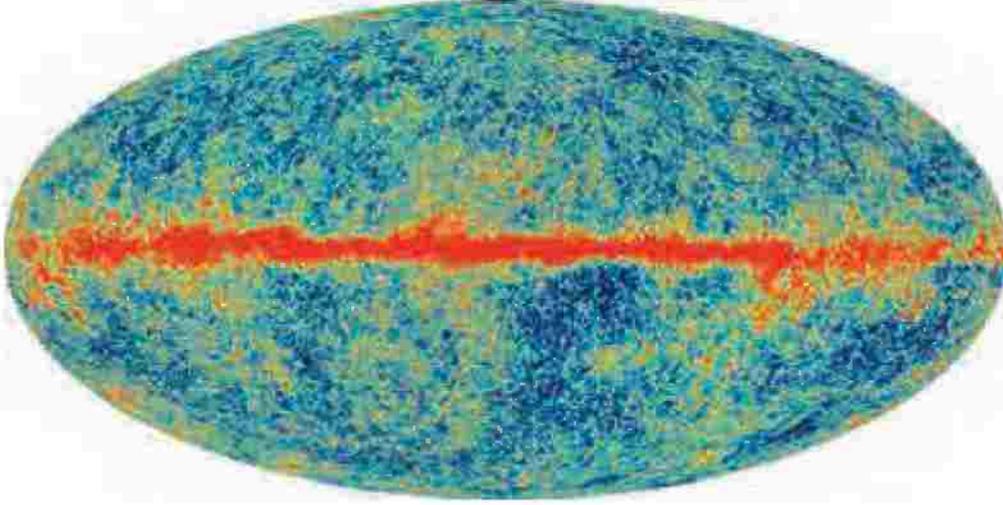


تمثل الألوان في هذه الخريطة للسماء (WMAP) التغيرات الطفيفة لدرجة الحرارة في الخلفية الإشعاعية المنتظمة الناجمة من أشعة الميكروويف التي حرارتها 2.7-K ، والتي تصلنا من الاتجاهات جميعها في السماء. لقد أنتجت هذه الخريطة في عام 2003، وهي توفر لنا معلومات مفصلة عن أصل الكون وتركيبه. ويشير الشريط الأحمر في 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. وسنناقش 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 أخيرا إلى بعض المشكلات التي لا تزال بحاجة إلى حلّ. كطبيعة الأجسام المعتمدة، والطاقة المعتمدة التي تشكل 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 الثَّانية 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 السَّنة الضوئية (light-year \equiv ly)

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

السَّنة الضوئية
(وحدة)

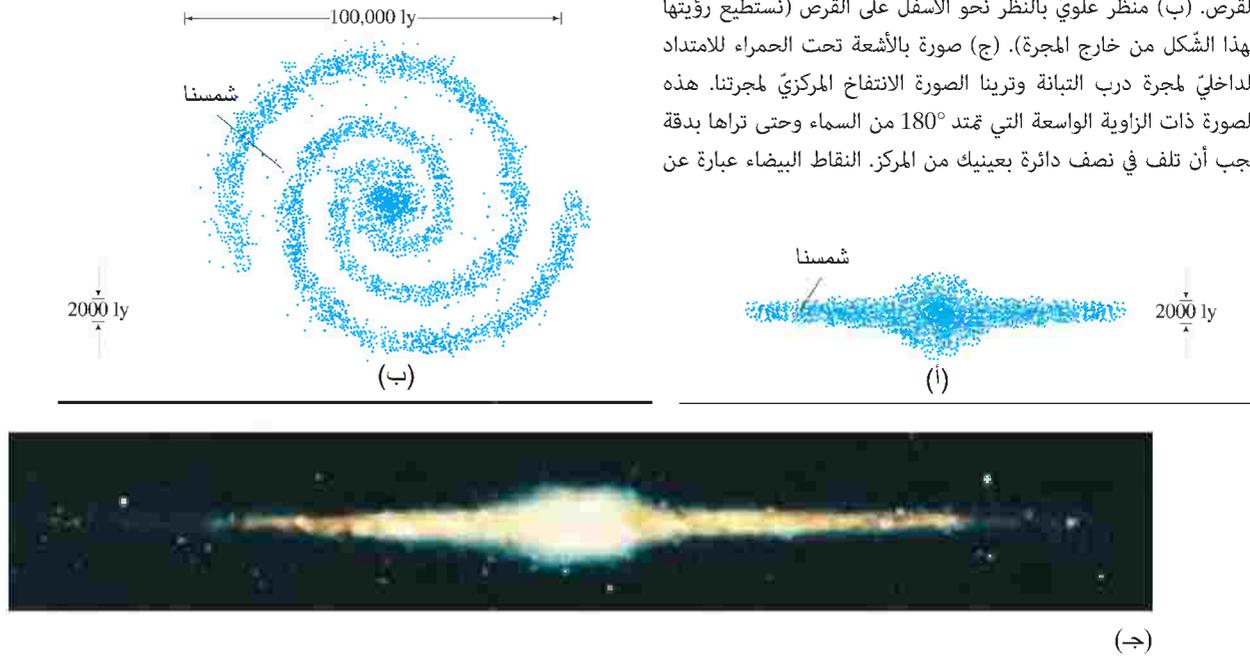
ولتحديد المسافة من الأرض إلى الشَّمس أو القمر، فإنَّنا نستخدم عادةً وحدة المتر أو الكيلومتر ولكن يمكن أن نحددها بدلالة سرعة الضوء. إنَّ المسافة بين الأرض والقمر تساوي 384,000 km وتساوي 1.28 ثانية ضوئية. أما المسافة بين الأرض والشَّمس فتساوي $1.50 \times 10^{11} \text{ m}$ أو 150,000,000 km وهذه تساوي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

إنَّ أقرب نجم إلينا، عدا الشَّمس، هو نجم بروكسيما سينتوري الذي يبعد عنَّا مسافة 4.3 ly (لاحظ أنَّ أقرب نجم يبعد عنا نحو 10,000 مرَّة من أبعد نقطة في مجموعتنا الشَّمسية). 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 تسمَّى درب التبانة. أول ملاحظات جاليليو بالتلسكوب الذي صنعه هو أنَّ درب التبانة هو تجمُّع هائل غير محدود من النجوم المنفردة. وبعد نحو قرن ونصف (عام 1750 تقريبًا) أشار توماس رايت إلى أنَّ درب التبانة قرصٌ 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. يمثِّل الخطُّ 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 تقريبًا. وذات سمك يساوي نحو 2000 سنة ضوئية. ولها انتفاخ مركزيّ (نواة). وأذرع لولبية (الشكل 33-2). وتقع شمسنا التي تبدو كنجم مجاور عند نصف المسافة بين مركز المجرة وحافتها تقريبًا. 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 تقريبًا. 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 مركّزة بالقرب من مركزها. **النّهج:** 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 الجاذبيّة الناجمة من قانون الجذب العام (الفصل 5). **الحل:** تدور شمسنا مع نظامنا الشمسيّ حول مركز المجرة بسرعة تساوي $v = 200$ km/s تقريبًا وفقًا لأفضل الأقيسة كما ذكرنا سابقًا. وتقع على مسافة من مركز المجرة تساوي $r = 26,000$ ly تقريبًا. 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} ($(2 \times 10^{41} \text{ kg}) / (2 \times 10^{30} \text{ kg}) \approx 10^{11}$) أو 100 بليون نجم تقريبًا.



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.



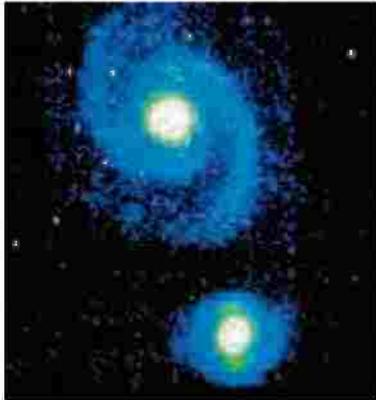
وبالإضافة إلى النجوم الموجودة داخل مجرة درب التبانة وخارجها، نستطيع أن نرى بالتلسكوب بقايا غيمية باهتة في السماء، تُسمى السُّدم (nebulae). بعض من هذه السُّدم موجودة في تجمعات أندروميديا وأوريون النجمية، والتي يمكن تمييزها بالعين المجردة في الليالي الصافية. وهناك بعض العناقيد النجمية (الشكل 33 - 3) وهي 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 لأنها على مسافة كبيرة. في البداية، لم يُقبل عالميًا أنّ هذه الأجسام خارج مجرتنا. لقد أظهرت التلسكوبات الكبيرة التي صمّمت في القرن العشرين أنّ التجمّات 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 السُّدم هي مجرات مشابهة لمجرتنا (لاحظ أننا، عادةً، 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 هناك 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 بعض من المجرات في كلّ عنقود أو عدة آلاف منها.

* 2.5 m (= 100 inches) تشير إلى قطر المرآة الشيئية المحدبة. كلما 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 الى وقت طويل للتعرف للضوء. أما 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 نابضة مجرتنا.

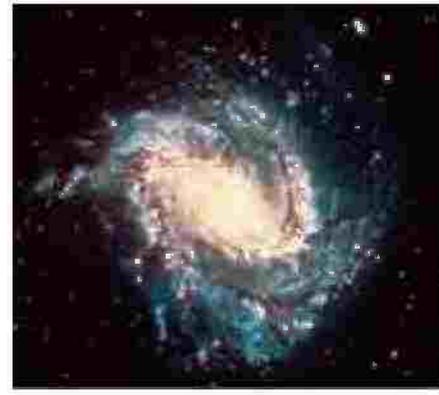
الشكل 33 - 5 صور للمجرات. (أ) مجرة لولبية في مجموعة هيدرا النجمية. (ب) مجرتان؛ الكبيرة منهما والأكثر إثارة تعرف باسم مجرة الحوض الدوار. (ج) صورة بالأشعة تحت الحمراء بألوان غير حقيقية للمجرتين الموضحتين في الشكل (ب)، وهنا تبدو الأذرع اللولبية أكثر انتظامًا من الصورة بالضوء المرئي (ب)، الألوان المختلفة 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 كيبيرة	2.4×10^6
أبعد العجرات	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 النّجوم العادية، والعناقيد النّجمية، والمجرات، والعناقيد المجرية، والعناقيد الفائقة، فإنّ الكون يحتوي على أجسام أخرى مثيرة، من أمثلتها نجوم تُسمّى العملاقة الحُمْر، والأقزام البيض، والنّجوم النيوترونية،

ونجوم 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 النّجوم، وهي خلفية الميكروويف الإشعاعية، والتي تظهر بانتظام من الاتجاهات كافة في الكون. وسوف نناقش لاحقاً هذه الظواهر جميعها.

أخيراً، فإنّ هنالك الأنوية المجرّبة الفاعلة (AGN) وهي مصادر نقطية مضيئة جدّاً في مراكز المجرات وأكثر مثال مثير لها هو شبيهات النّجوم (كريزارس) والتي تكون مضيئة جدّاً، وتجب الأضواء النّجمية التي تحيط 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 تغيير ملحوظ. في الواقع، وبمقياس الإنسان الزمني، فإنّ الأكثرية السّاحقة للنّجوم تتغير 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 **السطوع 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. وهنالك 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 كمّي، 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 موجي يساوي 700 nm تقريبًا (مائل للأحمر). في حين يعطي طيف النجم الأحمر هذه القيمة عند 350 nm 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

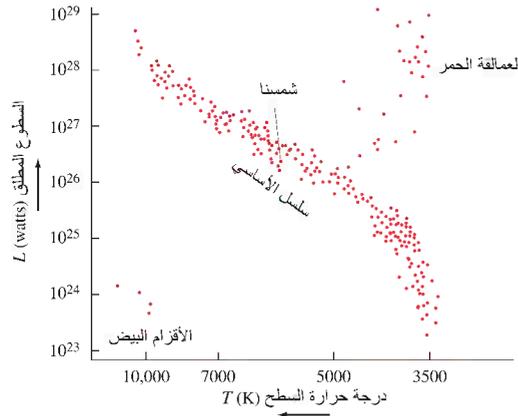
$$T_r = \frac{2.90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{700 \times 10^{-9} \text{ m}} = 4140 \text{ K}.$$

وتكون درجة حرارة النجم المائل للأزرق ضعف هذه القيمة: لأنّ الطول الموجي 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 يُسمى 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 يُمثل بنقطة على هذا المخطط. (الشكل 33 - 6). تقع معظم النجوم على الخط القطري الذي يعرف بالسلسلة الأساسي (main sequence). إذا بدأنا من أسفل اليمين، فسندرج 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، فسندرج النجوم الأكبر كتلة، والأكثر سطوعاً. وذات اللون الأزرق. تسمى 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، وتسمى العملاقة الحمر (red giants). وفي أسفل اليسار، نجد عدداً قليلاً من النجوم ذات سطوع قليل، وبدرجة حرارة عالية تُسمى الأقزام البيض (white dwarfs).

مخطط H - R

نجوم التسلسل الرئيس

العملاقة الحمر
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 $\lambda_p \approx 600$ ، فقدر 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

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

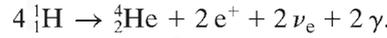
التمرين ب قدر بعد نجم درجة حرارته 6000 K و سطوعه الظاهري $2.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$

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 شدّة 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 الأوّلي، 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، مما 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 10^7K ، وتقابل متوسط طاقة حركية (kT) تساوي 1keV تقريباً (المعادلة 13 - 8). وفي النجوم ذات الكتل الأكبر، فإنّ حلقة الكربون تنتج الأثر نفسه: أربع أنوية من 4He تنتج 12C نواة (انظر البند 31 - 3). يحدث تفاعل الاندماج بدايةً في قلب النجم، حيث تكون درجة الحرارة T عالية بما فيها الكفاية. (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 جُمًا يافعًا 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: فإننا 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

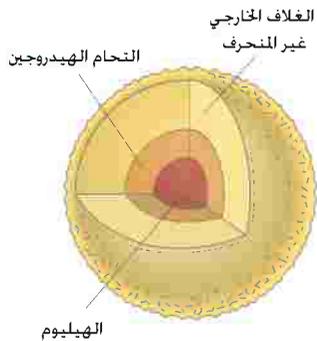
اجتياز التسلسل الأساسي

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 تشكّل 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، مما يسبب تمدد الغلاف الخارجي وبرودته. وبالتالي، فإنّ درجة حرارة سطح النجم تقلّ مما يؤدي إلى إنتاج طيف ضوئيّ تكون قمته على طول موجي أكبر (أكثر احمرارًا).

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

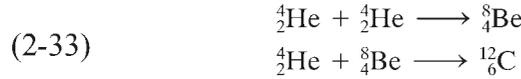
* تستخدم كلمة حرق في تفاعلات الاندماج ذات الحرارة العالية، والتي تحدث بعملية نووية ولا تقارن بعملية الاحتراق العادية (مثل احتراق الورق، أو الخشب، أو الفحم) والتي هي عبارة عن تفاعل كيميائيّ يحدث على مستوى الذرة (وله درجة حرارة أقلّ بكثير).

** 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} سنة.

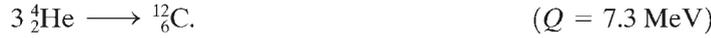


حتى هذا الوقت، يكون النجم إلى يسار التسلسل الأساسي. يصبح النجم أكثر احمرارًا. وعندما يزداد حجمه، يصبح أكثر سطوعًا. وبعد ذلك، يبدأ بالتحرك نحو اليمين وإلى الأعلى على مخطط H – R كما هو موضَّح في (الشكل 33 – 8). وكلما حرك إلى الأعلى، فإنه يقترب من مرحلة العملاقة الحمراء. لذا، فإنَّ النظريات تناقش أصل العملاقة الحمراء كخطوة طبيعية لتطور النجم. إنَّ شمسنا، على سبيل المثال، موجودة في التسلسل الأساسي منذ 4½ 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، فإنَّ 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 (لأنَّ غير مستقر بشكل كبير) وبالتالي يكون التأثير النهائي لهذه التفاعلات:

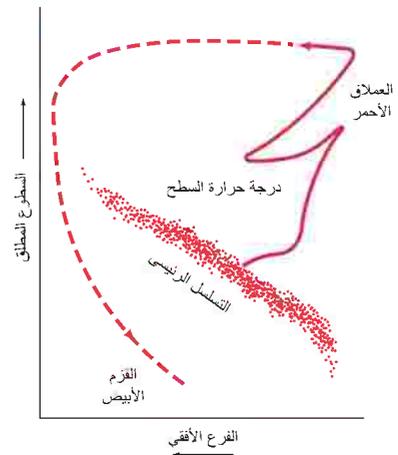


بسبب هذا الاندماج للهيليوم تغيرًا في النجم الذي يتحرك بسرعة على التفرع الأفقي على مخطط H – R (الشكل 33 – 8). بالإضافة إلى ذلك، فإنَّ تفاعلات الاندماج النووي لـ ${}^4_2\text{He}$ مع ${}^{12}_6\text{C}$ يمكنه لتكوين ${}^{16}_8\text{O}$. وفي النجوم ذات الكتل الأكبر، فإنَّ عناصر لها عدد ذري (Z) أكبر مثل ${}^{20}_{10}\text{Ne}$ أو ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ يمكن أن تتكوّن. وتسمّى هذه الآلية لتكوين أنوية أثقل من أنوية أخف (أو بامتصاص النيوترونات والذي يظهر عند الأعداد الذرية الأكبر) السلسلة النووية.

إنَّ 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 حدٍّ نموذجي يتبع المسار الموضح في (الشكل 33 – 8). ومن ثمَّ يهبط إلى الأسفل ليصبح قزمًا أبيض. إنَّ القزم الأبيض بكتلة تساوي كتلة الشمس له حجم يساوي حجم الأرض. إنَّ 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. إنَّ 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 بأنَّ 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. إنَّ الأنوية التي بثقل ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ و ${}^{58}_{28}\text{Ni}$ 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)، فإنَّ متوسط طاقة الربط لكل نيوكليون تبدأ بالتناقص عند عدد كتلي A أكبر من حوالي 60. بالإضافة إلى ذلك، فإنَّ الاندماج يحتاج إلى طاقة أكثر من التي يطلقها العناصر الأثقل من النيكل (Ni) يعتقد أنها تتكون أساسًا من التقاط النيوترون، وبشكل جزئي في انفجار السوبرنوفا. عدد كبير من النيوترونات الحرة ينتج من التفاعلات النووية، ويظهر داخل النجوم وتستطيع أن تتحد مع نواة ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ على سبيل المثال لتكوين (عند التقاط ثلاثة منها) نواة ${}^{59}_{26}\text{Fe}$ ، وتستطيع نواة ${}^{59}_{26}\text{Fe}$ 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 السوبرنوفا عندما تتوافر مجموعة من النيوترونات.

العملاقة الحمراء



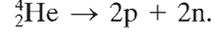
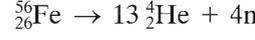
الشكل 33 – 8 مسار تطوّر نجم مثل شمسنا فمثلا على مخطط H – R.

السلسلة النووية

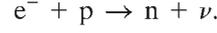
الأقزام البيضاء

إنتاج الأنوية الثقيلة

علاوة على ذلك، وعند درجات الحرارة العالية جدًا هذه، والتي تكون أكبر من 10^9K ، فإن الطاقة الحرارية للأنوية تكون عالية جدًا بحيث يبقى اندماج الأنوية الأثقل من الحديد ممكنًا 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 عاليتين جدًا، 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 محددًا مبدأً باولي للاستثناء، والذي يطبق هنا على النيوترونات (*neutron degeneracy*) ويبدأ النجم بالانكماش سريعًا باتجاه تكوين نجم نيوتروني هائل الكثافة. إن انكماش القلب يعني نقصًا كبيرًا 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 فعليًا تشكيل عناصر الجدول الدوري كلها. وإطلاق الغلاف الخارجي للنجم بالكامل بعيدًا (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، هناك نجم نيوتروني دوار يُسمى النابض (Pulsar).

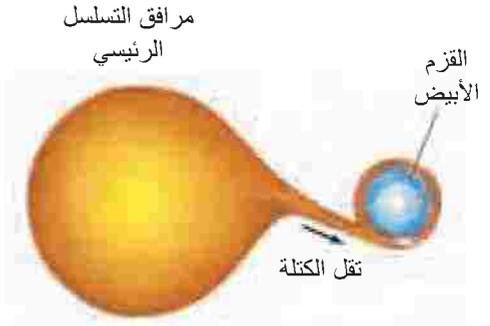
إن قلب النجم النيوتروني ينكمش إلى النقطة التي تكون عندها النيوترونات كلها قريبة من بعضها كقربها في النواة. أي أن كثافة النجم النيوتروني أكبر 10^{14} مرة من الأجسام الصلبة والسائلة العادية على سطح الأرض. إن كوكبًا ملوًا من مادة النجم النيوتروني قد يزن ملايين الأطنان. كما أن النجم النيوتروني الذي كتلته أكبر بمرتين 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 تطوراتهِ المتتالية، يعتقد أنه سيصبح مشابهاً للأقزام البيضاء. ولكن إذا كانت الكتلة أكبر من ذلك، فإن النجم سينهار تحت تأثير الجاذبية، متجاوزًا حتى مبدأ باولي للاستثناء الخاص بالنيوترونات. وتصبح الجاذبية هنا قوية جدًا؛ 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 راجعًا. وأي جسم يمر به أو ينحرف باتجاهه نتيجة مجال جاذبيته بحيث يكون قريبًا جدًا منه، فإنه سوف يتلعه، ولن يفلت منه. وهذا ما يُسمى بالثقوب السوداء.

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 يبدّ 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 بانتهيار 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

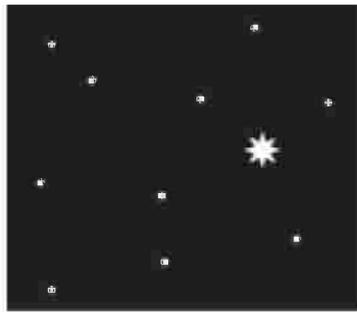
3-33 قياس المسافات

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.

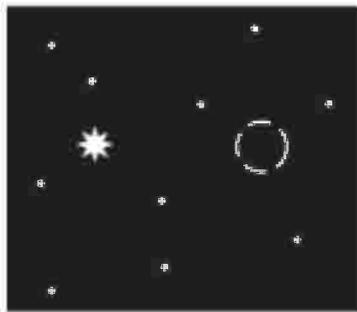
* هذه هي الطريقة المستخدمة لتحديد ارتفاع الجبال بواسطة المثلثات. انظر (المثال 9-1).

كيف نستطيع قياس المسافات الفلكية؟

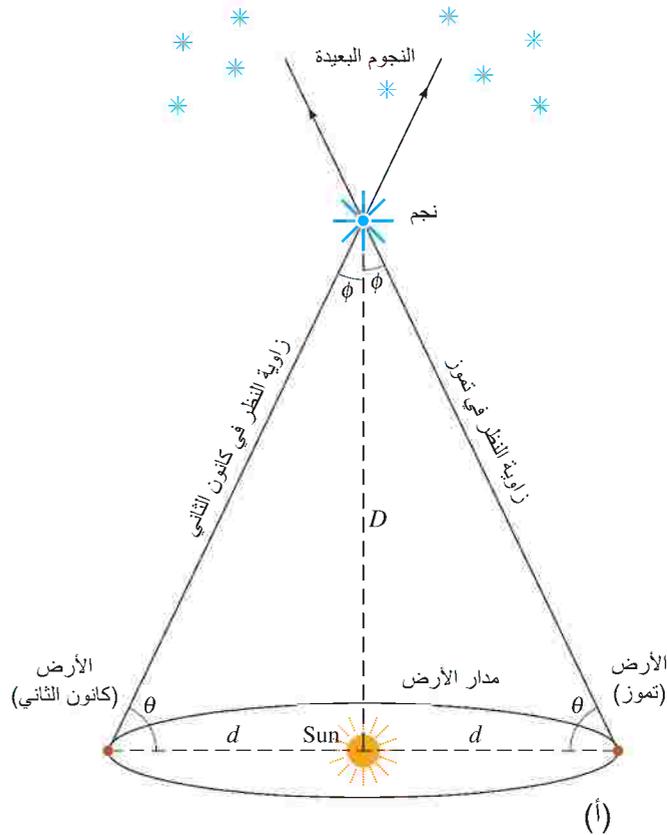
الشكل 33 - 11 (أ) تحديد بعد النجم بطريقة اختلاف المطلع. المثلثات التخيلية هي مثلثات قائمة، و ϕ زاوية صغيرة جدًا. (ب) يرينا منظرًا للسماء، موقع الظهور لنجم قريب بالنسبة للنجوم الأبعد في وقتين مختلفين (كانون الثاني وتموز). زاوية الظهور في كانون الثاني تضع النجم أبعد إلى اليمين بالنسبة لموقع النجم، ولكن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



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° .
 النهج: من هندسة المثلثات، يكون $\tan \phi = d/D$ في (الشكل 33 - 1). البعد بين الشمس والأرض هو $d = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$
 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 $\frac{1}{60}$ 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 $1/0.22'' = 4.5 \text{ pc}$. 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 ($\approx 30 \text{ parsecs}$) 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 يبت 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).



(أ)

مبدأ التساوي



(ب)

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 الأربع 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.

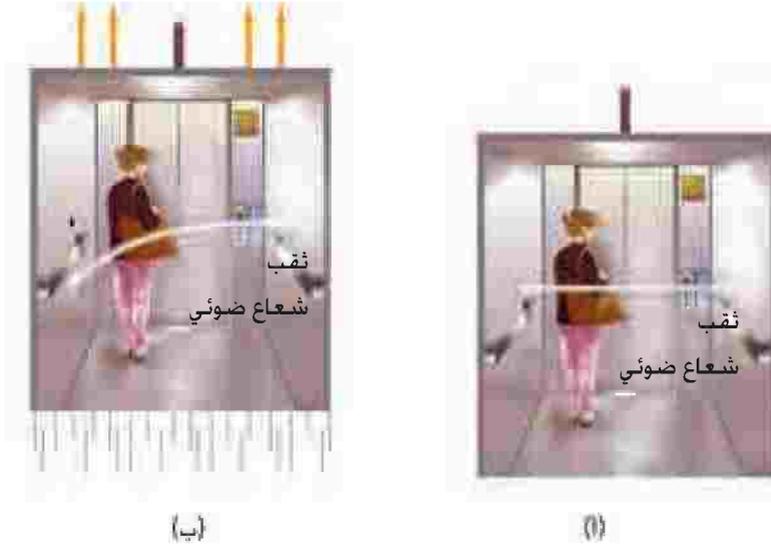
سنبدأ بمبدأ أينشتاين للتكافؤ الذي ينصّ على:

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 قصوري. ولا يستطيعون عمل شيء مع الجاذبية.

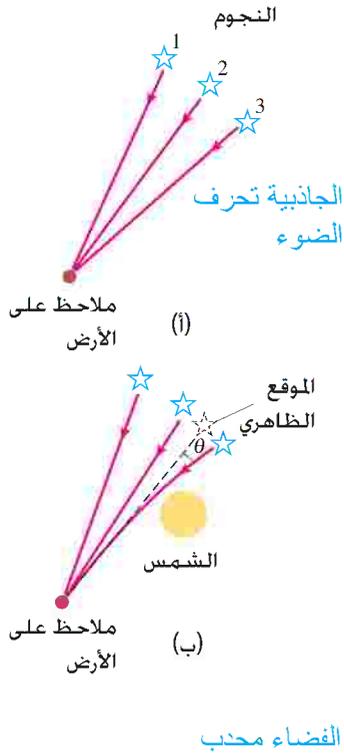
وكتجربة ذهنية. افترض أن شخصاً ما داخل مصعد يسقط سقوطاً حرّاً بالقرب من سطح الأرض. إذا كانت مشاهدتنا هي إسقاط كتاب من بين يدي هذا الشخص. فماذا سيحدث؟ ستقوم الجاذبية بسحبه للأسفل باتجاه الأرض. ولكن في الوقت نفسه. فإنّ الشخص والمصعد يتحركان نحو الأسفل بالتسارع نفسه ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$). لذا. فإنّ الكتاب 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 - بدقّة 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!

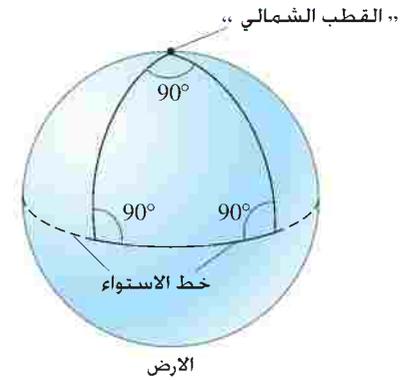
إنّ تأثير الضوء بالجاذبية هو استنتاج مهمّ لنظرية أينشتاين العامة في النسبية. ويمكن اختبار هذا الاستنتاج. كمية الانحراف للحزمة الضوئية عن الخط المستقيم يجب أن تكون صغيرة حتى عند مرورها بالقرب من الكتل الكبيرة. (مثلًا، الضوء الذي يمر بالقرب من الأرض. وبعد مروره 1 km، يُتوقع أن ينحرف مسافة تساوي $10^{-10}m$ 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 ملامم 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 بحد ذاته محدب. 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 لتصوّر 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 تخيّل الفضاء المنحني بثلاثة أبعاد صعبٌ للغاية، فما بالك بتخيل الفضاء بأربعة أبعاد، بإضافة الزّمن كبعد رابع. لذلك، دعنا نحاول فهم فكرة الفضاء المَحْدَب باستخدام سطحين ثنائيّ الأبعاد. افترض على سبيل المثال سطحين ثنائيّ الأبعاد لكرة. من الواضح أنّ التحدب. (الشّكل 33 - 5). يظهر لنا على الأقلّ من الخارج من عالمنا ثلاثيّ الأبعاد. ولكن كيف تستطيع مخلوقات افتراضية ثنائية الأبعاد تخيّل كون الفضاء ثنائي الأبعاد مستويًا أو محدبًا؟ إنّ إحدى الطرق تكون بقياس مجموع زوايا المثلث. إذا كان السّطح 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 (الشّكل 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 (الشّكل 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 الشّكل. 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 السّطح 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.

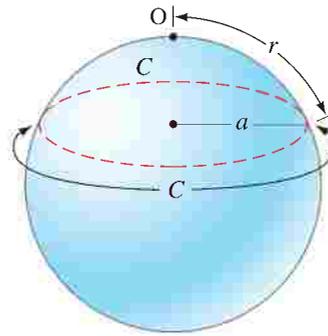
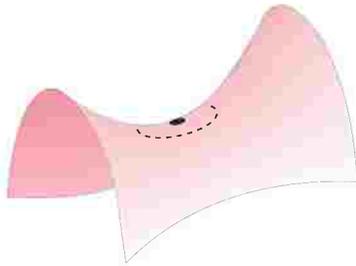
الجيوديسك (الخط الجيوديسي)



الشّكل 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 السّطح المستوي، يكون $C = 2\pi r$. ولكن في السّطح الكروي ثنائيّ الأبعاد، فإنّ C تكون أقلّ من $2\pi r$ كما يمكن ملاحظته في (الشّكل 33 - 16). إنّ التّناسب بين C و r أقلّ من 2π . ويقال لمثل هذا السّطح بأنّه ذو انحناء موجب. إنّ محيط الدائرة للسّطح الموضح في (الشّكل 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.

الشّكل 33 - 17 مثال على سطح ثنائيّ 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 مستوي (دون انحناء)؟ إذا كان للكون انحناء موجب، فيجب أن يكون مغلقًا، 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 بخطّ مستقيم باتجاه معيّن فإنّه سيعود إلى نقطة البداية: بالطبع بعد دهر من الزّمن.

الشّكل 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 صفراً أو سالباً، فإنّ الكون يكون مفتوحاً وسيستمر كذلك إلى الأبد. ومن الممكن أن يكون الكون المفتوح لانهائياً، ولكن ليس بالضرورة اعتماداً على الأبحاث المعاصرة.

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



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

الثقوب السوداء

استناداً 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، وعضواً 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 جداً، لدرجة أنّ الضوء لا يستطيع الإفلات منه. وحتى يصبح ثقباً أسود، فإنّ الجسم ذا الكتلة M يجب أن يخضع لانهايار جاذبي بحيث ينقبض تحت تأثير جاذبيته الذاتية ليصبح نصف قطره مساوياً لما يُسمّى بنصف قطر شوارزشيك:

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

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

الأفق اللحظي

يمثل نصف قطر شوارزشيك أيضاً 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 ثقباً سوداً دوّارة)، وشحنه الكهربائي. 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 أجساماً سوداً 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 دوّارة كأنها أعضاء في نظام ثنائي (نجمان يدوران حول مركز كتلتهما). وأيضاً فإنّ النجم المرافق يكون غير مرئي، إذا كان النجم غير المرئي ثقباً 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 دليلاً 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) نقسناً على ضرب نيوتن بقول: الطبيعة، وقوانين الطبيعة مخبأ في الليل.

قال الله، ليكن نيوتن، فكان الضوء

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

لم تدم طويلاً: 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 النجوم من الولادة وحتى الممات مثل الأقزام البيض، والنجوم النيوترونية، والثقوب 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، وأنه كلما كانت أبعد كانت أسرع في الابتعاد. كيف توصل الفلكيون إلى هذه الفكرة الفلكية؟ 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 تغيير كل 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 الضوء، ولكن الطول الموجي أو التردد الجديدين يعطيان بصيغة تختلف قليلاً عما 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 الضوء (إذا كان مرئياً) باتجاه النهاية الحمراء للطيف المرئي، وتعرف هذه الظاهرة بالانزياح نحو الأحمر. (إذا كان المصدر يتحرك باتجاهنا، فإنّ لون الضوء 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 الضوء، من السهل إثبات أنّ z (المسألة 29) تتناسب مع سرعة المصدر في حالة ابتعاده عنا (كما هو الحال بالنسبة للصوت).

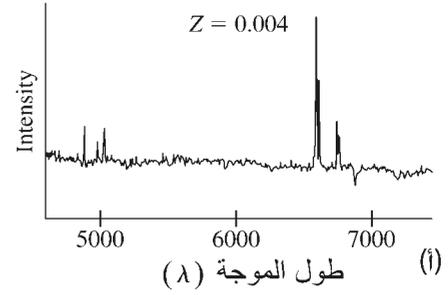
$$(5-33) \quad z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \approx \frac{v}{c} \quad [v \ll c]$$

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

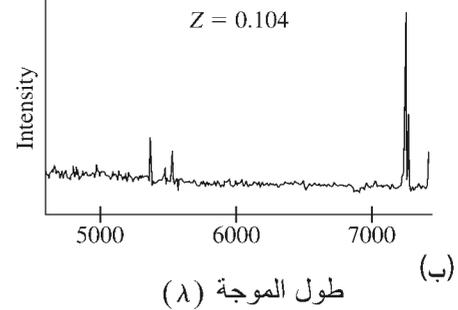
* بالنسبة للضوء، لا يكون هناك وسط ناقل، ولا يميّز بين حركة كل من المصدر والمشاهد (التطريّة النسبية الخاصة) كما هو الحال في حالة الصوت الذي يحتاج إلى مصدر مادي ينتقل فيه (الفصل 12).

