 75	مغناطيس	
Domains of a magnet	573- 75	حقول المغناطيس	
Electro – magnet	567	مغناطيس كهربائي	
Permanent magnet	574	مغناطيس دائم	
Magnetic confinement	875	حجز مغناطيسي	
Magnetic damping	610	تخامد مغناطيسي	
Magnetic declination	556	انحراف مغناطيسي	
Magnetic dipole	570	ثنائي القطب المغناطيسي	
Magnetic domains	573- 75	حقول مغناطيسية	
Magnetic field	554- 75	مجال مغناطيسي	
Magnetic field of circular loop	5 57	مجال مغناطيسي لحلقة دائرية	
Definition of magnetic field	55 8	تعريف المجال المغناطيسي	
Determination of magnetic field	5 68 – 69	تحديد المجال المغناطيسي	
Magnetic field of Earth	556	المجال المغناطيسي الأرضي	
In EM wave	617- 19	في موجة كهرومغناطيسية	
Energy stored in a magnetic field	6 02	الطاقة المخزنة في مجال مغناطيسي	
Induces emf when changing magnetic field	584	قوة دافعة كهربائية مسطحة تتجم عن تغير مجال مغناطيسي	
Magnetic field lines	555	خطوط المجال المغناطيسي	
Motion of charged particles in a magnetic field	560	حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي	
Magnetic field produced by changing electric field	616	مجال مغناطيسي ناتج من تغير مجال كهربائي	
Magnetic field produced by electric current	557, 616- 17	مجال مغناطيسي ناتج من تيار كهربائي	
Magnetic field of solenoid	5 67	المجال المغناطيسي لملف لولبي	
Magnetic field of straight wire	5 64	المجال المغناطيسي لسلك مستقيم	
Magnetic flux	586, 591	التدفق المغناطيسي	
Magnetic force	586, 591	القوة المغناطيسية	
Magnetic head	598	رأس مغناطيسي	
Magnetic lens	768	عدسة مغناطيسية	
Magnetic moment	570	عزم مغناطيسي	
Magnetic monopole	555	أحادي القطب المغناطيسي	
Magnetic permeability	564, 574	النفاذية المغناطيسية	
Magnetic poles	554- 55	أقطاب مغناطيسية	
Magnetic poles of earth	556	الأقطاب المغناطيسية للأرض	
Magnetic quantum number	795	عدد كمي مغناطيسي	
Magnetic resonance imaging	882- 84	التصوير بالرنين المغناطيسي	
Magnetic tape and discs	598	أشرطة وأقراص مغناطيسية	
Magnetism	554- 75	مغناطيسية	
Magnification		تكبير	
Magnification of Lens	650- 53	تكبير العدسة	
Magnification of microscope	7 09, 715	تكبير المجهر	
Magnification of mirror	638 – 39	تكبير المرآة	
Magnification of Telescope	7 06- 8	تكبير بالتلسكوب (بالمناظر)	
Magnifier	704 , 705	مكبر	
Magnifying glass	696, 704- 5	زجاج تكبير	
Magnifying mirror	640	مرآة تكبير	
Magnifying Power	705	قدرة التكبير	
Main sequence	919, 920	تسلسل رئيس	
Malus' Law	685	قانون مالوس	
Manhattan Project	871	مشروع مانهاتن	
Manometer	260 – 61	مانومتر	
Marconi, Guglielmo	626	جوجلييلمو ماركوني	
Mars	126 – 127	المريخ	
Mass	9, 75, 256, 744	كتلة	
Atomic mass	353, 836	كتلة ذرية	
Center of mass	182- 86	مركز الكتلة	
Critical mass	868	كتلة حرجية	
Mass and energy	744 – 47	كتلة و طاقة	
Mirror equation, 638–39		معادلة المرآة	
MKS system of units, 9		وحدات النظام (متر كيلو جرام ثانية)	
Mm Hg (unit), 261		ململمتر زئبق (وحدة)	
Models, 4–5		نموذج	
of particle, 19		لجسيم	
Moderator, 880		وسيط	
Modern physics, 1, (defn, 727)		فيزياء حديثة	
Modulation, 627		تغير في طبقة الصوت (تعديل)	
Modulus, elastic, 237–38		معامل المرونة	
Molar specific heats, A-20–A-21		الحرارة النوعية المولية للغازات	
for gases, A-20–A-21		للغازات	
of solids, A-22		للمواد الصلبة	
Mole, 363, 364		مول	
volume of, for gas, 364		حجم، للغاز	
Molecular biology and electric		forces,	
460–62, 818–21		الجزئي البيولوجي والكهربائي، القوى	
Molecular mass and molecular		weight, 353,	
353 fn		الكتلة الجزيئية والوزن الجزيئي	
Molecular rotation, 821–22		الدوران الجزيئي	
Molecular spectra, 821–23		الأطياف الجزيئية	
Molecular speeds, 370–71		السرعات الجزيئية	
distribution of, 371		توزيع	
Molecular vibration, 823		الاهتزاز الجزيئي	
Molecules, 353 fn, 812–15		الجزيئات	
bonding in, 812–15		الترباط في	
in breath, 367		في النفس	
diatomic, A-22		تثنائي	
kinetic energy of, 370		طاقة حركية	
potential-energy diagrams for,		815–17	
815–17		مخططات طاقة كامنة	
spectra, 821–23		الأطياف	
weak bonds between, 817–21		روابط ضعيفة بين	
Moment arm, 203		نزاع العزم	
Moment, magnetic dipole, 570		عزم، ثنائي قطب مغناطيسي	
Moment of a force, 204		عزم القوة	
Moment of inertia, 206 and ff, (defn, 207)		عزم القصور (تعريف)	
Momentum, 136, 167–93		زخم	
angular, 213–15		زاوي	
conservation of, 170 ff		حفظ	
of photon, 762–63		للفوتون	
relation of force to, 168–69		علاقة القوة بـ	
relativistic, 742–43, 747		نسبوي	
total, of systems of particles, 185–86		كلي، نظام جسيمي	
units of, 168		وحدات لـ	
Monochromatic aberrations, 710–11		انحرافات أحادية الموجة	
Monochromatic (defn), 668		أحادي طول الموجة (تعريف)	
Moon, 109, 118, 120, 141		قمر	
Morley, E. W., 730		مورلي	
Moseley, H. G. J., 801		موسيتلي	
Moseley plot, 801		مخطط موسيتلي	
Motion:		حركة:	
circular, 106–17		دائرية	
at constant acceleration, 26–44		عند تسارع ثابت	
damped harmonic, 298		توافقية خامة	
description of (kinematics), 19–71		وصف لـ (علم)	
dynamics of, 72 ff		الديناميكا لـ	
graphical analysis of linear, 36–37		تحليل تخطيطي خطي لـ	
Mach, Ernst	342	أرنست ماخ	
Mach number	342	عدد ماخ	
Macroscopic	353	جاهري	
Macrostate	428	حالة جاهرية	
Mean life, 850		متوسط العمر	
Measurement, 2, 5–7		قياس	
Mechanical advantage, 89, (defn, 229)		الفائدة الميكانيكية (تعريف)	
of hydraulic lift, 260		لرافعة الهيدروليكية	
Mechanical energy, 149–55		طاقة ميكانيكية	
Mechanical equivalent of heat, 385		المكافئ الميكانيكي للحرارة	
Mechanical waves, 300		الأمواج الميكانيكية	
Mechanics (defn), 19		ميكانيك	
Medical imaging, 343–45, 402, 892–96		التصوير الطبي	
Meitner, Lise, 787, 878		مايتنر، لايز	
Melting points, 392 (see also Change of phase (or state))		نقاط الذوبان (أنظر أيضًا تغير النمط)	
Mendeleev, Dmitri, 798		مانديليف، ديمتري	
Mercury barometer, 262		ماروميتر زئبقي	
Meson, 908, 913–14, 917		ميسون	
Meson exchange, 908		تبادل ميسوني	
Messenger-RNA, 820–21		مرسال	
Metabolism, human, 414–15		أيض، بشري	
Metal detector, airport, 595		كاشف الفلزات (في المطار)	
Metallic bond, 824		رابطة فلزية	
Metastable state, 803–4, 847		متر (وحدة)	
Meter (unit), 8		عدادات قياس (كهربائية)	
Meters (electrical), 541–45		9 (see also inside front cover)	
Metric prefixes (multipliers), 9 (see also inside front cover)		الثوابت المترية (المضاعفات) (أنظر أيضًا داخل الغلاف الأمامي النظام المترية)	
Metric system, 8–10		النظام المترية	
MeV (see Electron volt (unit))		إلكترون فولت (وحدة)	
Michelson, A. A., 622–23, 684, 730		مايكلسون	
Michelson interferometer, 684, 730		مقياس مايكلسون للتداخل	
Michelson-Morley experiment, 730		تجربة مايكلسون - مورلي	
Micrometer, 13		مايكروميتير	
microscopic property (defn), 353		صفات (دون مجهرية) (تعريف)	
Microphone, 598 (مكبر صوت)		مايكروفون (مكبر صوت)	
capacitor, 546 pr		مواسع	
Microscope:		مايكروسكوب	
compound, 708–9, 715		مركب	
electron, 754, 768–69		إلكترون	
interference, 716		تداخل	
magnification of, 709, 715–16		تكبير	
phase-contrast, 716		تباين - نمطي	
resolving power of, 714–15		قدرة تحليلية	
useful magnification of, 715–16		تكبير مفيد	
Microstate, 428		حالة دون مجهرية	
Microwave background,		خلفية مايكروويفية	
cosmic, 945–47		كوني	
Microwaves, 620, 945 ff		مايكروويف	
Milky Way, 927–29		الطريقة الحلبي (درب التبانة)	
Millikan oil-drop experiment, 756		تجربة ميليكان لقطرة الزيت	
Millikan, Robert A., 756, 760		ميليكان روبرت	
Mineral and oil exploration, 122		استكشاف نفطي وفلزي	
Mirage, 667		سراب	
Mirror:		مرآة	
concave and convex, 635 ff, 639–40		مقعرة ومحدبة	
focal length of, 636, 641		البعد البؤري	
magnifying, 640		تكبير	
parabolic, 636		قطع مكافئ	
plane, 633–35		سطح	
spherical, 635–42		كروي	
used in telescope, 707		مستخدم في التليسكوب	
Magnetic poles, 554–55		الأقطاب المغناطيسية	
of earth, 556		للأرض	
single, 555		مفرد	
Magnetic quantum number, 795		عدد كمي مغناطيسي	
Magnetic resonance imaging, 894–96		تصوير رنين مغناطيسية	
Magnetic tape and discs, 598		شريط وأقراص مغناطيسية	
Magnetism, 554–75 (see also Electromagnetism)		مغناطيس (أنظر أيضًا الكهرباء المغناطيسية)	
Magnification:		تكبير	
angular, 705, 706, 709		زاوي	
of lens, 650–53, 704–8		للعدسة	
of magnifying glass, 704–5		للعدسة المكبرة	
of microscope, 709, 715		ميكروسكوب	
of mirror, 638–39		للمرآة	
of telescope, 706–8		للتليسكوب	
useful, 715–16		مفيد	
Magnifier, simple, 704, 705		تكبير بسيط	
Magnifying glass, 696, 704–5		عدسة (زجاج) مكبرة	
Magnifying mirror, 640		مرآة مكبرة	
Magnifying power, 705 (see also Magnification)		القدرة التكبيرية (أنظر أيضًا التكبير)	
Main sequence, 931 fn, 932 ff		التسلسل الرئيسي	
Malus' law, 685 fn		قانون مالوس	
Manhattan Project, 883		مشروع مانهاتن	
Manometer, 260–61		مانومتر	
Marconi, Guglielmo, 626		ماركوني، جوجلييلمو	
Mars, 126–27		المريخ	
Mass, 9, 75, 256, 744		كتلة	
atomic, 353, 836		ذري	
center of, 182–86		مركز لـ	
critical, 868		حرج، حساس	
energy, 744 – 47		والطاقة	
inertia, 206 and ff, (defn, 207)		جاذبي	
moment, 570		قصوري	
moment of, 204		جزيئي	
of a force, 204		لليوترينات	
of inertia, 206 and ff, (defn, 207)		نووي	
of photon, 762–63		للفوتون	
of systems of particles, 185–86		نسبوي	
of Sun, 127		نسبوي	
