الملحق ب

نتائج رياضية Mathematical Results

على الرغم من أننا لا نحتاج إلى أكثر من التكامل متعدد المتغيرات لفهم مادة الكتاب، لكننا في بعض المواقع استدعينا بعض النتائج الرياضية التي لا تشتق عادة في مقرر أولي بالتفاضل والتكامل. إن الهدف من هذا الملحق هو اشتقاق تلك النتائج. إذا كنت ترغب في أخذ هذه النتائج كما هي (أو أفضل من ذلك قليلًا، التحقق من النتائج بطريقة تقريبية أو في حالات خاصة) عندها لا حاجة إلى دراسة هذا الملحق. لكن الأدوات المستخدمة في اشتقاق هذه النتائج، لها تطبيقات واسعة في الفيزياء النظرية، وأيضًا الاشتقاقات نفسها جميلة ومحببة. لذا فإننا نأمل أن تقرأ الملحق، وتتعرّف بعض الوسائل التي لم تظهر في مقررات التفاضل والتكامل الأولية.

ب.1 التكاملات الجاوسية Gaussian Integrals

إن الدالة e^{-x^2}، وتدعى عادة الدالة الجاوسية، لها دالة عكس الاشتقاق، لكن لا يمكن بأي طريقة من الطرق كتابة تلك الدالة بدلالة الدوال المألوفة (كالجذور، والقوى، والدوال الأسية، أو الدوال اللوغاريتمية).

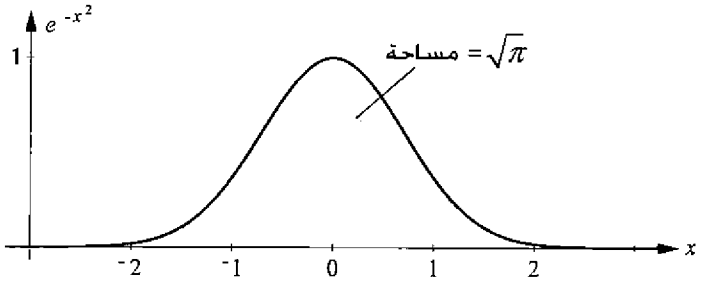
لذا، إذا واجهت تكاملًا بهذا الشكل، فمن المحتمل أن تجريه بالطرق العددية. لكن إذا كانت حدود التكامل 0 أو $\pm\infty$، يصبح الأمر سهلًا. لقد وجد أن تكامل e^{-x^2} من $-\infty$ إلى ∞ يساوي تمامًا $\sqrt{\pi}$.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \bar{e}^{x2}\, dx = \sqrt{\pi} \qquad (ب.1)$$

ولمّا كانت الدالة داخل التكامل دالة زوجية (انظر الشكل ب.1)، فإن التكامل من 0 إلى ∞ يساوي $\sqrt{\pi}/2$ تمامًا. ولإثبات هذه النتيجة البسيطة نستخدم التكامل في بعدين في الإحداثيات القطبية.

لنعرف التكامل I على النحو الآتي:

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{e}^{x2}\, dx \qquad (ب.2)$$



الشكل ب.1: الدالة الجاوسية e^{-x^2}، وتكاملها من $-\infty$ إلى $+\infty$ يساوي $\sqrt{\pi}$ تمامًا

والفكرة الأساسية هي تربيع تلك الكمية للحصول على العلاقة الآتية:

$$I^2 = \left(\int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2}\,dx\right)\left(\int_{-\infty}^{\infty} e^{-y^2}\,dy\right) \qquad (3.ب)$$

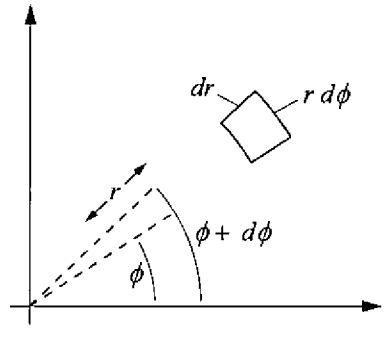
حيث سُمّي متغير التكامل الرمز y، في المعامل الثاني حتى لا يختلط بمتغير التكامل في المعامل الأول. ونظرًا إلى أن التكامل الثاني المحدود هو مقدار ثابت، لذا يمكن إدخاله داخل التكامل على x، وبالنظر أيضًا إلى كون e^{-x^2} مستقلة عن y، لذا يمكن نقلها إلى داخل التكامل على y، ومن هنا يتحول حاصل ضرب التكاملين إلى تكامل مزدوج على النحو الآتي:

$$I^2 = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2}\left(\int_{-\infty}^{\infty} e^{-y^2}\,dy\right)dx = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2}\,e^{-y^2}\,dy\,dx \qquad (4.ب)$$