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

انزياح نحو الأحمر المنخفض لطيف المجرة



انزياح نحو الأحمر المرتفع لطيف المجرة



الشكل 33 - 19

الذرات والجزيئات تبعث الضوء وتمتصه 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)

$$v = Hd.$$

قانون هيل

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

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

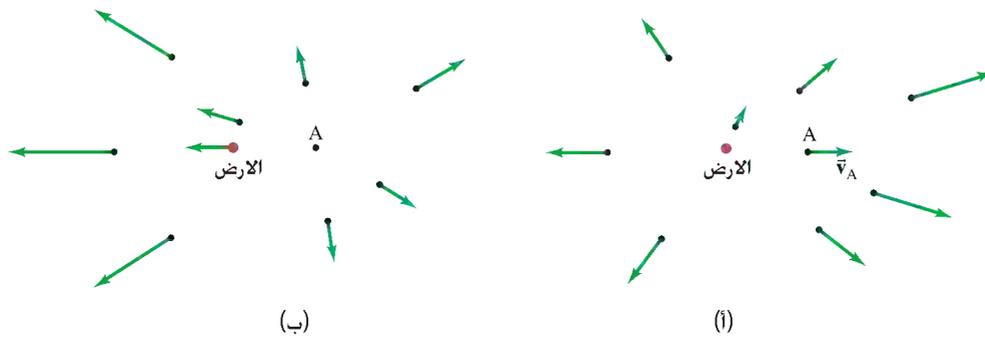
متغيرات هيل

(أي 71 km/s لكل ميغا فرسخ من المسافة). الخطأ في هذه القيمة نحو 5% أو 4 km/s/Mpc \pm . 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.

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 بقياس 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

إنَّ إحدى الطرائق لتقدير عمر الكون هي باستخدام معامل هبل: حيث $H \approx 22 \text{ km/s}$ لكل 10^6 سنة ضوئية. فإنَّ الزمن اللازم للمجرات للوصول إلى وضعها الانفصالي الحالي سيكون تقريبًا (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 اتفاقًا كبيرًا 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 أبد الدهر. ويبدو الآن كما لو كان في أيّ وقت مضى (هذا يفترض الانتظام في كلّ من الزمان والمكان ويُسمّى المبدأ الكوني التام). واستنادا إلى نموذج ثبات الحالة. فإنّه لا توجد تغيرات في مقياس كبير قد حدثت في الكون كوحدة واحدة. أي لا يوجد انفجار عظيم. لتأكيد هذه النظرية 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 جدًّا: نيوكليون واحد في المتر المكعب كلّ 10^9 سنة تقريبًا.

لقد زوّد نموذج ثبات الحالة نموذج الانفجار العظيم بمنافسة مناسبة في منتصف القرن العشرين. ولكن اكتشاف أشعة المايكرويف الكونية الخلفية (البند اللاحق). بالإضافة إلى التمدد الملحوظ في الكون جعل نموذج الانفجار العظيم مقبولًا عالميًا تقريبًا.

6-33 الانفجار العظيم وخلفية المايكرويف 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 تعدد من حالة تتصف بكثافة ودرجة حرارة مرتفعة جدًّا تُسمّى الانفجار العظيم.

إنّ الانفجار العظيم ليس انفجارًا؛ لأنّ الانفجار ينثر قطعًا إلى الفراغ المحيط. ولكن بدلًا من ذلك. فإنّ الانفجار العظيم كان بداية لتمدد الكون نفسه. إنّ حجم الكون الذي نشاهده كان صغيرًا جدًّا في البداية. ثم تمدد منذ ذلك الحين. ويجب ألا نعتقد أنّ الحجم الأصلي الدقيق لمادة كثافتها كبيرة جدًّا 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. فإننا 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 للمايكرويف الكونية (CMB) التي اكتشفت كما يلي:

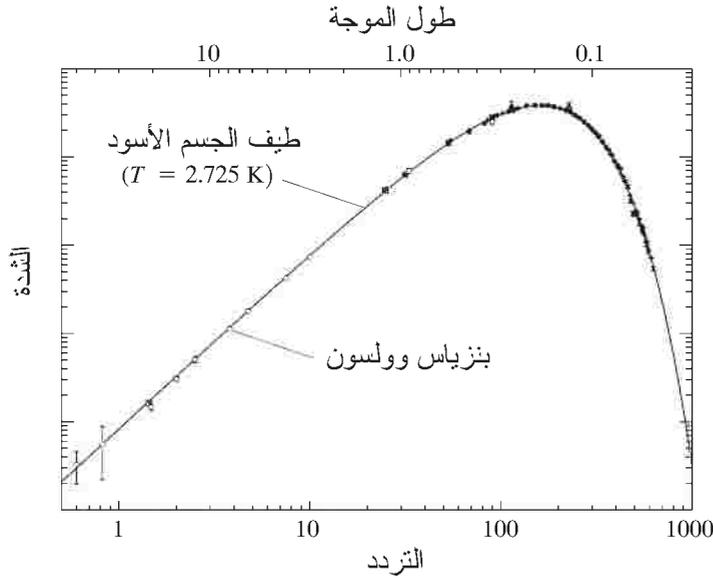
في عام 1964 كان العالمان أرنو بنزياس وروبرت ولسون يختبران مشكلة ما افترضاه التشويش الخلفي "أو السكوني" في التلسكوب اللاسلكي الخاص بهما (جهاز هوائي كبير للكشف عن موجات المذياع من السماء. الشّكل 33 - 21). وفي النهاية. اقتنعا أنّ هذا التشويش حقيقيّ. وأنّه قادم من خارج المجرة. لقد قاما بإجراء أقيسة دقيقة عند الطول الموجي $\lambda = 7.35 \text{ cm}$ الذي يقع ضمن منطقة المايكرويف 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 (يسارًا) وأرنو بنزياس وخلفهم الهوائي البوقي الذي صمماه.



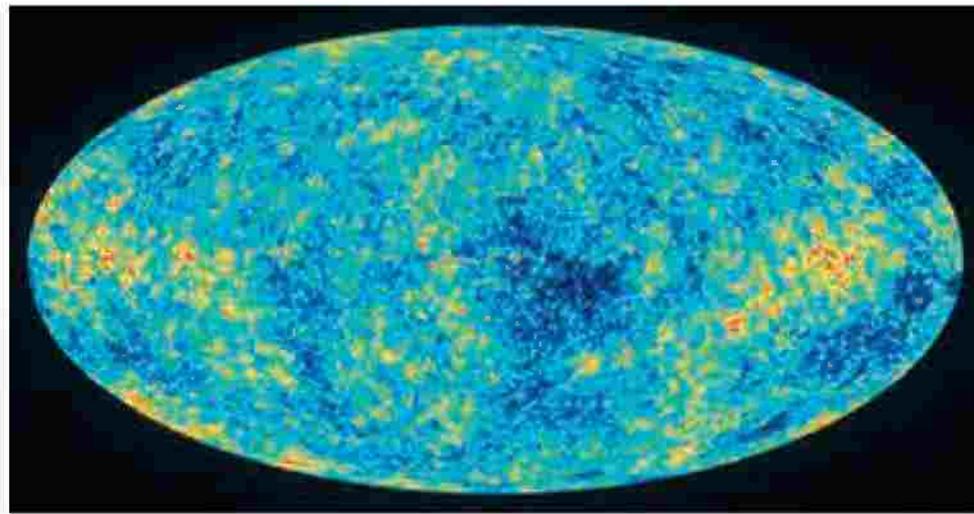
الخلفية الكونية لشعاع المايكرويف
2.73-k



الشكل 33 - 22 بين طيف الإشعاعات الخلفية الكونية للمايكرويف، يرينا منحنى 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 المايكرويف 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 منحنى الجسم الأسود كما هو مبين في (الشكل 33 - 22). لتقابل درجة الحرارة 2.725 K تبدأ قوة جديدة. لقد كان الانتظام المميز لإشعاعات خلفية المايكرويف الكونية متوافقًا مع المبدأ الكوني. ولكن شعر علماء الفيزياء النظرية بضرورة إلى وجود تباين قليل في الخصائص، أو نوع من عدم التجانس في CMB التي كونت البذور التي بدأت حولها تشكل مجرة ما، وبالفضل. فقد وجد أنّ مناطق صغيرة ذات كثافة ودرجة حرارة مرتفعة قليلًا يمكن أن تتكون قد انكمشت تحت تأثير الجاذبية لتشكل 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 مايكرويف ويلكنسون). انظر (الشكل 33 - 23). 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 للمايكرويف الكونية.

أهمية CMB: الانفجار العظيم



الشكل 33 - 23 إشعاعات خلفية المايكرويف الكونية خلال السماء، تمثّل الدلائل 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.

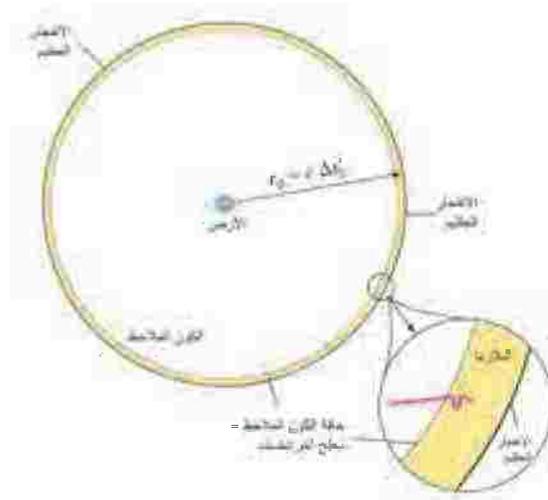
وكي نفهم السبب: دعنا نتأمل في طبيعة الانفجار العظيم. في البداية، كانت درجة الحرارة مرتفعة جداً إلى الحد الذي لا يمكن أن تكون فيه أي ذرات في المراحل المبكرة للكون. وبدلاً من ذلك، كان الكون يحتوي على إشعاعات (فوتونات)، وبلازما من إلكترونات مشحونة، وجسيمات أولية أخرى فقط. كان الكون معتمًا: أي أنّ الفوتونات 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 $2.7 K$.

الفوتونات منفصلة

* 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 المحرات 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 الأرض وبالتالي يظهر حدثاً حدث قبل ذلك الزمن $\Delta t' = r/c$ في الماضي وهذا ما نقصد بالنظر إلى الوراء. حدث الانفجار العظيم عند مليون سنة ضوئية

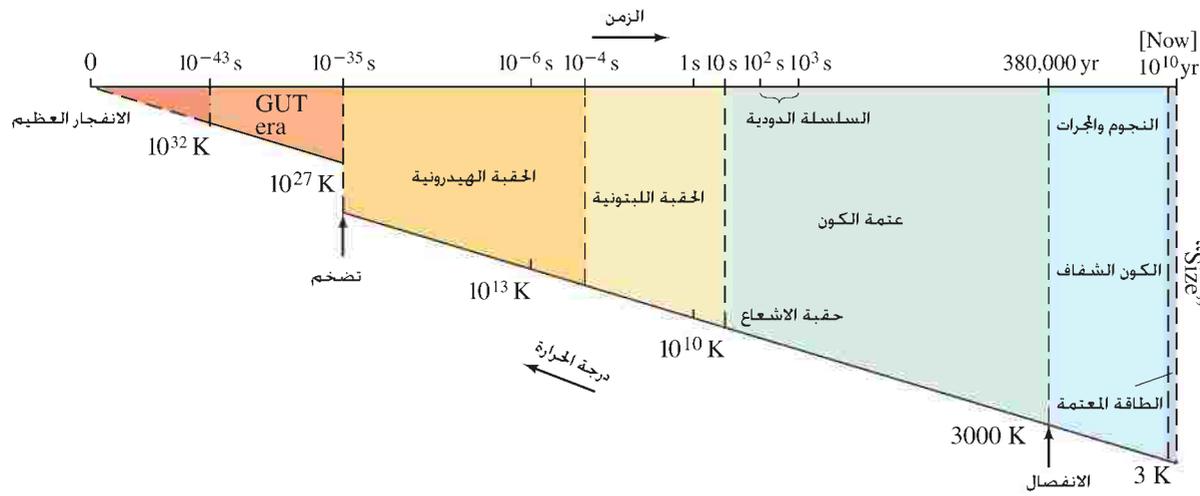
$$\Delta t'_0 = 13.7 \text{ Gyr}$$

7-33 النموذج الكوني؛ التاريخ المبكر للكون

لقد طوّرت نظرية مقنعة عن أصل الكون ونشأته في آخر عقد أو عقدين. وتُسمى الآن **النموذج الكوني المعياري**. أو نموذج الانسجام أحياناً. يستند جزء من هذه التّطوّرات التّطوّرات التجريبية والتّجريبية الحديثة 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 10⁻⁴³s 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 10⁻³⁵s، ربما قريباً 10⁻⁴³s، كانت القوى الأربع في الطبيعة موحدة: كانت هناك قوة واحدة فقط. إنّ درجة الحرارة في هذه الظروف يجب أن تكون في حدود 10³²K. وهي ما تجعل الجسيمات تتحرك في الاتجاهات جميعها بمتوسط طاقة حركية تساوي 10¹⁹ 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 يُعتقد 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 $10^{-35}s$ تقريباً بعد الانفجار العظيم. والآن، أصبح الكون مليئاً بسحاب كثيف من الليبتونات والكواركات. كانت الكواركات في البداية حرة، ولكنها بدأت بتشكيل جسيمات طبيعية سريعاً: 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 وفقاً لعلماء الفيزياء النظرية. اقترحت هذه الفكرة العبقريّة في حدود عام 1980 حيث أشارت إلى أنّ الكون قد تمدد أُسِّياً بشكل لا يصدق. وازداد حجمه بعامل 10^{40} أو 10^{50} خلال جزء دقيق جداً 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 تقريباً. وبعد الانتفاخ الآن ميزة مقبولة لنظرية الانفجار العظيم.

وبعد فترة الانتفاخ القصيرة جداً، استقر الكون عائداً 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 تقريباً 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 $10^{13}K$ تقريباً، 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 نوعاً ما من 1 GeV . كانت النيوترونات والبروتونات وجسيماتها المضادة تنشأ بشكل مستمر من طاقات تصادمات تشتمل على فوتونات وجسيمات أخرى. مثل:

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

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

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

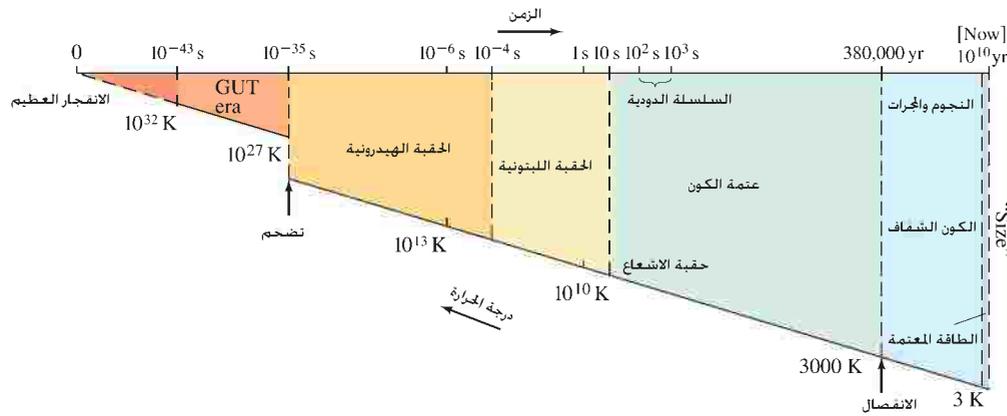
$$p + \bar{p} \rightarrow \text{فوتونات أو ليبتونات}$$

ولهذا، فإنّ عمليات خلق النيوكليونات وفنائها كانت متوازنة. لقد كانت أعداد النيوكليونات والنيوكليونات المضادة كبيرة – تقريباً الأعداد نفسها التي كانت للإلكترونات، والبوزترونات، 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 تقريباً. ولكن ليس نهائياً تماماً. 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 مستويّاً بالنسبة لمشاهد عليها. يفسر الانتفاخ أيضاً سبب الانتظام القويّ لـ CMB. دون الانتفاخ، كان الكون الدقيق عند اللحظة $10^{-35}s$ ما زال كبيراً 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 تقريباً عند اللحظة $10^{-36}s$ وفقاً للنظرية الأصلية للانفجار العظيم. عند تلك اللحظة، يقطع الضوء مسافة 10^{-27} m $\approx (3 \times 10^8 \text{ m/s})(10^{-36} \text{ s})$ ، 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 متماسكاً ومتوازناً حراريّاً حتى ينجم عنه CMB منتظم تقريباً كما نشاهده. لذلك، فإنّ الانتفاخ يسمح للكون المبكر جداً قبل الانتفاخ ليكون صغيراً جداً بحيث تكون أجزاؤه جميعها متوازنة حراريّاً، في حين يكون كبيراً جداً بعد الانتفاخ وصولاً إلى الكون الحاضر.



الشكل 33 - 25 (مكرر)

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

وقد أدى 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 10^9 K تقريباً، 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 كتليهما 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 $e^+ + e^-$). 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 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 مهمّة. 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. ولدينا 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. إنَّ 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 للأنيوية والإلكترونات والفوتونات أقلَّ من إلكترون فولت واحد. وبما أنَّ طاقات تأيُّن الذرات من رتبة الإلكترون فولت. وبعد أن انخفضت درجة الحرارة إلى أقلَّ من ذلك. فإنَّ 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 حرَّة تنتشر دون عوائق. تقريبًا. خلال الكون. وكما أشرنا في البند السابق. فإنَّ الفوتونات أصبحت مفصولة عن المادة. لقد قلَّت الطاقة الكلية الموجودة في الإشعاعات (الاستطالة في الطول الموجي كلِّها 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 إنَّ الكون أصبحت تسوده المادة. كلما تمدد الكون. تبرد الإشعاعات الكهرومغناطيسية أكثر لتصل إلى 2.7 K في الواقع الحاضر لتتشكَّل الخلفية الإشعاعية للمايكروويف الكونية التي نكشف عنها من أيِّ مكان في الكون.

وبعد ولادة الذرات. بدأت النجوم والمجرات تتشكل - فرضيًا بواسطة الجاذبية الذاتية حول تكدُّسات (غير متجانسة) الكتلة. وقد بدأت النجوم بالتكون بعد نحو 200 مليون سنة من الانفجار العظيم. أمَّا 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 بأيِّ طريقة كانت. ولكنه يعطي. وللمرة الأولى. صورة عملية عن كيفية بداية الكون وتطوره.

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

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

8-33 المادة المظلمة والطاقة المظلمة

بناءً على النموذج المعياري للانفجار العظيم. فإنَّ 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 خمسينيات القرن الماضي أنَّ الكون تسوده المادة التي تتفاعل بواسطة الجاذبية. وقد كان هذا السؤال مرتبطًا بانحناء الفراغ - الزمن (البند 33 - 4). إذا كان للكون انحناء سالب. فإنَّ تمدد الكون سوف لن يتوقف. على الرغم من أنَّ معدل التمدد يجب أن يقلَّ بسبب التجاذب (الكتلي) بين أجزائه. مثل هذا الكون يكون مفتوحًا ولا نهائيًا. فإذا كان الكون مستويًا (دون انحناء). فإنَّ 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 قوي في تشكيل كافٍ. بحيث يتوقف التمدد أخيرًا. ويبدأ الكون بالانكماش. وينهار على نفسه مصدرًا صوتًا هائلًا.

يتفق هذا النموذج القياسي الذي يمثل 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.

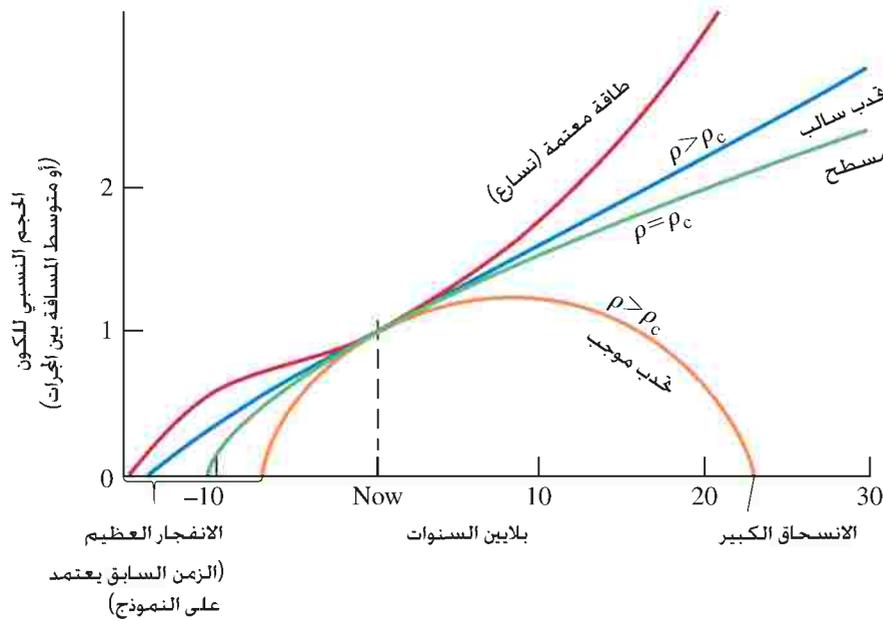
الكثافة الحرجة

وفقاً للسيناريو أعلاه (الذي لا يتضمن الاكتشاف الحديث لتسارع الكون) فإن نهاية الكون تعتمد على متوسط كثافة الكتلة في الكون. لمتوسط كثافة الكتلة التي تبلغ أكبر من قيمة حرجة تُسمى 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. أخيراً (إذا ما كانت $\rho > \rho_c$) فإن الجاذبية تجذب الكون إلى العكس بقوة ويكون انحناء "الزمان - المكان" موجباً. إذا كانت الكثافة الحقيقية مساوية للكثافة الحرجة $\rho = \rho_c$ ، فإن الكون يكون مستويًا ومفتوحًا. أما إذا كانت الكثافة الحقيقية أقل من الكثافة الحرجة $\rho < \rho_c$ ، فإن انحناء الكون يكون سالبًا. انظر إلى (الشكل 33 - 26). في الوقت الحاضر نعتقد أن الكون قريب جدًا من أن يكون مستويًا. لكن الدليل الحالي يقترح أن الكون يتمدد بمعدل متسارع. كما سيناقش لاحقًا.



الشكل 33 - 26 ثلاثة احتمالات مستقبلية للكون اعتماداً على كثافة المادة الاعتيادية، واحتمال رابع يتضمن الطاقة المظلمة. لاحظ أنه تم اختيار المنحنيات جميعها ليكون لها الآن الميل نفسه (معامل هبل، $H = H_0$). بالعودة إلى الزمن الماضي حدث الانفجار العظيم حيثما لامس كل منحنى المحور الأفقي (الزمن).

المادة المظلمة

اقتنع العلماء من نتائج WMAP وتجارب أخرى أن الكون مستوي وأن $\rho = \rho_c$. 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 تُسمى المادة المظلمة. فعلى سبيل المثال، تقترح مشاهدات دوران المجرات بأنها تدور كما لو أن كتلتها أكثر ضخامة مما يمكن رؤيته. تذكر من (الفصل 5).

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

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

وبالتالي فإن $v = \sqrt{GM/r}$. إذا طبقنا هذه المعادلة على التجموع في المجرة، فسنلاحظ أن سرعاتها تعتمد على كتلة المجرة. تبين المشاهدات أن النجوم البعيدة عن مركز المجرة تدور بشكل أسرع مما يتوقع من المادة المرئية، وهو ما يدل على وجود مادة غير مرئية ضخمة. وبالمثل، فإن مشاهدات حركة المجرات داخل التجمعات تقترح أيضاً أن 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، فإنها تتكون من نوع آخر من الجسيمات الأولية.

تشكل المادة المظلمة نحو 23% من كتلة - طاقة الكون وفقاً لأحدث التجارب. وهكذا، فإن "الكتلة - الطاقة" الكلية هي 23% مادة مظلمة زائد 4% بروتونات، ما يشكل ما مجموعه 27%. وهذا لا يجعل ρ تقترب من ρ_c ما النسبة الباقية التي تشكل 73% لسنا متأكدين من ذلك أيضاً. 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).

تسارع

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 أينشتاين معادلاته، وجد أنها لا تقدم حلولاً للكون الساكن. في تلك الأيام (1917) كان يعتقد أن الكون ساكن، أي أنه لا يتغير وأبدي. لقد أضاف أينشتاين ثابتاً إلى معادلاته لتعطي حلولاً للكون الساكن. وبعد عقد من الزمان عندما بين لنا هابل أن الكون يتمدد، أهمل أينشتاين 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 .

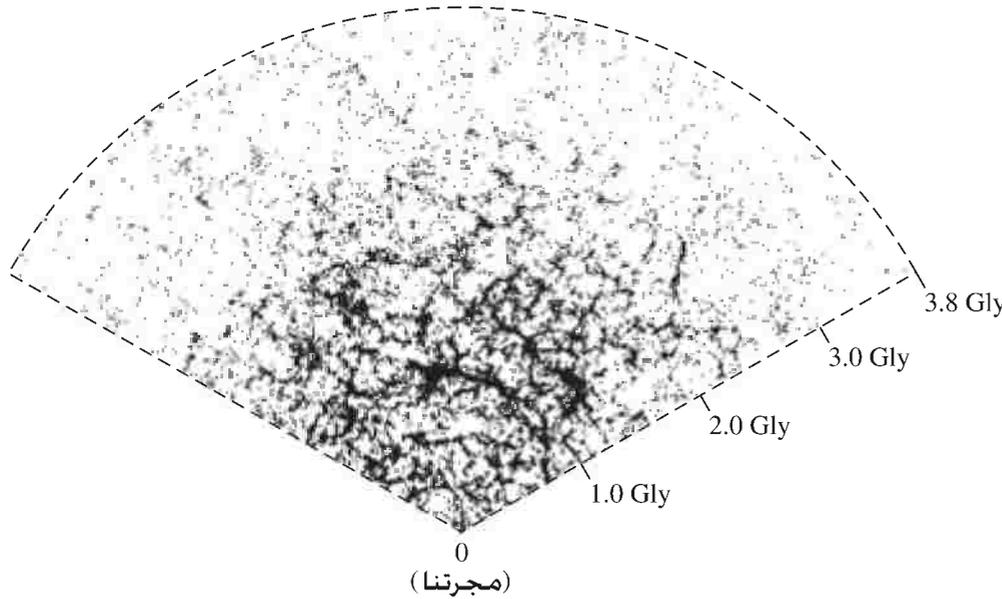
أفضل التخمينات في الوقت الحاضر عن كيفية توزيع الكتلة – الطاقة في الكون هي كما يلي:

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 المقاسة، بالإضافة إلى بيانات تجريبية أخرى (تجمعات المجرات – انظر البند التالي) تبدو ذات معنى.



الشكل 27-33: توزيع 50,000 مجرة
 بزواوية 2.5° تمتد خلال نصف السماء تقريباً فوق خط الاستواء، كما تم قياسه بواسطة ماسح 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 التباين 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 والتنبؤات. كما يمكنهم أيضاً استخلاص قيم دقيقة جداً للمعاملات الكونية التي كانت معروفة في السابق بدقة قليلة. إنّ CMB الكونية مهمة وقابلة للملاحظة بحيث يمكن بذل الجهد كلّها 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 حدثت داخل النجوم أو السوبرنوفات التي افترضنا وجودها ونعتقد أيضاً بوجودها. إننا في الحقيقة نعتمد على عابرة قدموا نظريات يمكن تطبيقها. وأفكاراً، بالإضافة إلى نماذج يمكن اختبارها. كما أننا نعتمد على نماذج حاسوبية معقدة تتغير معاملاتنا حتى تتفق مخرجاتها مع تحليلات ومشاهدات 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 غيّرت على نحو متأنّ القِيَم - قليلاً 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 قليلاً (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 قليلاً عما هو عليه، لما كنّا 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 للميكروويف (CMB) التي تنطبق على منحني 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 (حقيبة 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 لحقبة 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 لانهايار 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 قد 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 الانهايار 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 الإفلات 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 مستوي 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 مستوي، 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 حد 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 يفلت أي شيء من الثقب الأسود، حتى الضوء، فكيف يمكن إذن أن تقول إن أحداً هناك؟
16. ما الكتلة التي تعطي نصف قطر شوارزشيك 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 أقل 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 فتعد 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 سوداء؟
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؟

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

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

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.

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

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

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

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].

33 - 6 إلى 33 - 8 الانفجار العظيم، CMB، تمدد الكون

30. (I) استعمل قانون فين لحساب الطول الموجي عند قمة التوزيع الإشعاعي للجسم الأسود عند درجة الحرارة 2.7 K .

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

12. (II) عندما تصبح 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؟

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.

15. (II) احسب قيم Q لتفاعلات حرق He في (المعادلة 33 - 2). (كتلة غير المستقر جداً ${}^4\text{Be}$ تساوي 8.005305 u)

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 33 - 4، و 33 - 5].

17. (III) هناك نجوم موجودة في تجمع معين يفترض أنها تقع على البعد نفسه عن الأرض. يظهر طيفان 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].

33 - 4 النسبية العامة، الجاذبية وانحناء الفضاء

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

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

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

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

33 - 5 الإزاحة الحمراء، قانون هبل

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

مسائل عامة

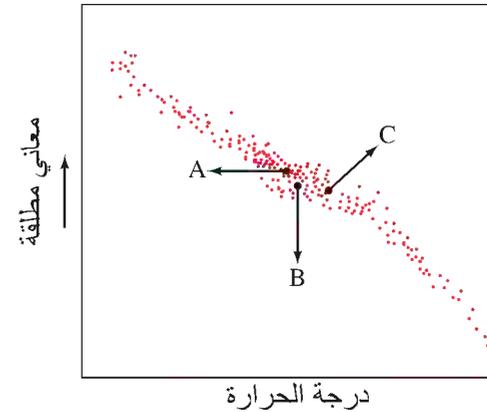
35. افترض أنّ السطوع المطلق الذي لأقرب النجوم يساوي ذلك الذي للشمس تقريباً. وعلى أيّ حال، فإنّ البريق الظاهري لهذه النجوم أقلّ من ذلك الذي للشمس بنحو 1011 مرة. من هذه المعلومات، قدر المسافة لهذه النجوم القريبة. (قام نيوتن بإجراء هذه الحسابات، على الرغم من أنه ارتكب خطأ حسابياً بمعامل من 100).

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؟

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 لكلّ يوم، والتي تتحول إلى إشعاعات، فما القدرة الصادرة عن هذا النجم؟

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). صفّ التغيرات في درجة الحرارة، السطوع والحجم لكلّ حالة.

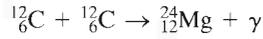


الشكل 33 - 28 (مسألة 34)

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؟

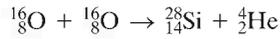
46. تتحرك مجرة بعيداً عن الأرض. ينبعث من المجرة خط الهيدروجين الأزرق عند 434 nm، ولكن قياسه على الأرض كان عند 650 nm. (أ) ما السرعة التي تتحرك بها المجرة؟ (ب) كم تبعد المجرة عن الأرض؟

47. في المراحل الأخيرة من نشأة نجم، بدأ 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 لكّن 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 كلٍّ منهما $3 \times 10^{41} \text{ kg}$ ، فما قوة الجاذبية التي تؤثر بها كل مجرة في الأخرى؟

40. قدر كتلة سكون النيوتريينو (بوحددة 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 كلٌّ 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 مطع في موقع نجم عند 100 فرسخ. ما الحد الأدنى لتحليلنا الزاوي (بالدرجات) بناء على هذه المعلومات؟

43. في أثناء تطابق ما، حدث أن تركبت خطوط بالمر من هيليوم أحادي التأين في نجم بعيد مع خطوط بالمر من الهيدروجين في الشمس (الشكل 27 - 22). ما السرعة التي يتعد 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 دائري 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 حالاتٍ 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 نقبر 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.

أى 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 تُجمع. 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 الأس الصفرى؟ أي، ما معنى a^0 ؟ يعرف أي رقم مرفوع إلى الأس الصفرى على أنه يساوي 1:

$$a^0 = 1$$

ويستخدم هذا التعريف لأنه 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

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

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 الآسي

إنّ كتابة أعداد كبيرة جدًا أو صغيرة جدًا كبعد كوكب نبتون عن الشمس، 4.500.000.000 km أو كقطر ذرة اعتيادية، 0.00000001 cm، هو أمر غير مريح وعرضة للخطأ. كما أنّه يترك تساؤلًا (انظر البند 1 - 4) عن عدد الأرقام المميزة. كم من الأصفار يعد مبرًا في العدد (4.500.000.000 km)؟ ولذلك فنحن نستخدم "إلى القوة 10" أو المصطلح الآسي. وعليه، يصاغ البعد من نبتون إلى الشمس كالتالي: 4.50×10^9 km (على افتراض أن القيمة مميزة حتى ثلاث خانات). وقطر الذرة 1.0×10^{-8} 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 $11 \times 10^7 = (2.0 \times 5.5) \times (10^3 \times 10^4)$ حيث استخدمنا قاعدة جمع الأسس (الفهرس أ - 2). وبالمثل، 8.2×10^5 مقسومة على 2.0×10^2 تساوي

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

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 الأس. ولذلك، $0.020 \times 3600 = 72$ ، والمصطلح الآسي $72 = 7.2 \times 10^1 = (3.6 \times 10^3) \times (2.0 \times 10^{-2})$. 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 الآسي، 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 أنّ 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 $(-3)^2 = 9$. تمامًا 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 و b و c عادة أعداداً أو ثوابت معطاة.* والخلان العامان لمعادلة من هذا النوع يعطيان بالصيغة التربيعية التالية:

(أ-4)

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

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 لكل 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 و b و c في الصيغة النموذجية القيم التالية: $a = 3$ و $b = -5$ و $c = -2$. ويصبح الخلان لـ x كما يلي:

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

9

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

ويكون الخلان 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 الخلان 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 بالتخيالي.

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)

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

وهذه الصيغة مفيدة لنا بشكل رئيس عندما تكون x صغيرة جداً مقارنة مع الواحد ($x \ll 1$). وفي هذه الحالة، يكون كل حد تالٍ 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

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

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- 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 رأسيّتين (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 أنّهما 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):

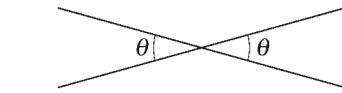
$$\frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2} = \frac{a_3}{b_3}.$$

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

(أ) تساوي الأضلاع الثلاثة في المثلثين.