of, 9, 75		سكوني	
of, 9, 75		وحدات لـ	
of, 9, 75		الإشعاع النجمي	
of, 9, 75		للمشمس	
of, 9, 75		وحدات لـ	
of, 9, 75		التحول الكتلي الطاقوي	
of, 9, 75		الزيادة الكتلية	
of, 9, 75		الرقم الكتلي	
of, 9, 75		572–73	
of, 9, 75		المطياف الكتلي (الرسم الطيفي)	
of, 9, 75		back	
of, 9, 75		صيع رياضية (أنظر داخل الغلاف الخلفي)	
of, 9, 75		Mathematical review, A-1–A-11	
of, 9, 75		مراجعة رياضية	
of, 9, 75		Mathematical signs and symbols (see inside front cover)	
of, 9, 75		الإشارات والرموز الرياضية (أنظر داخل الغلاف الأمامي)	
of, 9, 75		Matter, states of, 255–56, 353	
of, 9, 75		المادة، حالات	
of, 9, 75		Matter waves, 781, 788 ff	
of, 9, 75		الأمواج المادية	
of, 9, 75		Matter-dominated universe, 951	
of, 9, 75		كون ذو المادة السائدة	
of, 9, 75		Maxwell distribution of molecular speeds, 371	
of, 9, 75		توزيع ماكسويل للسرعات الجزيئية	
of, 9, 75		Maxwell, James Clerk, 371, 615 ff, 729, 730	
of, 9, 75		ماكسويل، جيمس طيرك	
of, 9, 75		Maxwell's equations, 616–17	

Newtonian mechanics 74- 135	ميكانيكا نيوتونية	قوانين كبلر لحركة الكواكب	Mirage 667	سراب	Gravitational mass	كتلة الجاذبية
Newton's law of universal gravitation 117- 20	قانون نيوتن للجذب العام	Kinematics of motion 19- 71	Mirror	مرآة	926 – 27	كتلة القصور
Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	قوانين نيوتن في الحركة	Newton's laws of motion 73- 105	Concave mirror 635	مرآة مقعرة	Inertial mass 926 – 27	كتلة جزيئية
Newton's laws for rotational motion 206- 7	قوانين نيوتن في الحركة الدورانية	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Convex mirror 635	مرآة محدبة	Molecular mass 353	كتلة النيوترونات
Newton's rings 680	حلقات نيوتن	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Focal length of mirror 636, 641	البعد البؤري للمرآة	Mass of neutrinos 900	كتلة نووية
Newton's second law for system of Particles 186	قانون نيوتن الثاني لنظام	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Magnifying mirror 640	مرآة تكبير	Nuclear mass 836 – 38	كتلة الفوتون
Newton's synthesis 127- 28	تركيب نيوتن	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Parabolic mirror 636	مرآة على شكل قطع مكافئ	Rest mass 743	كتلة السكونية
Noble gases 799	غاز خامل	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Spherical mirror 635 – 42	مرآة كروية	Mass of sun 127	كتلة الشمس
Nodes 310. 333	عقد	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Mirror equation 638 – 39	معادلة المرآة	Units of mass 9. 75	وحدات الكتلة
Noise 334 – 35	إزعاج	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	MKS system of Units	نظام وحدات متر كيلوغرام ثانية	Mass energy transformation 744 – 47	تحول الكتلة – الطاقة
Noncom doctor 441	غير موصل	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	9	نماذج	Mass increase 743	زيادة الكتلة
Neoconservative force 148	قوة غير محافظة	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Models 4-5	نماذج كتلتي	Mass number 836	مطياف الكتلة
No inertial reference frame A- 17	74, 727, A- 16,	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Models of particle	مهدئ	Mass Spectrometer 572 – 73	صيغة رياضية
Nonlinear or nonohmic devices 498, 830	أنوات لاختطية أو لا أومية	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Moderator 868	فيزياء حديثة	Mathematical formula	مراجعة رياضية
Normal force 81	قوة عمودية	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Modern Physics 1,727	تضمنين	Mathematical review A1 – A – 11	مادة
Normal lens 701	عدسة طبيعية	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Modulation 627	معامل المرونة	Matter 255- 56, 353	موجات مادية
North pole 555	قطب شمالي	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Modulation Modulus elastic 237-38	Molar specific heat	Matter waves 781, 788	939
Novae 918, 924	نوا	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Modulus of elasticity 237-38	الحرارة النوعية الغرامية	Matter – dominated universe	كون تسوده المادة
Npn transistor 830- 31	ترانزستور npn	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Mole 363, 364	جزيء غرامي	Maxwell distribution of molecular speeds 371	توزيع ماكسويل للسرعات الجزيئية
n-type semi conductor 827 – 28	شبه موصل n- نوع	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Molecular biology and electric forces 460- 62, 818- 21	البيولوجية الجزيئية والقوى الكهربائية	Maxwell, James Clerk 371	جيمي كلارك ماكسويل
Nuclear angular momentum 838	كمية التحرك الزاوية النووية	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Molecular mass and molecular weight 353	كتلة جزيئية ووزن جزيئي	Maxwell's equations 616- 17	معادلات ماكسويل
Nuclear binding energy 838- 41	طاقة الربط النووية	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Molecular rotation 821 – 22	دوران جزيئي	Mean life 850	متوسط العمر
Nuclear collision 177	تصادم نووي	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Molecular spectra 821 – 23	أطياف جزيئية	Measurement 2,5 -7	قياس
Nuclear fission 866- 71	انشطار نووي	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Molecular speeds 370 – 71	سرعات جزيئية	Mechanical advantage 89	فائدة آلية
Nuclear forces 128, 840- 44	قوى نووية	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Distribution of molecular speeds 371	توزيع السرعات الجزيئية	Mechanical energy 149 – 55	طاقة ميكانيكية
Nuclear magnetic resonance 882- 83	الرنين النووي المغناطيسي	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Molecular vibration 823	اهتزاز جزيئي	Mechanical equivalent of heat 385	مكافئ ميكانيكي حراري
Nuclear masses 836	كتل نووية	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Molecules 353, 812- 15	جزيئات	Mechanical waves 300	موجات ميكانيكية
Nuclear medicine 881- 82	علاج نووي	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Bonding in molecules 812- 15	ترابط الجزيئات	Mechanics 19	ميكانيكا
Nuclear power 431, 869- 70	طاقة نووية	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Diatom molecules A – 22	جزيئات ثنائية الذرات	Medical imaging 343 – 45, 402	تصوير طبي
Nuclear radiation 849	إشعاع نووي	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Kinetic energy of molecules 370	طاقة حركة الجزيئات	Melting points 392	نقاط الانصهار
Nuclear radius 837	نصف القطر النووي	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Potential energy diagram for molecules 815 – 17	مخطط بياني لطاقة وضع الجزيئات	Mendeleev, Dmitri 798	ديمتري مندليف
Nuclear reactions 863- 66	تفاعلات نووية	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Weak bonds between molecules 817 – 21	روابط ضعيفة بين الجزيئات	Mercury barometer 262	بارومتر زئبقي
Nuclear reactors 866- 72	مفاعلات نووية	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Moment arm 203	ذراع العزم	Meson 896, 901- 2, 905	ميزون
Nuclear Spin 838	مغزلية نووية	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Magnetic dipole moment 570	عزم ثنائي القطب المغناطيسي	Meson exchange 986	تبادل الميزون
Nuclear structure 835 – 38	تركيب نووي / تركيب النواة	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Moment of a force 204	عزم القوة	Messenger – RNA 820 – 21	رسول RNA
Nuclear weapons testing 871	اختبار الأسلحة النووية	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Moment of inertia 206, 207	عزم القصور	Metabolism 414	عملية الأيض
Nucleon 836	نيوكلون	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Momentum 136, 167 – 93	كمية التحرك	Metal detector (airport) 595	كاشف المعدن (في المطارات)
Nucleon number 848, 899, 902	عدد النيوكلون	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Angular momentum 213 – 15	كمية التحرك الزاوية	Metallic bond 824	رابطة معدنية
Nucleo synthesis 921- 23, 938	سلسلة نووية نواة	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Momentum of photon 762 – 63	كمية تحرك الفوتون	Metastable state 803- 4, 847	حالة شبه مستقرة
Nucleus 835	نواة	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Relation of force to momentum 168 – 69	علاقة القوة مع التحرك	Meter (Unit) 8	(متر) وحدة قياس
Compound nucleus 866	نواة مركبة	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	relativistic momentum 742 – 43, 747	كمية التحرك النسبية	Meters (electrical) 541 – 45	أجهزة قياس (كهربائية)
Daughter nucleus	نواة وليدة	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Total momentum of system of particles 185- 86	كمية التحرك الكلية لأنظمة الجسيمات	Metric prefixes (multipliers) 9	(بادئات مترية) (مضاعفات)
Parent nucleus	النواة الأم	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Units of momentum 168	وحدات كمية التحرك	Metric system 8 -10	نظام متري
Radioactive decay of unstable nucleus 842	الاضمحلال النووي للأنوية غير المستقرة	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Monochromatic aberrations 710 – 11	انحراف أحادي اللون	MeV (Unit)	ميغا إلكترون فولت (وحدة قياس)
Size of nucleus	حجم النواة	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Monochromatic 668	أحادي اللون	Michelson, A. A 622 – 23, 684	ميكلسون، أ. أ.