إن ما لدينا الآن هو تكامل على فراغ ببعدين للدالة $e^{-(x^2+y^2)}$، وسنجري هذا التكامل في الإحداثيات القطبية r و ϕ. (انظر الشكل (ب.2)). إن دالة التكامل هي ببساطة e^{-r^2}، وتحدد منطقة تكامل من صفر r وتحدد ϕ من صفر إلى 2π. والأكثر أهمية يصبح عنصر المساحة المتناهي في الصغر $dxdy$ في المحاور القطبية، على نحو ما هو مبين في الشكل، وعليه يصبح التكامل المزدوج على النحو الآتي :

$$I^2 = \int_0^{\infty}\int_0^{2\pi} e^{-r^2}\,r\,d\phi\,dr = 2\pi\int_0^{\infty} re^{-r^2}\,dr = (2\pi)\left(-\frac{1}{2}\,e^{-r^2}\right)\Big|_0^{\infty} = \pi \qquad (5.ب)$$

وهذا يثبت الصيغة (ب.1).



الشكل ب.2: إن عنصر المساحة المتناهي في الصغر في المحاور القطبية يساوي $(dr)(rd\phi)$.

ومن المعادلة (ب.1)، ومع بعض الاستبدالات البسيطة، نحصل على النتيجة الأكثر عمومية:

$$\int_0^\infty e^{-ax^2}\,dx = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{a}} \qquad (6.ب)$$

حيث a أي ثابت موجب. ومن هذه المعادلة، نستطيع الحصول على نتيجة أخرى مفيدة، وذلك بالاشتقاق بالنسبة إلى المعامل a

$$\frac{d}{da}\int_0^\infty e^{-ax^2}\,dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}\frac{d}{da}\,\alpha^{-1/2} \qquad (7.ب)$$

على الطرف الأيسر من المعادلة، نستطيع نقل المشتقة إلى داخل التكامل لتؤثر مباشرة في الدالة e^{-ax^2} لتعطي معاملًا إضافيًّا $(-x^2)$. وبحساب الطرف الأيمن للمعادلة، واختصار الإشارة السالبة على طرفي المعادلة نحصل على الآتي:

$$\int_0^\infty x^2\,e^{-ax^2}\,dx = \frac{1}{4}\sqrt{\frac{\pi}{a^3}} \qquad (8.ب)$$

إن فكرة التفاضل داخل التكامل طريقة جيدة لحساب أنواع مختلفة من التكاملات المحدودة لدوال حدية مضروبة في قوى x. (البديل عن ذلك هو التكامل بطريقة الأجزاء، لكنها أبطأ كثيرًا).

وتأتي التكاملات الجاوسية دومًا في الفيزياء والرياضيات؛ لذا يحبذ عمل جدول مرجعي لنتائج هذا الجزء (وفيها نتائج الأسئلة اللاحقة). وتظهر التكاملات الجاوسية في الميكانيك الإحصائي على صورة على معاملات بولتزمان، حيث تكون الطاقة الدالة المربعة في متغير التكامل (كما هو الحال في الأجزاء 3.6 و 6.4).

السؤال ب.1 : ارسم عكس المشتقة للدالة e^{-x^2}.

السؤال ب.2: اشتق المعادلة (8.ب) مرة أخرى لحساب التكامل $\int_0^\infty x^4 e^{-ax^2}dx$.

السؤال ب.3: إن تكامل $x^n e^{-ax^2}$ سهل الإجراء عندما تكون n فردية.

(أ) احسب $\int_{-\infty}^{\infty} xe^{-ax^2}dx$. (غير مسموح إجراء عمليات حسابية).

(ب) احسب التكامل غير المحدود (عكس المشتقة) للدالّه xe^{-ax2} باستخدام استبدال بسيط.

(ج) احسب $\int_0^\infty xe^{-ax^2}dx$.

(د) اشتق النتيجة السابقة لتحصل على التكامل $\int_0^\infty x^3e^{-ax^2}dx$.

السؤال ب.4: تحتاج أحيانًا إلى تكامل طرف الدالة الجاوسية. من قيمة كبيرة للمتغير x إلى الما لا نهاية. يعني إجراء التكامل

$$\int_x^\infty e^{-t^2}dt = ? \quad \text{عندما } x >> 1.$$

ويمكن إجراء هذا التكامل على النحو الآتي. أولًا تستبدل المتغير $s = t^2$ للحصول على دالة أُسية بسيطة مضروبة في كمية تتناسب مع $s^{-1/2}$. إن المنطقة القريبة من نهاية التكامل السفلى تهيمن على نتيجة التكامل الكلي؛ لذا، فمن المنطق أن ننشر $s^{-1/2}$ بدلالة سلسلة تايلور حول تلك النقطة محتفظين فقط بحدود السلسلة الأولى القليلة. قم بذلك، واحصل على سلسلة نشر للتكامل، واحسب الحدود الثلاثة الأولى من السلسلة بطريقة صريحة، لتحصل على النتيجة الآتية:

$$\int_x^\infty e^{-t^2}dt = e^{-x^2}\left(\frac{1}{2x} - \frac{1}{4x^3} + \frac{3}{8x^5} - \cdots\right).$$