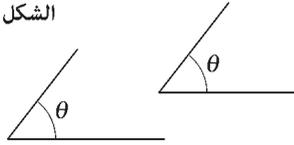
(ب) تساوي ضلعين والزاوية المحصورة بينهما (ضلع - زاوية - ضلع).

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

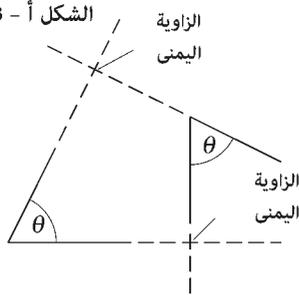


الشكل أ-1

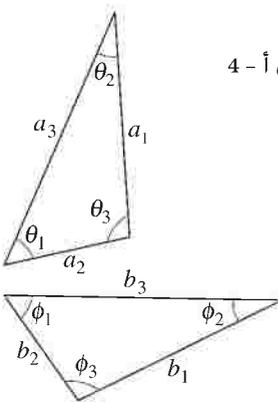
الشكل أ-2



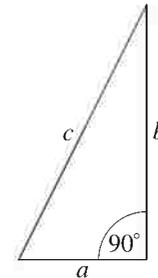
الشكل أ-3



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

أ-7 الاقترانات المثلثية والتمثالات

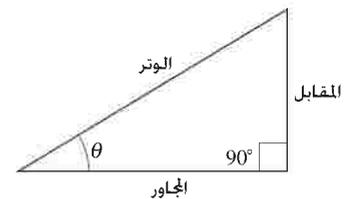
تعرف الاقترانات المثلثية لأي زاوية θ بوساطة إنشاء مثلث قائم حول تلك الزاوية كما هو مبين في الشكل أ - 6: المقابل والمجاور هما طول الضلعين المقابل والمجاور للزاوية θ . والوتر هو طول الوتر

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

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

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

$$\text{المجاور}^2 + \text{المقابل}^2 = \text{الوتر}^2 \text{ (نظرية فيثاغورس).}$$



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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

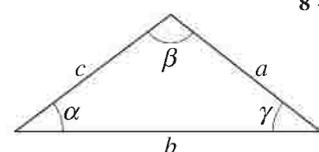
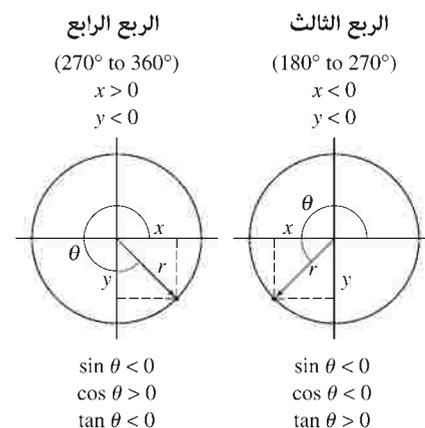
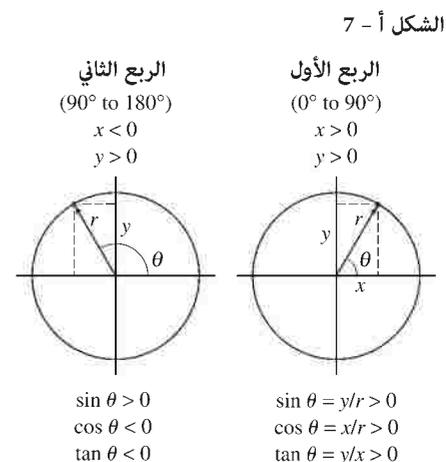
$$\tan \frac{1}{2}\theta = \sqrt{\frac{1 - \cos \theta}{1 + \cos \theta}}$$

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

لأي مثلث (انظر الشكل أ - 8):

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

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



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.

$$\log(ab) = n + m = \log a + \log b \text{ وعليه}$$

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 خانتين (بعض الجداول تعطي N إلى ثلاث خانات 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

$10^1 = 10$. 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 $\log 4.68 = 0.670$ تقريباً.

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

* الكتلة المبنية في الجدول (5) هي للذرات المتعادلة من الأيونات 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

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 بتأني، 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 تحريرها (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.

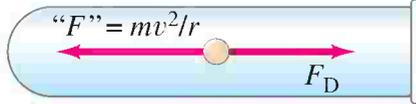
قوى (قصورية) وهمية

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 لشأنها (كما لو أنّ هناك قوّة 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 يفترس 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



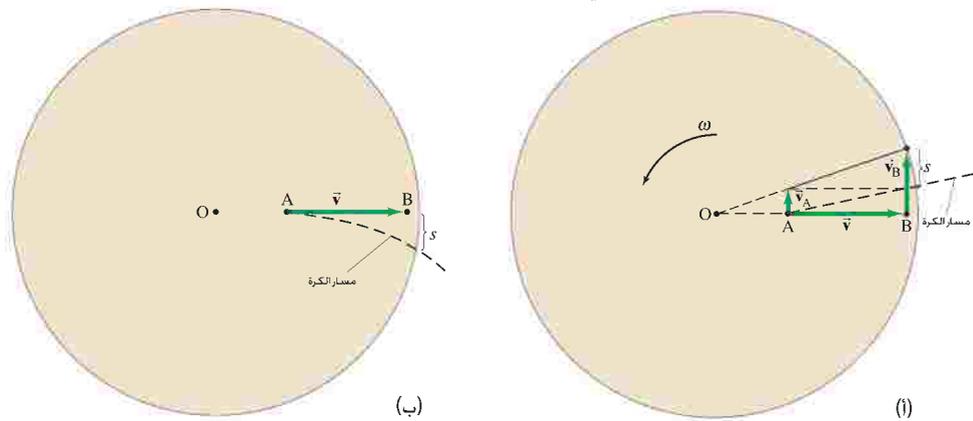
الشكل ج - 2 القوى على جسيم في أنبوب اختبار يدور في جهاز طرد مركزي، كما يشاهد في الإطار المرجعي لأنبوب الاختبار.

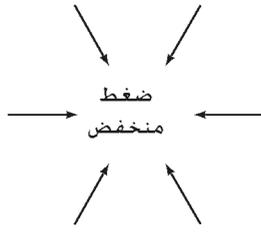
أثر كوريوليس

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 دوّار فقط إذا كان الجسم يتحرك نسبة إلى ذلك الإطار المرجعي، وهي تعمل على انحراف الجسم بالاتجاه الجانبي. كما أنّها 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). تمّذف 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.

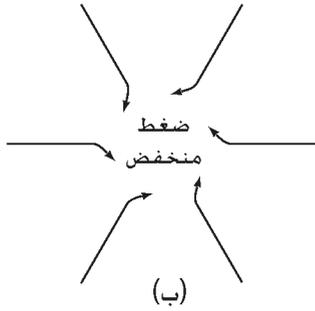
يظهر (الشكل ج - 3 ب) الحالة كما تشاهد من المنصة الدوارة كإطار مرجعي. A و B ساكنان، وقذفت الكرة بسرعة \vec{v} باتجاه B، ولكنها تنحرف إلى اليمين كما هو مبين وتمرّ من خلف B كما ورد سابقا. وهذا ليس أثر قوة مركزية، لأن القوة الطاردة من المركز تعمل على امتداد القطر إلى الخارج، وبدلا من ذلك، يعمل هذا الأثر 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 دوّار، 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 دوّار. (ب) كما تشاهد من منصة دوارة كإطار مرجعي.





(i)



(ب)



(ج)

الشكل ج - 4 (i) 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 قطريًا 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 سابقًا 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 نشاهد 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

ج - 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

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

(ج - 2)

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 متجهة جنوبًا نحو خط الاستواء ستتحرف نحو الغرب (كما لو أنها قادمة من الشرق).

يعمل أثر كوريولس أيضًا على الجسم الساقط: الجسم الذي يترك ليسقط من أعلى برج لن يصطدم بالأرض مباشرة أسفل نقطة سقوطه، بل سينحرف قليلًا 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 ثابتاً. 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 ، واللتي عُرفت 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

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

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

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.

الحرارة النوعية

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، ندع 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، فإن 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

$$C_P - C_V = R. \quad (د - 2)$$

وبما أنّ ثابت الغاز $R = 8.315 \text{ J/mol} \cdot \text{K} = 1.99 \text{ cal/mol} \cdot \text{K}$ ، فإننا نتنبأ بأن C_P ستكون أكبر من قيمة C_V بمقدار $1.99 \text{ cal/mol} \cdot \text{K}$. وبالفعل، إن هذا قريب جداً 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)، نكتب $\Delta U = Q_V$ على الصورة الآتية:

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

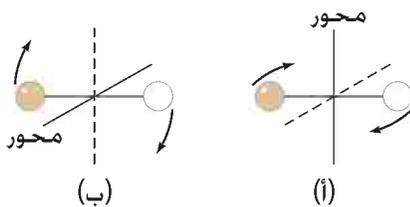
أو

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

وبما أنّ $R = 8.315 \text{ J/mol} \cdot \text{K} = 1.99 \text{ cal/mol} \cdot \text{K}$ ، فإن النظرية الحركية تتنبأ أن $C_V = 2.98 \text{ cal/mol} \cdot \text{K}$ للغاز المثالي أحادي الذرة. وهذا قريب جداً 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 المقيستان 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

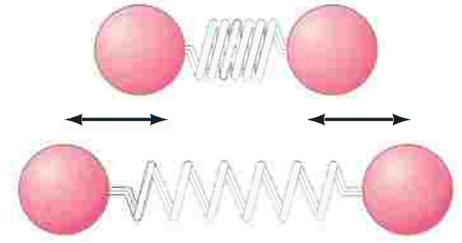
من المفيد أن نقدم فكرة درجات الحرية التي نعني بها عدد الطرق المستقلة التي تستطيع من خلالها الجزيئات امتلاك الطاقة. ومثال ذلك امتلاك الغاز أحادي الذرة ثلاث درجات من الحرية: لأن الذرة تستطيع أن تمتلك سرعة على امتداد المحاور x و y و z . وتعدّ هذه ثلاث حركات مستقلة لأن أيّ تغير في أيّ من المركبات لن يؤثر 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 بالتوسط 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 المقاسة. 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 أخريتين. نفسرهما على أنهما مرتبطتان مع ذرتين مهتزتين. كما لو أنّهما موصلتان بزنبرك (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.

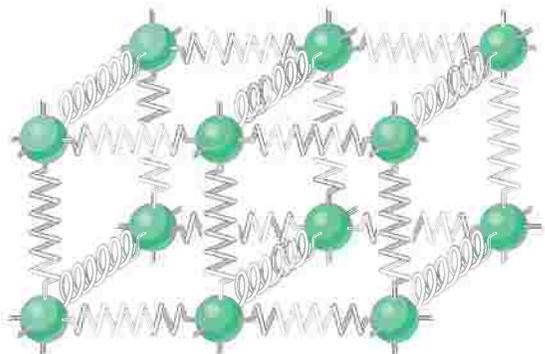
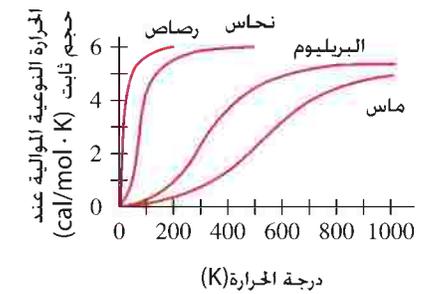


الشكل د - 2 يستطيع الجزيء ثنائي الذرة الاهتزاز كما لو أنّ الذرتين متصلتان بزنبرك، وبالطبع فهما ليستا كذلك، ولكنهما تؤثران في بعضهما بقوة ذات طبيعة كهربائية - بصورة تمثل قوة الزنبرك.

المواد الصلبة

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

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 العالمين 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 بزنبرك 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 المقاسة.



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 تغيّر 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 (غير ظاهر) إلى S . في حين يشير المحوران x' و y' إلى S' . ويتداخل المحوران x و x' مع بعضهما. ونفترض أنّ 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 خديداً. فإن S' بعد زمن t . ستكون قد تحركت مسافة vt . ولذا. عند زمن t . $x = x' + vt'$. أما المحوران y, z على الوجه الآخر فلم يتأثرا بالحركة على امتداد محور x . وعليه. فإن $y = y'$ و $z = z'$. 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:

$$x = x' + vt'$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = t'$$

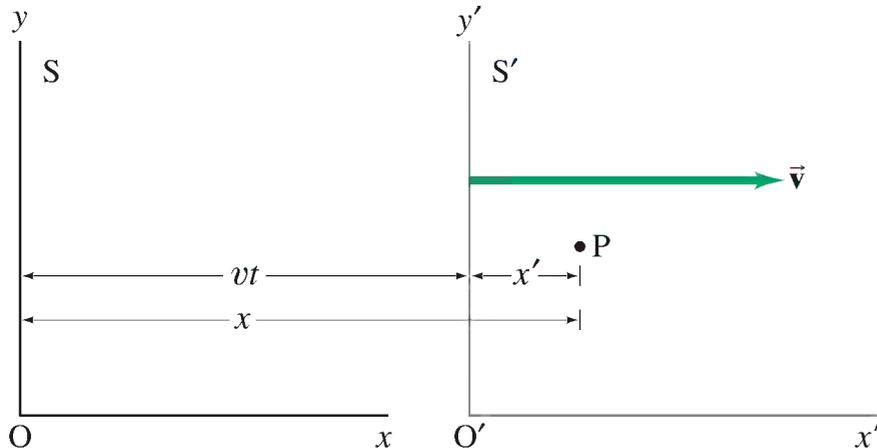
تحويلات جاليليو

(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 ، و u'_z (نستعمل u هنا لنميزها عن السرعة النسبية للإطارين v). والآن $u'_z = \Delta z' / \Delta t'$ ، و $u'_x = \Delta x' / \Delta t'$ ، $u'_y = \Delta y' / \Delta t'$ ، 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 و S تمثل 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 الخاطئة 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

$$\text{المعادلات هـ - 3 (نوع } \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2})$$

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

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

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 نهايته 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 $L = x'_2 - x'_1$. ويقبس 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 يقاس في S كما يلي:

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

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

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

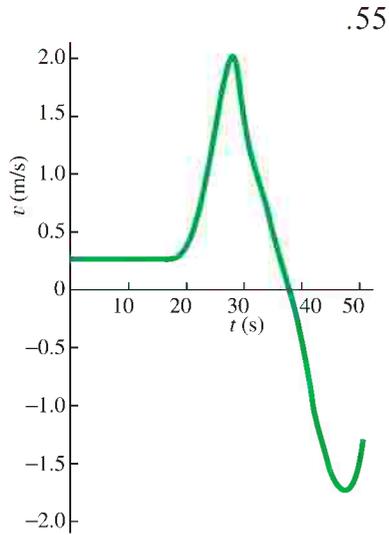
والتي هي (المعادلة 26 - 1). لاحظ أنّنا اخترنا S' لتكون الإطار الذي يحدث به الحدثان في الموضع نفسه. لتكون $x'_2 = x'_1$ و لتلغى الحدود المحتوية على x'_2 و x'_1 .

الفصل 1

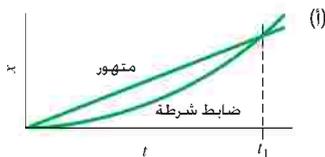
1. (أ) 1.4×10^{10} سنة
- (ب) 4.4×10^{17} s
3. (أ) 1.156×10^0
- (ب) 2.18×10^1
- (ج) 6.8×10^{-3}
- (د) 2.7635×10^1
- (هـ) 2.19×10^{-1}
- (و) 4.44×10^2
5. (أ) 1%
7. (أ) 4%
- (ب) 0.4%
- (ج) 0.07%
9. 1.7 m
11. 9%
13. (أ) 1 ميغافولت.
- (ب) 2 ميكرومتر.
- (ج) 6×10^3 يوم .
- (د) 18 ورقة من 100 دولار.
- (هـ) 8 قطع منمنمة
15. (أ) 1.5×10^{11} m
- (ب) 150 غيغامتتر.
17. 3.8 s
19. 3.76 m
21. 7.3%
23. (أ) 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. (أ) 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. (أ) 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. (أ) 3%، 3%
- (ب) 0.7%، 0.2%
1. 72.3 km/h
3. 61 m
5. -2.5 cm/s
7. 2.6×10^2 km (أ)
- (ب) 77 km/h
9. 4.3 m/s (أ)
- (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 (أ)
- (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 (أ)
- (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 (أ)
- (ب) 38.9 m/s
- (ج) 84.7 m
49. 48 s (أ)
- (ب) 90s - 108 s
- (ج) 0 s - 38 s, 65 s - 83 s
- (د) 90 s - 108 s
51. 0 s - 18 s (أ)
- (ب) 27 s
- (ج) 38 s
- (د) كلا الاتجاهين.
53. 4 m/s² (أ)
- (ب) 3 m/s²
- (ج) 0.35 m/s²
- (د) 1.6 m/s²

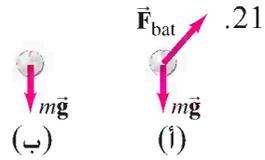


57. (أ) -150 m/s²
- (ب) رخي.
59. 1.3 m
61. (أ) 14 m
- (ج) 39.4 m
63. 31 m/s
65. 8.8 min (أ)
- (ب) 7.5 min
67. 4.9 m/s - 5.7 m/s, 6.0 m/s
- 69 m/s الأصغر للسرعات الابتدائية.
69. 29.0 m
71. 5.1×10^{-2} m/s²
73. 3.3 min; 5.2 km; 23.3 s, 0.61 km
75. 88 m/s (أ)
- (ب) 27 s
- (ج) 1590 m
- (د) 36 s
- (هـ) -177 m/s
- (و) 54 s
- (ز) 77

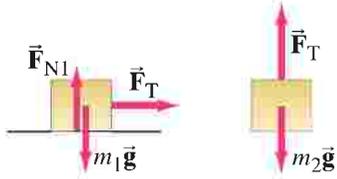


- (ب) 23 s
- (ج) 3.0 m/s²
- (د) 67 m/s
79. 18 m/s
81. 2.9 برغر /min, 0.44 m/min
83. 12 m/s

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

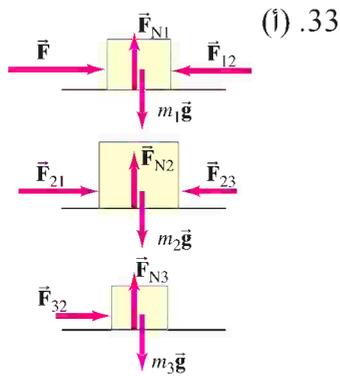


- (ب) $1.41 \times 10^3 \text{ N}$
 (ج) $63 \text{ N}, 31 \text{ N}$
 (د) $73 \text{ N}, 36 \text{ N}$
 (هـ) $6.9 \times 10^3 \text{ N}, 8.9 \times 10^3 \text{ N}$
 (و) 320 N
 (ز) 1.5 m/s^2
 (ح) 31



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

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



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

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

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

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

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

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

- (هـ) $2.67 \text{ m/s}^2; 32.0 \text{ N}, 64.0 \text{ N}, 32.0 \text{ N}$

- عندما تصل الهدف.
 (ب) 10.4 s

- (ج) 541 m
 (د) $51.9 \text{ m/s}, -63.1 \text{ m/s}$
 (هـ) 81.7 m/s
 (و) $50.6^\circ \text{ below the horizon}$
 (ز) 78.1 m
 (ح) 76°

- (ط) 481 m
 (ي) 8.37 m/s أسفل.
 (ج) 97.4 m/s
 (د) $1.80 \text{ m/s}, 19^\circ$ بالنسبة إلى ضفة النهر.
 (هـ) $2.59 \text{ m/s}, 28^\circ$ من الشاطئ.
 (و) 6.90 m باتجاه سريان النهر

- بعرض النهر.
 (ب) 7.61° جنوب شرق.
 (ج) 17 km
 (د) 1.41 m/s
 (هـ) 1.24 m/s
 (و) 2.28 m/s
 (ز) 67 m
 (ح) 170 s

- (ط) 42.2° شمال غرب.
 (ي) 114 km/h
 (ج) 6.2°
 (د) 2.8 m/s^2 أسفل. (عكس حركة الشاحنة)
 (هـ) 4.7 m/s^2 يسار.

- (و) $v_T / \tan \theta$
 (ز) $180 \text{ s}, 4.8 \text{ km}; 21.2 \text{ s}, 0.56 \text{ km}$
 (ح) 1.9 m/s^2
 (ط) $1.9 \text{ m/s}, 2.7 \text{ s}$
 (ي) 49.6°
 (ج) 66° فوق الأفق.
 (د) $108 \text{ m/s} - 11.0 \text{ m/s}$
 (هـ) 36 m/s
 (و) 20 m/s
 (ز) $7.0 \text{ m/s}, 97^\circ$
 (ح) 39 m

الفصل 4

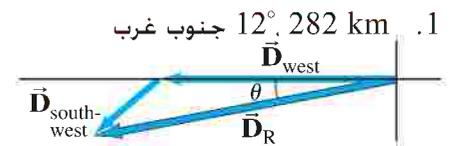
1. 75.0 N
 3. $1.15 \times 10^3 \text{ N}$
 5. $196 \text{ N}, 196 \text{ N}$
 (ب) $294 \text{ N}, 98.0 \text{ N}$
 7. 68.4 N
 9. 780 N للحلف.
 11. $2.00 \text{ g/s}, 9.51 \times 10^3 \text{ N}$
 13. $5.08 \times 10^4 \text{ N}, 4.43 \times 10^4 \text{ N}$
 15. 2.5 m/s^2 أسفل.
 (أ) 7.4 m/s^2 أسفل.

85. (أ) قرب منتصف الفترة الزمنية.
 (ب) A

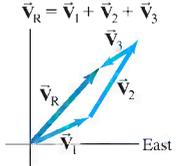
(ج) عند اللحظات التي يتقاطع عندها المنحنيان. سرعة الدراجة B عند التقاطع الأول أكبر من سرعة الدراجة A. أمامند التقاطع الثاني فسرعة الدراجة A أكبر من سرعة الدراجة B.
 (د) A

(هـ) لهما متوسط السرعة نفسه.

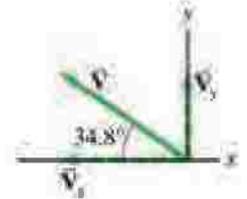
الفصل 3



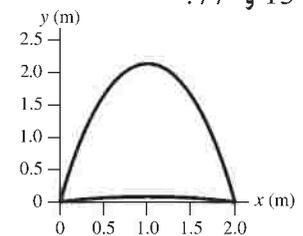
1. $12^\circ, 282 \text{ km}$
 3. $\vec{v}_2 - \vec{v}_1$
 5. $58 \text{ m}, 48^\circ$



- (أ) 7



- (ب) 8.16 وحدة. -11.7 وحدة;
 (ج) 14.3 وحدة. 34.8° فوق محور $-x$.
 9. $550 \text{ km/h}, 487 \text{ km/h}$
 (ب) $1650 \text{ km}, 1460 \text{ km}$
 11. $64.6, 53.1^\circ$
 13. $62.6, 329^\circ$
 (ب) $71.9^\circ, 77.5^\circ$
 (ج) $251.9^\circ, 77.5^\circ$
 15. $-2450 \text{ m}, 3870 \text{ m}, 2450 \text{ m}; 5190 \text{ m}$
 17. 4.0 m
 19. 77° و 13°



- 7.92 m/s
 21. 12.9 m
 25. أبعد بـ 6 مرات
 27. 5.71 s
 29. لن تتخطى الطابة العارضة لأنها على ارتفاع 0.76 m وهي على ارتفاع أقل

- 2.2 × 10³ m (i) .73
 5.4 × 10³ N (ب) .74
 3.8 × 10³ N (ج) .75
 $\theta = \tan^{-1} m_M R_{\text{Earth}}^2 / M_{\text{Earth}} D_M^2$ (i) .75
 5 × 10¹³ kg (ب) .76
 (8 × 10⁻⁴)° (ج) .77
 5.07 × 10³ s .77
 26.9 m/s .79
 2.6 × 10⁹, 5.2 × 10³⁹ كتلة الشمس .81
 3.86 × 10³ m/s (i) .83
 4.36 × 10⁴ s (ب) .84
 ≈ 12 h (i) .85
 1.8 × 10³ m (ب) .86
 5 × 10⁻⁵ N.m²/kg² .87
 3.8 × 10⁻¹⁰ N .89
 1.6 × 10⁻⁴ m/s² .91
 $v_{\min} = v_0 \sqrt{\frac{(1 - \mu_s Rg/v_0^2)}{(1 + \mu_s v_0^2/Rg)}}$.93
 $v_{\max} = v_0 \sqrt{\frac{(1 + Rg\mu_s/v_0^2)}{(1 - \mu_s v_0^2/Rg)}}$

الفصل 6

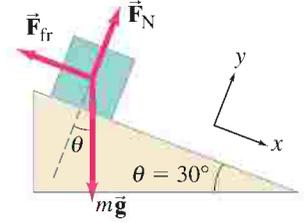
- 7.27 × 10³ J .1
 9.2 × 10² J (i) .3
 5.2 × 10³ J (ب) .4
 4.9 × 10² J .5
 1.10 Mg (i) .9
 1.10 Mgh (ب) .10
 5.0 × 10³ J .11
 8.4 × 10⁻² J .13
 484 m/s .15
 -1.64 × 10⁻¹⁸ J .17
 44 m/s .19
 2.25 .21
 1.1 N .23
 3.24 × 10³ N (i) .25
 9.83 × 10³ J (ب) .26
 7.13 × 10⁴ J (ج) .27
 -6.14 × 10⁴ J (د) .28
 8.31 m/s (هـ) .29
 82 J .27
 8.1 × 10⁴ N/m .29
 9.2 × 10⁵ J (i) .31
 9.2 × 10⁵ J (ب) .32
 (ج) نعم .33
 0.7 m > 1.4 m لا إلا إذا كانت المسافة > 0.7 m .33
 5.14 m/s .35
 9.2 m/s (i) .37
 -0.31 m (ب) .38

- 5.3 × 10² N, 2.6 × 10² N .89

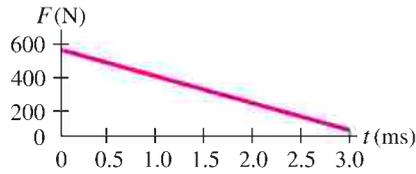
الفصل 5

- 1.42 m/s² (i) .1
 35.5 N (ب) .2
 5.97 × 10⁻³ m/s², 3.56 × 10²² N .3
 الشمس .4
 0.9 g's .5
 3.73 N (i) .7
 9.61 N (ب) .8
 25 m/s نعم .9
 30.4 m/s, 0.403 rev/s .11
 8.5 m/s .13
 11 rpm .15
 3.38 × 10⁴ rpm .17
 0.22 .21
 $4\pi^2 f^2 (m_1 r_1 + m_2 r_2), 4\pi^2 m_2 r_2 f^2$.23
 3.5 × 10³ N, 5.0 × 10² N .25
 1.27 m/s (i) .27
 3.05 m/s (ب) .28
 21.0 kg, 21.0 kg (i) .29
 206 N, 252 N (ب) .30
 4.4 m/s² .31
 3.9 kg, 0.1 kg .33
 2.02 × 10⁷ m .35
 4.38 × 10⁷ m/s² .37
 3.2 × 10⁻⁸ N نحو مركز المربع .39
 6.4 × 10²³ kg .41
 6.32 × 10³ m/s .43
 10s /rev .45
 7.90 × 10³ m/s .47
 2.0 × 10⁴ s, 7.1 × 10⁴ s .49
 21 N (i) نحو القمر .51
 2.0 × 10² N (ب) بعيداً عن القمر .52
 5.4 × 10² N (i) .53
 5.4 × 10² N (ب) .54
 7.2 × 10² N (ج) .55
 3.6 × 10² N (د) .56
 0 N (هـ) .57
 5.4 × 10³ kg/m³ (ب) .58
 1.62 × 10¹¹ m .59
 2690 × 10⁶ km نعم بلوتو .59
 1.90 × 10²⁷ kg (i) .61
 1.90 × 10²⁷ kg (ب) .62
 1.90 × 10²⁷ kg نعم .63
 671 × 10³ km, 1070 × 10³ km .64
 1880 × 10³ km .65
 9.0 d .66
 2.64 × 10⁶ m .67
 0.344% .69
 2.6 m/s² للأعلى .71

- 1.74 m/s², 22.6 N, 20.9 N .35
 0.98 (i) .37
 0.91 (ب) .38
 7.8 m/s² .39
 73 N, 0.59 .41
 (i) .43



- (ب) لا تغيير .44
 (ج) يجب أن يعكس اتجاه قوة الاحتكاك .45
 40 N .46
 4.1 m .47
 -7.4 m/s² .48
 0.40 .51
 1.2 m (i) .53
 1.6 s (ب) .54
 101 N, 0.719 .55
 0.58 (i) .57
 5.7 m/s (ب) .58
 15 m/s (ج) .59
 0.36 .59
 5.3 × 10² N .61
 $g \frac{(m_1 \sin \theta - m_2)}{(m_1 + m_2)}$ (i) .63
 (ب) $m_1 \sin \theta > m_2$ أسفل المستوى .64
 (ب) $m_1 \sin \theta < m_2$ إلى أعلى المستوى .65
 1.3 × 10² N .66
 1.3 m .67
 1.54 × 10³ N .69
 16 m/s (i) .71
 13 m/s (ب) .72
 3.8 m/s نعم .73
 82 m/s .75
 5.9° .77
 940 N, 79° فوق الأفق .79
 9.43 × 10⁴ N (i) .81
 1.33 × 10⁴ N (ب) .82
 1.33 × 10⁴ N (ج) .83
 12 m/s .84
 45 N (10 lb) (i) .85
 37 N (8.4 lb) (ب) .86
 (ج) ليس عندما يسحب عمودياً .87
 4.1 m/s², 3.2 m/s² (i) .88
 4.1 m/s², 3.2 m/s² (ب) .89
 3.5 m/s² (ج) .90



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) 210 s
 21. -4.1 rad/s² (أ)
 (ب) 7.6 s
 23. 41 m·N (أ)
 (ب) 29 m·N
 25. عقارب الساعة $mg(L_2 - L_1)$
 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. 0.88 m/s و 2.23 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. بالنسبة إلى الزاوية (1.2l, 0.9l)
 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.

$$v'_x = \frac{3}{2} v_0, v'_y = -v_0$$

63. 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

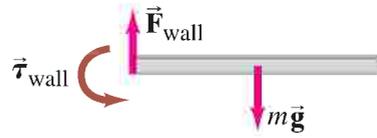
1. 0.24 kg·m/s
 3. 4.40×10^3 N نحو القاذف.
 5. 6.0×10^7 N للأعلى.
 7. 12.6 m/s
 9. 8×10^2 N, $F_{wind} > F_{fr} \approx 7 \times 10^2$ N
 11. 4.2×10^3 m/s

- .69 (i) $\mu_s < l/2$ (ب)
 (ب) $\mu_s > l/2$
 71 (i) $F_{\text{يسار}} = 3.3 \times 10^2$ N أعلى.
 $F_{\text{يمين}} = 2.3 \times 10^2$ N أسفل.
 (ب) 0.65 m
 (ج) 1.2 m
 73 $F_{\text{يسار}} = 1.0 \times 10^2$ N
 $F_{\text{يمين}} = 1.9 \times 10^2$ N
 75 متوسط القوة لكل وحدة مساحة
 $= 4.5 \times 10^5$ N/m²
 77 (i) 3.5×10^8 N/m²
 (ب) سوف تكسر العظمة.
 (ج) 8.2×10^6 N/m² لن تكسر العظمة.
 79 2.34 m

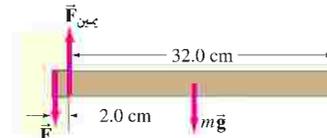
الفصل 10

- 1 3×10^{11} kg
 3 5.8×10^2 kg
 5 0.8477
 7 (i) 7×10^7 N/m²
 (ب) 2×10^5 N/m²
 9 (i) 4.7×10^5 N
 (ب) 4.7×10^5 N
 11 2.2×10^3 kg
 13 13 m
 15 1.60×10^4 m
 17 (i) 9.6×10^5 N/m²
 (ب) 98 m
 19 (i) 1.41×10^5 Pa
 (ب) 9.8×10^4 Pa
 21 أعلى 3% 1.06×10^3 kg/m³
 23 0.199
 25 920 kg
 27 حديد أو فولاذ.
 29 (i) 7.4×10^5 N
 (ب) 1.0×10^4 N
 31 (i) 1.03×10^3 kg/m³
 (ب) $\rho_{\text{liquid}} = \rho_{\text{object}}(m_{\text{object}} - m_{\text{apparent}})/m_{\text{object}}$
 33 0.105
 35 0.90 m/s
 39 4.4×10^5 s (5.1 days)
 41 5.6×10^{-3} m³/s
 43 1.9×10^5 N
 45 9.7×10^4 Pa (≈ 0.96 atm)
 47 (ب) 0.24 m/s
 49 (i) $2\sqrt{h_1(h_2 - h_1)}$
 (ب) $h_1 = h_2 - h_1$

- 23 (i) 0.78 N
 (ب) 0.98 N
 25 55.2 N, 63.7 N
 27 0.50
 29 1.0×10^2 N
 31 9.9×10^2 N
 33 2.7×10^3 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 (i) 2.0×10^5 N/m²
 (ب) 4.1×10^{-6}
 41 (i) 1.4×10^5 N/m²
 (ب) 6.9×10^{-7}
 (ج) 6.5×10^{-6} m
 43 9.6×10^6 N/m²
 45 $(-2 \times 10^{-2})\%$
 47 (i) 1.1×10^2 m·N عقارب الساعة.
 (ب) الجدار.