Structure and properties of nucleus 835 – 38	تركيب النواة وخصائصها	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Moon 109, 118, 12,141	قمر	Michelson interferometer 684	جهاز ميكلسون لقياس التداخل
Nuclides 836	نويدات	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Morley, F. W. 730	(مورلي) (عالم)	Michelson –Morley Experiment 730	تجربة ميكلسون – مورلي
Null result 730	نتيجة عديمة القيمة	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Moseley, H. G. J 801	(موسلي) (عالم)	Micrometer 13	ميكرومتر
Object distance 634, 638, 650	مسافة الجسم	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Moseley plot 801	مخطط موسلي	Microscopic property 353	خاصية مجهرية
Objective lens 706	عدسة شينية	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Motion	حركة	Microphone 598	ميكروفون
Observation 2	مشاهدة	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Circular motion 107- 17	حركة دائرية	Microscope 708 – 9, 715	ميكروسكوب
Ocular lens 708	عدسة عينية	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Motion at constant acceleration 26 – 44	حركة بتسارع ثابت	Compound microscope 754, 768 – 69	ميكروسكوب مركب
Oersted, Hans Christian 557	هانز كريستيان أورستد	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Description of motion (Kinematics) 19- 71	(وصف الحركة) (كينماتيكا)	Electron microscope 754, 768 – 69	ميكروسكوب إلكتروني
Ohm, Georg Simon 498	جورج سيمون أوم	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Dynamics of motion 72	ديناميكا الحركة	Microstate 428	حالة مجهرية
Ohm (Unit) 498	(أوم) وحدة قياس	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Graphical analysis of linear motion 36- 37	التحليل البياني للحركة الخطية	Microwave background 933 – 39	خلفية ميكروويفية كونية
Ohm meter 543	جهاز كهربائي لقياس المقاومة	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186	Kepler's laws of planetary motion 125- 28	قوانين كبلر للحركة الكوكبية	Microwaves 620, 433	موجة ميكروويف
Ohm's law 498- 500	قانون أوم	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186			Milky way 915, 17	درب التبانة
Oil drop experiment 756	تجربة قطرة الزيت	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186			Millikan oil – drop experiment 756	تجربة قطرة الزيت لميلكان
Ones, H. K 510	أونس	Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186			Millikan, Robert 756, 760	روبرت ميلكان
		Newton's laws of motion 73- 105, 168, 186			Mineral and oil exploration, 122	استكشاف الزيت والمعادن

Principle of complementarity	765- 67	كمي رئيسي مبدأ التمام	Pn junction 857	وصلة Pn	Period of circular motion 108	مدة الحركة الدائرية	Open circuit 496	دائرة مفتوحة
Principle of correspondence	749, 779, 787	مبدأ التناظر	Pn junction diode 828- 30	صمام ثنائي ممتاسم القطبين	Period of planets 125	دورة الكواكب	Open tube 332	أنبوب مفتوح
Principle of equipartition of energy	A- 22	مبدأ تجزئة الطاقة بالتساوي	Pn junction laser 805	ليزر ذو وصلة Pn	Period of rotation 200	فترة الدوران	Operating temperatures 416	درجات حرارة التشغيل
Principle of equivalence	926, 927	مبدأ التكافؤ	Pnp tranistor 830, 831	ترانزستور Pnp	Period of vibration 287, 288, 292- 93	فترة الاهتزاز	Operational definition 10	تعريف عملي
Principle of superposition	308, 334- 35	مبدأ التراكب	Point charge 446	شحنة نقطية	Period of wave 302	مدة الموجة	Openheimer, J. Robert 871	روبرت أوبنهايمر
Principles versus laws	5	القوانين مقابل القواعد	Field of a point charge 451	مجال الشحنة النقطية	Periodic motion 287	حركة دورية	Optical coating 682	طلاء بصري
Printers	462- 63	طابعات	Potential of a point change 476- 79	جهد الشحنة النقطية	Periodic table 798- 800	الجدول الدوري	Optical illusions 643	خداع بصري
Prism	672, 678	منشور	Poise (Unit) 272	(بواز) وحدة	Peripheral nervous system 511	النظام العصبي السطحي	Optical instruments 696- 725	أجهزة بصرية
Prism binocular	646, 708	منشور ثنائي العينين	Poiseuille's equation 275- 76	معادلة بوازيس	Permeability 574	مغناطيس دائم	Optical pumping 804	ضخ بصري
Probability,	60	احتمالية / احتمال	Poisson, Simeon 673	سيمون بوزون	Permeability 564	نفذية	Optical tweezer 626	ملقط بصري
Probability in nuclear physics	848	الاحتمالية في الفيزياء النووية	Polar molecules 441, 480, 815	جزء مستقطب	Magnetic permeability 574	المغناطيسية	Optics 632- 56	علم البصريات
Probability in quantum machines	788, 792	الاحتمالية في ميكانيكا الكم	Polarization 684- 87	استقطاب	Permittivity 445, 482	سماحية	Orbital quantum number 794	عدد كمي مداري
Probability in thermodynamics	428- 29	احتمالية التوزيعات	Direction of polarization 684 – 87	ضوء مستقطب	Perturbations 127	اضطراب	Order and disorder 424, 426	ترتيب وعشوائية
Proper length	740	طول مناسب	Polarization 685	مستقطب	Phase 603	طور	Order of magnitude and rapid estimating 12- 14	رتبة المقدار والتقدير السريع
Proper time	736, 913	زمن مناسب	Polarizing angle 687	زاوية الاستقطاب الكامل	Phase in Ac-circuits 603- 7	الطور في دارات التيار المتردد	Organ pipe 333- 34	أنبوب الأورغن
Proportion A-1, - 2	237	تناسب	Polaroid 685- 86	غشاء مستقطب	Phase of matter 256, 353	حالة المادة	Orthodontia 227	تقويم الأسنان
Proportional limit	237	حد التناسب	Poles, magnetic 554- 55	أقطاب مغناطيسية	Phase angle 607	زاوية الطور	Oscillations 287	اهتزازات
Proteins	679, 718, 819- 21	بروتينات	Pollution 430- 31	تلوث	Phase diagram 606- 7	مخطط بياني للطور	Oscillator 608	مولد النذبية
Shape of proteins	819- 21	شكل البروتينات	Positive holes 827	ثقوب موجبة	Phase plate 716	صفحة الطور	Oscilloscope 485 – 86	راسم الذبذبات
Synthesis of proteins	819- 21	تركيب البروتينات	Positron 764- 65, 846	بوزيترون	Phase transition 317- 73, 391- 92	تحول الطور	Over exposure 698	تعرض مفرط للضوء
Proton	836- 902	بروتون	Positron emission tomography 882	التصوير الطبقي بالبثعاث البوزيترون	Phase- contrast microscope 716	ميكروسكوب تباين الطور	Overflow 359	فيضان
Proton decay	909	اضمحلال البروتون	Potential difference 471	فرق جهد	Phasor diagram 606- 7	مخطط بياني للأطوار	Overtones 310, 311, 330, 332	نغمات توافقية
Proton – proton cycle	873	دورة بروتون – بروتون	Potential drop 500	هبوط الجهد	Phons (Unit) 328	(فون) وحدة جهازة	p-type semiconductor 827- 28	شبه موصل P-
Proto star	921	نجم بروتوني	Potential energy 144- 289	طاقة وضع	Phosphor 856	فسفور	Pacemaker 538- 600	ضابط نبضات القلب
Pseudo force	A - 17	قوة زائفة	Elastic potential energy 147, 289	طاقة وضع المرونة	Phosphorescence 802- 3	وميض فسفوري (فوتينو جسيم أولي)	Page 13	صفحة
PT. diagrams	372- 73	مخططات بيانية للضغط ودرجة الحرارة	Electric potential energy 170- 71	طاقة وضع كهربائية	Photino 910	كاث ضوئي	Thickness of a page 13	سمك صفحة
Ptolemy	3	(بطليموس) (نسبة إلى العالم)	Gravitational potential energy 144- 45	طاقة وضع الجاذبية	Photo cathode 856	خلية ضوئية	Pair production 764- 65	إنتاج الأزواج
Pulley	89	بكرة	Potential energy diagram for molecules 814- 16, 823	مخطط بياني لطاقة وضع الجزيئات	Photocell 759	خلية مكافئ	Parabola (projectile) 62	قطع مكافئ (مسار الجسم المقذوف)
Pulsar	923	نايض	Potential energy diagram for nucleus 855	مخطط بياني لطاقة وضع النواة	Photocopy machine 451, 462- 63	آلة تصوير الوثائق	Parabolic mirror 636	مرآة على شكل قطع مكافئ
Pulse	301	نبضة	Pound (Unit) 76	(باوند) وحدة قياس	Photo diode 762, 830	صمام ثنائي ذو موصلية ضوئية	Parallax 924- 25	تغير ظاهري في موقع جرم سماوي
Pulse induction	595	حث نبضي	Power 158	قدرة، طاقة	Photoelectric effect 758- 61	الظاهرة الكهروضوئية	Parallel circuits 506, 522	دارات التوازي
Pulsed laser	805	ليزر نبضي	Power factor 607	عامل القدرة	Photographic emulsion 857	مستحلب فوتوغرافي	Parallel ogram method of adding vectors 48	طريقة متوازي الأضلاع لجمع المتجهات
Pulse – echo technique	343- 44	تقنية النبض والصدى	Power generation 430- 31	توليد الطاقة	Photo multiplier tube 856	أنبوب التضاعف الفوتوني	Parallel circuits 482	مواضع متوازي اللوحين
Pumps	278- 79	مضخات	Power of lens 648	قدرة العدسة	Photon 758-62, 775, 787- 88	فوتون	Paramag netism 574	بارامغناطيسية
Pupil	701	بؤبؤ العين	Power plants 431, 592	محطات توليد الطاقة	Absorption of photon 762- 63	امتصاص الفوتون	Pracial rays 636	أشعة موازية للمحور
PV diagrams	372	مخططات بيانية للضغط والحجم	Power reactor 869- 70, 874 – 75	مفاعل طاقة	Energy, mass and momentum of photon 896	طاقة التحرك للفوتون وكتلته وكميته	Parent nucleus 842	النواة الأم
Pythagorean theorem	50, A-8	نظرية فيثاغورس	Power transmission 584, 595- 97	نقل القدرة	Virtual photon 896	فوتون افتراضي	Parsec 925	فريسخ نجمي
Q-factor in resonant circuit	614, 615	عامل الجودة في دائرة رنين	Powers of ten 8, A- 3	قوى الرقم عشرة	Photon exchange 896	تبادل الفوتون	Partial pressure 375	ضغط جزئي
Quadratic formula	34,35, A-6	تربيعية	Pointing vector 624	متجه بوينك	Photon inter action 764- 65	تفاعلات الفوتون	Particle accelerators 890- 95	مسارعات الجسيم
Quality of sound	334- 35	جودة الصوت	Precision 5	دقة	Photon theory of light 758- 61	نظرية الفوتون للضوء	Particle classification 901- 2	تصنيف الجسيمات
Quantities	10	كميات	Prefixes 9	بادئات	Photosynthesis 763	التمثيل الضوئي	Particle 167	جسيم
Quantization	443	تكميم أو تكمية	Presbyopia 702	بصر الشيخوخة	Photovoltaic cell 431	خلية فولتية ضوئية	Particle detectors 830	كواشف الجسيم
Quantization of angular momentum	773	تكميم كمية التحرك الزاوية	Pressure cooker 375	طنجرة الضغط	Piano 14, 377	بيانو	Particle exchange 895- 97	تبادل الجسيم
Quantization of electric change	443	تكميم الشحنة الكهربائية	pressure 257	ضغط	Pion 897, 01, 902	بيون	Particle interactions 898	تفاعل الجسيم
Quantization of energy	756, 758, 795	تكميم الطاقة	Absolute pressure 259	ضغط مطلق	Pitch of a sound 323	درجة (نغمة) الصوت	Particle model 19	نموذج الجسيم
Quantum chromodynamics	897, 906, - 8	ديناميكا اللون الكمية	Atmospheric pressure 259, 261	ضغط جوي	Pixel 688- 89, 720	(بكسيل) وحدة قياس	Particle physics 889- 910	فيزياء الجسيمات
Quantum condition	773, 780- 81	شرط كمي	Blood pressure 279	ضغط الدم	Planck, Max 756- 58	ماكس بلانك	Particles resonance 902	رنين الجسيم
Quantum electrodynamics	896	الكهروديناميكا الكمية	Pressure gauge 259	مدلول مقياس الضغط	Planck's constant 758, 791	ثابت بلانك	Pascal, Blaise 257, 260	(باسكال بليز)
Quantum mechanics	781, 786, - 834	ميكانيكا الكم	Hydraulic pressure 260	ضغط هيدروليكي	Planck's quantum hypothesis 756- 58	فرضيات بلانك الكمية	Pascal (Unit) (قياس)	باسكال (وحدة قياس)
Quantum mechanics of atoms	786- 807	ميكانيكا الكم للذرات	Pressure measurement 260- 62	قياس الضغط	Virtual photon 896	فوتون افتراضي	Pascal's principle 260	قياس مبدأ باسكال
Quantum mechanics of molecules and solids	813- 31	ميكانيكا الكم للجزيئات والمواد الصلبة	Partial pressure 257- 261	وحدات قياس الضغط	Photon exchange 896	تبادل الفوتون	Paschen series 772, 776- 77	متوالية باشن
Quantum numbers	758, 773, 794 – 97	أعداد كمية	Vapor pressure 374	ضغط البخار	Photon inter action 764- 65	تفاعلات الفوتون للضوء	Pauli exclusion principle 797- 98, 799	مبدأ الاستبعاد لباولي
			Pressure head 258	علو الضغط، طاقة ناجمة عن الضغط وتزداد بالعلو	Photon theory of light 758- 61	نظرية الفوتون للضوء	Pauli, Wolfgang 787, 797, 846	ولفغانغ باولي
			Pressure waves 324	موجة ضغطية	Photosynthesis 763	التمثيل الضوئي	Peak current 507	تيار الذروة
			Prestressed concrete 242	خرسانة مسبقة الإجهاد	Photovoltaic cell 431	خلية فولتية ضوئية	Peak voltage 506- 7	جهد الذروة
			Primary coils 595	ملفات ابتدائية	Piano 14, 377	بيانو	Peaks, world's tallest 10- 11	أعلى قمم العالم
			Principal axis 636	محور رئيسي	Pion 897, 01, 902	بيون	Pendulum, ballistic 178- 79	بندول قذفي
			Principal quantum number 773- 794	عدد	Pitch of a sound 323	درجة (نغمة) الصوت	Pendulum, simple 296- 97	بندول بسيط
					Pixel 688- 89, 720	(بكسيل) وحدة قياس	Percent uncertainty 6	النسبة المئوية في عدم الدقة
					Planck, Max 756- 58	ماكس بلانك	Perfect cosmological principle 933	المبدأ الكوني التام
					Planck's constant 758, 791	ثابت بلانك	Perfume atomizer 272	مرذاذ العطر
					Planck's quantum hypothesis 756- 58	فرضيات بلانك الكمية	Period	فترة، مدة

Salam,A 907	مركب شر اعي ومبدأ برنولي (سلام، عبد السلام	Remote control 628	التحكم عن بعد	Radioactivity, natural 878	مقتفي النشاط الإشعاعي	Quntum theory 727, 754- 834	نظرية الكم
Satellite 122-23	تابع، قمر صناعي	Resistance 498- 500	مقاومة	Radioactivity, natural 878	نشاط إشعاعي طبيعي	Early quantum theory 754- 81	نظرية الكم المبكرة
Saturated vapor pressure 374	ضغط بخار مشبع	Internal resistance 521	مقاومة داخلية	Radio nuclides 877	أنوية مشعة	Quantum theory of light 758- 61	نظرية الكم للضوء
Saturation (magretic) 575	تشبع مغناطيسي	Resistance thermometer 502	مقياس درجة الحرارة ذو المقاومة	Radon 878	(رادون) عنصر غازي مشع	Quarks 445,889,890,904,910	كواركات
Sawtooth voltage 537	فولتية سن منشار	Resistivity 500- 502	المقاومية، المقاومة النوعية	Rainbow 672	(قوس المطر(قوس قزح	Quasars 918	كوازار: شبيهات النجوم
Scalars 45,46	كميات قياسية	Temperature coefficient of resistivity 502	المعامل الحراري للمقاومية	Range of projectile 60- 61	مدى المقذوف	q- value 843, 864	قيمة q- للتفاعل
Scales, Musical 329	تدريج موسيقي	Resistors 498- 500	مقاومات	Rapid transit 42	انتقال سريع	Rad (Unit) 877	راد: وحدة قياس الجرعة الإشعاعية الممتصة
* Scanning electron microscope 768	ماسح الإلكترون الميكروسكوبي	Resistors in ac circuit 603	مقاومات في دارة تيار متردد	Rare- earth solid – state laser 805	ليزر الحالة الصلبة	Radar 341,345	رادار
Scattering of light 690	تشتت الضوء	Resistors with capacitors 535- 37	مقاومات مع مواسعات	Rarefaction 303, 324	تخلخل	Radial acceleration 107	تسارع باتجاه القطر
754,787	Schrödinger, Erwin	Resistors and Kirchhoff's rules 529	مقاومات وقاعدتا كير شوف	Rate of decay 848- 51	معدل الاضمحلال	Radian 195	زاوية نصف قطرية
Schwann Cells 511	خلايا شوان	Resistors in series and parallel 522- 28/	وصل المقاومات على التوالي والتوازي	Ray 308, 632	شعاع	Radiation biology 880- 81	علم الحياة الإشعاعي
Schwarzschild radius 929	نصف قطر شوارز شيلد	Resolution 711-13	تحليل ، تفريق	Ray diagramming 637	تخطيط بياني للأشعة	Radiation damage 876	إضرار الإشعاع ((التلف الإشعاعي
Science, nature of 1-3	طبيعة العلم	Resolution of electronmicroscope 768	القدرة التحليلية للميكروسكوب الإلكتروني	Ray model of light 632	نموذج شعاعي للضوء	Radiation dosimetry 877- 79	مقياس الجرعات الإشعاعية
Scintillation counter 856	عداد الوميض	Resoluhon of highenergy accelerators 890-91	القدرة التحليلية لمسار عات الطاقة العالية	Ray tracing 647- 50	اقتفاء الشعاع	Radiation era 938	حقبة الإشعاع
Scintillator 856	وماض	Resoluhon of lens 711-13	القدرة التحليلية للعدسة	Rayleigh criterion 712, 713	معيار رايلي	Radiation fields 618	مجال إشعاعي
Seasons 402	فصول	Resoluhon of telescope 714-15	القدرة التحليلية للتلسكوب	RBF 878	الأثر البيولوجي النسبي	Radiation film badge 878	شارة الفيلم الحساس للإشعاع
Second harmonic 311,332	التوافقي الثاني	Resolution of vector 49-53	تحليل المتجهات	RC Circuit 535- 38	دارة RC	Radiation pressure 625- 26	ضغط الإشعاع
Second law of thermodynamics 415-16,424-29	القانون الثاني في الديناميكا الحرارية	Resolving power 714	قدرة التحليل	Reactance 603- 5	مفاعلة	Radiation sickness 878- 79	مرض ناجم عن الإشعاع
Clausius Statement of second law of the on dynamics 416-422	نص كلازيوس للقانون الثاني في الديناميكا	Resonance 299m310-12,780	رنين	Reaction energy 864	طاقة التفاعل	Radiation therapy 880	العلاج بالإشعاع
Statistical interpretation of second law of thermodynamics 428-29	القانون الثاني في الديناميكا الحرارية	Resonance in ac circuits 680	رنين في دارات تيار متردد	Reactions	تفاعلات	Radiation from human body 400	الإشعاع من جسم الإنسان (الأشعة) إشعاعات
Second (unit) 9	(ثانية) وحدة	Resonance of elementary particle 902	رنين الجسيم الأولي	Critical reactions 869	تفاعلات حرجة	Infrared radiation 399	الأشعة تحت الحمراء
Secondary Coils 595	ملفات ثانوية	Resonant collapse 299	انهيار الرنين	Nuclear reactions 863- 66	تفاعلات نووية	Net flow rate radiation 400	التدفق الصافي لمعدل الإشعاع
Seesaw, balancing 230-31	أرجوحة ، توازن	Resonant frequency 299,310 ,608	تردد الرنين	Reactor 866- 75	مفاعل نووي	Radiation from sun 401, 402	إشعاعات من الشمس
Seismograph 598-99	سيزموغراف راسم الزلازل	Resources, energy 431	موارد الطاقة	Real image 634, 637, 649	صورة حقيقية	Thermal radiation 399- 402	الإشعاع الحراري
Selection rule 797,822,823	قاعدة اختيار	Rest energy 744	طاقة السكون	Receivers 628	جهاز استقبال	Radiation, electromagnetic	إشعاعات كهرومغناطيسية
Selenium 462	(سيلينيوم) (عنصر لا فلزي	Resultant vektor 46-48	متجه محصل	Recoil 172	ارتداد	Blackbody radiation 756- 58	إشعاع الجسم الأسود
Self-Sustaining chain reaction 867-68	تفاعل متسلسل ذاتي الدائمة	Retina 701	(شبكة العين)	Recording head 598	رأس تسجيل	Gamma radiation 847	إشعاعات جاما
Semiconductor 442,498,502,826,827-31	شبه موصل	Reverse biased diode 828	صمام ثنائي منحاز عكسيًا	Rectifiers 829	مُقوم	Radiation from hot bodies 756- 57	إشعاع من الأجسام الساخنة
Semiconductor chips 11	رقائق شبه موصلة	Reversible process 419	عملية عكوسة	Red giants 9,8,920,922	عملاق أحمر	Microwave radiation 620	إشعاع ميكروويف
Semiconductor detector 857	كاشف شبه موصل	Rifle recoil 172	ارتداد بندقية	Red shift 341- 42, 925,930 -33	انزياح نحو الأحمر	Synchrotron radiation 893	إشعاع سنكروترون
Semiconductor diode 828-30	صمام ثنائي شبه موصل	Right hand rule 215m527-58	قاعدة اليد اليمنى	Reference frames 20-21, 62, 74	أطر اسناد	UV- recitation 620, 671	إشعاعات فوق بنفسجية
Semiconductor doping 827-28	حساسية أجهزة القياس الكهربائي	Rigid body 194	جسم صلب	Reflection	انعكاس	Radiation, nuclear	(أشعة) إشعاع نووي
Sensitivity of meters 543	القياس الكهربائي	Ripple roltage 834	جهد موجي	Angle of reflection 308, 633	زاوية الانعكاس	Activity of radiation 849, 851, 877	(الشدة الإشعاعية) النشاط الإشعاعي
Sensory neurons 511	خلايا عصبية حسية	Rocket 78-79,172,186	تسلق الصخور	Law of reflection 3058, 633	قانون الانعكاس	Alpha radiation 842- 44, 848	إشعاعات ألفا
Series Circuits 522,532-34	دارات التوالي	Roentgen 78-79,172,186	صاروخ	Reflection of light 633, 645	انعكاس الضوء	Beta radiation 842, 845- 47	أشعة بيتا
Shear modulus 238,240	معامل القص	Roller coaster 157	مرتفعة و متموجة تجرى فوقها عربة أفهوانية	Phase change during reflection 6 80- 681	تغير الطور في أثناء الانعكاس	Measurement of radiation 877- 79	قياس الإشعاع
Shear Stress 239-40	إجهاد القص	Rolling 202-3	دحرجة	Total internal reflection 6 45- 46	انعكاس كلي داخلي	Medical uses of radiation	استعمالات طبية للإشعاعات
798-99	قشر ذرية	Friction and rolling 90,211-12	احتكاك ودحرجة	Reflection of water waves 3 07, 308	انعكاس موجات الماء	Types of radiation 848	أنواع الإشعاعات
Shielding, electrical 457	حجب كهربائي	Root-mean-square (rms) 370	جذر متوسط التربيع	Reflection of waves on a string 3 07	انعكاس الموجات في حبل	Radiation – dominated universe 938	كون تسوده الإشعاعات
SHM (Simple harmonic motion) 287-97	حركة توافقية بسيطة	A-2	جذر	Reflection grating 676	محزوز الانعكاس	Radio 626- 28	راديو، لا سلكي
Shock abosorbers 289,298	ممتص الصدمات	Rope 105	حبل	Reflector 633	عاكس	Radio control 628	تحكم لا سلكي
Shock waves 342-43	موجات صدمية	Rotation 200	دوران	Refraction 666- 67	انكسار	Radio waves 620	موجات الراديو
Shoot-range force 841	قوة تؤثر على مدى قصير	Frequency of rotation 200	تردد الدوران	Angle of refraction 312- 643	زاوية الانكسار	Transmission of radio waves 626	إرسال موجات الراديو
Shunt resistor 542	مقاوم توازي	Rotational angular momentum quantum number 822	العدد الكمي لكمية التحرك الزاوية الدورانية	Refraction of earthquake waves 304	انكسار الموجات الزلزالية	Radioactive dating 853- 55	تاريخ العناصر المشعة
Shutter speed 698	سرعة الغلق	Rotational inertia 206-8	المحور الدوران	Refraction of light 642	انكسار الضوء	Radioactive decay 842- 55	اضمحلال إشعاعي