- 49 (i) 393 N
 (ب) أسمك.
 51 (i) 4.4×10^{-5} m²
 (ب) 2.7×10^{-3} m
 53 1.2×10^{-2} m
 55 12 m
 57 2.94×10^{-1} kg, 2.29×10^{-1} kg
 59 (i) $Mg\sqrt{h/(2R - h)}$
 (ب) $Mg\sqrt{h(2R - h)/(R - h)}$
 61 (i)



- (ب) $F_{\text{يسار}} = 3.7 \times 10^2$ N
 $F_{\text{يمين}} = 4.2 \times 10^2$ N
 $mg = 49$ N
 (ج) 8.3 m·N
 63 29°
 65 7.7×10^{-6} 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 1.40×10^4 J
 45 56 J
 47 1.42×10^4 J
 49 3.22 m/s
 51 2.64 kg·m²/s
 53 (i) يزداد القصور الذاتي الدوراني له.
 (ب) 1.6
 55 0.77 kg·m² عن طريق سحب ذراعها نحو مركز جسمها.
 57 (i) 14 kg·m²/s
 (ب) -2.7 m·N
 59 $\omega/2$
 61 (i) 1.2 rad/s
 (ب) 1.8×10^3 J, 1.1×10^3 J
 63 5×10^{-2} rad/s, 2×10^4 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) 2.2×10^3 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 kg·m²/s (i)
 (ب) 3.9 m·N
 (ج) 2.9 rad/s
 85 $2.7R - 1.7r$

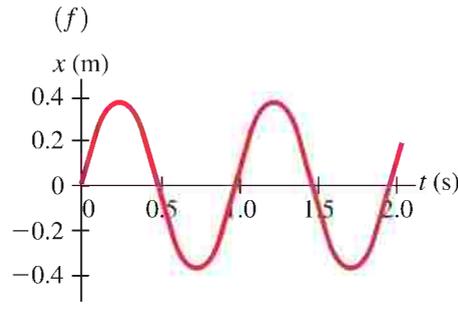
الفصل 9

- 1 1120° , 430 N, \vec{F}_A
 3 6.52 kg
 5 1.1×10^3 N
 7 5.8×10^3 N, 8.1×10^3 N
 9 (i) 2.3 m من الرجل.
 (ب) 2.5 m من الرجل.
 11 2.6×10^3 N, 3.1×10^3 N
 13 0.32 m
 15 6.1×10^3 N, 5.9×10^3 N
 17 34.6 N
 19 9.05×10^{-1} m
 21 4.25×10^2 N (i)
 (ب) 4.25×10^2 N, 3.28×10^2 N

- .69 (i) $3.2 \times 10^{-2} \text{ m}$
 (ب) 1.5 m
 .71 (i) $1.8 \times 10^4 \text{ N/m}$
 (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) $5.0 \times 10^3 \text{ m/s}^2$
 .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 $3.4 \times 10^2 \text{ m}$
 (i) .3 17 cm - 17 m
 (ب) $3.4 \times 10^{-5} \text{ m}$
 .5 55 m
 .7 (i) 8%
 (ب) 4%
 .9 63 dB
 .11 114 dB
 .13 (i) $9 \times 10^{-6} \text{ W}$
 (ب) 1×10^7 نسمة.
 .15 (i) 114 dB, 122 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,
 613 Hz
 .27 8.6 mm - 8.6 m
 .29 (i) 0.18 m
 (ب) 1.1 m
 (ج) 0.78 m, 440 Hz
 .31 -2.6%
 .33 (i) 0.583 m
 (ب) 1.71 m
 (i) .35 55 Hz
 (ب) $2.0 \times 10^2 \text{ m/s}$
 .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/s^2
 (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) $1.4 \times 10^3 \text{ m/s}$
 (ب) $4.1 \times 10^3 \text{ m/s}$
 (ج) $5.1 \times 10^3 \text{ m/s}$
 .41 0.35 s
 .43 $2.1 \times 10^3 \text{ m}$
 .45 0.99 m
 .47 (i) $4.6 \times 10^9 \text{ W/m}^2$
 (ب) $2.3 \times 10^{10} \text{ W}$
 .49 1.73
 .51 (i)



(ج) الطاقة حركية كلها.

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

- .51 الزمن الجديد = 0.13 (الزمن السابق).
 .53 $9.9 \times 10^2 \text{ Pa}$
 .55 0.9 Pa/cm
 .57 (i) $Re = 2500$ لذلك فهو مضطرب.
 (ب) $Re = 5000$ لذلك فهو مضطرب.
 .59 $3.6 \times 10^{-2} \text{ N/m}$
 .61 لا. $8.3 \times 10^{-6} \text{ kg}$ 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 $1.3 \times 10^2 \text{ N}$
 .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 $4.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
 .87 $4.2 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

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 (i) 2.5 m/s
 (ب) $\pm 1.6 \text{ m/s}$
 (ج) 1.8 J
 (د) $x = (0.13 \text{ m}) \cos(6.0 \pi t)$
 .11 $\pm \frac{1}{2} x_0$
 .13 (i) $6.0 \times 10^{-2} \text{ m}$
 (ب) 0.58 m/s
 .15 (i) $4.2 \times 10^2 \text{ N/m}$
 (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) $5.1 \times 10^{-2} \text{ J}$, 0.86 J

97. يقل ب 6%.

99. 3.0 kg

الفصل 14

1. 1.0×10^7 J .1

1.0 $\times 10^7$ J (i) .3

2.9 kWh (ب) .

(ج) لا \$0.29 لكل يوم.

220 kg/h .5

100 kcal .7

2.0×10^3 J/kg.C °.9

401°C .11

(1.9×10^2) °C .13

425 s .15

2.3×10^3 J/kg.C° .17

0.32C° .19

5.0×10^6 J .21

1.3 kg .23

9.90×10^{-3} kg .25

4.7×10^3 kcal .27

1.12×10^4 J/kg .29

1.7 g .31

83 W .33

95 W (i) .35

33 W (ب) .

23 مصباحا .37

(1.6×10^2) °C .39

10°C .41

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

6.4 كالوري .45

4×10^{15} J .47

3.2×10^{26} W (i) .49

1.1×10^3 W/m² (ب) .

0.80°C .51

46 W (i) .53

7.3×10^3 W (ب) .

20 W .55 فقط نحو 9% من معدل

الحرارة التي يجب أن يفقدوها.

44 C° (i) .57

(ب) لن تنصهر الرصاص.

4.1 g/h .59

1.2×10^{18} J (i) .61

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

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} .

6.1 cm (i) .21

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

3.5×10^7 N/m² .23

27°C (i) .25

4.3×10^3 N (ب) .

-459.67°F .27

1.07 m³ .29

1.43 kg/m³ .31

14.8 m³ (i) .33

1.83×10^5 Pa (ب) .

2.40×10^8 Pa .35

37°C .37

3.43 atm .39

2.69×10^{25} molecules/m³ .41

7×10^{22} (i) مول .43

4×10^{46} (ب) جزيء .

19 جزيء/نفس .45

6×10^3 m/s .47

899°C .49

25.9°C .51

3.9×10^2 m/s .55

3.34×10^{-9} m .57

(أ) صلب أو بخار .61

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

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

14°C .63

91°C .65

1.1×10^3 Pa .67

3.1 kg .69

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

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

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

(i) أقل .73

$(1.7 \times 10^{-2})\%$ (ب) .

0.21 .75

260 m/s, 4×10^{-22} atm .77

11 L .79 لا ينصح.

1.29, 1.65 .81

1.1×10^{44} جزيء .83

15 ساعة .85

0.66×10^3 kg/m³, -3.5% .87

1.6×10^{-3} cm .89

2.20×10^3 L (i) .91

92 min (ب) .

30 min (ج) .

6.8 s/كرة .93

1.7×10^3 Pa (i) .95

7.0×10^2 Pa (ب) .

±0.50 Hz .39

28.5 kHz .41

3.0 Hz .43

$f_A = 438$ Hz أو 444 Hz .45

$f_C = 437$ Hz أو 445 Hz

$f_{\text{beat}} = 1$ Hz أو 7 Hz

130.5 Hz, 133.5 Hz (i) .47

(ب) يزداد ب 2.3% يقل ب 2.2%

1690 Hz (i) .49

1410 Hz (ب) .

2087 Hz و 2091 Hz (i) .51

2870 Hz و 3550 Hz (ب) .

3750 Hz و 16,000 Hz (ج) .

4.32×10^4 Hz .53

2 Hz .55

0.171 m/s .57

110 m/s (i) .59

260 m/s (ب) .

120 (i) .61

0.48° (ب) .

0.3 s .65

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

170 Hz

88 dB .69

15 W .71

50 dB .73

2.8×10^2 m/s, 48 N (i) .75

0.195 m (ب) .

880 Hz, 1320 Hz (ج) .

7.4×10^2 N .77

504 Hz .79

17 m/s .81

2.84 m .83

2.29×10^3 Hz .85

11.5 m .87

34 Hz, 43 Hz, 61 Hz .89

10^6 .91

17 km/h .93

الفصل 13

3.3×10^{22} ذرة .1

20° C (i) .3

3300°F (ب) .

5°F (i) .5

-26°C (ب) .

4.3×10^{-3} m .7

8×10^{-2} m .9

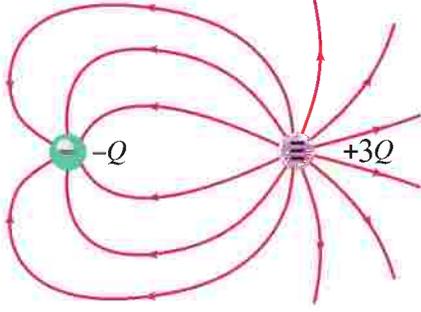
981 kg/m³ .11

5.12 mL .13

-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. $0.40Q_0$ 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)

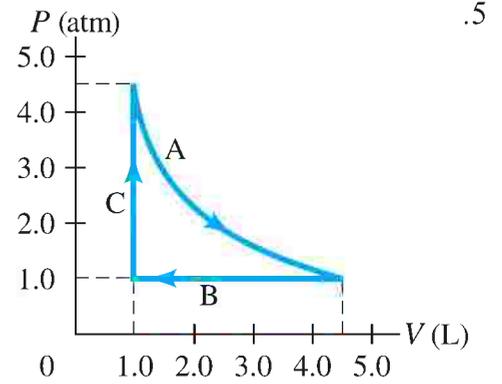
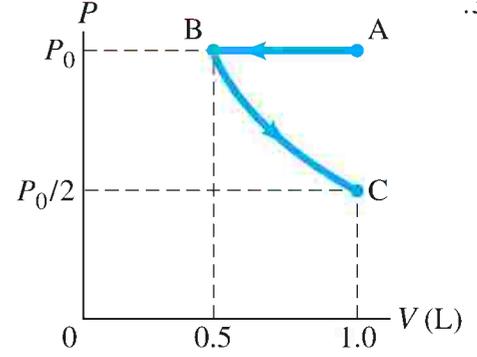
(ب) $3.3 \times 10^3 \text{ s}$

الفصل 15

1. 0 J (i)

(ب) $3.40 \times 10^3 \text{ J}$

3.

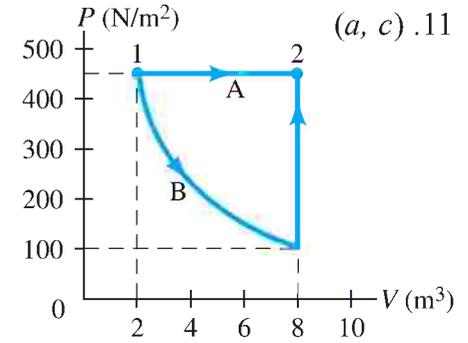


7. 0 J (i)

(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) .79
 Q_A = 1.2 × 10³ C (ج) .79
 Q_B = 1.2 × 10⁴ C .79
 E_A = E_B = 1.4 × 10⁵ J (د) .79
 B (هـ) .79
 1.34 × 10⁻⁴ Ω .81
 2200°C .83

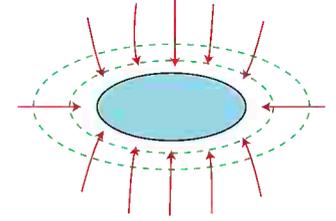
الفصل 19

- 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 .11
 (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
 V₁, V₂ (i) .19
 V₃, V₄ يقل
 I₁, I₂ (ب) .19
 I₃, I₄ يقل
 (ج) يزيد
 I₁ = 0.117 A, I₂ = 0 (د) قبل .19
 I₃ = I₄ = 0.059 A .19
 I₁ = 0.132 A بعد .19
 I₂ = I₃ = I₄ = 0.044 A نعم .19

- 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
 (أ) 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 .61
 (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 .61
 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
 $(\frac{ILB}{m} \mu_k g)r$ (ب)
(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
55° (ب)
5.1 × 10⁻³ Wb (ج) .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
4.3 × 10⁻² V (ب)
1.7 × 10⁻² A (ج) .15
0.548 N .15
0.17 V (i) .17
6.1 × 10⁻³ A (ب)
6.4 × 10⁻⁴ N (ج) .19
5.86 C .19
28 V .21
2.08 rev/s .23
99.0 A (i) .25
1.3 × 10⁻² m² (ب) .27
100 V .27
13 A .29
0.375, 2.67 .31 خفض
50, 4.8 V .33
(أ) رفع
2.8 (ب)
48 kV (rms) (i) .37
0.056 (ب)

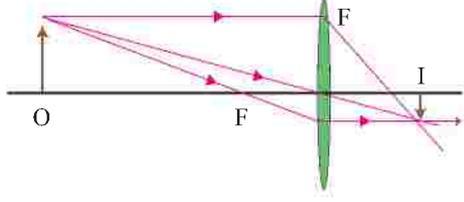
- 3.3 Ω (i) .81
2.2 V (ب)
100 Ω .83
7.6 Ω (i) .85
0.33 A (ب)
0.33 A (ج)
0.95 W (د)
7.2 Ω .87

الفصل 20

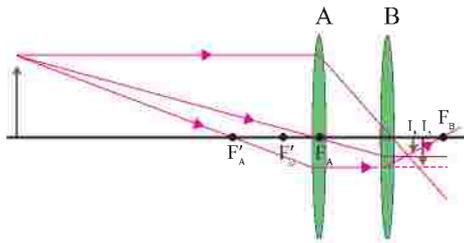
- 7.6 N/m (i) .1
5.3 N/m (ب)
1.95 A .3
0.264 T .5
7 (أ) القطب الجنوبي
4.1 A (ب)
6.4 × 10⁻² N (ج)
1.3 T .9
11 (أ) يسار
(ب) يسار
(ج) للأعلى
(د) للداخل
(هـ) لا توجد قوة
(و) للأسفل
13. حركة دائرة مع اتجاه عقارب الساعة
ب نصف قطر
2.77 × 10⁻⁵ m
1.6 T .15 غرب
2.7 × 10⁻² m (i) .17
3.8 × 10⁻⁷ s (ب) .23
6.20 × 10⁻⁷ m .23
45° (i) .25
3.5 × 10⁻³ m (ب) .27
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 تحت الأفق
(2.0 × 10⁻⁵ T/A) (I - 15A) (i) .37
(2.0 × 10⁻⁵ T/A) (I + 15A) (ب)
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 .41
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. (i) V_{left} يقل, V_{middle} يزداد, V_{right} يقترب من 0
(ب) I_{left} يقل, I_{middle} يزداد, I_{right} يقترب من 0
(ج) يزداد
(د) 14.1 V
(هـ) 14.3 A
23. 0.41 A
25. (i) -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
 $I_2 = 0.31$ 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. (i) 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. $Q_1 = 48.0 \mu C$, $Q_3 = 24.0 \mu C$;
 $V_1 = 3.00$ V, $V_2 = 1.50$ V,
 $V_3 = 1.50$ V; $V = 3.00$ V.
45. (i) $V_{0.40} = 5.4$ 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. $1.0 \times 10^6 \Omega$
51. 9.3×10^{-2} s
53. $7.5 \times 10^{-2} \Omega$
55. (i) $5.0 \times 10^{-5} \Omega$ على التوازي
(ب) 5.0×10^6 A على التوالي
57. 1000 Ω على التوالي. 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. $1.1 \times 10^{-5} \Omega$
(i) $R_x = R_2 R_3 / R_1$
65.7 Ω (ب)
73. $\frac{1}{4} C, \frac{2}{3} C, \frac{3}{5} C, \frac{3}{4} C, C, \frac{4}{3} C, \frac{5}{2} C, 4 C$
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. (i) 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 خلف العدسة المفرقة .59
7.14 cm إلى يمين العدسة B (i) .61
-0.357 (ب)
(ج)



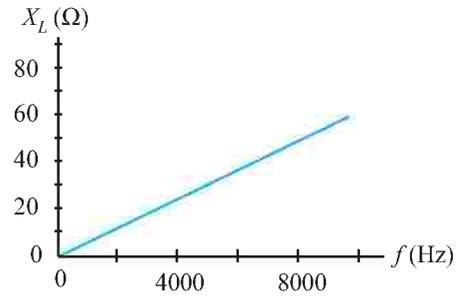
- 16 cm (i) .63 إلى يسار العدسة اللامة
1.8 cm (ب) إلى يمين العدسة المفرقة
1.54 .67
-36.1 cm .69
5.6 m .71
5.16 m .73
 $r = \infty$ (i) .75
 $d_o = -d_i$ (ب)
+1 (ج)
(د) نعم
77. الجسم وهمي وأقرب إلى العدسة من

- 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 خلف السطح الأمامي للمكرة .9
معتدل وهمي
5.66 cm .11 مقعرة
1.0 mm (ج) .-6.7 cm (ب) .13
(i) .15 عند مركز الانحناء
(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 $\times 10^{-2}$ 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× .63 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

11 (i) 2.7 سنة .11

9.2 سنة (ب)

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)

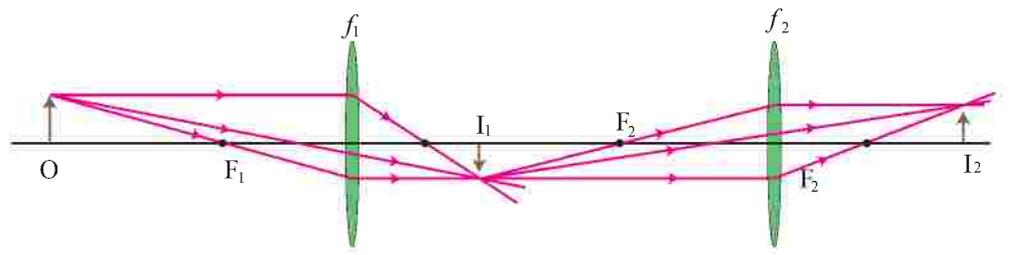
237.0483 u .39

(i) .41

(ب) هدام

360 nm .65

31° .67



590 nm .69

71 الأطوال الموجية من 600 nm إلى

700 nm لطيف الدرجة الثانية تتراكب

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) .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) .27

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 بين العدسة الثانية.

0.65

0.106 m , 2.7 m .83

85 حقيقي ومعتدل, حقيقي ومعتدل

0.26 mm (i) .87

0.47 mm (ب)

1.3 mm (ج)

0.56, 2.7 (د)

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

1640 cm/خط .29

2.20 × 10⁻⁶ m, 53.3° .31

534 nm, 612 nm, 760 nm .33

7140 cm/خط .35

5.79 × 10⁵ cm/خط .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

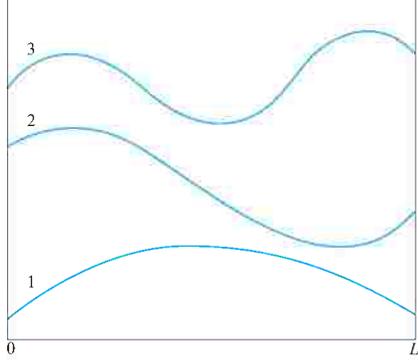
63.4° (ب)

44.5% .59

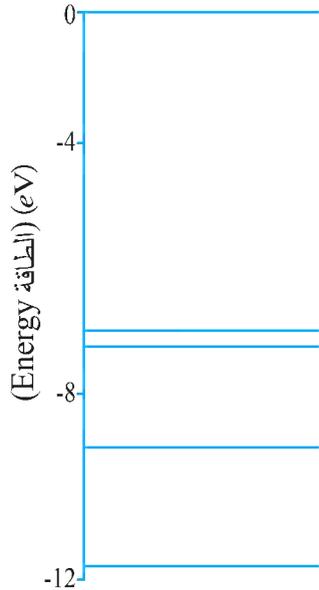
0.031I₀ .61

(i) بناء .63

- 27.2 eV, -13.6 eV .59
 7.3 × 10⁻³ c, 0.999973 نعم. 61
 (i). 63



- 2.4 × 10⁻¹⁷ J, 150 eV (ج)
 1.6 × 10⁻⁶⁶ J, 4.7 × 10⁻³³ m/s (د)
 1.3 × 10⁻¹⁰ m (هـ)
 3.27 × 10¹⁵ Hz .65
 4.7 × 10²⁶ فوتون/s .67
 5.3 × 10¹⁸ فوتون/s .69
 0.39 MeV لكل واحدة .71
 4.7 × 10⁻¹⁴ m .73
 1. (4.4 × 10⁻⁴⁰). نعم .75
 0.64 V .77
 6.7 N .79
 1.0 eV .81
 (i). 83

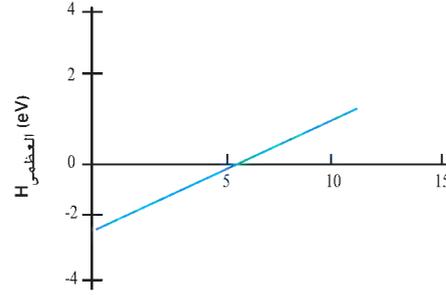


- 0.4 eV, 2.2 eV, الحالة الأرضية. (ب)
 2.5 eV, 4.7 eV, 5.1 eV
 1.8 × 10¹¹ C/kg .85
 $E_n = -\frac{3 \times 10^{165} \text{ J}}{n^2}$.87
 $r_n = n^2 (5 \times 10^{-129} \text{ m})$

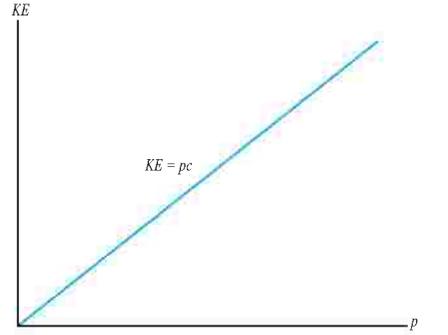
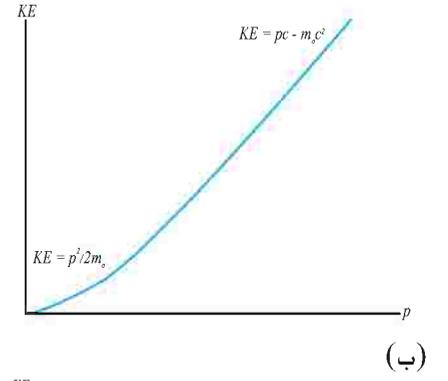
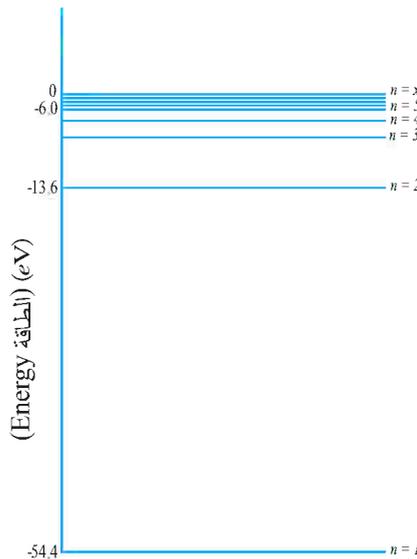
الفصل 28

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

- من 2.7 × 10⁻¹⁹ إلى 11
 3.1 eV إلى 1.7 eV من 5.0 × 10⁻¹⁹ J
 2.4 × 10⁻¹³ Hz, 1.2 × 10⁻⁵ m .13
 6.6 × 10⁻²³ kg.m/s .15
 (أو 0.12 MeV/c)
 6.5 × 10¹⁴ Hz .17
 نحاس وحديد .19
 0.63 eV .21
 2.95 eV .23
 1.9 eV, 43 kcal/mol .25
 .27



- التردد (H₂ 10¹⁴)
 6.7 × 10⁻³⁴ J.s (i)
 5.5 × 10¹⁴ Hz (ب)
 2.30 eV (ج)
 2.42 × 10⁻¹² m (i) .29
 1.32 × 10⁻¹⁵ m (ب)
 55 eV (i) .31
 0.105 nm (ب)
 6.61 × 10⁻¹⁶ m .33
 0.51 MeV, 0.51 MeV/c .35
 2.9 × 10⁻³² m .37
 26 V .39
 1.3 × 10⁻²⁴ kg.m/s (i) .41
 1.5 × 10⁶ m/s (ب)
 6.0 V (ج)
 4.7 × 10⁻³⁸ m/s, 6.3 × 10³⁸ مرة أصغر .45
 2.48 × 10⁻¹¹ m .47
 3.40 eV .49
 122 eV .51
 5.26 × 10⁻⁸ m .55
 .57

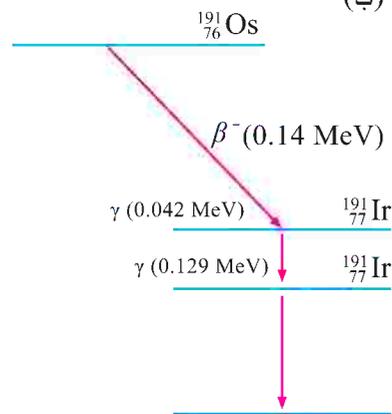


- 0.80c .43
 0.98c (i) .45
 0.42c (ب)
 0.92c .47
 0.73c (i) .49
 (ب) 5.9 سنة
 c - v = 0.77 m/s (i) .51
 0.21 m (ب)
 1.02 MeV (أو 1.64 × 10⁻¹³ J) .53
 234 MeV .55
 4 × 10⁹ kg/s (i) .57
 (ب) 4 × 10⁷ سنة
 (ج) 1 × 10¹³ سنة
 28.3 MeV (أو 4.53 × 10⁻¹² J) .59
 2470 MeV/c (i) .61
 (ب) 0
 1.40 × 10⁴ MeV/c (ج)
 2.5 × 10⁷ kg .63
 نعم بالنسبة لإطار إسناد مخزن
 الجيوبولكن ليس بالنسبة لإطار إسناد
 الولد.
 0.96 c .67
 c .69
 68.6 × 10²¹ J مرة أكبر أو ضعف .71
 1.17 s (i) .73
 2.68 s (ب)

الفصل 27

- 6.2 × 10⁴ C/kg .1
 5 إلكترونات .3
 1.06 × 10⁻⁵ m (i) .5
 8.29 × 10⁻⁷ m (ب)
 7.25 × 10⁻⁴ m (ج)
 1.06 × 10⁻³ m (د)
 5.4 × 10⁻²⁰ J, 0.34 eV .7
 9.35 × 10⁻⁶ m .9

- $^{234}_{90}\text{Th}$ (j) .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 /min أو 0.18 /s 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 $L_{\text{Bohr}} = 2h, L_{QM} = 0$.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
 $2.58 \times 10^{-10} \text{ m}$ (ج) .180 m (ب) .5
 6×10^{26} . 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	± 1/2
1	0	0	-1/2
2	0	0	± 1/2
2	0	0	-1/2
2	1	1	± 1/2
2	1	1	-1/2

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

n	l	m _l	m _s
1	0	0	± 1/2
1	0	0	-1/2
2	0	0	± 1/2
2	0	0	-1/2
2	1	1	± 1/2
2	1	1	-1/2
2	1	0	± 1/2
2	1	0	-1/2
2	1	-1	± 1/2
2	1	-1	-1/2
3	0	0	± 1/2
3	0	0	-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 $n = 2$.
 37 فوتون 6.1×10^{16} , $1.9 \times 10^{-2} \text{ J}$.
 $5.64 \times 10^{-4} \text{ rad}$.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

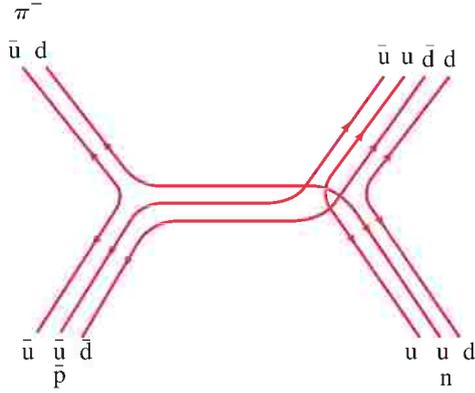
3. $^{28}_{10}\text{Al}, \beta^-, ^{28}_{14}\text{Si}$.1
 3. محتمل
 5. 5.701 MeV كمية الطاقة المنبعثة.
 7. (أ) نعم
 (ب) 19.85 MeV
 9. 4.730 MeV
 11. $n + ^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{14}_6\text{C} + p, 0.626$ MeV
 13. (أ) ^3_2He تلتقط نيوترون
 (ب) $^{11}_6\text{C}$
 (ج) 1.856 MeV. طارد للحرارة
 15. 18.000953 u
 17. 173.3 MeV
 19. 1/1100
 21. 3.7×10^{-7} kg
 23. 630 kg
 25. 2.1×10^{-16} J أو 1.3 keV
 29. 6.0×10^{23} MeV/g
 4.9×10^{23} MeV/g
 2.1×10^{24} MeV/g
 5.1×10^{23} MeV/g
 31. 0.38 g
 33. 5.3×10^3 kg/h
 35. (ب) 26.73 MeV
 (ج) 1.94 MeV, 2.22 MeV, 7.55 MeV
 49. 7.30 MeV, 2.75 MeV, 4.97 MeV
 (د) تنافر أكبر من الأنوية التي عددها
 الذري Z أكبر
 37. 4.0 Gy
 39. 250 قدما
 41. 200 counts/s
 43. 2.5 يوم
 45. 8.25×10^{-7} Gy/day
 47. $^{131}_{53}\text{I} \rightarrow ^{131}_{54}\text{Xe} + e^- + \bar{\nu}$ (أ)
 (ب) 27 يوما
 (ج) 8×10^{-12} kg
 49. $^{218}_{84}\text{Po}$ (أ)
 (ب) مشع
 α decay: $^{218}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{214}_{82}\text{Pb} + ^4_2\text{He}$
 β decay: $^{218}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{218}_{85}\text{At} + e^-$
 3.1 min كلاهما
 (ج) يتفاعل كيميائيا
 (د) 5.7×10^6 اضمحلال
 2.5×10^4 اضمحلال
 51. $^{12}_6\text{C}$ (أ)
 (ب) 5.701 MeV
 53. $v_{235} : v_{238} = 1.0043 : 1$
 55. 5.1×10^{-2} rem/yr
 57. 4.7 m
 59. 1300 kg (أ)
 (ب) 4.1×10^6 Ci
 61. 4.0×10^{26} W (أ)

- (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
 67. 96 yr
 69. 3 mCi

الفصل 32

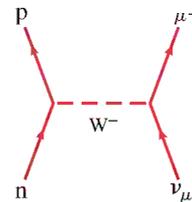
1. 7.29 GeV
 3. 1.8 T
 5. 13 MHz
 7. جسيمات ألفا
 $\lambda_{\alpha} = 2.2 \times$ حجم النيوكليون
 $\lambda_{\alpha} = 4.4 \times$ حجم النيوكليون
 9. 1.8×10^{-19} m
 11. 5.5 T
 15. 33.9 MeV
 17. 1879.2 MeV
 19. 67.5 MeV
 21. 2.3×10^{-18} m
 23. (أ) الشحنة. (والغرامة)
 (ب) الطاقة
 (ج) عدد البريون والغرامة
 27. 69.3 MeV
 29. $KE_{\Lambda^0} = 8.6$ MeV, $KE_{\pi} = 57.4$ MeV
 31. 52.3 MeV
 33. 7.5×10^{-21} s
 35. 1.3 keV (أ)
 (ب) 8.9 keV
 37. (أ) ممنوع. الطاقة غير محافظة
 (ب) ممنوع. عدد البيبتون غير محافظ
 (ج) محتمل
 39. (أ) p
 (ب) $\bar{\Sigma}^-$
 (ج) K^-
 (د) π^-
 (هـ) $D\bar{s}$
 41. $D\bar{s} = c\bar{s}$
 43. 0.38 A (أ)
 (ب) 1.0×10^2 m/s
 47. 1.022 MeV (أ)
 (ب) 1876.6 MeV
 49. (أ) ممنوع بواسطة حفظ الشحنة.
 (ب) محتمل بواسطة التفاعل القوي.
 (ج) ممنوع بواسطة حفظ الغرامة للتفاعل
 القوي. محتمل بواسطة التفاعل
 الضعيف.

- (د) ممنوع بواسطة حفظ الغرامة 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

3. 4.8 ly
 5. 0.059", 17 pc
 7. 110 yr
 9. 3.7×10^{-2}
 11. 1.4×10^{-4} kg/m³
 14. 1.83×10^{-9} kg/m³. أكبر بنحو
 3.33×10^5 مرة
 15. -0.092 MeV, 7.366 MeV
 17. $d_1/d_2 = 0.15$
 19. 4×10^{14} m
 21. 540°
 23. 1.6×10^8 ly
 25. 656 nm (أ)
 (ب) 661 nm
 (ج) 1670 nm
 27. 0.44c
 31. 6 نيوكليون/m³
 33. 10^{-5} s (أ)
 (ب) 10^{-7} s
 (ج) 10^{-4} s
 35. 5 ly
 37. 5×10^9
 39. 2×10^{28} N
 41. $d_{400} \text{ nm} / d_{600} \text{ nm} \approx 1.4$
 43. 0.88c
 45. 2×10^{-3}
 47. 13.933 MeV (أ)
 (ب) 4.7 MeV
 (ج) 3.7×10^{10} K
 49. ≈ 400 ly أكبر بنحو 2×10^7 مرة.
 أصغر ب 100 مرة.