SI. Units 8-10,76	SI وحدات النظام الدولي	Rotational Kinetic energy 210-13	طاقة الحركة الدورانية	Refraction by thin lenses 647- 50	انكسار الضوء رقيقة	Radioactive decay constant 848	ثابت الاضمحلال الإشعاعي
Sivert (unit) 878	سيفرت (وحدة قياس الجرعة المكافئة للإنسان)	Rotational motion 194-225	حركة دورانية	Refractor 633	عاكس	Radioactive decay law 849	قانون الاضمحلال الإشعاعي
Significant figures 6-7,A-3	الأرقام المعنوية	Rotational transitions 822-23	انتقالات دورانية	Refractive index 642, 672	معامل الانكسار	Radioactive decay series 852- 53	سلاسل الاضمحلال الإشعاعي
Silicon 826,827	(سليكون) (عنصر لافلزي	Rotor 571,593	عضو دوران	Law of refraction 313, 643- 44, 666- 67	قانون الانكسار	Radioactive fallout 871	تساقط الغبار المشع
Simple harmonicoscillator 289	مذبذب توافقي بسيط	Ruby Laser 804	ليزر الياقوت	Refraction of water waves 312- 13	انكسار موجات الماء	Radioactive tracer 880, 881	المقتفي المشع أو
Simple pendulum 296-97	بندول بسيط	Runway, airport 27	مدرج المطار	Refrigerator 421- 23	ثلاجة، جهاز تبريد		
Simultaneity 731-33	تزامن	Rutherford, Ernest 770,842	رذر فورد، أرنست	Reinforced concrete 242	خرسانة مسلحة		
Single photon emission tomography 881-82	التصوير الطبي الإشعاعي بالتبعثات الفوتون	Rutherford's model of the atom 770,772-73	نموذج رذرفورد للذرة	Relative biological effectiveness (RBE) 878	الأثر البيولوجي النسبي		
Single-Slit diffraction 673-57	حيود بوساطة شق أحادي	Rydberg constant 772	ثابت وايدبرج	Relative humidity 375- 76	رطوبة نسبية		
Sinusoidal Curve 294	منحنى جيبي	Safety factor 241	عامل الأمان	Relative motion 62- 64, 726	حركة نسبية		
Siphon 280	سيفون	Sailboat and Bernoulli's principle 273	نموذج رذرفورد للذرة	Relative velocity 62- 64, 748	سرعة نسبية		
Skater, rotating 214	دوران المزلجة			Relativity: 727	النسبية		
Skidding of car 113	انزلاق السيارة			General theory of relativity 914, 926- 29	نظرية النسبية العامة		
				Principle of relativity 728, 730, 731	مبدأ النسبية		
				Special theory of relativity 726- 49, 926	نظرية النسبية الخاصة		
				Relay 577	مرحلة، مُتابع		
				Rem (Unit) 878	رم (وحدة قياس الجرعة الإشعاعية الممتصة)		

مصدر طاقة الشمس	873	spectrum of sun	Standing waves	310-12,329-34	Specific gravity	256	جاذبية نوعية	Sky, Color of	690	لون السماء
		Energy source of sun	Star Clusters	917	Specific heat	3 87, A-20, A-21	حرارة نوعية	Slepton	910	لببتون فائق التماثل
كتلة الشمس	127	mass of sun	Stars	915-18	Specific heat of gases	388	الحرارة النوعية للغازات	Slingshot	193	يقذف بمقلاع
الإشعاع المنبعث من الشمس	401	Radiation from sun	Collapse of Stars	215	Spectrometer	678-79	مقياس الطيف الضوئي	Sloan digital sky survey	942	ماسح السماء الرقمي
(لون الغروب (غروب الشمس	960	Sunset, color of	Evolution of stars	918-24	Light spectrometer	678-79	مقياس الطيف الكتلني	Slope	36	ميل، انحدار
تجمعات عملاقة	918	Super cluster	Radius of stars	402	Mass spectrometer	572-73	مقياس الطيف الكتلني	Slow neutron reaction	864	تفاعل نيوترون بطيء
فائقة التوصيلية	510	Super conductivity	Source of energy of stars	873, 922-23	Spectroscope	678-79	مطياف، سيكتروسكوب	Slug (unit)	76	السلج (وحدة الكتلة في النظام البريطاني)
فائقة السيولة	373	Super fluidity	Types of stars	925	Spectroscopy	678-79	علم الطيف	Smoke detector	844	كاشف الدخان
سوبر نوبا	941, 925, 24-923, 918	Supernova	Statcoulomb (unit)	445	Spectrum	377	طيف	Snell, Willebrord	643	سنل ويلبرورد
مبدأ التركيب		Superposition, principle of	State:		Absorption spectrum	679,771-72	طيف الامتصاص	Snell's Law		قانون سنل
هواء مفرط التشبع	376	Super saturated air	Changes of State	371-73,391-92	Atomic spectrum	771-73	طيف ذري	Soap bubbles		فقاقيع صابون
سرعة فوق صوتية	43-342	Supersonic speed	Equation of state	361,364	Band spectrum	821	طيف شريطي	Society of Automotive Engineers	679,682	جمعية مهندسي السيارات
نظرية الأوتار الفائقة	910	Super string theory	Equilibrium state	361	Black body spectrum	756-58	طيف الجسم الأسود	Sodium Chloride	814,817,824	كلوريد الصوديوم
		Super symmetry	State of matter	255-56, 353	Continuous Spectrum	678, 757	طيف مستمر	Solar Cell	431,830	خلية شمسية
910		Surface of last scattering	State variables	409	Electromagnetic spectrum	619-22	طيف كهرومغناطيسي	Solar Constant	401	الثابت الشمسي
سطح آخر تشتت	935	Surface tension	Static electricity	440-41	Emission spectrum	771	طيف انبعاث	Solar energy	401-2,430,431	الطاقة الشمسية
التوتر السطحي	78-276	Surface waves	Static friction	90,91-92, 211-12	Spectrum emitted by gases	678, 771-73	طيف منبعث بواسطة الغازات	Solar heating	431	التسخين الشمسي
305		SUSYs	Static rope	105	Spectrum emitted by hot bodies	756-57	طيف منبعث بواسطة أجسام ساخنة	Solenoid	567, 569	ملف لولبي
خافض للتوتر السطحي	227	Symmetry	Statics	226-55	Line spectrum	678-79, 771	طيف خطي	Solenoid inductance	601	حث الملف اللولبي
جسيمات فائقة التماثل	910	Symmetry breaking	Stationary State in atom	773	Molecular spectrum		طيف جزيئي	Solids	255,353, 824-26,A-22	صلب، جامد
تماثل	37-936, 910, 453, 34, 13	Synapse	Statistics and entropy	428-29	Spectrum of selected elements	678-79, 771	طيف عناصر مختارة	Band theory of Solids	825-26	نظرية الشريط (الحزمة) في المواد الصلبة
		Synchrocyclotron	Stator	593	Visible light spectrum	671-73	طيف الضوء المرئي	Bonding in Solids	824	ترابط المواد الصلبة
إشعاع السنكروترون	94-893	Synchrotron radiation	Steady – State modle of universe	933	X-ray spectrum	800-802	طيف الأشعة السينية	Energy Levels in solids	825-26	مستويات الطاقة في المواد الصلبة
نظام مغلق	408, 388, 171	System	Steam engine	416-17,420	Average speed	21	متوسط السرعة القياسية	Equipartition of energy for solids	A-22	تجزئة الطاقة بالتساوي في المواد الصلبة
نظام معزول	89-388, 72-171	Isolated system	Steam power plants	431	Speed of EM Waves	619	سرعة الموجات الكهرومغناطيسية	Molar specific heats of solids	A-22	الحرارة النوعية للغرامية للمواد الصلبة
نظام مفتوح	414, 388	Open system	Stefan – Boltzmann constant	399	Speed of Light	8,619, 622-23, 729-31, 743	سرعة الضوء	Solid state physics	824-26	فيزياء الحالة الصلبة
نظام الوحدات	10-8	System of units	Stefan – Boltzmann Law	399,919	Mean speed of molecules	370	متوسط سرعة الجزيئات	Solving for Unknowns	A-4, A-5	حل بالنسبة للمجاهيل
ضغط انقباض القلب	279	Systolic presore	Stellar evolution	918-24	Molecular speed	370-71	سرعة الجزيئات	Somatic damage	876	ضرر جسدي
تسارع حماسي	198, 14-113	Tangential acceleration	Stellar fusion	873	Relative speed	179	سرعة نسبية	Sonar	343,343	سونار: جهاز سير بالصدى
الطفح	359	Tank overflow	Step-down transformer	596	Speed of sound	323	سرعة الصوت	Sonicboom	34243	دوي اختراق جدار الصوت
رأس المسجل الشريطي	598	Tape recorder head	Step – up transformer	596	Super sonic speed	342-43	سرعة فوق صوتية	Sonograms	343	الصانوغرام
تقويم الأسنان	277	Teeth, straightening	Stereo broadcasting FM	627	Ultimate speed	743	سرعة قصوى	Sound and Sound waves	322-45	الصوت وموجاته
عدسة تصوير مقربة	701	Telephoto Lens	Stimulated emission	803	Speed of wave	302,304	سرعة الموجة	Doppler Shift of Sound waves	338-42	إزاحة دوبلر للموجات الصوتية
(تلسكوب (منظار	8-706	Tele scope	Stopping potential	759	Spherical aberration	636,710	زيغ كروي	Interference of Sound	334-37	تداخل موجات الصوت
(تلسكوب فلكي (منظار فلكي	7-706	Astronomical telescope	Storage rings	894	Spin, electron	574,795,882	مغزلية الإلكترون	Quality of Soond	334-35	جودة الصوت
(تلسكوب جاليليو (منظار جاليليو		Galileian telescope	STP	364	Spin quantum number	795	عدد كمي مغزلي	Source of Sound	329	مصدر الصوت
			Strain	237-41	Spider web	293	شبكة العنكبوت	Speed of Soond	323	سرعة الصوت
			Strange particles	903,904	Spin – echo technique	884	تقنية الصدى المغزلي	Sound barrier	342	جدار الصوت
			Strangeness903		Spiral galaxy	914	مجرة حلزونية	Sound Spectrum	335	طيف صوتي
			Strassmann, Fritz	866	Spring	287,289-93	زنبرك	Sound System		نظام صوتي
			Streamline Flow	268	Spring equation	147,237,287	معادلة الزنبرك	598-99		
			Stress		Spring scale	73	ميزان زنبركي	Sound track	762	مدرج الصوت
			Compressive stress	239-40	Spring vibration (see Vibrations)		اهتزاز الزنبرك	Sounding board	331	لوح رنان
			إجهاد الضغط		Spyglass	708	منظار	Sounding box	331	صندوق رنان
			إجهاد قصي					Source		مصدر
			إجهاد الشد					Source activity	877	شدة المصدر
			Thermal stress	361				South pole	555	قطب جنوبي
			String theory	910				Space		فضاء
			Stringed instruments	335, 31-330				Curvature of Space	926-29,939	انحناء الفضاء
			Strings, vibrating	34-329, 12-310				Interference in space	335-36	تداخل في الفضاء
			Piano	330, 311				Space perception using Sound waves	304	إدراك الفضاء بواسطة موجات الصوت
			Strong bonds	817				Space travel	373	السفر عبر الفضاء
			Strong nuclear force	910-895, 865, 840, 128				Space – time	742,927	زمان – مكان
			Strongly interacting particles	901				Special theory of relativity	726-49, 926	نظرية النسبية الخاصة
			ظاهرة التماسي: تحول المادة من حالة الصلابة إلى تحت (دون)					Impact of special theory of relativity	748-49	أثر نظرية النسبية الخاصة
			القشرة الذرية	800, 99-798				Postulates of special theory of relativity	730-31	فرضيات نظرية النسبية الخاصة
			Subshell, atomic							
			Suction	262						
			Sun							
			Absorption	768						

904	كوارك علوي	Upquark	373 النقطة الثلاثية	Triple point	731 تجربة تفكير	Thought experiment	395, 356	درجة حرارة جسم الإنسان	Human body temperature
		اليورانيوم	جريان في أنابيب	Tubes, flow in	جزيرة الأميال الثلاثة	Three mile Island		362, 355 كلفن	Kelvin
		Uranium	ضبط أوتار البيانو	Tuning apiano	888, 865 طاقة حد العتبة	Threshold energy		التفسير الجزيئي لدرجة الحرارة	71-367
858		استخدام اليورانيوم في التأريخ	(عبور النفق) اختراق	Tunneling	61-460 الثيمين	Thymine		Molecular interpretation of temperature	
		يورانيوم مخصب	توربين	Turbine			416	درجة حرارة التشغيل	Operating temperature
868		يورانيوم مخصب	تدفق مضطرب	Turbulent flow					
		انتشار اليورانيوم	626 ملقط بصري	Tweezers, optical	359	غطاء محكم الإغلاق		416	درجة حرارة النجم
		يورانيوم في المفاعلات	738-40 ظاهرة التوأم	Twin paradox		73-272 انحناء جناح		920	درجة حرارة النجم
715-16	تكبير مفيد	Useful Magnification	743 سرعة قصوى	Ultimate speed		334 جرس		510	درجة حرارة التحول
620-671	الأشعة فوق البنفسجية	UV	237, 241 شدة قصوى	Ultimate strength		وقت، زمن		502	معامل حراري للمقاومة
278	مضخة تفريغ	Vacuum pump	الفرز بالطرد المركزي فائق السرعة	Ultracentrifuge	9	وقت مناسب		273	معامل حراري للمقاومة
825	نطاق (الالكترونات) التكافؤ	Valence band	تردد فوق سمعي	Ultrasonic frequency	602, 536	9 معيار الزمن		273	معامل حراري للمقاومة
817-21	روابط وقوى فان دير فال	Van der Waals bonds and force	323, 343 موجات فوق صوتية	Ultrasonic waves	37-734	ثابت الزمن		273	معامل حراري للمقاومة
372	بخار	Vapor	التصوير الطبي بالموجات فوق الصوتية	Ultrasound medical imaging	427	تمدد الزمن		273	معامل حراري للمقاومة
374	ضغط البخار	Vapor Pressure	343-45 التصوير الطبي بالموجات فوق الصوتية	Ultrasound medical imaging	621	مقياس ضغط الإطارات		273	معامل حراري للمقاومة
392	حرارة التبخر	Vaporization, heat of	671 ضوء فوق البنفسجي	Ultraviolet (UV) light		التصوير الإشعاعي الطبي	8 2-881, 20-718	111, 87-86	شدة في الحبل
925	نجوم متغيرة	Variable stars	426-27 عدم توفر الطاقة	Unavailability of energy	334	334		495	أقطاب البطارية
409	حالة متغيرة	Variable, state	5-6 عدم الدقة في القياس	Uncertainty in measurement	462	أنواع إنتاج العزم		559	سرعة حدية
454		Vector Field	789-92 (مبدأ الريبية (عدم التحديد	Uncertainty principle	203	كوارك قمة		22-520	جهد طرفي
84, 447		Vector forces	298 ناقص المضادة	Under damping	580, 75-574	ملف حلقي		559	(تسلا (وحدة قياس
		Vectors	698 (ناقص التعرض للضوء	Under exposure	8-203	عزم دوران		2	اختبار النظريات
		Addition of vectors	274 حيوانات تعيش تحت الأرض	Under ground animals	594	عزم دوران معاكس		893	تيفترون
		Components of vectors	704 رؤية تحت الماء	Under water vision	570	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		5-2	(نظريات (بشكل عام
		Resolution of vectors	908 مقياس التوحيد	Unification scale	272, 262, 261	عزم دوران معاكس		910	نظريات لكل شيء
46-48	متجه محصل	Resultant vectors	9, 353, 837-38 وحدة الكتلة الذرية الموحدة	Unification atomic mass unit	272, 262, 261	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		396	موصلية حرارية
		Subtraction of vectors	حركة دائرية منتظمة	Uniform circular motion:	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		386	طاقة حرارية
		Velocity	109-12 ديناميكا الحركة الدائرية المنتظمة	Dynamics of uniform circular motion	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		357	توازن حراري
		Addition of velocities	106-9 كينماتيكا الحركة الدائرية المنتظمة	Kinematics of uniform circular motion	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		60-357, 354	تمدد حراري
		Angular Velocity	26-44 حركة بتسارع منتظم	Uniformly accelerated motion	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		58-357	معامل التمدد الحراري
		Average velocity	وحدات	Units	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		358	التمدد الحراري في البناء
		Drift velocity	10-11 تغيير الوحدات	Units Changing	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		360	التمدد الحراري للماء
		Instantaneous velocity	8-11, 76 وحدات قياس	Units of measurement	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		397-396	عزل حراري
		Velocity of light	364	Universal gas constant	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		31-430	تلوث حراري
		Molecular velocity, and relation to temperature	117-20, 445	Universal law of gravitation	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		402-399	إشعاع حراري
		Relative velocity	914-43 الكون	Universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		361	إجهاد حراري
		Relativistic addition of velocity	933 عمر الكون	Age of Universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		397	نوافذ حرارية
		Velocity selector	932 نظرية الانفجار العظيم للكون	Big Bang theory of Universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		485	انبعاث أيوني - حراري
		Velocity of simple harmonic oscillator	928-29, 939 انحناء الكون	Curvature of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		502	ثيرمستور
		Velocity of sound	930-34 تمدد الكون	Expanding universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		38-408	ديناميكا حرارية
		Supersonic Velocity	كون محدد أو غير محدد	Finite or infinite universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		1	القانون الأول في الديناميكا الحرارية
		Terminal Velocity	928-29, 939 كون محدد أو غير محدد	Finite or infinite universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		429-424	القانون الثاني في الديناميكا الحرارية
		Velocity of waves	942-43 مستقبل الكون	Future of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		420	القانون الثالث في الديناميكا الحرارية
		Velocity gradient	942 سيناريو الكون	Inflationary scenario of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		357	القانون الصفري في الديناميكا الحرارية
		Ventricular fibrillation	939 كون تسوده المادة	Matter - dominated universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		402	رسم تغير درجة الحرارة
		Venture meter	928-289, 939 كون مغلق أو مفتوح	Open or closed universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		787	التألق الحراري
		Venturi tube	938 كون يسوده الإشعاع	Radiation dominated universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		502, 57-354	مقياس درجة الحرارة
		Vibrational energy levels	936-39 نموذج معياري للكون	Standard model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		874	أجهزة نووية حرارية
		Vibrational quantum number	933 نموذج حالة الثبات للكون	Steady state model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			(ثيرمستات (مثبت أوتوماتيكي لدرجة الحرارة
		Vibrational transition	A-4- A- 5 حل بالنسبة للمجاهيل	Unknowns, Solving for	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		53-650	معادلة العدسة الرقيقة
		Vibrations	928-289, 939 كون مغلق أو مفتوح	Open or closed universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		647	عدسات رقيقة
		Vibrations of air columns	938 كون يسوده الإشعاع	Radiation dominated universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		83-679	تداخل الأغشية الرقيقة
		اهتزازات إجبارية	936-39 نموذج معياري للكون	Standard model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		689	ترانزستور الأغشية الرقيقة
		Forced vibrations	933 نموذج حالة الثبات للكون	Steady state model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		767	طومسون
			A-4- A- 5 حل بالنسبة للمجاهيل	Unknowns, Solving for	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية		768, 767, 755	طومسون، جوزيف جون
			928-289, 939 كون مغلق أو مفتوح	Open or closed universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			Thomson, J.J
			938 كون يسوده الإشعاع	Radiation dominated universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			936-39 نموذج معياري للكون	Standard model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			933 نموذج حالة الثبات للكون	Steady state model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			A-4- A- 5 حل بالنسبة للمجاهيل	Unknowns, Solving for	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			928-289, 939 كون مغلق أو مفتوح	Open or closed universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			938 كون يسوده الإشعاع	Radiation dominated universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			936-39 نموذج معياري للكون	Standard model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			933 نموذج حالة الثبات للكون	Steady state model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			A-4- A- 5 حل بالنسبة للمجاهيل	Unknowns, Solving for	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			928-289, 939 كون مغلق أو مفتوح	Open or closed universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			938 كون يسوده الإشعاع	Radiation dominated universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			936-39 نموذج معياري للكون	Standard model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			933 نموذج حالة الثبات للكون	Steady state model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			A-4- A- 5 حل بالنسبة للمجاهيل	Unknowns, Solving for	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			928-289, 939 كون مغلق أو مفتوح	Open or closed universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			938 كون يسوده الإشعاع	Radiation dominated universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			936-39 نموذج معياري للكون	Standard model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			933 نموذج حالة الثبات للكون	Steady state model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			A-4- A- 5 حل بالنسبة للمجاهيل	Unknowns, Solving for	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			928-289, 939 كون مغلق أو مفتوح	Open or closed universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			938 كون يسوده الإشعاع	Radiation dominated universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			936-39 نموذج معياري للكون	Standard model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			933 نموذج حالة الثبات للكون	Steady state model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			A-4- A- 5 حل بالنسبة للمجاهيل	Unknowns, Solving for	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			928-289, 939 كون مغلق أو مفتوح	Open or closed universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			938 كون يسوده الإشعاع	Radiation dominated universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			936-39 نموذج معياري للكون	Standard