فهرست

of hydrogen, 367	للهدروجين	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؛ pr تعني موجود في مسألة أو سؤال؛ ff تعني أيضًا الصفحات التالية
Atomic mass unit, 9, 353, 837,		vector, nature of, 215–16		Air columns, vibrations of,329–34	اهتزاز الأعمدة الهوائية	A	(atomic mass number), 836
838		Angular velocity, 196 ff, 215–16	السرعة الزاوية	Air conditioner, 421–23	مكيف الهواء	(العدد الذري الكتلتي)	
Atomic number, 797, 836	العدد الذري	linear velocity and, 197, 199	السرعة الخطية	Air pollution, 430	تلوث الهواء	Zig:	
determined from X-ray analysis, 800–802	محددًا بالأنشطة السنوية	Annihilation, 765, 949	فناء	Airplane, sound intensity of,326–27	شدة صوت الطائرة	astigmatism, 702, 710	اللانقطبية
Atomic spectra, 771–73	أطياف ذرية	Anode, 485, 754, 755	مصعد	Airy disk, 712	جناح الطائرة	chromatic, 710	لوني
fine structure of, 786, 795		Antenna, 615, 621, 626, 627–28	هوائي	Algebra, review of, A-3–A-6	كاشفات المعادن في المطار	of eye, 702–3, 710	العين
Atomic structure:	التركيب الدقيق	Anthropic principle, 955	هوائي	Airport runway, 27	مدرج المطار	of lenses, 710–11	العدسات
Bohr model of, 773–79	النموذج بوهر	Antilock brakes, 113	مبدأ	Airy disk, 712	قرص آيري	monochromatic, 710–11	وحيد اللون
of complex atoms, 797–98	للذرات المركبة (المعدنة)	Antimatter, 921, 923 pr	طابع البشر	Alkali metals, 799	مختصر جزري	spherical, 636, 710	كروي
early models of, 769–70	النماذج الأولية لـ	Antineutrino, 846	كوابح عدم الاقفل	Allowed transition, 797, 823	الفلزات القوية	Absolute luminosity, 930 and ff	المعان المطلق
of hydrogen atoms, 771–85,794–97	نظرة الهيدروجين	Antinodes, 310, 333	ضد المادة	Alpha decay, 842–44	انتقال مسموح	Absolute space and time, 729	الحيز المطلق والزمن
quantum mechanics of,786–807	ميكانيكا الكم	Antiproton, 910	ضد البروتون	and tunneling, 855	انحلال ألفا	Absolute temperature scale, تدرج الحرارة المطلق, 362–63	تدرج الحرارة المطلق
shells and subshells of,798–99, 800	القشرات ودون القشرات	Antiquark, 916–17	ضد الكوارك	Alpha particles (or rays), 770,842, 844	عبور ألفا	Absolute zero, 362	الصفر المطلق
Atomic theory, 352–54, 769–81	النظرية الذرية	Apparent brightness, 930–31,937	البريق الظاهري	Alternating current (ac),506–8, 603–8	جسيمات ألفا	Absorbed dose, 889	الجرعة الممتصة
(see also Atom;Atomic structure; theory)	Kinetic theory	Apparent weight, 265	الوزن الظاهري	Alternators, 593	تيار متناوب (ac)	Absorption lines, 679, 777	خطوط الامتصاص
Atomic weight, 353 fn	نظر النذرة والترتيب الذري	Approximate calculations,12–14	الوزن الظاهري	AM, 626, 627	تضمين الانتعاش	Absorption spectrum, 679, 771–72	طيف الامتصاص
Atomizer, 272	الوزن الذري	Arabisopsis thaliana, 881	حسابات تقريبية	Amino acids, 819–20	أحماض أمينية	Abundances, natural, 836	الوفرة الطبيعية
ATP, 817	البخاخ	Arches, 243–45		Ammeter, 541–45	أميتر	Ac circuits, 506–8, 520 fn, 603–5	دارات AC
Attack angle, of wing, 272–73	زاوية الهجوم، للجناح	Archimedes, 263, 265	فرانكوس أراغو	Amorphous material, 824	مادة لابلورية	Ac generator, 592–93	مولد التيار المتناوب
Atwood machine, 88, 221 pr	آلة أتود	Archimedes' principle, 255,263–67	أرخميدس	Ampère, André, 496, 568, 616	أندريه أمبير	Ac motor, 572	محرك التيار المتناوب
Audible range, 323	المدى السمعي	Architecture, 4, 243–45	معماري	Ampere (unit), 496, 566	أمبير (وحدة)	Accademia del Cimento, 355	أكاديمية سيمينتو
Aurora borealis, 563	الشفق	Area under a curve or graph,37, 141	المساحة تحت المنحني	operational definition of,566		Acceleration, 23–27, 75–77, 106–9	التسارع
Autofocusing camera, 324	القمرة آلية التبيير	Areas and volumes, A-1	المساحة والحجم	Ampère's law, 568–69, 616	قانون أمبير	angular, 196–99, 201	الزاوي
Autoradiography, 892–93	التصور الإشعاعي الآلي	Aristotle, 2, 73	أرسطو	Amplifiers, 830, 831	مكبرات	average, 23, 24	المتوسط
Average angular acceleration,197	التسارع الزاوي المتوسط	Armature, 571, 592, 594	ذراع	Amplitude:	Amplitude modulation (AM),	centrifuge, 201	الطرد المركزي
Average angular velocity, 196	السرعة الزاوية المتوسطة	Astigmatism, 702, 710	لانقطبية	of vibration, 288	انتعاش الاهتزازة	centripetal, 107 ff, 194, 198, 200	المركزي
Average speed, 21	السرعة المتوسطة	Astronomical telescope, 706–7	مقرب (تلسكوب)	wave, 302, 305, 306–7, 314, 327	انتعاش الموجة	Coriolis, A-18–A-19	كوروليوس
Avogadro, Amedeo, 366	أميدو أفوجادرو	Asymptotic freedom, 919	فيزياء فلكية	Amplitude modulation (AM),	تضمين الانتعاش	cosmic, 953	كوني
Avogadro's hypothesis, 366–67	أميدو أفوجادرو	Atmosphere, scattering of light by, 690	الحرية المقاربة	626, 627	of the Moon, 109, 118	of gravity, 33 ff, 121 in g's, 35	في الجاذبية
Avogadro's number, 366–67	عدد أفوجادرو	Atmosphere (unit), 259, 261	تشتت الضوء	Amusement park rides, 111,	instantaneous, 24	of the Moon, 109, 118	لحظي
Axis of lens, 647	محور العدسة	Atmospheric pressure, 259, 261	وحدة ضغط جوي	194, 198, 199	of the Moon, 109, 118	motion at constant, 26–44	حركة ثابتة
Axis of rotation, 195	محور الدوران	Atom, 352–54, 441, 769–81 (see also Atomic structure; Kinetic theory)	الضغط الجوي	Analog information, 598	radial, 107	relationship with force, 75–77	نصف قطري
forces tilting, 206	Axon, 511–13	binding energy, 776	ذرة	Analyzer (of polarized light),	relationship with force, 75–77	of simple harmonic oscillator, 295	علاقة مع القوة
Audible range, 323	محور الليفة العصبية	Bohr model of, 773–79	تركيب الذرة	685	of simple harmonic oscillator, 295	tangential, 115–16, 198	المهتز التوافقي البسيط
Aurora borealis, 563	قوة دافعة راجعة	complex, 797–98	النظرية الحركية	Andromeda, 929	uniform (constant), 26–44	uniform (constant), 26–44	مماسي
Autofocusing camera, 324	قوة راجعة	distance between, 354	الزخم الزاوي	Aneroid gauge and barometer,	Accelerators, 902	Accelerators, 902	متنظم
Autoradiography, 892–93	ألم ظهر	early models, 769–70	طاقة الربط	261	Acceptance of theories, 2–3	Acceptance of theories, 2–3	منظم
Average angular acceleration,197	إشعاع الخلفية، كوني، ميكروويف	electric charge in, 441	نموذج بوهر	Analyzer (of polarized light),	Accommodation of eye, 702	Accommodation of eye, 702	مسار عات
Average angular velocity, 196	ميزان	energy levels in, 775–76, 794–96, 799, 800	معقد	685	Accuracy, precision vs., 5 fn	Accuracy, precision vs., 5 fn	قبول النظريات
Average speed, 21	بنودل قففي	hydrogen, 771–85, 794–97	المسافة بين	Andromeda, 929	Achilles tendon, 250 pr	Achilles tendon, 250 pr	مستوى المتقبل
Avogadro, Amedeo, 366	صيغة بالمر	ionization energy of, 776	النماذج القديمة	Aneroid gauge and barometer,	Actinides, 800	Actinides, 800	تكيف العين
Avogadro's hypothesis, 366–67	بالمر	neutral, 837	الشحنة الكهربائية	Barometer,	Action potential, 512–13	Action potential, 512–13	الدقة
Axis of lens, 647	سلسلة بالمر	packing of, 824	مستويات الطاقة	261	Action-reaction (Newton's third law), 77–80	Action-reaction (Newton's third law), 77–80	وتر آشيل
Axis of rotation, 195	فقرة الحزمة	planetary (nuclear) model of,770	الهيدروجين	Brewster's, 687	Activation energy, 371, 816	Activation energy, 371, 816	مزودج لا لوني
forces tilting, 206	أطياف الحزمة	probability distributions in,794, 797, 813	طاقة التآين	critical, 645	Active galactic nuclei (AGN), 930	Active galactic nuclei (AGN), 930	الاكتنيدات
Audible range, 323	نظرية الحزمة للمواد الصلبة	quantum theory of, 773–811	متعادلة	of dip, 556	Active matrix LCD, 689	Active matrix LCD, 689	جهد الفعل
Aurora borealis, 563	منحنيات مائلة	shells and subshells in,798–99, 800	النموذج الفلكي (للنواة)	of incidence, 308, 312, 633,643	Activity of nuclear radiation, 849	Activity of nuclear radiation, 849	الفعل ورد الفعل (قانون نيوتن)
Autofocusing camera, 324	شيفرة البار	stationary states in, 773 ff	توزيع الاحتمالات	phase, 607	Addition of velocities, 62–64,748	Addition of velocities, 62–64,748	طاقة التنشيط
Autoradiography, 892–93	بار (وحدة)	Tensor, 773 ff	النظرية الكمومية	polarizing, 687	Adenine, 460–61	Adenine, 460–61	أنوية المجرات النشطة
Average angular acceleration,197	الباروميتر	Tensor, 773 ff	القشرات ودون القشرات	radian measure of, 195	Adhesion (defn), 277	Adhesion (defn), 277	جمع السرعات
Average angular velocity, 196	عدد بايرون	Tensor, 773 ff	القشرات	of reflection, 308, 633	Adiabatic process, 411–12	Adiabatic process, 411–12	التصاق
Average speed, 21	الباريونات	Tensor, 773 ff	النظرية القديمة	refraction, 312, 643	ADP, 817	ADP, 817	عملية كظيمة
Avogadro, Amedeo, 366	نظرية الكوارك	Tensor, 773 ff	الشحنة الكهربائية	of refraction, 312, 643	Air:	Air:	الهواء
Avogadro's hypothesis, 366–67	جهد القاعدة	Tensor, 773 ff	مستويات الطاقة	refraction, 312, 643	buoyancy of, 267	buoyancy of, 267	الطفو
Axis of lens, 647	سلسلة بالمر	Tensor, 773 ff	الهيدروجين	of refraction, 312, 643	mass of in room, 365	mass of in room, 365	كتلة الهواء في الغرفة
Axis of rotation, 195	فقرة الحزمة	Tensor, 773 ff	طاقة التآين	refraction, 312, 643	water content of, 374–76	water content of, 374–76	محتوى الماء
forces tilting, 206	أطياف الحزمة	Tensor, 773 ff	متعادلة	of refraction, 312, 643			
Audible range, 323	نظرية الحزمة للمواد الصلبة	Tensor, 773 ff	النموذج الفلكي (للنواة)	refraction, 312, 643			
Aurora borealis, 563	منحنيات مائلة	Tensor, 773 ff	توزيع الاحتمالات	of refraction, 312, 643			
Autofocusing camera, 324	شيفرة البار	Tensor, 773 ff	النظرية الكمومية	refraction, 312, 643			
Autoradiography, 892–93	بار (وحدة)	Tensor, 773 ff	القشرات ودون القشرات	of refraction, 312, 643			
Average angular acceleration,197	الباروميتر	Tensor, 773 ff	القشرات	refraction, 312, 643			
Average angular velocity, 196	عدد بايرون	Tensor, 773 ff	النظرية القديمة	of refraction, 312, 643			
Average speed, 21	الباريونات	Tensor, 773 ff	الشحنة الكهربائية	refraction, 312, 643			
Avogadro, Amedeo, 366	نظرية الكوارك	Tensor, 773 ff	مستويات الطاقة	of refraction, 312, 643			
Avogadro's hypothesis, 366–67	جهد القاعدة	Tensor, 773 ff	الهيدروجين	refraction, 312, 643			
Axis of lens, 647	سلسلة بالمر	Tensor, 773 ff	طاقة التآين	of refraction, 312, 643			
Axis of rotation, 195	فقرة الحزمة	Tensor, 773 ff	متعادلة	refraction, 312, 643			
forces tilting, 206	أطياف الحزمة	Tensor, 773 ff	النموذج الفلكي (للنواة)	of refraction, 312, 643			
Audible range, 323	نظرية الحزمة للمواد الصلبة	Tensor, 773 ff	توزيع الاحتمالات	refraction, 312, 643			
Aurora borealis, 563	منحنيات مائلة	Tensor, 773 ff	النظرية الكمومية	of refraction, 312, 643			
Autofocusing camera, 324	شيفرة البار	Tensor, 773 ff	القشرات ودون القشرات	refraction, 312, 643			
Autoradiography, 892–93	بار (وحدة)	Tensor, 773 ff	القشرات	of refraction, 312, 643			
Average angular acceleration,197	الباروميتر	Tensor, 773 ff	النظرية القديمة	refraction, 312, 643			
Average angular velocity, 196	عدد بايرون	Tensor, 773 ff	الشحنة الكهربائية	of refraction, 312, 643			
Average speed, 21	الباريونات	Tensor, 773 ff	مستويات الطاقة	refraction, 312, 643			
Avogadro, Amedeo, 366	نظرية الكوارك	Tensor, 773 ff	الهيدروجين	of refraction, 312, 643			
Avogadro's hypothesis, 366–67	جهد القاعدة	Tensor, 773 ff	طاقة التآين	refraction, 312, 643			
Axis of lens, 647	سلسلة بالمر	Tensor, 773 ff	متعادلة	of refraction, 312, 643			
Axis of rotation, 195	فقرة الحزمة	Tensor, 773 ff	النموذج الفلكي (للنواة)	refraction, 312, 643			
forces tilting, 206	أطياف الحزمة	Tensor, 773 ff	توزيع الاحتمالات	of refraction, 312, 643			
Audible range, 323	نظرية الحزمة للمواد الصلبة	Tensor, 773 ff	النظرية الكمومية	refraction, 312, 643			
Aurora borealis, 563	منحنيات مائلة	Tensor, 773 ff	القشرات ودون القشرات	of refraction, 312, 643			
Autofocusing camera, 324	شيفرة البار	Tensor, 773 ff	القشرات	refraction, 312, 643			
Autoradiography, 892–93	بار (وحدة)	Tensor, 773 ff	النظرية القديمة	of refraction, 312, 643			
Average angular acceleration,197	الباروميتر	Tensor, 773 ff	الشحنة الكهربائية	refraction, 312, 643			
Average angular velocity, 196	عدد بايرون	Tensor, 773 ff	مستويات الطاقة	of refraction, 312, 643			
Average speed, 21	الباريونات	Tensor, 773 ff	الهيدروجين	refraction, 312, 643			
Avogadro, Amedeo, 366	نظرية الكوارك	Tensor, 773 ff	طاقة التآين	of refraction, 312, 643			
Avogadro's hypothesis, 366–67	جهد القاعدة	Tensor, 773 ff	متعادلة	refraction, 312, 643			
Axis of lens, 647	سلسلة بالمر	Tensor, 773 ff	النموذج الفلكي (للنواة)	of refraction, 312, 643			
Axis of rotation, 195	فقرة الحزمة	Tensor, 773 ff	توزيع الاحتمالات	refraction, 312, 643			
forces tilting, 206	أطياف الحزمة	Tensor, 773 ff	النظرية الكمومية	of refraction, 312, 643			
Audible range, 323	نظرية الحزمة للمواد الصلبة	Tensor, 773 ff	القشرات ودون القشرات	refraction, 312, 643			
Aurora borealis, 563	منحنيات مائلة	Tensor, 773 ff	القشرات	of refraction, 312, 643			
Autofocusing camera, 324	شيفرة البار	Tensor, 773 ff	النظرية القديمة	refraction, 312, 643			
Autoradiography, 892–93	بار (وحدة)	Tensor, 773 ff	الشحنة الكهربائية	of refraction, 312, 643			
Average angular acceleration,197	الباروميتر	Tensor, 773 ff	مستويات الطاقة	refraction, 312, 643			
Average angular velocity, 196	عدد بايرون	Tensor, 773 ff	الهيدروجين	of refraction, 312, 643			
Average speed, 21	الباريونات	Tensor, 773 ff	طاقة التآين	refraction, 312, 643			
Avogadro, Amedeo, 366	نظرية الكوارك	Tensor, 773 ff	متعادلة	of refraction, 312, 643			
Avogadro's hypothesis, 366–67	جهد القاعدة	Tensor, 773 ff	النموذج الفلكي (للنواة)	refraction, 312, 643			
Axis of lens, 647	سلسلة بالمر	Tensor, 773 ff	توزيع الاحتمالات	of refraction, 312, 643			
Axis of rotation, 195	فقرة الحزمة	Tensor, 773 ff	النظرية الكمومية	refraction, 312, 643			
forces tilting, 206	أطياف الحزمة	Tensor, 773 ff	القشرات ودون القشرات	of refraction, 312, 643			
Audible range, 323	نظرية الحزمة للمواد الصلبة	Tensor, 773 ff	القشرات	refraction, 312, 643			
Aurora borealis, 563	منحنيات مائلة	Tensor, 773 ff	النظرية القديمة	of refraction, 312, 643			
Autofocusing camera, 324	شيفرة البار	Tensor, 773 ff	الشحنة الكهربائية	refraction, 312, 643			
Autoradiography, 892–93	بار (وحدة)	Tensor, 773 ff	مستويات الطاقة	of refraction, 312, 643			
Average angular acceleration,197	الباروميتر	Tensor, 773 ff	الهيدروجين	refraction, 312, 643			
Average angular velocity, 196	عدد بايرون	Tensor, 773 ff	طاقة التآين	of refraction, 312, 643			
Average speed, 21	الباريونات	Tensor, 773 ff	متعادلة	refraction, 312, 643			
Avogadro, Amedeo, 366	نظرية الكوارك	Tensor, 773 ff	النموذج الفلكي (للنواة)	of refraction, 312, 643			
Avogadro's hypothesis, 366–67	جهد القاعدة	Tensor, 773 ff	توزيع الاحتمالات	refraction, 312, 643			
Axis of lens, 647	سلسلة بالمر	Tensor, 773 ff	النظرية الكمومية	of refraction, 312, 643			
Axis of rotation, 195	فقرة الحزمة	Tensor, 773 ff	القشرات ودون القشرات	refraction, 312, 643			
forces tilting, 206	أطياف الحزمة	Tensor, 773 ff	القشرات	of refraction, 312, 6			

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		كرة السلة
Centigrade (see Celsius temperature scale)	مئوي	Buoyancy, 263–67	المعامل الجرمي	Bohr, Niels, 766, 773, 793	نموذج بوهر في الذرة	بطارية
Centipoise (unit), 275	وحدة سينتوز 275	Buoyant force, 263–67	قوة الطفو	Bohr radius, 774		رمز البطارية
Centrifugal (pseudo) force, 110, A-17–A-18	مضخة الطرد المركزي	Cable TV, 628–29	التلفاز بالكابل	Bohr theory, 773–79, 786–87		أعمدة
Centrifugal pump, 278	الطرد المركزي	Calculator errors, 7	أخطاء آلة الحاسبة	Boiling, 374–75, 414 pr	غليان	Beam splitter, 684
Centrifuge, 116–17	الطرد المركزي	Caloric theory, 385	نظرية الكالوري	Boiling point, 355 fn, 373, 375		Beams, 243
Centripetal acceleration, 107 ff,	تسارع مركزي	Calorie (unit), 385	وحدة الكالوري		درجة الغليان	Beat frequency, 337
194, 198–99, 201	قوة مركزية	related to the joule, 385	وحدة الكالوري	table, 392		Beats, 335–37
Centripetal force, 109	قوة مركزية	working off, 386		Boltzmann, Ludwig, 428		Becquerel, Henri, 841
Cepheid variables, 937	متغيرات	Calorimeter, 390, 857	الكالوريمتر	Boltzmann's constant, 367, 833pr	ثابت بولتزمان	Becquerel (unit), 889
CERN, 905	مختبرات سيرن	Camera, 697–701	القياسات الحرارية		لودفيغ بولتزمان	Bel (unit), 325
Cgs system of units, 9	نظام للوحدات cgs	adjustments to, 698–700	التقويمات	Bomb calorimeter, 390	ثابت بولتزمان	Bell, Alexander Graham, 325
Chadwick, James, 836	شادوليك، جيمس	autofocusing, 324	القمرة	Bond energy, 813, 817	مسعر القنبلة	Bernoulli, Daniel, 270
Chain reaction, 879–81	تفاعل متسلسل	digital, 697	خط القمرة	Bonding:	طاقة الرابطة	Bernoulli's equation, 270–71
Chandrasekhar limit, 934	نهاية شاندراسيكر	flash unit, 484	تنبيه آلي	in molecules, 812–15	الربط في الجزيئات	
Change of phase (or state), 371–73, 391	تغيير الحالة (الطور)	Cantilever, 231	رقصي	in solids, 824	الربط في المواد الصلبة	Bernoulli's principle, 270 ff
		Capacitance, 480–82, 533–35	وحدة الوميض	Bonds, 812–15, 824		applications of, 272–74
Charge (see Electric charge)	شحنة	equivalent, 534	مكافئ	covalent, 813, 815, 816, 824	الروابط	Beta decay, 845–47
		Capacitive reactance, 605	مقاومة مواسع	dipole, 818–19	التشارك	Beta particle, or ray, 842,
Charge-coupled device (CCD), 697	إدارة إزدواج الشحنة	Capacitor, 480–81	مواسع	hydrogen, 818–20	الهيدروجين	845–46 (see also Electron)
Charging a battery, 521 fn, 532–33	شحنة البطارية	in ac circuits, 604–5	في دارات التيار المتردد	ionic, 814, 815, 817, 824	أيونية	Bethe, Hans, 885
Charles, Jacques, 362	شارل، جاك	charge and voltage on, 535	الشحنة والجهد	metallic, 824	فلزية	Bias voltage, 828
Charles's law, 363	قانون شارل	energy stored in, 484–85	الطاقة المخزنة	molecular, 812–15	جزيئية	Biceps, and torque, 205, 221
Charm, and charmed quark,	جميل، الكوارك	as filter, 605	كمرشح	partial ionic and covalent, 815	أيونية تشاركية	
		parallel-plate, 482	متوازي الصفيحتين	in solids, 824	الصلبة	Big Bang theory, 944 ff
		in RC circuit, 535–37	في دائرة RC	strong (defn), 817	قوية	Big crunch, 951, 952
		reactance (impedance) of, 603–5	ممانعة	van der Waals, 817–21	فان دي فالز	Bimetallic-strip thermometer, 355
		in series and parallel, 533–34	في التوالي والتوازي	weak, 817–21, 824	ضعيفة	ميزان المزودج الحراري
		uses of, 605	في التوالي والتوازي	Bone density, measurement of, 764	كثافة العظام وقياسها	Binary system, 935, 941
Chemical bonds, 812–15	روابط كيميائية	Capacitor microphone, 546 pr	في التوالي والتوازي	Born, Max, 788	ماكس بورن	النظام المزودج
Chemical lasers, 805	ليزرات كيميائية	Capacity (see Capacitance)	ميكروفون المواسع	Bosons, 797 fn, 913, 917, 918	البيوزونات	طاقة الربط
Chemical reactions, 371	تفاعلات كيميائية		المواسعة	Bottom quark, 916–17	الطبقة الحدية	816–17, 838–41
temperature effect, 371	أثر درجة الحرارة	Capillary, 276–78	الأنابيب الشعرية	Boundary layer, 273	موجة القوس	in atoms, 775
Chernobyl, 882	شيبوبول	Capillarity, 276–78	الشعرية	Bow wave, 342	روبرت بويل	of molecules, 813, 816–17
Chimney smoke, 274	دخان المدخنة	Car:	سيارة	Boyle, Robert, 362	قانون بويل	of nuclei, 838–41
Chip, 812, 831	شيب	air bags, 29	أكياس هوائية	Boyle's law, 362, 363, 368	معادلة براغ	Binding energy per nucleon, 839
Chromatic aberration, 710–11	الزيج اللوني	brakes, 260	كوابح	Bragg equation, 717	براغ	طاقة الربط لكل نوية
Chromosome (see DNA)	كروموسوم	force that accelerates, 79	القوة المسارعة	Bragg, W. H., 717	المكايح الهيدروليكية	Binoculars, 646, 708
Circle of confusion, 699, 710	دائرة الارتباك	forces on a curve, 112	القوى عن المنحنى	Bragg, W. L., 717	الكبح	Binomial expansion, 737, A-6–A-7 (see also inside back cover)
Circle of least confusion, 710		power needs of, 159	احتياجات القدرة	Brake, hydraulic, 260	الكبح	التمدد ثنائي الحدود
Circuit (see Electric circuit)	دائرة كهربائية	skidding, 113	الانزلاق	Braking of car, 30, 113, 144	كسر السائق	Biological damage by
		stopping distance of, 30, 144	مسافة الوقوف	eddy currents for, 594	نقطة الكسر	التلف الحيوي بالأشعاع
Circuit breaker, 505–6, 599	قاطع كهربائي	Car starters, 567	دورة الكربون	LED lights to signal, 830	التنفس	radiation, 888
magetic, 567		Carbon cycle, 885	التأريخ الكربوني	Breaking a leg, 174	Bremsstrahlung, 802	Biological evolution and
Circular motion, 292	حركة دائرية	Carbon dating, 853–55	دورة الكربون	Breaking point, 237	مفاعلات بريدنر	التطور الحيوي
nonuniform, 115–16	حركة دائرية غير منتظمة	Carnot cycle (engine), 419–21	كفاءة كارنوت	Breath, molecules in, 367	زواوية برومستر	development, 427
uniform, 106–15		Carnot efficiency, 420	كفاءة كارنوت	Breeder reactor, 882	دائرة القنطرة	Bit speed, 200
Circulating pumps, 278–79	مضخات دوائر	Carnot, Sadi, 419	كارنوت، سادي	Brewster, David, 687	إشعاع الكبح	Black holes, 930, 935, 941
Classical physics, 1, (defn, 727)	فيزياء كلاسيكية (727)	Carrier frequency, 626	تردد الحامل	Brewster's angle and law, 687		Blackbody radiation, 756–58
Clausius, R. J. E., 416, 422	نص كلاسيوس للقانون الثاني	Cassegrainian focus, 707	الحفاظات	Bridge circuit, 551 pr		Blood flow, 269, 275–76, 590
Clausius statement of second law, 416, 422	معضلة الساعة (معضلة التوازن)	CAT scan, 719	الكاترات	Bridge collapse, 299		convection by, 399
Clock paradox (see Twinparadox)	بندول الساعة (معضلة التوازن)	Catalysts, 817	الكاترات	Brightness, apparent, 930–31, 937	الزريق	Doppler blood-flow meter, 341
Clock, pendulum, 297	بندول الساعة	Cathedrals, 244–45	الكاترات	British system of units, 9 (see also name of unit)	النظام الوحداني البريطاني	مقياس دوپلر لجران الدم
Closed tube, 332, 333	أنبوب مغلق	Cathode, 485, 754	أنبوب أشعة المهبط	Brogli (see de Broglie, Louis)	بروجلي لونس	Doppler weather forecasting, 341
Clothing, insulating properties of, 397	خصائص عزل الملابس	Cathode rays, 485, 754–55 (see also Electron)	النسبية	Bronchoscopes, 646	منظار التنصبات	TIAs and, 273
Cloud chamber, 857	مجرة الغيوم	Cathode-ray tube (CRT), 485–86, 628	النسبية	Brown, Robert, 353		Blood pressure, measuring, 279
CO molecule, 822–23	جزيء أول أكسيد الكربون	Cell, electric, 494–95	جهاز تشغيل CD	Brownian motion, 353		قياس ضغط الدم
Coating of lenses, optical, 682	طلاء العدسات، ضوء	Cell phones, 314, 621, 628	خلية كهربائية	Brunelleschi, Filippo, 245	الحركة البراونية	Blue sky, 690
Coaxial cable, 580 pr, 621		Cells, pressure on, 259	تلفون خلوي	Brushes, 571		Blue-shift, 943
		Celsius temperature scale, 355–56, 362–63	ضغط الخلية	BSCCO, 510		Bobsled acceleration, 75
				Btu (unit), 385	وحدة حرارة بريطانية	Body heat loss from, 399, 400
						metabolism, 414–15
						التمثيل الغذائي للجسم

Current (see Electric current)	تيار	Convex mirror, 635, 641–42	مرآة محدبة	stress on, 361	تكتيف	COBE, 946	كابل محوري
Current sensitivity of meters,	حساسية المقاييس للتيار	Cooling	تبريد	Condensation, 374	تكتيف	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	Copernicus, 3	كوبرنيكس	heat, 395–97	حرارة	of building, 242	البنائيات
Curves, car on, 112–15	السيارة على المنحنيات	Core, of reactor, 881	قلب المفاعل	nerve, 510–13	عصب	of star, 215	النجم
Cutoff wavelength, 802	طول موجة القطع	Coriolis acceleration, A-18–A-19	تسارع كوريوليس	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	القرنية	Conductors: electrical, 441–42, 456–57, 475–76, 493–513, 590–91, 825	الموصلات الكهربائية	elastic, 175–77	مرن
Cytosine, 460–61, 818	سيتوسين	Corrective lenses, 701–4	عدسات مصححة	heat, 396	حرارة	inelastic, 175–76, 178–79	غير مرن
da Vinci, Leonardo, 3	لويش، دي بروي	Correspondence principle, 749, 779, 787	مبدأ التطابق (النشابه)	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:	ألوان
Dampening, eddy currents for,		Cosmic Background Explorer, 946	كاشف الخلفية الأرضية الكونية	Conservation laws: of angular momentum, 213–15	قوانين الحفظ للزخم الزاوي	of quarks, 918–20	لون الكوارك
594		Cosmic microwave background radiation, 945–47	خلفية أشعة كونية ميكرووية	apparent violation of in beta decay, 846	انتهاك ظاهري كما في انحلال بيتا	related to wavelength, 670,671	مرتبطة بطول الموجة
Dampers on building, 298	ممتصات الصدمة في المباني	Cosmic rays, 902	أشعة كونية	of baryon number, 911	انتهاك عدد الباريون	of sky, 690	بالسماه
Dark matter, 951–53	المادة السوداء	Cosmological constant, 953	ثابت كوني	of electric charge, 440–41, 523, 528–29	انتهاك حفظ الشحنة	Color charge, 918–19	شحنة اللون
Dart gun, 153		Cosmological principle, 944	المبدأ الكوني	in elementary particle interactions, 910–12	في التفاعلات الأولية	Color force, 918–20	قوة اللون
Dating, radioactive, 853–55	التأريخ الإشعاعي	Cosmological redshift, 943	الانزياح الكوني الأحمر	149–55, 389 ff, 409,529	في الطاقة	Coma, 710	عيبوية
Daughter nucleus (defn), 842	الأبنة، نواة دافيسون	Cosmology, 921, 926–55	علم الكون	of lepton numbers, 911, 912	في أعداد ليبتون	Comfort, room, 400–401	غرفة ملائمة
Davisson, C. J., 767	دايفيسون	Coulomb, Charles, 444	شارل كولومب	of linear momentum, 170–73 and ff	في الزخم الخطي	Communications, fiber optics in, 1	الاتصالات، بصريات الألياف
de Broglie, Louis, 766, 780–81, 787	لويش، دي بروي	Coulomb force (defn), 447	قوة كولومب	in nuclear processes, 846	في العمليات النووية	Commutators, 571, 592–93	المبدلات
de Broglie's hypothesis, 780–81	نظرية دي بروي	Coulomb (unit), 445	وحدة الكولومب	of nucleon number, 848, 911	في العمليات النووية	Compass, magnetic, 556, 564	بوصلة، مغناطيسية
de Broglie's wavelength, 766, 780–81, 890	طول موجة دي بروي	operational definition of, 566	تعريف عملي	of strangeness, 915	في عدد النيوكليونات الغريبة	Complementarity, principle of, 765–66	مبدأ التكاملية
Debye (unit), 479–80	ديباي (وحدة)	Coulomb's law, 444–47, 458, 774	قانون كولومب	Conservative force, 148–49	قوة محافظة	Complete circuit, 496, 497	دائرة كاملة
Decay:	انحلال	Counter emf, 593–94	قوة دافعة كهربائية	Conserved quantity, 149	كمية محفوظة	Complex atoms, 797–98	ذرات معقدة
alpha, 842–44, 848, 855	ألفا	Counter torque, 593–94	عزم عكسي	Constant angular acceleration, 201	تسارع زاوي ثابت	Components of vector, 49–53	مركبات متجه
beta, 842, 845–47	بيتا	Counterweight, 88	وزن مضاد	Constants, fundamental (see inside front cover)	ثوابت أساسية	Compound lenses, 711	عدسات مركبة
of elementary particles, 901 ff	الجسيمات الأولية	Covalent bond, 813, 815, 816, 824	رابطة تساهمية	Constant-volume gas thermometer, 356–57	حجم الغاز الثابت	Compound microscope, 708–9	مجهر مركب
gamma, 842, 847–48	جاما	Creativity, in science, 1–2	الإبداع في العلم	Constructive interference, 308–9, 335–37, 668	تداخل بناء	Compound nucleus, 878	نواة مركبة
rate of, 848–51	معدل	Credit card swipe, 599	بطاقة ائتمانية	Contact force, 81, 450	قوة ثابتة	Compounds (defn), 353 fn	مركبات
types of radioactive, 842, 848	أنواع الانحلال للمواد المشعة	Crick, F. H. C., 718	زاوية حرجة	Contact lenses, 702, 703–4	عدسات لاصقة	Compression (longitudinal wave), 303	انضغاط
Decay constant, 848	ثابت الانحلال	Critical angle, 645	تخامد حاد	Continental drift, 267	انزياح قاري	Compression waves (P waves), 304	موجات انضغاطية
Decay series, 852–53	سلسلة الانحلال	Critical damping, 298	الكثافة الحرجة في الكون	Continuity, equation of, 268–69	معادلة الاستمرارية	Compressive stress, 239–40	جهد انضغاطي
Deceleration (defn), 25	تباطؤ	Critical density of universe, 951 ff	الكتلة الحرجة	Continuous laser, 805	ليزر مستمر	Compton, A. H., 763	كومبتون
Decibel (dB) (unit), 325–27	ديسيل (وحدة)	Critical mass, 880	النقطة الحرجة	Continuous spectrum, 679, 756	طيف متصل	Compton effect, 763–64	أثر كومبتون
Declination, magnetic, 556	الميل (مغناطيسي)	Critical point, 372	تفاعل حرج	Contrast in microscope images, 716	تمايز في صور المجهر	Compton wavelength, 763	موجة كومبتون
Decommissioning nuclear plant, 870	فوتونات منفصلة	Critical reaction, 881	درجة حرارة حرجة مستقطبات متخامدة	Control rods, 880, 881	قضبان التحكم	Computerized axial tomography, 719	حاسبات
Decoupled photons, 935, 939	تعريف عملي	Crossed Polaroids, 686	شبكة بلورية	Convection, 397–99	حمل	Computers, 598	بيانات رقمية
Defibrillator, 485, 538 fn	علم تصوير البلورات	Crystal lattice, 824	بلورة مسائلة	of blood, 399	الدم	digital information and, 598	
Definition, operational, 10	بلورة مسائلة	Crystals, liquid, 256, 688–89		on hiking trail, 398		hard drive, 200	
Degradation of energy, 427		CT scan, 718–21		Conventional current (defn), 497		keyboards, 482	
Degrees of freedom, A-22	درجات الحرية	Cucurbita melopepo, 893		Conventions, sign, 638–39, 651	اصطلاح	monitors, 485–86	
Dehumidifier, 438 pr	مزيل الرطوبة	Curie, Marie, 841–42	ماري كوري	Converging lens, 647, 648, 653	عدسة مجمعة	Concave mirror, 635 ff, 639–40	مرآة مقعرة
Delayed neutrons, 869 fn	نيوترونات مثبطة	Curie, Pierre, 841–42	بيير كوري	Conversion factors, 10–11 (see also inside front cover)	معاملات التحويل	Concentration gradient, 377	تدرج التركيز
Democritus, 352	ديمقراط	Curie temperature, 574	درجة حرارة كوري			Concordance model, 948	
Demodulator, 627	مزيل التنصين	Curie (unit), 889	وحدة كوري			Concrete:	خرسانة
Dendrite, 511						prestressed and reinforced, 242	خرسانة سابقة الاجهاد