model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			933 نموذج حالة الثبات للكون	Steady state model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			A-4- A- 5 حل بالنسبة للمجاهيل	Unknowns, Solving for	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			928-289, 939 كون مغلق أو مفتوح	Open or closed universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			938 كون يسوده الإشعاع	Radiation dominated universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			936-39 نموذج معياري للكون	Standard model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			933 نموذج حالة الثبات للكون	Steady state model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			A-4- A- 5 حل بالنسبة للمجاهيل	Unknowns, Solving for	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			928-289, 939 كون مغلق أو مفتوح	Open or closed universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			938 كون يسوده الإشعاع	Radiation dominated universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			936-39 نموذج معياري للكون	Standard model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			933 نموذج حالة الثبات للكون	Steady state model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			A-4- A- 5 حل بالنسبة للمجاهيل	Unknowns, Solving for	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			928-289, 939 كون مغلق أو مفتوح	Open or closed universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			938 كون يسوده الإشعاع	Radiation dominated universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			936-39 نموذج معياري للكون	Standard model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			933 نموذج حالة الثبات للكون	Steady state model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			A-4- A- 5 حل بالنسبة للمجاهيل	Unknowns, Solving for	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			928-289, 939 كون مغلق أو مفتوح	Open or closed universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			938 كون يسوده الإشعاع	Radiation dominated universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			936-39 نموذج معياري للكون	Standard model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			933 نموذج حالة الثبات للكون	Steady state model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			A-4- A- 5 حل بالنسبة للمجاهيل	Unknowns, Solving for	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			928-289, 939 كون مغلق أو مفتوح	Open or closed universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			938 كون يسوده الإشعاع	Radiation dominated universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			936-39 نموذج معياري للكون	Standard model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			933 نموذج حالة الثبات للكون	Steady state model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			A-4- A- 5 حل بالنسبة للمجاهيل	Unknowns, Solving for	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			928-289, 939 كون مغلق أو مفتوح	Open or closed universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			938 كون يسوده الإشعاع	Radiation dominated universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			936-39 نموذج معياري للكون	Standard model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			933 نموذج حالة الثبات للكون	Steady state model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			A-4- A- 5 حل بالنسبة للمجاهيل	Unknowns, Solving for	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			928-289, 939 كون مغلق أو مفتوح	Open or closed universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			938 كون يسوده الإشعاع	Radiation dominated universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			936-39 نموذج معياري للكون	Standard model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			933 نموذج حالة الثبات للكون	Steady state model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			A-4- A- 5 حل بالنسبة للمجاهيل	Unknowns, Solving for	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			928-289, 939 كون مغلق أو مفتوح	Open or closed universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			938 كون يسوده الإشعاع	Radiation dominated universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			936-39 نموذج معياري للكون	Standard model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			933 نموذج حالة الثبات للكون	Steady state model of universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			A-4- A- 5 حل بالنسبة للمجاهيل	Unknowns, Solving for	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية			
			928-289, 939 كون مغلق أو مفتوح	Open or closed universe	272	عزم الدوران المؤثر في حلقة			

Title page Art Wolfe/Getty Images, Inc. **CO-1** NOAA/Phil Degginger/Color-Pic, Inc. **1-01** Erich Lessing/Art Resource, N.Y. **1-02a, 1-02b** Franca Principe/Istituto e Museo di Storia della Scienza **1-03** Franca Principe/Istituto e Museo di Storia della Scienza **1-04a** Philip H. Coblenz/Getty Images, Inc.–Stone Allstock **1-04b** Antranig M. Ouzoonian, P.E./Weidlinger Associates, Inc. **1-05** Mary Teresa Giancoli **1-06a, 1-06b** Douglas C. Giancoli **1-07** Paul Silverman/Fundamental Photographs **1-08a** Oliver Meckes/Eye of Science/Max-Planck-Institut-Tubingen/Photo Researchers, Inc. **1-08b** Douglas C. Giancoli **1-09** Adolfo Viansson **1-10a** Douglas C. Giancoli **1-11** Larry Voight/Photo Researchers, Inc. **1-14** David Parker/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **1-15** The Image Works **CO-2** George D. Lepp/CORBIS BETTMANN **2-08** John E. Gilmore, III **2-16** SuperStock, Inc. **2-17** Nimatallah/Art Resource, N.Y. **2-18** Harold E. Edgerton/Palm Press, Inc. **CO-3** Michel Hans/Vandystadt/Getty Images, Inc.–Allsport Photography **3-17** Berenice Abbott/Commerce Graphics Ltd., Inc. **3-19** Richard Megna/Fundamental Photographs **3-27a** Dave Wilhemi/Corbis/Stock Market **3-27b** Guy Vanderelst/Taxi/Getty Images, Inc.–Taxi **3-27c** Douglas C. Giancoli **CO-4** Mark Wagner/Aviation-images.com **4-01** Daly & Newton/Getty Images, Inc.–Stone Allstock **4-04** Bettmann/Corbis **4-05** Gerard Vandystadt/Agence Vandystadt/Photo Researchers, Inc. **4-07** David Jones/Photo Researchers, Inc. **4-10** Tsado/NASA/Tom Stack & Associates, Inc. **4-37** Lars Ternblad/Getty Images, Inc.–Image Bank **4-39** Kathleen Schiaparelli **4-41** AP/Wide World Photos **4-63** Tyler Stableford/The Image Bank/Getty Images, Inc. **CO-5** Earth Imaging/Getty Images Inc.–Stone Allstock **5-06c** Jay Brousseau/Getty Images, Inc.–Image Bank **5-12** Guido Alberto Rossi/Getty Images, Inc.–Image Bank **5-23** NASA/Johnson Space Center **5-27a** AP/Wide World Photos **5-27b** Mickey Pfleger/Photo 20-20/PictureQuest **5-27c** Dave Cannon/Getty Images, Inc.–Stone Allstock **5-34** C. Grzimek/Okapia **5-35** Daniel L. Feicht/Cedar Fair L.P. **CO-6** Al Bello/Getty Images, Inc.–Liaison **6-21** Harold E. Edgerton/Palm Press, Inc. **6-22** David Madison/David Madison Sports Images, Inc. **6-25** AP/Wide World Photos **6-28** Nick Rowe/Getty Images, Inc.–Photodisc **6-42** CORBIS BETTMANN **6-46** R. Maisonneuve/Publiphoto/Photo Researchers, Inc. **CO-7** Richard Megna/Fundamental Photographs **7-01** Stephen Dunn/Getty Images, Inc.–Liaison **7-08** Loren M. Winters/Visuals Unlimited **7-15** D.J. Johnson **7-18** Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **7-22** Berenice Abbott/Photo Researchers, Inc. **7-28** John McDermott Photography **CO-8** Tom Stewart/CORBIS BETTMANN **8-07a** Jeff Greenberg/Photo Researchers, Inc. **8-11a** Richard Megna/Fundamental Photographs **8-11b** Photoquest, Inc. **8-34** Tim Davis/Photo Researchers, Inc. **8-35** Regis Bossu/Corbis/Sygma **8-36** AP/Wide World Photos **8-38** Karl Weatherly/Getty Images, Inc.–Photodisc. **8-42** Tom Stewart/CORBIS BETTMANN **8-56a** Michael Kevin Daly/Corbis/Stock Market **CO-9** John Kelly/Getty Images, Inc.–Image Bank **9-01** AP/Wide World Photos **9-21** Douglas C. Giancoli **9-23a, 9-23b** Mary Teresa Giancoli **9-26** Fabricius & Taylor/Getty Images, Inc.–Liaison **9-28a** Douglas C. Giancoli **9-28b** Galen Rowell/Mountain Light Photography, Inc. **9-30** Douglas C. Giancoli **9-32** Giovanni Paolo Panini (Roman, 1691–1765), “Interior of the Pantheon, Rome,” c. 1734. Oil on canvas, 1.280 * .990 (50 1/2 * 39); framed, 1.441 * 1.143 (56 3/4 * 45). Samuel H. Kress Collection. Photograph © 2001 Board of Trustees, National Gallery of Art, Washington. 1939.1.24.(135)/PA. Photo by Richard Carafelli **9-33** Douglas C. Giancoli **9-34a** Italian Government Tourist Board **9-56** Peter LaMastro/Getty Images, Inc. **CO-10** Verlinden, Vic/Getty Images, Inc.–Image Bank **10-10** CORBIS BETTMANN **10-19a-R, 10-19b-R**, David Hazen **10-33a** Lester V. Bergman/CORBIS BETTMANN **10-33b** Biophoto Associates/Photo Researchers, Inc. **10-34** Rod Plank/Tom Stack & Associates, Inc. **10-36** Alan Blank/Bruce Coleman, Inc. **10-46** Douglas C. Giancoli **10-48** Adam Jones/Photo Researchers, Inc. **10-52** NASA Goddard Space Flight Center/Science Source/Photo Researchers, Inc. **CO-11L** Fundamental Photographs **CO-11R** Jonathan Nourok/PhotoEdit **11-04** Robert Reiff/Getty Images, Inc.–Taxi **11-07** Gary Carter/Visuals Unlimited **11-11** Photo Researchers, Inc. **11-13** Douglas C. Giancoli **11-17** Taylor Devices, Inc. **11-19a** AP/Wide World Photos **11-19b** Corbis/Sygma **11-20** Douglas C. Giancoli **11-27** Art Wolfe/Getty Images, Inc.–Stone Allstock **11-37** Douglas C. Giancoli **11-42** Visuals Unlimited **11-48** Gallant, Andre/Getty Images, Inc.