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,	توماس أديسون	Displacement, 20–21, 37,	إزاحة	Depth of field, 699	كميات اشتقاقية (مشتقة)
and Ohm's law, 498–500	وقانون أوم	594–95	الجرعة الفعالة	46–47, 50–53		Derived quantity, 10	وحدات اشتقاقية
peak, 506–7	قمة	Edison, Thomas, 485	القيم الفعالة	in vibrational motion, 288		Derived units, SI (see inside front cover)	تداخل هدام
produced by changing magnetic field, 584 ff	ينتج عن تغير المجال المغناطيسي	Effective dose, 878	فعالية المحرك الحراري	of wave, 314	في الحركة الاهتزازية للموجة	308–9, 310, 335–36, 668	كواشف
produces magnetic field, 557	ينتج مجالاً مغناطيسياً	Effective values, 507	كارنوت	Displacement current, 617	تيار الانزياح	of particles and radiation,	للجسيمات والإشعاع
rms, 507	جذر متوسط المربع	Efficiency, of heat engine, 160,	البرت اينشتين	Dissipative forces, 156–58	قوى مصنعة	856–58	ملوثات
Electric dipole, 455, 479–80, 818	ثنائطي كهربائي	418	تصادمات مرنة	Dissociation energy, 813	طاقة التفكك	Detergents, 277	التحديد
Electric energy, 470–87	طاقة كهربائية	Carnot, 420	حد المرونة	Distances, astronomical,	مسافات فلكية	Determinism, 792–93	دوتيريوم
production of, 430	انتاج	Einstein, Albert, 3, 353, 727–49,	معامل المرونة	924–25	تشويش عدسات	Deuterium, 864, 868, 872,	ديوترون
storage of, 484–85	تخزين	758, 871, 914, 926	وسرعة الصوت، موجات	Distortion (lenses), 710	عدسات مفرقة	873–74	نقطة الندى
Electric field, 450–54	مجال كهربائي	EKG, 487	طاقة وضع المرونة	Diverging lens, 647, 648, 650,	غوص	Dew point, 376	الديامغناطيسية
and conductors, 456–57	والموصلات	Elastic collisions, 175–77	المنطقة المرنة	653	مدى (مغناطيسي)	Diamagnetism, 574 fn	الأحجار الكريمة
Coulomb's law to determine, 458	قانون كولوم	Elastic limit, 237	زفيرك مرن	Diving, spins in, 214	قريب	Diamonds, 672	الضغط الديناميكي
in dielectric, 482–83	في العازلات	Elastic modulus, 238	بطارية كهربائية	DNA, 460–62, 679, 718, 818–21,	تركيب وتفتيح	Diastolic pressure, 279	ثابت العازلية
617–19	في موجات EM	and speed of sound, waves,	خلية كهربائية	DNA	مستوى الغطاء	Dielectric constant, 482	متانة العازل
energy stored in, 485	الطاقة المخزنة	304	شحنة كهربائية	876, 881	جرعة	Dielectric strength, 482	العوازل
and equipotential lines, 474–75	خطوط تساوي الجهد	Elastic potential energy, 147,	شحنة كهربائية	structure and replication of,	مقياس جريان الدم الدوبلري	molecular description of, 483	وصف جزيئي
Gauss's law to determine, 458	قانون غاوس	289	التسارع يؤدي إلى موجة كهرومغناطيسية	460–62	حقل غرس أشباه الموصلات	Diffraction, 313–14, 665–66,	حيود
lines of, 454–56	خطوط المجال المغناطيسي	Elastic region, 237	في الذرة	Domains, magnetic, 573–75	مقياس جريان الدم الدوبلري	673–75, 711–18	بواسطة فتحات دائرية
magnetic field produced by	الناتج عن تغير	Elastic spring, 147	حساب	Domes, 243–45	أثر	by circular apertures, 711–13	للإلكترونات
changing, 616 ff	شحنة نقطية	Elasticity, 237–41	حفظ	Donor level, 828	(ظاهرة) دوبلر	of electrons, 767	للضوء
of point charge, 451	شحنة نقطية	Electric battery, 494–97,	حفظ	Doorbells, 567	في الضوء	of light, 665–66, 673–75	كحد للتحويل
produced by changing magnetic field or flux, 591, 617 ff	ينتج عن تغير التدفق المغناطيسي	520–21	حفظ	Doping, of semiconductors, 827–28	مقياس جريان الدم الدوبلري	as limit to resolution, 711–13	كحد للتحويل
relation to electric potential, 474	العلاقة مع الجهد الكهربائي	Electric cell, 494–95	حفظ	Doppler blood-flow meter, 341	أثر	of matter, 767	لمادة
Electric field lines, 454–56	خطوط المجال الكهربائي	Electric charge, 439 ff	حفظ	Doppler effect, 338–42, 930	(ظاهرة) دوبلر	by single slit, 673–75	لفتحة مفردة
Electric flux, 457–58, 617	خطوط المجال الكهربائي	accelerating, gives rise to EM	حفظ	for light, 341–42	في الضوء	of water waves, 313–14	لموجات الماء
Electric force, 439 ff	التدفق الكهربائي	wave, 619	حفظ	Doppler, J. C., 338 fn	دوبلر (اسم)	X-ray, 717–18	للأشعة السينية
Electric force, 439 ff	القوة الكهربائية	in atom, 441	حفظ	Doppler techniques in medicine, 341	طرق دوبلر في الطب	Diffraction equation, 674	معادلة الحيود
Coulomb's law for, 444–47	قانون كولوم	calculating, 535	حفظ	Doppler weather forecasting,	التنبؤ الجوي لظاهرة دوبلر	Diffraction grating, 676–78	محززة الحيود
Electric field (cont.)	المجال الكهربائي	conservation of, 440–41, 523,	حفظ	341	جرعة	Diffraction limit, for resolution,	حد
relation to electric potential, 474	العلاقة مع الجهد الكهربائي	528–29, 848, 898	حفظ	Dose, 877–79, 880	مقياس الجرععات	715	الحيود، للتحويل
Electric field lines, 454–56	خطوط المجال الكهربائي	of electron, 445, 754–56	حفظ	Dosimetry, 877–79	تجربة الشق المزدوج	Diffraction pattern (defn),	نمط الحيود
Electric flux, 457–58, 617	خطوط المجال الكهربائي	elementary, 445	حفظ	Double-slit experiment, 787–89	لإلكترونات	of circular opening, 711–13	لفتحة دائرية
Electric force, 439 ff	القوة الكهربائية	induced, 442–43	حفظ	for electrons, 787–89	في الضوء	of electrons, 767	للإلكترونات
Coulomb's law for, 444–47	قانون كولوم	motion of in magnetic field,	حفظ	for light, 668–71	مقياس الجرععات	of single slit, 673–75	لشق مفرد
in molecular biology, 460–62, 479, 818–21	في علم الحياة الجزيئي	560–63	حفظ	Down quark, 904	تجربة الشق المزدوج	X-ray, 717–18	للأشعة السينية
Electric generator, 473, 520, 584,	مولد كهربائي	point, 446, 450–51, 476–79	حفظ	Drift speed, 509	في الضوء	Diffraction spot, 673, 712	بقعة الحيود
592–93	مولد كهربائي	quantization of, 445	حفظ	Driving, around curve, 112–13	مقياس الجرععات	Diffuse reflection, 633	انعكاس غير منتظم
Electric hazards, 538–41	أضرار كهربائية	”test,” 450	حفظ	Dry cell, 495	تجربة الشق المزدوج	Diffusion, 376–78	الانتشار
Electric motor, 571–72	محرك كهربائي	Electric circuit	حفظ	Dry ice, 373	لإلكترونات	Diffusion constant, 377	ثابت الانتشار
counter emf in, 593–94	قوة دافعة عكسية	ac, 506–8, 603–8	حفظ	Duality, wave-particle, 765–68,	في الضوء	Diffusion equation, 377	معادلة الانتشار
Electric potential, 470–87 (see also	Potential difference)	complete, 496, 497	حفظ	781	القيادة حول منحنى	Digital camera, 697	القمره الرقمية
reference)	فرق الجهد	containing capacitors, 533–35, 603–8	حفظ	Dulong and Petit value, A-22	خلية جافة	Digital circuits, 831	دارات رقمية
of dipole, 479–80	ثنائطي	containing resistors, 498 ff, 520–45	حفظ	DVD player, 805, 806	الجليد الجاف	Digital information, 598	مقياس رقمي
relation to electric field, 474	العلاقة مع المجال الكهربائي	dc, 493 ff, 520–45	حفظ	Dye lasers, 805	الإزدواجية، موجة - جسيم	Diodes, 828–30	الثنائطيات
of single point charge, 476–79	شحنة مفردة	digital, 831	حفظ	Dynamic lift, 272–73	جهاز	Diopter, 648	ديوبتر
Electric power, 502–5	قدرة كهربائية	grounding, 539–41	حفظ	Dynamics, 19, 72 ff	ليزر الأصبغة	Dipole:	ثنائطي
in ac circuits, 606	في دارات التيار المتردد	household, 505	حفظ	Dry cell, 495	الرفع الديناميكي	electric, 455, 479–80, 818	كهربائي
in household circuits, 506–7	في الدارات المنزلية	integrated, 830–31	حفظ	Dry ice, 373	الحبل الديناميكي	magnetic, 570	مغناطيسي
transmission, 595–97	نقل	and Kirchhoff's rules, 528 ff	حفظ	Dualty, wave-particle, 765–68,	الدورانية	Dipole bonds, 818–19	روابط قطبية
Electric power generation, 430–31	توليد القدرة الكهربائية	LC, 608, 627	حفظ	781	المحرك	Dipole moment, 479	عزم ثنائطي
Electric shocks, 538–41	الصددمات الكهربائية	LCR, 602–3	حفظ	Dulong and Petit value, A-22	(المولد الكهربائي)	Dipole-dipole bonds, 818	روابط قطبية - قطبية
Electrical shielding, 457	العزل الكهربائي	LRC, 606–7	حفظ	DVD player, 805, 806	داين (وحدة)	Dipole-induced dipole bonds,	روابط قطبية تأثيرية
Electricity, 439–545, 584 ff, 615 ff	الكهرباء	open, 496	حفظ	Dye lasers, 805	الداينو	818	
Gauss's law, 457–59	قانون غاوس	RC, 535–37	حفظ	Dynamic lift, 272–73	الأذن البشرية	Dirac, P.A. M., 795	ديراك
static, 440–41	سكوني	rectifier, 829	حفظ	Dynamic rope, 105 pr	تناسب ثابت	Direct current (dc) (defn), 506 (see also	تيار مباشر
		resonant, 608	حفظ	Dynamics, 19, 72 ff	أنبوب تفريغ	current)	تناسب ثابت
		time constants of, 536, 602	حفظ	Dynamic rope, 105 pr	تناسب ثابت	Direct proportion, A-1	تناسب ثابت
		Electric current, 493 and ff	حفظ	rotational, 206 ff	تناسب ثابت	Discharge tube, 754, 771	أنبوب تفريغ
		alternating (ac), 506–8,	حفظ	Dynamo (see Electric generator)	تناسب ثابت		
		603–8	حفظ	Dyne (unit), 76	تناسب ثابت		
		conduction (defn), 617	حفظ	Dynodes, 856–57	تناسب ثابت		
		conventional (defn), 497	حفظ	744–47	تناسب ثابت		
		direct (dc) (defn), 506	حفظ	Ear, human, 328–29	تناسب ثابت		
		dicement, 617	حفظ	sensitivity of, 327, 328	تناسب ثابت		
		hazards of, 538–41	حفظ				
		induced, 584	حفظ				

Excited state: of atom, 775 of nucleon, 914 of nucleus, 847	حالة مهيجة للذرة للنوية للنواة	vibrational, 289–91, 823 of waves, 305–6 zero-point, 823 Energy bands, 825–26 Energy “buckets,” 290 Energy conservation, law of, 910 Energy density, 485, 602, 623	اهتزازي للموجات نقطة الصفر حزم الطاقة قواديس من الطاقة 149–55, 848, حفظ الطاقة	production of, 934 transmutation of, 842, 875–78 Elevator and counterweight, 88	انتاج تحويل	Electrocardiogram (ECG, EKG), 487 مخطط القلب الكهربائي
Exclusion principle, 797–98, 813	مبدأ الاستبعاد			المصعد والقوة الموازنة اهلجي		Electrode, 494 Electrolyte, 494 Electromagnet, 567 Electromagnetic blood-flow measurement, 590 قياس جريان الدم بطريقة كهرومغناطيسية
Exoergic reaction, 876	تفاعل طارد للطاقة			EM waves (see Electromagnetic (EM) waves, Emf, 520–22, (defn), 520)	قوة دافعة كهربائية	Electromagnetic (EM) waves, موجات كهرومغناطيسية
Expansion, binomial, A-6–A-7 (see back cover)	تفاعل طارد للحرارة	in electric field, 485 in EM wave, 623 in magnetic field, 602	في المجال الكهربائي في موجة EM	back, 593–94 counter, 593–94 of generator, 592–95 induced, 584 ff induced in moving conductor, 590–91 motional, 590 in series and in parallel, 532–34	عكسية عداد موك تأثيري تأثيري في موصل متحرك	615–28, 664 ff, 726–27, 729, 730 Doppler effect for, 341 أثر (ظاهرة) دوبلر في نقل الزخم وضغط الإشعاع
Expansion joints, 354	وصلات التمدد			source of, 520–21 Emission spectrum, 771 Emission tomography, 893–94	طيف انبعاث	momentum transfer and radiation pressure, 625–26 Electromagnetic force, 907–22 القوة الكهرومغناطيسية
Expansion of universe, 942–46	تمدد الكون	Energy gap, 825 Energy levels: atomic, 775–76, 794 ff for fluorescence, 803 for lasers, 803–5 in molecules, 821–23 nuclear, 847 in solids, 825–26 Energy production and resources,	ذرية للنورة ذرية للنورة	in life processes, 427 in atoms, 775–76, 794–96 in molecules, 821–23 in nuclei, 847 Energy transfer, heat as, 385–86	مستويات الطاقة مصادر إنتاج الطاقة حالات الطاقة في الذرات في الجزيئات	Electromagnetic induction, 584 ff التأثير الكهرومغناطيسي
Expansion (rarefaction), 303, 324	تمدد (تخلخل)			Emitter (transistor), 830–31 Emissivity, 399–400 Emulsion detector, 857 Endoergic reaction (defn), 876	مصدر طيف انبعاث تصوير طيفي انبعاثي الانبعاثية	Electromagnetic oscillations, 608 اهتزاز كهرومغناطيسي
Expansion, thermal, 354, 357–60	تمدد حراري	Environmental pollution, 430	في الجزيئات في النواة	Endoscope, 646 Endothermic reaction, 876	حركي على التوالي والتوازي	Electromagnetic pumping, 576 pr الضخ الكهرومغناطيسي
Experimentation, 2	تجريب	Enriched uranium, 880	في النواة	Energy, 136, 141–60, 744–47	مصدر	Electromagnetic spectrum, 619–22 الطيف الكهرومغناطيسي
Exponential curves, 535, 602, 849	منحنيات أسية	Entropy, 408, 424–25 in life processes, 427 second law of thermodynamics and, 424–25 statistics and, 428–29	في النواة في النواة	activation, 371, 816 binding, 775, 813, 816–17, 838–41 bond, 813, 817 conservation, 149–55, 389, 409, 529 degradation, 427 disintegration, 843 distinguished from heat and temperature, 386 electric (see Electric energy) in EM waves, 623–24 equipartition of, A-21–A-22 and first law of thermodynamics, 408–10 geothermal, 431 internal, 386–87, 408–15 ionization, 775, 778 kinetic, 141–44, 210–13, 744–47 mass and, 744–47 mechanical, 149–55 molecular rotational and vibrational, 387, 822–23 nuclear, 431, 875–96 of photon, 762–63 potential, 144 ff, 470–71 quantization of, 756, 758, 795 reaction, 876 related to work, 141 ff relativistic, 744–47 rest, 744 rotational, 210–13, 822–23 in simple harmonic motion, 289–91 solar, 431 stored in electric field, 484–85 stored in magnetic field, 602 thermal, 156, 386 threshold, 877, 900 pr total mechanical energy (defn), 149 transformation of, 155–56, 744–47 unavailability of, 426–27 and uncertainty principle, 789–92 units of, 143	في النواة في النواة	Electromagnetism, 584–631 الكهرومغناطيسية
Exponential decay, 849	انحلال أسّي	Enzymes, 817	في النواة	Equation of continuity, 268–69	طيف انبعاث	Electrometer, 443 Electromotive force (see Emf) قوة دافعة كهربائية
Exponential notation, A-3	تدليل أسّي	Equally tempered chromatic scale, 329	في النواة	Equation of state, 361 for an ideal gas, 364	تصوير طيفي انبعاثي الانبعاثية	Electron, 754–56, 766–68 الإلكترون
Exponents and exponential notation, A-2–A-3 (see also inside back cover)	أسس	Equilibrium, 226–55, (defn), 227)	في النواة	Equilibrium position (vibrational motion), 287 (موضع الاتزان (حركة اهتزازية))	تفاعل ماص للطاقة كاشف داخلي	charge on, 445, 754–56 discovery of, 754–56 in double slit experiment, 787–89 of, 755 free, 442 lepton number of, 911 mass of, 756 in pair production, 764–65 as % particle, 845–47 wave nature, 766–68, 780–81, 789 ”what is an,” 768 Electron band theory, 825–26 الإلكترون ونظرية الحزمة
Farad (unit), 481	فاراد (وحدة)	Equilibrium state (defn), 361	في النواة	Equipartition of energy, A-21–A-22	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	Electron capture, 847 Electron cloud, 794, 796, 813 غيمة الإلكترون
Faraday, Michael, 450, 584	ميكائيل فارادي	Equipotential lines, 474–75	في النواة	Equipotential surfaces, 474–75	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	Electron configuration, 798–99 شكل الإلكترون
Falling bodies, 31–35	تدرج الحرارة الفهرنهايتي	Equivalence principle, 938, 939	في النواة	Equivalence principle, 938, 939	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	Electron degeneracy, 934 تكاثرية الإلكترون
Fallout, radioactive, 871	الأجسام الساقطة	Erg (unit), 137, 143	في النواة	Escherichia coli, 769	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	Electron microscopes, 754, 768–69 المجهر الإلكتروني
Far point of eye, 702	النقطة البعيدة للعين	Estimated uncertainty, 5 fn, 6	في النواة	Estimating, 12–14	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	Electron spin, 574, 795 Electron volt (unit), 476, 746, 838 الكثرون فولت (وحدة)
Farad (unit), 481	فاراد (وحدة)	Esu (unit), 445 fn	في النواة	Esu (unit), 445 fn	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	Electronic devices, 485–86, الأدوات الإلكترونية
Faraday, Michael, 450, 584	ميكائيل فارادي	Ether, 730	في النواة	Ether, 730	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	541–45, 626–28, 827–31 Electroscope, 442–43 الكشاف الكهربائي
Farsighted eye, 702	عيني بعيدة النظر	Euclidean space, 940	في النواة	Euclidean space, 940	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	Electrostatic unit (esu), 445 fn وحدة كهروستاتيكية
Fermi, Enrico, 14, 766, 787, 797 fn, 846, 866, 868, 902	أنريكو فيرمي	Evaporation, 373–74, 395	في النواة	Evaporation, 373–74, 395	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	Electrostatics, 439–87 in photocopy machines and computer printers, 462–63 Electroweak theory, 128, 918–20 نظرية الضعف الكهربائي
Fermilab, 893	مختبر فيرمي	Event, (defn), 731	في النواة	Event, (defn), 731	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	Elementary charge (defn), 445 الشحنة الأولية
Fermions, 797 fn, 906	الفيرميونات	Event horizon, 941	في النواة	Event horizon, 941	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	Elementary particle physics, 901–22 فيزياء الجسيمات الأولية
Ferris wheel, 111	عجلة الجانح	Everest, Mt., 121	في النواة	Everest, Mt., 121	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	Elementary particles, 901–22 الجسيمات الأولية
Ferromagnetism, 555, 573–75	فيرومغناطيسية	Evolution: biological, 427 stellar, 930–36 Exchange particles (carriers of force), 908	في النواة	Evolution: biological, 427 stellar, 930–36 Exchange particles (carriers of force), 908	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	Elements (defn), 353 fn العناصر
Feynman diagram, 896	اشعاع فاينمان	Estimated uncertainty, 5 fn, 6	في النواة	Estimated uncertainty, 5 fn, 6	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	of lens, 711 periodic table of, 798–800 الجدول الدوري للعناصر
Feynman, Richard, 896	ريتشارد فاينمان	Equilibrium position (vibrational motion), 287 (موضع الاتزان (حركة اهتزازية))	في النواة	Equilibrium position (vibrational motion), 287 (موضع الاتزان (حركة اهتزازية))	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	(see also inside back cover)
Fiber optics, 645–46	ضوء الألياف	Equipartition of energy, A-21–A-22	في النواة	Equipartition of energy, A-21–A-22	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
Fick’s law of diffusion, 377	قانون فيك في الانتشار	Equipotential lines, 474–75	في النواة	Equipotential lines, 474–75	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
Fictitious (inertial) force, A-17	قوة قصورية	Equipotential surfaces, 474–75	في النواة	Equipotential surfaces, 474–75	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
Field, 450, 895 (see also Electric field; Gravitational field; Magnetic field)	مجال	Equivalence principle, 938, 939	في النواة	Equivalence principle, 938, 939	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
Figure skating, spins in, 214	شكل التزلج	Erg (unit), 137, 143	في النواة	Erg (unit), 137, 143	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
Film badge, 878	شارة (شعاع) فيلم	Estimated uncertainty, 5 fn, 6	في النواة	Estimated uncertainty, 5 fn, 6	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
Film speed, 698 fn	سرعة الفيلم	Esu (unit), 445 fn	في النواة	Esu (unit), 445 fn	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
Filter (electrical), 605	مرشح (كهربائي)	Ether, 730	في النواة	Ether, 730	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
Filter (optical), 786, 795	تركيب دقيق	Euclidean space, 940	في النواة	Euclidean space, 940	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
First harmonic, 311	التوافقي الأول	Evaporation, 373–74, 395	في النواة	Evaporation, 373–74, 395	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
First law of thermodynamics, 408–15	القانون الأول في الديناميكا الحرارية	Event, (defn), 731	في النواة	Event, (defn), 731	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
human metabolism and, 414–15	العمليات الغذائية في الإنسان	Event horizon, 941	في النواة	Event horizon, 941	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
in isobaric and isovolumetric processes, 413	عمليات تساوي الضغط وتساوي الحجم	Everest, Mt., 121	في النواة	Everest, Mt., 121	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
First overtone, 332	الجراب الأول	Evolution: biological, 427 stellar, 930–36 Exchange particles (carriers of force), 908	في النواة	Evolution: biological, 427 stellar, 930–36 Exchange particles (carriers of force), 908	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
Fission, 866–71	انشطار	Estimated uncertainty, 5 fn, 6	في النواة	Estimated uncertainty, 5 fn, 6	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
Fission bomb, 871	القنبلة الانشطارية	Equilibrium position (vibrational motion), 287 (موضع الاتزان (حركة اهتزازية))	في النواة	Equilibrium position (vibrational motion), 287 (موضع الاتزان (حركة اهتزازية))	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
Fission fragments, 866	أجزاء انشطارية	Equipartition of energy, A-21–A-22	في النواة	Equipartition of energy, A-21–A-22	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
Flashlight bulb, 495	مصباح وميض	Equipotential lines, 474–75	في النواة	Equipotential lines, 474–75	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
Flavor (of elementary particles), 906	منكه (الجسيمات الأولية)	Equipotential surfaces, 474–75	في النواة	Equipotential surfaces, 474–75	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
Flexor muscles, 234	عضلات قابضة	Equivalence principle, 938, 939	في النواة	Equivalence principle, 938, 939	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	
Floating objects, and density, 263, 266	الأجسام الطافية والكثافة	Erg (unit), 137, 143	في النواة	Erg (unit), 137, 143	تفاعل ماص للحرارة كاشف داخلي	

Glucos, 890, 897, 906–7	Galilean transformation, A-23–A-26	van der Waals, 817–21	فان دير والز	Florence cathedral, 245	كاتدرائية فلورنسا
Gophers, air supply, 274	Galilean velocity transformations, A-2, A-24–A-25	weak, 128, 841 ff, 846, 897 ff	ضعيف	Flow of fluids, 268–74	جريان الموائع
GPS, 17 pr, 134 pr, 739	Galilean-Newtonian relativity, 727–30, A-23–A-24	work done by, 137 ff	الشغل الناتج عن	laminar (defn), 268	انسيابي
Gradient:	Galileo, 2, 19, 31–32, 54–55, 73–74, 297, 354, 622, 633, 706 fn, 708, 727, 728, 742, 915	Force diagram, 84 ff, 228	مخطط القوة	streamline (defn), 268	خط الجدول
concentration, 377	تدرج التركيز	Force pump, 278	مضخة	in tubes, 275–76	في أنابيب
temperature, 396	درجة الحرارة	Forced convection, 397	الحمل القسري	turbulent, 268	اضطرابي
velocity, 27	السرعة	Forced vibrations, 299	الاهتزاز القسري	Flow rate, 268–69, 275	معدل الجريان
Glashow, S., 919	جلاشو	Formulas, mathematical (see in cover)	صيغ رياضية	Fluids, 255–85 (see also Gases)	موانع
Glasses, eye, 701–4	نظارات، نظر	Forward biased diode, 828	ثنائي القطب منحاز للأمام	longitudinal wave speed in, 304	سرعة الموجة الطولية
Global positioning system (GPS), 739	نظام تحديد المواقع العالمي	Fossil-fuel power plants, 430, 431, 592	محطات وقود أحفورية	Fluorescence, 802–3	فلورة
Global warming, 430	الاحتباس الحراري	Foucault, Jean, 666–67	فوكولت، جين	Fluorescent light bulbs, 803	مصابيح فلورية
Glueballs, 918 fn	كرات لصق	Four-dimensional space-time, 742, 928	فضاء رباعي الأبعاد - الزمن	Flux:	تدفق
Gluino, 922	جليون	Four-stroke-cycle engine, 417	محرك الأشواط الأربعة	electric, 617	كهربائي
Glucos, 902, 909, 918–19	جليونات	Fourier analysis, 334	تحليل فوريير	magnetic, 586, 591	مغناطيسي
Gophers, air supply, 274	فهود، سناجب الأرض، مخزون الهواء	Fovea, 701	نقرة	Flying buttress, 244	دعامة (كثف)
Gradient:	تدرج	Fractions (see inside back cover)	أجزاء	FM radio, 627	طائرة
concentration, 377	تركيز	Fracture, 237, 241–43	تقصف	Focal length, 636, 641, 648, 650–51, 656	البعد البؤري
temperature, 396	درجة الحرارة	Frame of reference (see Reference frames)	إطار مرجعي	Focal plane, 648	المستوى البؤري
velocity, 274	سرعة غاليلية تحويلات	Franklin, Benjamin, 440	بنجامين فرانكلين	Focal point, 636, 641, 647	النقطة البؤرية
Gram (unit), 9, 76	غرام (وحدة)	Franklin, Rosalind, 718	روزاليند فرانكلين	Focus, 636	البؤرة
Grand unified era, 949	الحقبه الموحدة المعظمى	Free fall, 124	سقوط حر	Focusing, of camera, 698–99	تثبيت الكاميرا
Grand unified theory, 128, 920–21	النظرية الموحدة المعظمى	Free space, permittivity of, 445	سماحية الفراغ	Football, 58, 61, 66 pr, 67 pr	كرة قدم
Graphical analysis:	تحليل خططي للحركة الخطية	Free-body diagram, 84 ff, 228	مخطط الجسم الحر	Foot-pound (unit), 137, 143	وحدة Esu
of linear motion, 36–37	للعمل	Freedom, degrees of, A-22	درجات الحرية	Forbidden energy gap, 825	فجوة الطاقة الممنوعة
for work, 141	للعمل	Freezing point (defn), 355 fn, 373	نقطة التجمد	Forbidden transition, 797, 803 fn	انتقال ممنوع (محظور)
Grating, diffraction, 676–78	محززة، حبيد	table of, 392	جدول	Force, 72–105, (defn, 73, 76), 128	(see also Electric force; Gravitational force)
Gravitation, universal law of, 117–20, 445, 938	قانون الجذب الكوني	Frequency, 108, 200, 288, 292–93 of	تردد	buoyant, 263–67	قوة (قوة جاذبية)
Gravitational collapse, 941	انهيار جذبي	audible sound, 323	للصوت المسموع	centrifugal, 110	قوة طرد مركزي
Gravitational constant, 119	ثابت الجذب	beat, 337	ضربات	centripetal, 109	مركزية
Gravitational field, 456, 938–41	مجال الجاذبية	carrier, 626	حامل	color, 906–8	لون
Gravitational force, 80–83, 117–28, 909, 938–41	قوة الجذب	of circular motion, 108	حركة دائرية	conservative, 148 ff	محافظة
Gravitational mass, 938–39	كتلة الجذب	cyclotron, 892	سيكلوترون	contact, 81, 128, 450	تماس
Gravitational potential energy, 144–45	طاقة الجاذبية الكامنة	fundamental, 310, 311, 330–34	أساسي	Coriolis, A-18–A-19	كوروليوس
Gravitational slingshot effect, 193 pr	أثر المغلاع الجاذبي	infrasonic, 324	تحت صوتي	Coulomb (defn), 447 (see also Electric force)	كولومب
Graviton, 909, 922	جرافيتون	of light, 620	للضوء	dissipative, 156–58	مضببة
Gravity, 32–34, 80–83, 117–28, 938–41	جاذبية	natural, 299, 310	طبيعي	elastic, 147, 237–41	مرنة
acceleration of, 32–34, 118, 121	تسارع	resonant, 299, 310, 329, 608	رنيني	electric, 439 ff	كهربائية
center of, 183–84, 229	مركز	of rotation, 200	للدوران	electromagnetic, 128, 895 ff	كهرومغناطيسية
and curvature of space, 938–41	وتقعر الفضاء	ultrasonic, 343	فوق صوتي	in equilibrium, 226–55	في التزان
effect on light, 939, 941	أثر الضوء	of vibration, 286	للاهتزاز	exerted by inanimate objects, 79	ناتجة عن أجسام جامدة
on Moon, 109	نوعى	of wave, 302, 305, 306–7	كموجة	fictitious, A-17–A-18	افتراضي
specific, 256	نوعى	Frequency modulation (FM), 627	تضميني التردد	friction, 90–95, 112–14	احتكاك
Gravity anomalies, 122	الانحراف الجاذبي	Fresnel, Augustin, 673	أوغستين، فرنل	of gravity, 80–83, 117–28, 897, 926–29	جاذبية
Gravity waves, 954	أمواج جاذبية	Friction, 73–74, 90–95, 112–14	احتكاك	inertial, A-17	قصوري
Gray (unit), 889	رماندي	coefficients of, 90, 91	معامل	long-range, 841	بعيد المدى
Greek alphabet (see inside front cover)	الأحرف الأبجدية اليونانية (انظر داخل الغلاف الأمامي)	kinetic, 90 ff	حركي	in magnetic fields on charges and currents, 558–63	في المجالات المغناطيسية على الشحنات والتيارات
Grid (electrode), 486	شبكة (قطب) Grimaldi, Francesco, 666, 670	in rolling, 90, 211–12	في التدرج	measurement of, 73	قياس
Ground fault, 599	المعيب الأرضي	static, 90, 91–92, 211–12	في التدرج	in muscles and joints, 234–35	في العضلات والمفاصل
Ground fault circuit interrupter (GFCI), 599	قاطع الدارة الكهربائية المعيبة	Frings, interference (defn), 668	في التدرج	net (defn), 76, 84	صافي
Ground state of atom (defn), 775	الحالة الأرضية للذرة	Frisch, Otto, 866	أوتو، فرش	in Newton's laws, 75 ff	في قانون نيوتن
Grounds and grounding, electrical, 497, 539–41	التأريض والتأريض الكهربائي	Full-wave rectifier, 829	مقوم موجة كاملة	nonconservative, 148	غير محفوظ
Groves, Leslie, 883	جروفز، ليزكي	Fundamental constants (see inside front cover)	مقوم موجة كاملة	normal, 81 ff	عادي
Guanine, 460–61, 818	جوانين	Fusion bomb, 874	منصهر	nuclear, 838–41, 855, 895 ff	نووي
Gun recoil, 172	ارتداد المدفع	Fusion, heat of, 392	قنبلة اندماجية	per unit mass, 456	لكل وحدة كتلة
GUT, 920–22	ارتداد المدفع	Fusion, nuclear, 871–75	حرارة الاندماج	pseudoforce, A-17	قوة كاذبة
h-bar (ħ), 791	h- بار (ħ)	in stars, 872, 873, 921, 938	اندماج نووي	relation of momentum to, 168–69	علاقة الزخم مع التنازع
		Galaxies, 915–18, 940	اندماج نووي	relationship to acceleration, 75–77	مع التنازع
		clusters, 917–18	اندماج نووي	restoring, 287	حفظ الطاقة
		mass of, 916	اندماج نووي	short-range, 841	قصير المدى
		Galilean telescope, 708	اندماج نووي	strong nuclear, 128, 840 ff, 895 ff, 897	نوية قوية
			اندماج نووي	types of in nature, 128, 897	الأنواع في الطبيعة
			اندماج نووي	units of, 76	وحدات

Inertial reference frame, 74, 727, A-16–A-17	إطار مرجعي قصوري	Ice, 360–61, 373, 393, 422	ثلج	Helium nuclei, 950	نواة هيليوم	Hadron, 914, 916–17, 949	هادرون
Instantaneous angular acceleration, 197	تسارع زاوي لحظي	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	سرعة زاوية لحظية	Ideal gas, 368	الغاز المثالي	Henry, Joseph, 584, 600	هنري جوزيف	Hahn, Otto, 878	هان أوتو
Instruments electrical, 541–45	ألات كهربائية	internal energy of, 368, 386–87	الطاقة الداخلية لـ قانون الغاز المثالي	Henry (unit), 600	هنري (وحدة)	Hair dryer, 508	مجفف الشعر
musical, 329–35	موسيقية	Ideal gas law, 363–67	also inside متوافقات، علم المتثلثات (أنظر أيضا داخل الغلاف الخلفي بعد الصورة)	Hertz, Heinrich, 619–20	هيرتز، هاينريش	Half-life, 848 ff	نصف العمر
Insulation, thermal, 396–97	عازل حراري	Identities, trigonometric, A-7 (see back cover)	تشكل الصورة تصوير مسح طبقي ليف ضوئي	Hertz (unit), 200, 288	هيرتز (وحدة)	Half-wave rectification, 829	مقوم نصف موجة
Insulators: electrical, 441–42, 825	كهربائية حرارية	Image distance, 634, 638	تشكلت بواسطة عدسة	Russell diagram, 932 ff	مخطط هايرتزر برنج - روسيل	Halley's comet, 133 pr	شهاب هالي
thermal, 396	حرارية	Image formation, 637	تشكلت بواسطة مرآة مسطحة	Higgs boson, 920	هيجز بوزون	Halogens, 799	هالوجين
Integrated circuits, 830–31	دارات تكاملية	Images, 634	تشكلت بواسطة مرآة دائرية	Higgs field, 920	مجال هيجز	Hammer:	مدقة
Intensity: of EM waves, 624	شدة: الأمواج الكهرومغناطيسية	CAT scan, 719	تشكلت بواسطة مرآة دائرية	High jump, 185	قفز عالي	action-reaction pair in striking, 78	الفعل ورد الفعل في التصادم
of general waves, 305, 306–7	للأمواج العامل للضوء للصوت	fiber optic, 645–46	تشكلت بواسطة عدسة	High-energy physics, 901–22	فيزياء الطاقة العالية	work done by, 143	شغل مبذول بواسطة
of light, 671	مستوى الشدة	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
Intensity level, 325, 328–29	التداخل	formed by plane mirror, 633–35	تشكلت بواسطة مرآة مسطحة	Highway buckling, 361	ربط حزام الأمان على الطرق السريعة	Harmonic motion: damped, 298	حركة توافقية خامدة
Interference, 308–9, 335–36, 668 ff	بناء هدامة	formed by spherical mirror, 635–42	تشكلت بواسطة مرآة دائرية	Highway mirages, 667	السراب	forced, 299	مرغمة
constructive, 308–9, 335–36, 668	للأمواج الضوئية	NMR, 894–96	تشكلت بواسطة مرآة دائرية	Hiking trail, convection, 398–99	مسار الرحلات السيارة، الحمل	simple, 287–97	بسيطة
destructive, 308–9, 310, 335–36, 668	للأمواج الصوتية	PET and SPET, 893–94	دقة الصورة	Holes (in semiconductor), 826, 827	ثقب	Harmonics, 310, 311, 330 fn, 332–33	التوافقات
of electrons, 788–89	للأمواج الصوتية	picture sharpness, 700	حقيقي	Hologram and holography, 806–7	تقريب (في شبه الموصل) الصورة التجسيمية والتصوير التجسمي	Hazards of electricity, 538–41	الأخطار الكهربائية
of sound waves, 335–37	مستوى الشدة	real (defn), 634, 637, 649	طبيقي	Hologram and holography, 806–7	تقريب (في شبه الموصل) الصورة التجسيمية والتصوير التجسمي	Head, magnetic, 598	رأس مغناطيس
thin film, 679–83	التداخل	tomographic, 719	(تعريف) تخليبي أشعة إكس تصوير طبي	Hooke, Robert, 237, 680 fn	هوك، روبرت	Hearing	السمع
in time, 336–37	للأمواج الصوتية	virtual (defn), 634, 640, 650	تشكلت بواسطة عدسة	Hooke's law, 147, 237, 287 ff	قانون هوك	in humans, 325, 328–29	عند البشر
of water waves, 309	للأمواج الصوتية	X-ray, 718–19	تشكلت بواسطة عدسة	Horsepower (unit), 158	قانون هوك	threshold of, 329	العتبة
of waves on a string, 308	للأمواج الصوتية	Imaging: medical, 718–20, 892–93	تشكلت بواسطة عدسة	Hot wires, 540	قانون هوك	Heart, defibrillator for, 538 fn	قلب، موقف الضربات
Interference fringes, 668 ff	للأمواج الصوتية	thermography, 402	تشكلت بواسطة عدسة	H-R diagram, 932 ff	قانون هوك	Heart, human, 278–79	قلب، بشري
Interference microscope, 716	للأمواج الصوتية	ultrasound, 343–45	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble age, 945	قانون هوك	and blood flow, 269, 275–76	وانسياب الدم
Interferometer, 684	للأمواج الصوتية	Impedance, 606–7	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	القوة الحسائية (وحدة)	ECG, 487	منظم ضربات القلب
Internal combustion engine, 416–17	للأمواج الصوتية	Impulse, 173–75	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	أسلاك كهربية	as pump, 278–79	مضخة
Internal conversion, 847–48	للأمواج الصوتية	Incidence, angle of, 308, 312, 633, 643	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	مخطط H-R	Heartbeats, number of, 13	ضربات القلب، عند
Internal energy, 386–87, 408–15	للأمواج الصوتية	Incident wave, 308	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	Heat, 384–407, (defn, 385)	حرارة
Internal reflection, 645–46	للأمواج الصوتية	Inclines, motion on, 94–95, 211–12	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	compared to work, 408	مقارنة بالشغل
Internal resistance, 521	للأمواج الصوتية	Incoherent sources of light, Indeterminacy principle (see Uncertainty principle)	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	conduction, convection, radiation, 395–402	إيصال، حمل، إشعاع
Interneuron, 511	للأمواج الصوتية	Index of refraction, 642, 672	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	distinguished from internal energy and temperature, 386	مميزة عن الطاقة الداخلة ودرجة الحرارة
Intervertebral disc, 235	للأمواج الصوتية	Induced charge, 584–85	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	in first law of thermodynamics, 408 ff	في القانون الأول في الديناميكا
Intrinsic semiconductor, 826, 827	للأمواج الصوتية	Induced electric charge, 442–43	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	as flow of energy, 385–86	انسياب الطاقة
Inverse proportion, A-1	للأمواج الصوتية	Induced emf, 584 ff	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	and human metabolism, 414–15	والأيض البشري
Inverted population, 803	للأمواج الصوتية	in generator, 592–95	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	latent, 391–95	كامن
Ion (defn), 441	للأمواج الصوتية	in transformer, 595–97	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	loss through windows, 396	فقد خلال النوافذ
in axons, 511	للأمواج الصوتية	Inductance, 600–601	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	lost by body, 399, 400	الفقد من الجسم
Ionic bonds, 814, 815, 817, 824	للأمواج الصوتية	in ac circuits, 603–4	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	mechanical equivalent of, 385	المكافئ الميكانيكي نوعي
Ionization energy, 775, 778	للأمواج الصوتية	mutual, 600	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	specific, 387–88	نوع
Ionizing radiation (defn), 876	للأمواج الصوتية	self, 600–601	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	Heat capacity, 405 pr (see also Specific heat)	السعة الحرارية أنظر أيضا (بوسعة الحرارة)
IR radiation, 399, 620, 671	للأمواج الصوتية	solenoid, 601	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	Heat death, 426–27	الموت الحراري
Iris, 701	للأمواج الصوتية	Induction: electromagnetic, 584 ff	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	Heat engines, 416–21, 430	الآلة الحرارية (كفاءة)
Irreversible process (defn), 419	للأمواج الصوتية	Faraday's law of, 586 ff	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	efficiency of, 418	كفاءة
Isobaric process, 411	للأمواج الصوتية	pulse, 595	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	temperature difference and, 417	فرق درجة الحرارة
Isochoric (isovolumetric) process, 411	للأمواج الصوتية	Induction stove, 588	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	and thermal pollution, 430	التلوث الحراري
Isomer, 847–48	للأمواج الصوتية	Inductive reactance, 604	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	Heat of fusion, 392	حرارة الانصهار
Isotherm, 410	للأمواج الصوتية	Inductor, 600 ff	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	Heat of vaporization, 392	حرارة التبخر
Isothermal process, 410, 412	للأمواج الصوتية	Inelastic collisions, 175–76, 178–79	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	Heat pump, 423	مضخة حرارية
	للأمواج الصوتية	Inertia, 74	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	Heat reservoir (defn), 410	خزان حراري
	للأمواج الصوتية	law of, 74	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	Heat transfer, 395–402	انتقال الحرارة
	للأمواج الصوتية	moment of, 206 and ff, (defn, 207)	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	Heating, convection, house, 398	تسخين، حمل، بيت
	للأمواج الصوتية	rotational, 206–8	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	Heating duct, 269	مجري حراري
	للأمواج الصوتية	Inertial confinement, 887	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	Heavy elements, 934	العناصر الثقيلة
	للأمواج الصوتية	Inertial forces, A-17	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	Heavy water, 880	الماء الثقيل
	للأمواج الصوتية	Inertial mass, 938–39	تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	Heisenberg uncertainty principle, 789–92	مبدأ هايزنبرج عدم اليقين
	للأمواج الصوتية		تشكلت بواسطة عدسة	Hubble, Edwin, 929, 942	عمر هبل	Heisenberg, Werner, 787, 790	هايزنبرج، ورنر

Lubricants, 73	دارة مواسع محلات 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		Laue, Max von, 717	ماكس فون، لوي لورنس	mean life of, 850	متوسط العمر
Los Alamos laboratory, 883	مختبر لوس ألاموس	intensity of, 671		Lawrence, E.O., 891		in medicine, 880–81	في الطب
Loudness, 323, 325, 328–29 (see also Intensity)	مستوى لـ	interference of, 668–71		Laws, 4–5 (see also specific name of law)	قوانين (أنظر أيضًا اسم القانون تحديدًا)	Iterative technique, 720	تقنية مكررة
level of, 328		monochromatic (defn), 668		L.C. circuit, 608, 627	دارة مواسع - محلات اهتزازات مواسع محلات	Jeweler's loupe, 705	عدسة المجهراتي
Loudspeaker, 295, 326, 335, 336, 501, 508, 572	مكبر صوت	photon theory of, 758–61	أحادي طول الموجة	L.C. oscillations, 608	دارة مواسع - محلات اهتزازات مواسع	Joints: expansion, 354	مفاصل التمدد
LR circuit, 602–3	دائرة محلات مقاومة	polarized, 684–87	نظرية الفوتون لـ مستقطب	LCD screen, 688–89	شاشة بلورية سائلة	human, forces in, 234–35	البشري، القوة داخل
LRC circuit, 606–7	دائرة محلات مقاومة مواسع	ray model of, 632 ff	نموذج الأشعة لـ انعكاس	Leakage current, 541	تيارات	Joule, James Prescott, 385	بريسكوت جيمس، جول
Lubricants, 73	مشحومات، مرنيات	reflection of, 632, 633 ff	الانحراف لـ تشتت لـ	Leg. break, 174	رجل، كسر	Joule (unit), 137, 143, 204 fn, 385	جول (وحدة)
Luminosity, of stars and galaxies, 930 ff	سطوح، والنجوم والمجرات	refraction of, 642 ff	الطيف المرئي	Length proper, 740	طول مناسب	Jumping, impulse on landing after, 174–75	التقفز، النبض عند الانزال بعد
Lyman series, 772, 776–77	سلسلة لايمان	scattering of, 690	سرعة	standard of, 8	نموذجي، مثالي	Junction diode, 828–29	
Mach, Ernst, 342 fn	ماخ، ارنست	spectrum of visible, 671–73	فوق بنفسي	Length contraction, 740–41	امتداد التقلص	Junction rule (see Kirchhoff's rules)	
Mach number, 342	عدد ماخ	speed of, 8, 619, 622–23, 729–31, 743	غير مستقطب	Lens: achromatic, 711	عدسة: لا لوني	Junction transistor, 830	تقني ترانزستوري
Macroscopic (defn), 353	حالة جاهرية	ultraviolet, 620, 671	مرئي	camera, 697	آلة تصوير	Jupiter, 133	المشتري
Macrostate, 428		unpolarized (defn), 684		coating of, 682	طلاء	K lines, 800	خطوط K
Magellanic clouds, 929 fn	غيوم ماجيلانية	visible, 620, 671–73	للنظرية الموجية لـ	color-corrected, 711	معدلة لونيًا	K 2, cover, 10, 11	غلاف K2
Magnet, 554–57, 573–75	مغناطيس	wave theory of, 664–95	الطول الموجي لـ ازدواجية الموجة - الجسيم	compound, 711	مركب متصل	Kant, Immanuel, 917	كوان
domains of, 573–75	حقول كهربائي	wavelengths of, 620, 670	مصباح صوتي	contact, 702, 703–4	مجموعة، لامة تصحيحي	Kaon, 901	اصطياد K
electro-, 567	دائم	wave-particle duality of, 765–68	متلالي	converging, 647, 648, 653	أسطواني	K-capture, 847	تدرج درجة الحرارة بالكلفن
permanent, 574	ولادة مغناطيسية	white, 670	متوهج	corrective, 701–4	مشتملة	Kelvin temperature scale, 355, 362–63	كلفن (وحدة)
Magnetic confinement, 887	خمود مغناطيسي	Light bulb: fluorescent, 803	أنبوب ضوئي	diverging, 647, 648, 650, 653	للعين	Kelvin (unit), 362	صيغة كيلر بلانك
Magnetic damping, 610 pr	ميلان مغناطيسي	incandescent, 495	صمام ثنائي مصدر للضوء	of eye, 701	نظارة طبية	Kelvin-Planck statement of second law of thermodynamics, 421	القانون الثاني الديناميكا الحرارية
Magnetic declination, 556	تثاقطي مغناطيسي	Light pipe, 646	برق	eyeglass, 701–4	عدسة عينية	Kepler, Johannes, 125	برهان كيلر
Magnetic dipole, 570	تثاقطي مغناطيسي	Light-emitting diode, 830	المسافة لـ	eyepiece, 706–7	البعد البؤري لـ مغناطيس	Keplerian telescopes, 706	تيليسكوبات كيلرية
Magnetic domains, 573–75	حقول مغناطيسية	Lightning, 470, 504	سنة ضوئية (وحدة) ليناك	focal length of, 648, 650, 651–52, 656	تكبير طبيعي	Kepler's laws, 125–28	قوانين كيلر
Magnetic field, 554–75	حقول مغناطيسية	distance to, 323	خطي	objective, 706	إيجابي وسلبي	Kicked football, 58, 61, 66 pr, 67 pr	كرة مقذوفة
of circular loop, 557	لدائرة دائرية	Linac, 894	مسطوح خطي	power of (diopeters), 648	الفترة لـ (وحدة قياس قوة العدسة)	Kilocalorie (unit), 385	كيلو سعر (وحدة)
definition of, 558	تحديد لـ	Line spectrum, 678–79, 771	مسار خطي	resolution of, 711–13	تحليل	Kilogram (unit), 9, 75	(كيلو جرام وحدة)
of, 568–69	من الأرض	Linear accelerator, 894	التمدد الخطي، معامل	telephoto, 701	عدسة مقربة	Kilowatt-hour (unit), 164, 504	كيلو وات ساعة (وحدة)
of Earth, 556	التيار الكهربائي ينتج في الموجة الكهرومغناطيسية	Linear expansion, coefficient of, 357–58	عزم خطي (أنظر العزم)	thin (defn), 647 ff	رقيقة	Kinematic equations, 27, 56, 201	معادلات الحركة
electric current produces, 557	طاقة مخزنة في	Linear momentum (see Momentum)	سرعة خطية	used in combination, 654–55, 710 ff	مستخدم بالجمع	Kinematics: for rotational motion, 201–3	علم الحركة
in EM wave, 617–19	القوة على الشحنة الكهربائية والتيار الكهربائي، وهي داخل تحت قوة محرك كهربائية عند تغيير خطوط لـ	Linear velocity, 197, 199	سائل	wide-angle, 701	زاوية عريضة	translational motion, 19–71	الحركة الدورانية
energy stored in, 602	تحديد لـ	Linearly polarized light, 684	شاشة البلورة السائلة	zoom, 701	تكبير	for uniform circular motion, 106–9	الحركة الانتقالية حركة الدورانية المنتظمة
force on electric charge and electric current, when in, 558–63	تحت قوة محرك كهربائية عند تغيير خطوط لـ	Lines of force, 454–56	البوارات السائلة	Lens aberrations, 710–11	انحرافات العدسية	Kinetic energy, 141–44, 210–13, 744–47	النظرية الحركية في التصادمات
induces emf when changing, 584 ff	تنتج مجال كهربائي، تيار كهرباء، قوة محرك كهربائية	Liquefaction, 371	نموذج النظرة السائلة	Lens elements, 711	عناصر العدسة	in collisions, 175–79	تعريف
lines of, 555	خطوط لـ	Liquid, 255, 353	مسائل داخل الزجاج	Lens equation, 650–53	معادلة العدسة،	definition, 142	جزيني
motion of charged particles in, 560–63	حركة الجسيمات المشحونة في	Liquid crystal display (LCD), 688–89	مسائل داخل الزجاج	in Newtonian form, 663 pr	على الشكل النيوتروني	molecular, 370	نسبوي
produced by changing electric field, 616 ff	أنتجت بواسطة مجال كهربائي متغير	Liquid crystals, 256, 688–89	مسائل داخل الزجاج	Lensmaker's equation, 656	معادلة صانع العدسة	relativistic, 744–47	دوراني
produced by electric current, 557, 616–17	أنتجت بواسطة تيار كهربائي	Liquid scintillators, 857	مسائل داخل الزجاج	Lepton era, 938	قانون ليز	rotational, 210–13	انتقالي
produces electric field, 616–17	تنتج مجال كهربائي، تيار كهرباء، قوة محرك كهربائية	Liquid-drop model, 866	مسائل داخل الزجاج	Lepton numbers, 899, 900	ليوناردو فينشي	translational, 142 ff	الاحتكاك الحركي
electric current, emf, 584 ff, 616 ff	تنتج مجال كهربائي، تيار كهرباء، قوة محرك كهربائية	Liquid-in-glass thermometer, 355	مسائل داخل الزجاج	Leptons, 890, 895, 901, 904–5, 907, 908	ليوناردو فينشي	Kinetic friction, 90 ff	نظرية الحركية، مسلمت
of solenoid, 567	للسولينويد	Logarithms, A-10–A-11 (see also inside back cover)	مسائل داخل الزجاج	Lever, 162 pr, 229	صادم LEP	Kinetic theory, 352, 367–71, 395	نظرية الحركية، مسلمت
of straight wire, 564	لسلك مستقيم	Logarithmic scale (the galactic)	مسائل داخل الزجاج	Lever arm, 203	حقيقية لبتون	postulates of, 368	كيرشوف
Magnetic field lines, 555	خطوط المجال المغناطيسي	Longitudinal wave, 303 ff	مسائل داخل الزجاج	Lid, opening when tight, 359	أعداد لبتون	Kirchhoff's rules, 528–31	قاعدة كيرشوف
Magnetic flux, 586, 591	التدفق المغناطيسي	Long-range force, 841	مسائل داخل الزجاج	Life under ice, 360	قانون لبتون	Lake, volume of, 12–13	بحيرة، حجم
changing, produces electric field, 591	تغير، ينتج مجال كهربائي	Lookback time, 935	مسائل داخل الزجاج	Lifetimes, 901, 902, 905 (see also Half-life)	ليوناردو فينشي	Laminar flow (defn), 268	انسباب صفاتي (تعريف)
Magnetic force, on electric current, 558–59	قوة مغناطيسية، على التيار الكهربائي	Loop rule (see Kirchhoff's rules)	مسائل داخل الزجاج	Lift, dynamic, 272–3	صادم LEP	Laminated armatures, 594	دروع صفانحية
on moving electric charge, 560–63	على الشحنة الكهربائية المتحركة	Lorentz transformation, A-25–A-26	مسائل داخل الزجاج	Light, 632–738	حقيقية لبتون	Laminated iron cores, 595	لب حديدي صفانحي
Magnetic head, 598	رأس مغناطيسي	Loudness, 323, 325, 328–29 (see also Intensity)	مسائل داخل الزجاج	coherent and incoherent	أعداد لبتون	Land, Edwin, 685	ادوين - لاند
Magnetic lens, 768	عدسة مغناطيسية	level of, 328	مسائل داخل الزجاج	sources of, 671	لون، وطول موجة	Landing, impulse on, 174–75	نيسة على اللانثانيدات
Magnetic moment, 570	العزم المغناطيسي	Loudspeaker, 295, 326, 335, 336, 501, 508, 572	مسائل داخل الزجاج	color of, and wavelength, 670, 671	حيود	Lanthanides, 800	طابعة ليزرية
Magnetic monopole, 555	قطب مغناطيسي أحادي	LR circuit, 602–3	مسائل داخل الزجاج	diffraction of, 665–66, 673–75	التشتت لـ	Laser printer, 463	ليزرات
Magnetic permeability, 564, 574	الاحتمالية المغناطيسية	LRC circuit, 606–7	مسائل داخل الزجاج	dispersion of, 671–73	أثر دوبلر لـ	Lasers, 803–6	ليزرات
			مسائل داخل الزجاج	Doppler effect for, 341–42	كموجة كهرومغناطيسية	Latent heats, 391–95	الحرارات الكامنة

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 مستحثة تتحد من 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 الميكروسكوب	
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	جوجليلمو 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 حرجة	
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	ملمتيزر 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	460–62, 818–21	الجزئي البيولوجي والكهربائي، القوى	
Molecular mass and molecular	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	في الرباط في	
in breath	367	تنفسي	
diatomic	A-22	ثنائي ذري	
kinetic energy of	370	طاقة حركية	
potential-energy diagrams for	815–17	مخططات طاقة كامنة	
spectra	821–23	الأطياف	
weak bonds between	817–21	روابط ضعيفة بين	
Moment arm	203	ذراع 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) التحريك	
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	ماروميتير 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	عدادات قياس (كهربائية)	
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 و فلزي	
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	لميكروسكوب	
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، جوجليلمو	
Mars	126–27	المريخ	
Mass	9, 75, 256, 744	كتلة	
atomic	353, 836	ذري	
center of	182–86	مركز لـ	
critical	868	حرج، حساس	
of	744–47	والطاقة	
gravitational	938–39	جاذبي	
inertial	938	قصوري	
molecular	353	جزيئي	
of neutrinos	912	لليوترينوات	
nuclear	836–38	نووي	
of photon	762–63	للفوتون	
relativistic	742–43	نسبوي	
rest	743	سكوني	
stellar luminosity and	931	الإشعاع النجمي	
of Sun	127	لشمس	
units of	9, 75	وحدات لـ	
Mass energy transformation	744–47	التحول الكتلتي الطاقوي	
Mass increase	743	الزيادة الكتلتي	
Mass number	836	الرقم الكتلتي	
Mass spectrometer (spectrograph)	572–73	المطياف الكتلتي (الرسم الطيفي)	
Mathematical formulas (see inside back cover)		صيغ رياضية (أنظر داخل الغلاف الخلفي)	
Mathematical review	A-1–A-11	مراجعة رياضية	
Mathematical signs and symbols (see inside front cover)		الإشارات والرموز الرياضية (أنظر داخل الغلاف الأمامي)	
Matter, states of	255–56, 353	المادة، حالات	
Matter waves	781, 788 ff	الأمواج المادية	
Matter-dominated universe	951	كون ذو المادة السائدة	
Maxwell distribution of molecular speeds	371	توزيع ماكسويل للسرعات الجزيئية	
Maxwell, James Clerk	371, 615 ff, 729, 730	ماكسويل، جيمس طيزيك	
Maxwell's equations	616–17		

Newtonian mechanics	74- 135	ميكانيكا نيوتونية	Kinematics of motion	19- 71	كينماتيكا الحركة	Mirage	667	سراب	Gravitational mass		
Newton's law of universal gravitation	117- 20	قانون نيوتن للجذب العام	Newton's laws of motion	73- 105	قوانين نيوتن في الحركة	Mirror		مرآة	926 – 27	كتلة الجاذبية	
Newton's laws of motion	73- 105, 168, 186	قوانين نيوتن في الحركة	Periodic motion	287	حركة دورية	Concave mirror	635	مرآة مقعرة	926 – 27	كتلة الفصور	
Newton's laws for rotational motion	206- 7	قوانين نيوتن في الحركة الدورانية	Projectile motion	54- 62	حركة المقذوف	Convex mirror	635	مرآة محدبة	353	كتلة جزيئية	
Newton's rings	680	حلقات نيوتن	Relative motion	62- 64, 726	حركة نسبية	Focal length of mirror	636, 641	البعد البؤري للمرآة	900	كتلة النيوترونات	
Newton's second law for system of Particles	186	قانون نيوتن الثاني لنظام	Rotational motion	194- 225	حركة دورانية	Magnifying mirror	640	مرآة تكبير	836 – 38	كتلة نووية	
Newton's synthesis	127- 28	تركيب نيوتن	Simple harmonic motion	287 – 79	حركة توافقية بسيطة	Parabolic mirror	636	مرآة على شكل قطع مكافئ	762 – 43	كتلة الفوتون	
Noble gases	799	غاز خامل	Translational motion	19, 185 – 86	حركة انتقالية	Spherical mirror	635 – 42	مرآة كروية	743	كتلة سكونية	
Nodes	310, 333	عقد	Uniform circular motion	106- 15	حركة دائرية منتظمة	Mirror equation	638 – 39	معادلة المرآة	127	كتلة الشمس	
Noise	334 – 35	إزعاج	Vibration motion	286- 300	حركة اهتزازية	9		نظام وحدات متر كيلوغرام ثانية	9. 75	وحدات الكتلة	
Noncom doctor	441	غير موصل	Wave motion	300- 315	حركة موجية	Models	4-5	نماذج	Mass energy transformation	744 – 47	تحول الكتلة – الطاقة
Neoconservative force	148	قوة غير محافظة	Motional emf	590	قوة دافعة كهربائية	Models of particle		نماذج الجسيم	Mass increase	743	زيادة الكتلة
No inertial reference frame	74, 727, A- 16, A- 17	لا يوجد إطار مرجعي قصوري	Motor		محرك	Moderator	868	مهدئ	Mass number	836	عدد كتلي
Nonlinear or nonohmic devices	498, 830	أدوات لخطية أو لا أومية	Electric motor	571- 72	محرك كهربائي	Modern Physics	1,727	فيزياء حديثة	Mass Spectrometer	572 – 73	مطياف الكتلة
Normal force	81	قوة عمودية	De motor	592	محرك يعمل بالتيار المستمر	Modulation	627	تضمين	Mathematical formula		صيغة رياضية
Normal lens	701	عدسة طبيعية	Motor neurons	511	محرك الخلايا العصبية	Modulation Modulus elastic	237-38	معامل المرنة	Mathematical review	A1 – A – 11	مراجعة رياضية
North pole	555	قطب شمالي	Multimeter	543	جهاز قياس كهربائي متعدد القياسات	A-20- A- 21		الحرارة النوعية للغرامية	Matter	255- 56, 353	مادة
Novae	918, 924	نوا	Multiplication factor	869	معامل الضرب	Mole	363, 364	جزء غرام	Matter waves	781, 788	موجات مادية
Npn transistor	830- 31	ترانزستور npn	Muon	899, 901	ميون	Molecular biology and electric forces	460- 62, 818- 21	البيولوجية الجزيئية والقوى الكهربائية	Matter – dominated universe	939	كون تسوده المادة
n-type semi conductor	827 – 28	نوع n-	Muon lepton number	899	عدد الليبتون الميوني	Molecular mass and molecular weight		كتلة جزيئية ووزن جزيئي	Maxwell distribution of molecular speeds		توزيع ماكسويل للسرعات الجزيئية
Nuclear angular momentum	838	كمية التحرك الزاوية النووية	Muscles and joints	205, 234 – 35	عضلات ومفاصل	Molecular rotation	353	دوران جزيئي	Maxwell, James Clerk	371	جيمي كلارك
Nuclear binding energy	838- 41	طاقة الربط النووية	Musical instruments	330- 34	أجهزة موسيقية	Molecular spectra	821 – 22	أطياف جزيئية	Maxwell's equations	616- 17	معادلات ماكسويل
Nuclear collision	177	تصادم نووي	Mutual inductance	600	حث متبادل	Molecular speeds	370 – 71	سرعات جزيئية	Mean life	850	متوسط العمر
Nuclear fission	866- 71	انشطار نووي	Myelinated axons	513	محوران عصبيين	Distribution of molecular speeds	371	توزيع السرعات الجزيئية	Measurement	2,5 -7	قياس
Nuclear forces	128, 840- 44	قوى نووية	Myopia	702	قصر البصر	Molecular vibration	823	اهتزاز جزيئي	Mechanical advantage	89	فائدة آلية
Nuclear magnetic resonance	882- 83	الرنين النووي المغناطيسي	Nagasaki	871	نجازاكي	Molecules	353, 812- 15	جزيئات	Mechanical energy	149 – 55	طاقة ميكانيكية
Nuclear masses	836	كتل نووية	Natural abundances	836	وفرة طبيعية	Bonding in molecules	812- 15	ترابط الجزيئات	Mechanical equivalent of heat	385	مكافئ ميكانيكي حراري
Nuclear medicine	881- 82	علاج نووي	Natural convection	397	الحمل الحراري الطبيعي	Diatom molecules	A – 22	جزيئات ثنائية الذرات	Mechanical waves	300	موجات ميكانيكية
Nuclear power	431, 869- 70	طاقة نووية	Natural frequency	299, 310	تردد طبيعي	Kinetic energy of molecules	370	طاقة حركة الجزيئات	Mechanics	19	ميكانيكا
Nuclear radiation	849	إشعاع نووي	Natural Global Positioning system	134	نظام عالمي لتحديد المواقع	Potential energy diagram for molecules	815 – 17	مخطط بياني لطاقة وضع الجزيئات	Medical imaging	343 – 45, 402	تصوير طبي
Nuclear radius	837	نصف القطر النووي	Near Earth asteroid Rendezvous	135	ملتقى نجمي قرب الأرض	Weak bonds between molecules	817 – 21	روابط ضعيفة بين الجزيئات	Melting points	392	نقاط الانصهار
Nuclear reactions	863- 66	تفاعلات نووية	Near field	618	مجال قريب	Moment arm	203	ذراع العزم	Mendelev, Dmitri	798	ديمتري مندليف
Nuclear reactors	866- 72	مفاعلات نووية	Near Point of eye	702	اقرب نقطة للروية الواضحة للعين	Magnetic dipole moment	570	عزم ثنائي القطب المغناطيسي	Mercury barometer	262	بارومتر زئبقي
Nuclear Spin	838	مغزلية نووية	Nearsighted eye	702	عين مصابة بقصر النظر	Moment of a force	204	عزم القوة	Meson	896, 901- 2, 905	ميزون
Nuclear structure	835 – 38	تركيب نووي / تركيب النواة	Nebula	917	سديم	Moment of inertia	206, 207	عزم القصور الذاتي	Meson exchange		تبادل الميزون
Nuclear weapons testing	871	اختبار الأسلحة النووية	Negative	697	سالب	Momentum	136, 167 – 93	كمية التحرك الزاوية	Messenger – RNA	820 – 21	رسول RNA
Nucleon	836	نيوكليون	Negative charge	472	شحنة سالبة	Relation of force to momentum	168 – 69	علاقة القوة مع التحرك	Metabolism	414	عملية الأيض
Nucleon number	848, 899, 902	عدد النيوكليون	Neon tubes	786	أنابيب النيون	relativistic momentum	742 – 43, 747	كمية التحرك النسبية	Metal detector (airport)	595	كاشف المعدن (في المطارات)
Nucleo synthesis	921- 23, 938	سلسلة نووية	Neptune	127	نبتون	Total momentum of system of particles	185- 86	كمية التحرك الكلية لأنظمة الجسيمات	Metallic bond	824	رابطة معدنية
Nucleus	835	نواة	Nerves and nerve conduction	510 – 13	أعصاب وتوصيل النصب	Units of momentum	168	وحدات كمية التحرك	Metastable state	803- 4, 847	حالة شبه مستقرة
Compound nucleus	866	نواة مركبة	Nervous system (human)	510- 13	(النظام العصبي في الإنسان)	Moment of momentum	762 – 63	كمية تحرك الفوتون	Meter (Unit)	8	متر (وحدة قياس)
Daughter nucleus		نواة واعدة	Net force	75, 76, 84	قوة محصلة	Momentum of photon	762 – 63	كمية تحرك الفوتون	Meters (electrical)	541 – 45	أجهزة قياس (كهربائية)
Parent nucleus		النواة الأم	Neuron	511- 12	خلية عصبية	Relation of force to momentum	168 – 69	علاقة القوة مع التحرك	Metric prefixes (multipliers)	9	(بادئات مترية (مضاعفات
Radioactive decay of unstable nucleus	842	الاضمحلال النووي للأنوية غير المستقرة	Neutral equilibrium	236	اتزان متعادل	relativistic momentum	742 – 43, 747	كمية التحرك النسبية	Metric system	8 -10	نظام متري
Size of nucleus		حجم النواة	Neutral wires	540	أسلاك محايدة	Moment of momentum	762 – 63	كمية تحرك الفوتون	MeV (Unit)		ميغا إلكترون فولت (وحدة قياس)
Structure and properties of nucleus	835 – 38	تركيب النواة وخصائصها	Neutrino flavor oscillation	9 00	اهتزاز الصفة المميزة للنيوترينو	Moment of momentum	762 – 63	كمية تحرك الفوتون	Michelson, A. A	622 – 23, 684	ميكلسون، أ. أ
Nuclides	836	نويدات	Neutrinos	846,900,901,938,942	نيوترينات	relation of force to momentum	168 – 69	علاقة القوة مع التحرك	Michelson interferometer	684	جهاز ميكلسون لقياس التداخل
Null result	730	نتيجة عديمة القيمة	Types of Neutrinos	899	أنواع النيوترينات	relativistic momentum	742 – 43, 747	كمية التحرك النسبية	Michelson –Morley Experiment	730	تجربة ميكلسون – موري
Object distance	634, 638, 650	مسافة الجسم	Neutron	836	نيوترون	total momentum of system of particles	185- 86	كمية التحرك الكلية لأنظمة الجسيمات	Micrometer	13	ميكرومتر
Objective lens	706	عدسة شينية	Neutron in nuclear reaction	866	نيوترون في تفاعل نووي	Units of momentum	168	وحدات كمية التحرك	Microscopic property	353	خاصية مجهرية
Observation	2	مشاهدة	Neutron role in fission	866	وظيفة النيوترون في الانشطار النووي	Moon	109, 118, 12,141	قمر	Microphone	598	ميكروفون
Ocular lens	708	عدسة عينية	Neutron degeneracy	923	انحلال النيوترون	Morley, F. W.	730	(مورلي عالم)	Microscope		ميكروسكوب
Oersted, Hans Christian	557	هانز كريستيان أورست	Neutron number	836	عدد النيوترون	Moseley, H. G. J.	801	(موسلي عالم)	Compound microscope	708 – 9, 715	ميكروسكوب مركب
Ohm, Georg Simon	498	جورج سيمون أوم	Neutron star	215, 918, 923	نجم نيوتروني	Moseley plot	801	مخطط موسلي	Electron microscope	754, 768 – 69	ميكروسكوب إلكتروني
Ohm (Unit)	498	(أوم وحدة قياس)	Neutron , Issac	19,74,106,106,117-28,450, 666, 67	إسحق نيوتن	Motion		حركة	Microstate	428	حالة مجهرية
Ohm meter	543	جهاز كهربائي لقياس المقاومة	Neutron (Unit)	76	(نيوترون وحدة قياس)	Circular motion	107- 17	حركة دائرية	Microwave background	933 – 39	خلفية ميكروويفية كونية
Ohm's law	498- 500	قانون أوم				Motion at constant acceleration	26 – 44	حركة بتسارع ثابت	Microwaves	620, 433	موجة ميكروويف
Oil drop experiment	756	تجربة قطرة الزيت				Description of motion (Kinematics)	19- 71	(وصف الحركة (كينماتيكا)	Milky way	915, 17	درب التبانة
Ones, H. K	510	أونس				Dynamics of motion	72	ديناميكا الحركة	Millikan oil – drop experiment	756	تجربة قطرة الزيت لميلكان