–Image Bank **11-55** Richard Megna/Fundamental Photographs **CO-12** Fra Angelico, Linaoli Altarpiece, detail. Museo di San Marco, Florence, Italy. Scala/Art Resource, N.Y. **12-04** Yoav Levy/Phototake NYC **12-09a** Andy Sacks/Getty Images, Inc.–Stone Allstock **12-09b** Getty Images, Inc.–Liaison **12-10** Bob Daemmrch/The Image Works **12-24** Norman Owen Tomalin/Bruce Coleman, Inc. **12-25b** SETTLES, GARY S./Photo Researchers, Inc. **12-28a** P. Saada/Eurelios/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **12-28b** Howard Sochurek/Medical Images, Inc. **12-38** Dallas & John Heaton/CORBIS BETTMANN **CO-13** Johner/Amana America, Inc. **13-03** Bob Daemmrch/Stock Boston **13-04a, 13-04b, 13-04c** Franca Principe/Istituto e Museo di Storia della Scienza **13-06** Leonard Lessin/Peter Arnold, Inc. **13-14** Leonard Lessin/Peter Arnold, Inc. **13-15** Michael Newman/PhotoEdit **13-23** Paul Silverman/Fundamental Photographs **13-24** JACK DANIELS/Getty Images, Inc.–Taxi **13-25a, 13-25b, 13-25c** Mary Teresa Giancoli **13-28** Kennan Harvey/Getty Images, Inc.–Stone Allstock **13-29** Brian Yarvin/Photo Researchers, Inc. **CO-14** Bill Losh/Getty Images, Inc.–Taxi **14-11** Getty Images, Inc.–Hulton Archive Photos **14-14a, 14-14b** Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **14-16** Phil Degginger/Color-Pic, Inc. **14-22** Taxi/Getty Images, Inc. **CO-15L** David Woodfall/Getty Images, Inc.–Stone Allstock **CO-15R** AP/Wide World Photos **15-09** Will Hart **15-10a, 15-10b, 15-10c** Leonard Lessin/Peter Arnold, Inc. **15-20a** Sandia National Laboratories **15-20b** Martin Bond/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **15-20c** Lionel Delevingne/Stock Boston **Table 15-4** (clockwise from top right) Ed Degginger/Color-Pic, Inc; Michael Collier; Malcolm Fife/Getty Images, Inc.–Photodisc; Inga Spence/Visuals Unlimited **15-25** Geoff Tompkinson/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **15-26** Inga Spence/Visuals Unlimited **15-27** Michael Collier **CO-16** Fundamental Photographs **16-36** Michael

J. Lutch/Boston Museum of Science **16-43** Dr. Gopal Murli/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **CO-17** Gene Moore/Phototake NYC **17-13c** Tom Pantages/Tom Pantages **17-17** Tom Pantages/Tom Pantages **17-18** Custom Medical Stock Photo, Inc. **17-22** Jon Feingersh/Jon Feingersh **CO-18** Mahaux Photography/Getty Images Inc. — Image Bank **18-01** J. L. Charmet/Science Photo Library/Photo Researchers **18-06b** Dave King/Dorling Kindersley Media Library **18-11** T. J. Florian/Rainbow **18-15** Richard Megna/Fundamental Photographs **18-16** Tony Freeman/PhotoEdit **18-18** Barbara Filet/Tony Stone Images **18-32** Jerry Marshall/Jerry Marshall **18-34** Scott T. Smith/Corbis/Bettmann; www.corbis.com/Scott T. Smith/Corbis Images **18-36** Jim Wehtje/Getty Images, Inc. — Photodisc. **CO-19** Courtesy of iRiver **19-24** Dept. Clinical Radiology, Salisbury District Hospital/SPL/Photo Researchers, Inc.; Department of Clinical Radiology, Salisbury District Hospital/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **19-27a** Getty Images, Inc. — Photodisc. **19-27b** William E. Ferguson/William E. Ferguson **19-27c** Ed Degginger/Color-Pic, Inc. **19-29a** Paul Silverman/Fundamental Photographs **19-29b** Paul Silverman/Fundamental Photographs **CO-20** Chris Rogers/Rainbow; © 2000 Chris Rogers/Rainbow **20-01** Unidentified/Dorling Kindersley Media Library; © Dorling Kindersley **20-04a** Stephen Oliver/Dorling Kindersley Media Library; Stephen Oliver © Dorling Kindersley **20-06** Mary Teresa Giancoli **20-08a** Richard Megna/Fundamental Photographs **20-18** Pekka Parviainen/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **20-50** Clive Streeter/Dorling Kindersley Media Library; Clive Streeter © Dorling Kindersley **CO-21** Richard Megna/Fundamental Photographs **21-08** Diva de Provence **21-13** Werner H. Muller/Peter Arnold, Inc. **21-21** Joe Raedle/Getty Images, Inc — Liaison **21-27b** Pete Saloutos/Corbis/Bettmann **21-30a** Richard Megna/Fundamental Photographs **CO-22** Jeremy Woodhouse/Getty Images, Inc. — Photodisc. **22-01** American Institute of Physics/Niels Bohr Library/AIP Emilio Segrè Visual Archives **22-09** Image Works **22-18** Larry Mulvehill/The Image Works; © Larry Mulvehill/The Image Works **22-21** World Perspectives/Getty Images, Inc. — Stone Allstock **CO-23** Mulvehill/The Photo Works **23-05** Douglas C. Giancoli **23-9a** Mary Teresa Giancoli/Mary Teresa Giancoli; Mary Teresa Giancoli and Suzanne Saylor **23-9b** Paul Silverman/Fundamental Photographs **23-18** Travel Pix Ltd./SuperStock, Inc. **23-21** Mary Teresa Giancoli **23-28b** S. Elleringmann/Bilderberg/Aurora & Quanta Productions, Inc. **23-30** Douglas C. Giancoli and Howard Shugat **23-46** Mary Teresa Giancoli **CO-24** Dave King/Dorling Kindersley Media Library; Dave King © Dorling Kindersley **24-04a** John M. Dunay IV/Fundamental Photographs **24-13** Science Photo Library/David Parker/Photo Researchers **24-17** George B. Diebold/Corbis/Bettmann **24-31b** Ken Kay/Fundamental Photographs **24-33** Bausch & Lomb Incorporated **24-35** Kristen Brochmann/Fundamental Photographs **24-51** Texas Instruments Incorporated **24-52b** Dan Rutter/Daniel Rutter; © Daniel Rutter/Dan's Data **24-55** Pekka Parviainen/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **24-56** Spike Mafford/Getty Images, Inc. — Photodisc. **CO-25** Richard Megna/Fundamental Photographs **25-04** Mary Teresa Giancoli **25-07** Leonard Lessin/Peter Arnold **25-18** Franca Principe/Istituto e Museo di Storia della Scienza, Florence, Italy **25-20** Yerkes Observatory **25-21c** Palomar/Caltech **25-21d** Roger Ressmeyer/Starlight **25-23b** Olympus America Inc. **25-28** Reproduced by permission from M. Cagnet, M. Francon, and J. Thrier, *The Atlas of Optical Phenomena*. Berlin: Springer-Verlag, 1962. **25-31** Space Telescope Science Institute **25-32** National Astronomy & Ionosphere Center, Cornell University, Arecibo, Puerto Rico **25-36** Photo by W. Friedrich/Max von Laue. Burndy Library, Dibner Institute for the History of Science and Technology, Cambridge, Massachusetts. **25-40** Rosalind Franklin/Photo Researchers **25-44a** Martin M. Rotker/Martin M. Rotker **25-44b** Simon Fraser/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **25-47** Ron Chapple/Getty Images, Inc. — Taxi **CO-26** Cambridge University Press; “The City Blocks Became Still Shorter” from page 4 of the book, “Mr Tompkins in Paperback” by George Gamow. Reprinted with the permission of Cambridge University Press. **26-01** Corbis/Bettmann **26-11** Cambridge University Press; “Unbelievably Shortened” from page 3 of “Mr Tompkins in Paperback” by George Gamow. Reprinted with the permission of Cambridge University Press. **CO-27** P. M. Motta and F. M. Magliocca/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **27-11** S. A. Goudsmit/American Institute of Physics/Niels Bohr Library/AIP Emilio Segrè Visual Archives **27-12** Education Development Center, Inc. **27-15a** Lee D. Simon/Science Source/Photo Researchers, Inc. **27-15b** Oliver Meckes/Max-Planck-Institut-Tubingen/Photo Researchers, Inc. **CO-28** Richard Cummins/Corbis/Bettmann; © Richard Cummins/Corbis **28-01** American Institute of Physics/Emilio Segrè Visual Archives **28-02** ED. Rosetti/American Institute of Physics/Emilio Segrè Visual Archives **28-04** Advanced Research Lab, Hitachi, Ltd. **28-15** Mark Schneider/Visuals Unlimited **28-21** Yoav Levy/Phototake NYC **28-23** Philippe Plaily/Photo Researchers, Inc. **CO-29** Intel Corporation Pressroom Photo Archives **CO-30** Reuters Newsmedia Inc./Corbis **30-03** Center for the History of Chemistry **30-07** University of Chicago/American Institute of Physics/Niels Bohr Library/Courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives **30-16** Fermilab Visual Media Services **CO-31** Peter Beck/Corbis/Bettmann; © Peter Beck/CORBIS **31-05** Gary Sheahan, “Birth of the Atomic Age,” Chicago (Illinois); 1957. Chicago Historical Society, ICHI-33305. **31-08** LeRoy N. Sanchez/Los Alamos National Laboratory **31-10** Corbis **31-13** Lawrence Livermore National Laboratory/Science Source/Photo Researchers, Inc. **31-16** J. Van’t Hof. **31-21** Southern Illinois University/Peter Arnold, Inc. **31-23** Mehau Kulyk/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **CO-32** Fermilab/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **32-01** Science Service/Watson Davis/American Institute of Physics/Niels Bohr Library/AIP Emilio Segrè Visual Archives/Physics Today Collection **32-03a** Fermilab Visual Media Services **32-03b** Fermilab Visual Media Services **32-04b** Barrie Rokeach/Aerial/Terrestrial Photography **32-05** CERN/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. **32-09** Science Photo Library/Photo Researchers **32-10** Brookhaven National Laboratory **CO-33** NASA/WMAP Science Team/NASA Headquarters **33-01** NASA Headquarters **33-02** Photo Researchers **33-03** U.S. Naval Observatory Photo/NASA Headquarters **33-04** National Optical Astronomy Observatories **33-09** Hubble Space Telescope/NASA/NASA Headquarters; Courtesy of NASA and the Hubble Heritage Team **33-11** National Optical Astronomy Observatories **33-22** Bell Photographers, Inc. **33-24** NASA Headquarters; GSFC/NASA **33-28** Dr. Wes Colley