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

Salam,A	907	مركب شرابي ومبدأ برنولي (سلام، عبد السلام	Remote control	628	التحكم عن بعد	مقتنى النشاط الإشعاعي	Quntum theory	727, 754- 834	نظرية الكم
Satellite	122-23	تابع، قمر صناعي	Resistance 498- 500		مقاومة	نشاط إشعاعي طبيعي	Early quantum theory	754- 81	نظرية الكم المبكرة
Saturated vapor pressure		374	Internal resistance	521	مقاومة داخلية	أنوية مشعة	Quantum theory of light	758- 61	نظرية الكم للضوء
Saturation (magretic)	575	تسبغ مغناطيسي	Resistance thermometer	502	مقياس درجة الحرارة ذو المقاومة	(رادون) عنصر غازي مشع	Quarks	445,889,890,904,910	كواركات
Sawtooth voltage	537	فولتية سن منشأ	Resistivity 500- 502		المقاومية، المقاومة النوعية	مدى المقذوف	Quasars	918	كوازار: شبيهات النجوم
Scalars	45,46	كميات قياسية	Temperature coefficient of resistivity	502	المعامل الحراري للمقاومية	انتقال سريع	q- value	843, 864	قيمة q- للتفاعل
Scales, Musical	329	تدريج موسيقي	Resistors 498- 500		مقاومات	805	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	ليزر الحالة الصلبة	Radar	341,345	رادار
Scattering of light	690	تشتت الضوء	Resistors with capacitors	535- 37	مقاومات مع مواسعات	تخلخل	Radial acceleration	107	تسارع باتجاه القطر
754,787		Schrödinger, Erwin	Resistors and Kirchhoff's rules	529	مقاومات وقاعدتا كيرشوف	معدل الاضمحلال	Radiation biology	880- 81	علم الحياة الإشعاعي
Schwann Cells	511	خلايا شوان	Resistors in series and parallel	522- 28/	وصل المقاومات على التوالي والتوازي	شعاع	Radiation damage	876	إضرار الإشعاع ((التلف الإشعاعي
Schwarzschild radius	929	نصف قطر شوارز شيلد	Resolution 711-13		تحليل، تقريب	تخطيط بياني	Radiation dosimetry	877- 79	مقياس الجرعات الإشعاعية
Science, nature of	1-3	طبيعة العلم	Resolution of electronmicroscope	768	القدرة التحليلية للميكروسكوب الإلكتروني	للأشعة	Radiation era	938	حقبة الإشعاع
Scintillation counter	856	عداد الوميض	Resoluon of highenergy accelerators	890-91	القدرة التحليلية لمسار عات الطاقة العالية	اقتراف الإشعاع	Radiation fields	618	مجال إشعاعي
Scintillator	856	وماض	Resoluon of lens	711-13	القدرة التحليلية للعدسة	معيار رايلي	Radiation film badge	878	شارة الفيلم الحساس لإشعاع
Seasons	402	فصول	Resoluon of telescope	714-15	القدرة التحليلية للتلسكوب	الأثر البيولوجي النسبي	Radiation pressure	625- 26	ضغط الإشعاع
Second harmonic	311,332	التوافقي الثاني	Resolution of vector	49-53	تحليل المتجهات	مفاعلة	Radiation sickness	878- 79	مرض ناجم عن الإشعاع
Second law of thermodynamics	415-16,424-29	القانون الثاني في الديناميكا الحرارية	Resolving power	714	قدرة التحليل	مفاعلة حرجة	Radiation therapy	880	العلاج بالإشعاع
Clausius Statement of second law of the on dynamics	416-422	نص كلازيوس للقانون الثاني في الديناميكا	Resonance 299m310-12,780		رنين	تفاعلات نووية	Radiation from human body	400	الإشعاع من جسم الإنسان (الأشعة إشعاعات)
Statistical interpretation of second law of thermodynamics	428-29	القانون الثاني في الديناميكا الحرارية	Resonance in ac circuits	680	رنين في دارات تيار متردد	مفاعلة نووية	Infrared radiation	399	تحت الحمراء
Second (unit)	9	(ثانية) وحدة	Resonance of elementary particle	902	رنين الجسيم الأولي	مفاعل نووي	Net flow rate radiation	400	التدفق الصافي لمعدل الإشعاع
Secondary Coils	595	ملفات ثانوية	Resonant collapse	299	انهيار الرنين	صورة حقيقية	Radiation from sun	401, 402	إشعاعات من الشمس
Seesaw, balancing	230-31	أرجوحة، توازن	Resonant frequency	299,310, 608	تردد الرنين	جهاز استقبال ارتداد	Thermal radiation	399- 402	الإشعاع الحراري
Seismograph	598-99	سيزموغراف راسم الزلازل	Resources, energy	431	موارد الطاقة	رأس تسجيل	Radiation, electromagnetic		الأشعة إشعاعات كهرومغناطيسية)
Selection rule	797,822,823	قاعدة اختيار	Rest energy	744	طاقة السكون	مقوم	Blackbody radiation	756- 58	إشعاع الجسم الأسود
Selenium	462	(سيلينيوم) (عنصر لا فلزي	Rest mass	743	كتلة السكون	عملق أحمر	Gamma radiation	847	إشعاعات جاما
Self-Sustaining chain reaction	867-68	تفاعل متسلسل ذاتي المداومة	Resultant vektor	46-48	متجه محصل	انزياح نحو الأحمر	Radiation from hot bodies	756- 57	إشعاع من الأجسام الساخنة
Semiconductor	442,498,502,826,827-31	شبه موصل	Retina	701	(شبكية العين)	20-21, 62, 74	Microwave radiation	620	إشعاع ميكروويف
Semiconductor chips	11	رقائق شبه موصل	Reverse biased diode	828	صمام ثنائي منحاز عكسيًا	انعكاس	Synchrotron radiation	893	إشعاع سنكروترون
Semiconductor detector	857	كاشف شبه موصل	Reversible process	419	عملية عكوسة	تغير الطور في أثناء الانعكاس	UV- recitation	620, 671	إشعاعات فوق بنفسجية
Semiconductor diode	828-30	صمام ثنائي شبه موصل	Rifle recoil	172	ارتداد بندقية	انعكاس كلي داخلي	Radiation, nuclear		أشعة (إشعاع) نووي
Semiconductor doping	827-28		Right hand rule	215m527-58	قاعدة اليد اليمنى	انعكاس كلي داخلي	Activity of radiation	849, 851, 877	(الشدة الإشعاعية) (النشاط الإشعاعي
Sensitivity of meters	543	حساسية أجهزة القياس الكهربائي	Rigid body	194	جسم صلب	انعكاس موجات الماء	Alpha radiation	842- 44, 848	إشعاعات ألفا
Sensory neurons	511	خلايا عصبية حسية	Ripple roltage	834	جهد موجي	انعكاس موجات الماء	Beta radiation	842, 845- 47	أشعة بيتا
Series Circuits	522,532-34	دارات التوالي	Rocle climbing	102,105	تسلق الصخر	محزوز الانعكاس	Measurement of radiation	877- 79	قياس الإشعاع
Shear modulus	238,240	معامل القص	Rocket	78-79,172,186	صاروخ	عكس	Medical uses of radiation		استعمالات طبية للإشعاعات
Shear Stress	239-40	إجهاد القص	Roentgen (unit)	877	(رونجن) وحدة	انعكاس الانعكاس	Types of radiation	848	أنواع الإشعاعات
798-99		قشر ذرية	Roller coaster	157	سكة حديدية مرتفعة و متموجة تحرى فوقها عربة أفعوانية	انعكاس الانعكاس	Radiation – dominated universe	938	كون تسوده الإشعاعات
Shielding, electrical	457	حجب كهربائي	Rolling	202-3	دحرجة	قانون الانعكاس	Radio	626- 28	راديو، لا سلكي
SHM (Simple harmonic motion)	287-97	حركة توافقية بسيطة	Friction and rolling	90,211-12	احتكاك ودحرجة	قانون الانعكاس	Radio control	628	تحكم لا سلكي
Shock abosorbers	289,298	ممتص الصدمات	Root-mean-square (rms)	370	جذر متوسط التربيع	قانون الانعكاس	Radio waves	620	موجات الراديو
Shock waves	342-43	موجات صدمية	A-2		جذر	انعكاس الضوء	Transmission of radio waves	626	إرسال موجات الراديو
Shoot-range force	841	قوة تؤثر على مدى قصير	Rope	105	حبل	انعكاس الأشعة	Radioactive dating		تأريخ بالعناصر المشعة
Shunt resistor	542	مقاوم توازي	Rotation	200	دوران	انعكاس الأشعة	Radioactive decay	842- 55	اضمحلال إشعاعي
Shutter speed	698	سرعة الغلق	Frequency of rotation	200	تردد الدوران	انعكاس الأشعة	Radioactive decay constant	848	ثابت الاضمحلال الإشعاعي
SI. Units	8-10,76	SI وحدات النظام الدولي	Rotational angular momentum quantum number	822	العدد الكمي لكمية التحرك الزاوية الدورانية	انعكاس الأشعة	Radioactive decay law	849	قانون الاضمحلال الإشعاعي
Sivert (unit)	878	سيفرت (وحدة قياس الجرعة المكافئة للإنسان)	Rotational axis	206	محور الدوران	انعكاس الأشعة	Radioactive decay series	852- 53	سلاسل الاضمحلال الإشعاعي
Significant figures	6-7,A-3	الأرقام المعنوية	Rotational inertia	206-8	القصور الذاتي الدوراني	انعكاس الأشعة	Radioactive fallout	871	تساقط الغبار المشع
Silicon	826,827	(سيلكون) (عنصر لافلزي	Rotational Kinetic energy	210-13	طاقة الحركة الدورانية	انعكاس الأشعة	Radioactive tracer	880, 881	المقتنى المشع أو
Simple harmonicoscillator	289	مذبذب توافقي بسيط	Rotational motion	194-225	حركة دورانية	انعكاس الأشعة			
Simple pendulum	296-97	بندول بسيط	Rotational transitions	822-23	انتقالات دورانية	انعكاس الأشعة			
Simultaneity	731-33	تزامن	Rotor	571,593	عضو دوار	انعكاس الأشعة			
Single photon emission tomography			Ruby Laser	804	ليزر الياقوت	انعكاس الأشعة			
881-82		التصوير الطبقي الإشعاعي بالتبعثات الفوتون	Runway, airport	27	مدرج المطار	انعكاس الأشعة			
Single-Slit diffraction	673-57	حيود بوساطة شق أحادي	Rutherford, Ernest	770,842	رذر فورد، أرنت	انعكاس الأشعة			
Sinusoidal Curve	294	منحنى جيبى	Rutherford's model of the atom	770,772-73	نموذج رذرفورد للذرة	انعكاس الأشعة			
Siphon	280	سيفون	Rydberg constant	772	ثابت وايدبرج	انعكاس الأشعة			
Skater, rotating	214	دوران الزلجة	Safety factor	241	عامل الأمان	انعكاس الأشعة			
Skidding of car	113	انزلاق السيارة	Sailboat and Bernoulli's principle	273		انعكاس الأشعة			

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	Sleypton	910	ليبتون فانق 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 الكلي	Slope	36	ميل، انحدار
تجمعات عملاقة	918	Super cluster	Radius of stars	402	Mass spectrometer	572-73	مقياس الطيف الكلي	Slow neutron reaction	864	تفاعل نيوترون بطيء
فائقة التوصيلية	510	Super conductivity	Source of energy of stars	873, 922-23	Spectroscopy	678-79	مقياس الطيف الكلي	Slug (unit)	76	السلج (وحدة الكتلة في النظام البريطاني)
فائقة السيولة	373	Super fluidity	Types of stars	925	Spectroscopy Spectrum	377	مطياف، سبكتروسكوب علم الطيف	Smoke detector	844	كاشف الدخان
سوبر نوبا	941, 925, 24-923, 918	Supernova	Statcoulomb (unit)	445	Absorption spectrum	679,771-72	طيف الامتصاص	Snell, Willebrord	643	سنل وويلبرورد
مبدأ التركيب	376	Superposition, principle of	State:		Atomic spectrum	771-73	طيف ذري	Snell's Law		قانون سنل
هواء مفرط التشبع	376	Super saturated air	Changes of State	371-73,391-92	Band spectrum	821	طيف شريطي	Soap bubbles		فقاعات صابون
سرعة فوق صوتية	43-342	Supersonic speed	Equation of state	361,364	Black body spectrum	756-58	طيف الجسم الأسود	Society of Automotive Engineers	679,682	جمعية مهندسي السيارات
نظرية الأوتار الفائقة	910	Super string theory	Equilibrium state	361	Continuous Spectrum	678, 757	طيف مستمر	Sodium Chloride	814,817,824	كلوريد الصوديوم
		فائق التماثل	State of matter	255-56, 353	Electromagnetic spectrum	619-22	طيف كهرومغناطيسي	Solar Cell	431,830	خلية شمسية
910		Super symmetry	State variables	409	771		طيف انبعاث	Solar Constant	401	الثابت الشمسي
سطح آخر تشتت	935	Surface of last scattering	Static electricity	440-41	Spectrum emitted by gases	678, 771-73	طيف منبعث بواسطة الغازات	Solar energy	401-2,430,431	الطاقة الشمسية
التوتر السطحي	78-276	Surface tension	Static friction	90,91-92, 211-12	Spectrum emitted by hot bodies	756-57	طيف منبعث بواسطة أجسام ساخنة	Solar heating	431	التسخين الشمسي
305		Surface waves	Static rope	105	Line spectrum	678-79, 771	طيف خطي	Solenoid	567, 569	مف لولبي
خافض للتوتر السطحي	227	Surfactants	Statics	226-55	Molecular spectrum		طيف جزيئي	Solenoid inductance	601	حث الملف اللولبي
جسيمات فائقة التماثل	910	SUSYs	Stationary State in atom	773	771		طيف عناصر مختارة	Solids	255,353, 824-26,A-22	صلب، جامد
تماثل	37-936, 910, 453, 34, 13	Symmetry	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
37-936, 908		Symmetry breaking	Stator	593	X-ray spectrum	800-802	طيف الأشعة السينية	Bonding in Solids	824	ترابط المواد الصلبة
تشابك الخلايا العصبية	511	Synapse	Steady – State modle of universe	933	Average speed	21	متوسط السرعة	Energy Levels in solids	825-26	مستويات الطاقة في المواد الصلبة
سنكروسيكلوترون	893	Synchrocyclotron	Steam engine		Speed 20		سرعة قياسية	Equipartition of energy for solids	A-22	تجزئة الطاقة بالتساوي في المواد الصلبة
إشعاع السنكروترون	94-893	Synchrotron radiation	416-17,420		Average speed	21	متوسط السرعة	Molar specific heats of solids	A -22	الحرارة النوعية للغرامية للمواد الصلبة
نظام مغلق	408, 388, 171	System	Stefan – Boltzmann constant	399	Speed of EM Waves	619	سرعة الموجات الكهرومغناطيسية	Solid state physics	824-26	فيزياء الحالة الصلبة
نظام معزول	409, 388	Closed system	Stefan – Boltzmann Law	399,919	Speed of Light	8,619, 622-23, 729-31, 743	سرعة الضوء	Solving for Unknowns	A-4, A-5	حل بالنسبة للمجهول
نظام معزول	89-388, 72-171	Isolated system	Stellar evolution	918-24	Mean speed of molecules	370	متوسط سرعة الجزيئات	Somatic damage	876	ضرر جسدي
نظام مفتوح	414, 388	Open system	Stellar fusion	873	Molecular speed	370-71	سرعة الجزيئات	Sonar	343,343	سونار: جهاز سبر بالصدى
نظام الوحدات	10-8	System of units	Step-down transformer	596	Relative speed	179	سرعة نسبية	Sonicboom	34243	دوي اختراق جدار الصوت
ضغط انقباض القلب	279	Systolic presore	Step – up transformer	596	Speed of sound	323	سرعة الصوت	Sonograms	343	الصانوغرام
تسارع حاسمي	198, 14-113	Tangential acceleration	Stereo broadcasting FM	627	Super sonic speed	342-43	سرعة فوق صوتية	Sound and Sound waves	322-45	الصوت وموجاته
الطبخ	359	Tank overflow	Stimulated emission	803	Ultimate speed	743	سرعة قصوى	Doppler Shift of Sound waves	338-42	إزاحة دوبلر للموجات الصوتية
رأس المسجل الشريطي	598	Tape recorder head	Stopping potential	759	Speed of wave	302,304	سرعة الموجة	Interference of Sound	334-37	تناخل موجات الصوت
تقويم الأسنان	277	Teeth, straightening	Storage rings	894	Spherical aberration	636,710	زيغ كروي	Quality of Soond	334-35	جودة الصوت
عدسة تصوير مقربة	701	Telephoto	STP	364	Spin, electron	574,795,882	مغزلية الإلكترون	Source of Sound	329	مصدر الصوت
(تلسكوب) (منظار)	8-706	Tele scope	Strain	237-41	Spin quantum number	795	عدد كمي مغزلي	Speed of Soond	323	سرعة الصوت
(تلسكوب فلكي) (منظار فلكي)	7-706	Astronomical telescope	Strange particles	903,904	Spider web	293	شبكة العنكبوت	Sound barrier	342	جدار الصوت
(تلسكوب جاليليو) (منظار جاليليو)		Galileian telescope	Strangeness903	866	Spin – echo technique	884	تقنية الصدى المغزلي	Sound Spectrum	335	طيف صوتي
			Strassmann, Fritz	866	Spiral galaxy	914	مجرة حلزونية	Sound System		نظام صوتي
			Streamline Flow	268	Spring	287,289-93	زنبرك	Sound track	762	مدرج الصوت
			Stress		Spring equation	147,237,287	معادلة الزنبرك	Sounding board	331	لوح رنان
			Compressive stress		Spring scale	73	ميزان زنبركي	Sounding box	331	صندوق رنان
			إجهاد الضغط		Spring vibration (see Vibrations)		اهتزاز الزنبرك	Source		مصدر
			إجهاد قصي		Spyglass	708	منظار	Source activity	877	شدة المصدر
			إجهاد الشد		Squark		كوارك فانق التماثل	South pole	555	قطب جنوبي
			إجهاد حراري	361	Squire, Sir John	929	سكوير، سير جون	Space		فضاء
			Thermal stress		Stable equilibrium	236	اتزان مستقر	Curvature of Space	926-29,939	انحناء الفضاء
			String theory	910	Standard Conditions	364	ظروف معيارية	Interference in space	335-36	تناخل في الفضاء
			Stringed instruments	335, 31-330	Standard model:	936	نموذج معياري	Space perception using Sound waves	304	إدراك الفضاء بواسطة موجات الصوت
			Strings, vibrating	34-329, 12-310	Cosmology		النموذج المعياري الكوني	Space travel	373	السفر عبر الفضاء
			Piano	330, 311	Elementary particles	890,907-8	النموذج المعياري للجسيمات الأولية	Space – time	742,927	زمان – مكان
			Strong bonds	817	Standards and units	8-10	المعايير والوحدات	Special theory of relativity	726-49, 926	نظرية النسبية الخاصة
			Strong nuclear force	910-895, 865, 840, 128				Impact of special theory of relativity	748-49	أثر نظرية النسبية الخاصة
			Strongly interacting particles	901				Postulates of special theory of relativity	730-31	فرضيات نظرية النسبية الخاصة
			ظاهرة التماسي: تحول المادة من حالة الصلابة إلى تحت (دون)							
			Sublimation	800, 99-798						
			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	275-76	جريان في أنابيب	Tubes, flow in	870	جزيرة الأميال الثلاثة	Three mile Island		362, 355	كلفن
		Uranium	14, 337	ضبط أوتار البيانو	Tuning apiano					71-367	Molecular interpretation of temperature
		استخدام اليورانيوم في التأريخ	769, 855	(عبور النفق) اختراق	Tunneling	888, 865	طاقة حد العتبة	Threshold energy		416	درجة حرارة التشغيل
858	يورانيوم مضطرب	Uranium in dating	430	توربين	Turbine	61-460	الثيمين	Thymine		416	درجة حرارة التشغيل
868	يورانيوم مخصب	Enriched uranium	268, 275	تدفق مضطرب	Turbulent flow					920	درجة حرارة النجم
		Uranium in dating	626	ملقط بصري	Tweezers, optical	359	غطاء محكم الإغلاق	Tight lid		510	درجة حرارة التحول
		Uranium in dating	738-40	ظاهرة التوأم	Twin paradox	73-272	انحناء جناح	Tilt of Wing		502	معامل حراري للمقاومة
		Fission of uranium	743	سرعة قصوى	Ultimate speed	334	جرس	Timbre		273	منحنى كرة التنس
		Uranium in reactors	237, 241	شدة قصوى	Ultimate strength		وقت، زمن	Time		273	منحنى كرة التنس
		Uranium in reactors	116-17	الفرز بالطرد المركزي، فائق السرعة	Ultracentrifuge	9	وقت مناسب	Propertime		273	منحنى كرة التنس
		Useful Magnification	323, 343	تردد فوق سمعي	Ultrasonic frequency	602, 536	معيار الزمن	Standard of time		273	منحنى كرة التنس
		UV	323, 343	موجات فوق صوتية	Ultrasonic waves	37-734	ثابت الزمن	Time constant		40-239	الشد وإجهاد القص
		Vacuum pump	343-45	التصوير الطبي بالموجات فوق الصوتية	Ultrasound and ultrasound medical imaging	8	تمدد الزمن	Time dilation		111, 87-86	شد في الحبل
		Valence band	671	ضوء فوق البنفسجي	Ultraviolet (UV) light	2-881, 20-718	مقياس الزمن	Standard of time		495	أقطاب البطارية
		Van der Waals bonds and force	426- 27	عدم توفر الطاقة	Unavailability of energy	334	تعدد الزمن	Time's arrow		32	سرعة حدية
		Vapor	5-6	عدم الدقة في القياس	Uncertainty in measurement	462	أنواع إنتاج العزم	Tools, torque – producing		22-520	جهد طرفي
		Vapor Pressure	789-92	(مبدأ الريبة (عدم التحديد	Uncertainty principle	203	كوارك قمة	Top quark		559	(تسلا (وحدة قياس
		Vaporization, heat of	298	ناقص المضاهلة	Under damping	580, 75-574	ملف حلقي	Toroid		2	اختبار النظريات
		Variable stars	698	(ناقص التعرض (للضوء	Under exposure	8-203	عزم الدوران	Torque		893	تيفاترون
		Variable, state	274	حيوانات تعيش تحت الأرض	Under ground animals	594	عزم دوران معاكس	Counter torque		5-2	(نظريات (بشكل عام
		Variable stars	704	رؤية تحت الماء	Under water vision	570	عزم الدوران المؤثر في حلقة تيارية	Torque on current loop		910	نظريات لكل شيء
		Vector Field	908	مقياس التوحيد	Unification scale	29- 228	عزم ممتز (تور	Torque in equilibrium		396	موصلية حرارية
		قوى متجهة	9, 353, 837- 38	وحدة الكتلة الذرية الموحدة	Unification atomic mass unit	261	(وحدة قياس الضغط الجوي (تور	Torr		357	توازن حراري
		Vector forces	272, 262, 261	حركة دائرية منتظمة	Uniform circular motion:	272	تورسلي، ايفانجيليسا	Torricelli, Evangelista		60-357, 354	تمدد حراري
		Vectors	272	ديناميكا الحركة الدائرية المنتظمة	Dynamics of uniform circular motion	839, 753	نظرية (مبرهنة) تورسلي	Torricelli's theorem		58-357	معامل التمدد الحراري
		Addition of vectors	109-12	كينماتيكات الحركة الدائرية المنتظمة	Kinematics of uniform circular motion	46-645	طاقة الترابط الكلية	Total binding energy		358	التمدد الحراري في البناء
		Components of vectors	106-9	حركية التوحد	Uniformly accelerated motion	149	انعكاس كلي داخلي	Total internal reflection		360	التمدد الحراري للماء
		Resolution of vectors	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units Changing	820	طاقة ميكانيكية كلية	Total mechanical energy		397-396	عزل حراري
		Resultant vectors	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	ناقل	Transfer – RNA		31-430	تولوث حراري
		Subtraction of vectors	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات	Transformations		402-399	إشعاع حراري
		Velocity	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		361	إجهاد حراري
		Addition of velocities	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		397	نوافذ حرارية
		Angular Velocity	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Average velocity	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Drift velocity	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Instantaneous velocity	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Velocity of light	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Molecular velocity, and relation to temperature	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Relative velocity	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Relativistic addition of velocity	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Velocity selector	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Velocity of simple harmonic oscillator	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Velocity of sound	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Supersonic Velocity	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Terminal Velocity	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Velocity of waves	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Velocity gradient	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Ventricular fibrillation	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Venture meter	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Venturi tube	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Vibrational energy levels	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Vibrational quantum number	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Vibrational transition	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Vibrations	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Vibrations of air columns	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		اهتزازات إجبارية	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري
		Forced vibrations	26-44	وحدة قياس التوحيد	Units of measurement	820	تحويلات جاليليو	Galilean transformations		485	انبعاث أيوني - حراري

أجهزة الرياح 331-35	Wind instruments	طول موجة دي برولي	766, 780-81, 890	De Broglie wave Length	اهتزازات في دارة مقاومة ومحث	608	LC vibrations
ضجيج الرياح 334	Wind noise	طبيعة جسيم - موجة	765-68, 781	Wave – Particle duality	اهتزازات جزئية	387, 823	Molecular vibrations
طاقة الرياح 431	Wind power	أمواج	300-315, 664-95	Waves	اهتزازات مصدر الموجة	301, 329-34	Vibrations as source of wave
لف، تدوير 572	Winding	انتساع الموجات	302, 627	Amplitude of waves	اهتزازات الأوتار	3 10-12, 329-34	Vibrations of strings
طاحونة هوائية 431	Windmill	موجات مستمرة	301	Continuous Waves	اهتزازات الأوتار	3 10-12, 329-34	Vibrations of strings
نوافذ	Windows	حيود الموجات	313-14, 665-66, 673-75	Diffraction of waves	خيال وهمي	634, 640, 650	Virtual image
فقدان الحرارة خلال النوافذ	Heat loss through windows	موجات زلزالية	304, 313	Earthquake waves	(فوتون وهمي) افتراضي	896	Virtule photon
نوافذ حرارية 397	Thermal windows	موجات كهرومغناطيسية	314, 615-28	Electromagnetic waves	لزوجة	268, 274-75	Viscosity
جناح 272-73	Wing	موجات ناقلية للطاقة	305-6	Energy transported waves	معامل اللزوجة	274	Coefficient of viscosity
غرفة الانسياب نحو السلك 858	Wire drift chamber	سقوط الموجات	308	Incident waves	أطوال موجة	620, 671-73	Visible light, wave Lengths of
اتصالات لاسلكية 626-67	Wireless communication	شدة الموجات	305, 306-7, 325-27	Intensity of waves	الضوء المرئي	701	Vitreous humor
شغل 136-67	Work	تناخل الموجات	308-9, 668-71, 677-78	Interference of waves	الزطوبة الزجاجية	701	Vitreous humor
التشغل مقارنة مع الحرارة 408	Work compared to heat	موجات الضوء	664-95	Light waves	(فولت) وحدة قياس الجهد	472	Volt (Unit)
التشغل بغاز متمد 411-12	Work by expanding gas	موجات طولية	303, 322	Longitudinal waves	472, 494	Volta, Alessandro	Voltage
التشغل في القانون الأول للديناميكا الحرارية 4 08	Work in first law of thermodynamics	التمثيل الرياضي للموجات المتحركة	314-15	Mathematical representation of traveling waves	فولتية منحازة للقاعدة	830	Base bias Voltage
التشغل من المحركات الحرارية 416-21	Work form heat engines	موجات مادية	781	Matter waves	فولتية منحازة		Bias Voltage
التشغل وعلاقته بالطاقة 414-58	Work related to energy	موجات دورية	301	Periodic waves	828		Calculating Voltage
التشغل بعزم الدوران 212-13	Work by torque	موجات مستوية	308, 618-19	Plane waves	535		Measuring voltage
وحدات الشغل 137	Unit of work	موجات ضغط	324	Pressure waves	541-45		Peak Voltage
دالة الشغل 760-61	Work function	موجات الراديو	620	Radio waves	506-7		Ripple Voltage
مبدأ الطاقة – الشغل	Work- energy principle	انعكاس الموجات	307-8	Refraction of waves	834		Sawtooth voltage
مادة عملية 417	Working substance	انكسار الموجات	312-13, 666	Reflection of waves	فولتية (جهد) سن المششار	537	Stopping Voltage
أعلى قمم العالم 10	World's tallest peaks	موجات صادمة	342-43	Shock waves	759		Terminal Voltage
حيود الأشعة السينية 717-18	X- ray diffraction, tion	موجات صوتية	322-45	Sound waves	520-22		Voltage divider
التصوير بالأشعة السينية 718-19	X- ray images	مصدر الموجات هو الاهتزاز	301, 322	Waves source vibration	(مجزي الجهد) (الفولتية)	525	Voltage drop
تبعثر الأشعة السينية 764	X- ray scattering	سرعة الموجات	302	Speed of waves	500		Voltaic battery
620, 717-18, 800-802	X- rays	موجات كروية	305	Spherical waves	494		Voltmeter
الإشعاعات السينية والعدد الذري 8 00-802	W- rays and atomic number	موجات مستقرة	310-12, 329-34	Standing waves	(فولتية) (مقياس الجهد)	541-45	Volume expansion
ميزات الإشعاعات السينية 800	X- ray characteristic	موجات سطحية	305	Surface waves	معامل تمدد الحجم	359-60	Volume holo-grams
الإشعاعات السينية في الطيف الكهرومغناطيسي 620	X- rays in EM spectrum	موجات مستعرضة	303, 684	Transverse waves	هولوغرام الحجم	807	W- Particles
668	Young, Thomas	موجات فوق الصوتية	323, 343	Ultrasonic waves	897, 901, 906, 907		Walking
تجربة يانغ ذات الشق المزدوج 668-71, 788-89	Young's double slit experiment	سرعة الموجات	302	Velocity of waves	79		Water
معامل يانغ 237-38, 239	Young's modulus	روابط ضعيفة	817-21, 824	Weak bounds	تماسك جزئي الماء	277	Cohesion of water
هيدكي يوكاوا 895	Yukawa, Hideki	قوة نووية ضعيفة	128, 841, 846, 897, 903	Weak nuclear force	تعدد الماء		Expansion of water
Z العدد الذري 836	Z (atomic number)	نشرة الأحوال الجوية	341	Weather forecasting	ماء ثقيل		Heavy water
Z° جسيم 897, 901, 906, 907	Z° particle	(ويبر) وحدة قياس التدفق المغناطيسي	586	Weber (Unit)	868		Moment of inertia for molecule of water
أثر زيمان 795	Zeeman effect	وزن	75, 81	Weight	عزم القصور الذاتي لجزئي	244	Polar nature of water
صمام ثنائي زنر 834	Zener diode	وزن ظاهري	265	Apparent weight	262		Specific heat of water
الصفير المطلق 36	Zero absolute	حالة انعدام الوزن	124-25	Weight less-ness	152		Triple point of water
نقطة صفر الطاقة	Zero – Point energy	واينبرج 907		Weinberg, S	276		Water – barometer
عدسة تعدل للتصوير القريب والبعيد 701	Zoom lens	551قنطرة ويتستون		Wheatstone bridge	718		Water slide
		مجرة دوامة 917		Whirlpool galaxy	718		Water strider
		أقزام بيضاء 918, 920, 922		White dwarfs	158		Watson, J. D.
		جرعة كامل الجسم 878, 879		Whole – body dose	308		Watt, James
		عدسة متسعة الزاوية 701		Wide – angle lens	308		Wave front
		قانون إزاحة فيينا 757, 919		Wien's displacement law	787- 89		Wave function
		مسبار ويلكنسون لتباين خصائص الميكروويف 934		Wilkinson Microwave Anisotropy Probe	300-315		Wave motion
		روبرت ويلسون 933		Wilson, Robert	664		Wave nature of light
		رياح		Windi	766-68, 780		Wave nature of matter
		فقدان الحرارة والرياح 397		Heat loss and wind	301		Wave pulse
					664-95		Wave theory of light
					302		Wave velocity
					334		Wave form
					302		Wave length
					763		Compton wave Length

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 Murti/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