ملحوظة: عندما تكون x كبيرة جدًّا، فإن الحدود القليلة الأولى ستقترب بسرعة إلى النتيجة الصحيحة. لكن إذا حُسب عدد كبير من الحدود، فإن العوامل تكون في البسط في نهاية الأمر، وسنبدأ بالزيادة بسرعة أكبر من زيادة الحدود في المقامات، عندها فإن السلسلة ستزداد حتى تصل الما لا نهاية. وسيحدث ذلك أولًا أو آخِرًا مهما كان كبر x!، ونشر السلاسل من هذا النوع يسمى نشر الاقتراب (افتراضي). إن عمليات النشر هذه مفيدة جدًّا، وإن كانت تؤدي إلى عدم الارتياح أحيانًا.

السؤال ب.5: استخدم طرق السؤال السابق لإيجاد نشر افتراضي لتكامل الدالة $t^2e^{-t^2}$ من x إلى الما لا نهاية عندما تكون $x >> 1$.

السؤال ب.6: عندما تشترط أن عكس تفاضل الدالة e^{-x^2} يساوي صفرًا عندما تكون $x = 0$ وضربها في المعامل $2/\sqrt{\pi}$ فإنها تأخذ اسمًا خاصًّا، وهو دالة الخطأ التي تكتب اختصارًا $erfx$

$$\operatorname{erf} x \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-t^2}dt$$

(أ) بيّن أن $erf(\pm\infty)$ يساوي ± 1.

(ب) احسب التكامل $\int_0^x t^2e^{-t^2}\,dt$ بدلالة دالة الخطأ $\operatorname{erf} x$.

(ج) استخدم طرق السؤال (ب.4) واحصل على صيغة تقريبية لدالة الخطأ عندما تكون $x >> 1$.

ب.2 دالة جاما The Gamma Function

إذا ابتدأنا بالتكامل:

$$\int_0^\infty e^{-ax}\ dx = a^{-1} \qquad (ب.9)$$

واشتققنا مرة بعد مرة بالنسبة إلى المعامل a فإننا سنحصل على النتيجة الآتية:

$$\int_0^\infty x^n e^{-ax}\ dx = (n!)a^{-(n+1)} \qquad (ب.10)$$

وبوضع قيمه $a=1$ فإننا نحصل على صيغة $n!$ على النحو الآتي:

$$n! = \int_0^\infty x^n e^{-x}\,dx \qquad (ب.11)$$

وسنستخدم هذه الصيغة في الجزء اللاحق لاشتقاق تقريب ستيرلنج لحساب $n!$.

ويمكن إجراء التكامل (ب.11) (ليس بالضرورة تحليليًّا) حتى لو كانت n عددًا غير صحيح؛ لذا فإن هذا التكامل يزودنا بطريقة لإنتاج دالة المضروب للأعداد غير الصحيحة. ويسمى التعميم **دالة جاما**، ويرمز إليها بالرمز $\Gamma(n)$. وتعرف هذه الدالة بدلالة تكامل على النحو الآتي:

$$\Gamma(n+1) \equiv \int_0^\infty x^n e^{-x}\, dx \qquad (12.ب)$$

ولأعداد صحيحة من n تصبح على النحو الآتي:

$$\Gamma(n+1) = n! \qquad (13.ب)$$

ولعل أفضل وأسهل صفة من صفات دالة جاما هي علاقة الاسترجاع:

$$\Gamma(n+1) = n\Gamma(n) \qquad (14.ب)$$

وهذه الصيغة في حالة n عدد صحيح، تُعدّ تعريفًا للمضروب، لكنها تصلح أيضًا لقيم غير صحيحة من n، على نحو ما يظهر من التعريف (ب.12). ويمكن ملاحظة أن $\Gamma(n)$ تأخذ قيمًا عاليةً جدًّا، عند $n = 0$، وذلك من التعريف (ب.12). أو من علاقة الاسترجاع. وعندما يكون متغير دالة جاما سالبًا، فإن التعريف (ب.12) يأخذ قيمًا عاليةً جدًّا، لكن لايزال بإمكاننا تعريف دالة جاما (لمتغيرات غير صحيحة) من علاقة الاسترجاع (ب.14). ويبين الشكل (ب.3) رسمًا لدوال جاما لمتغيرات موجبة وسالبة.

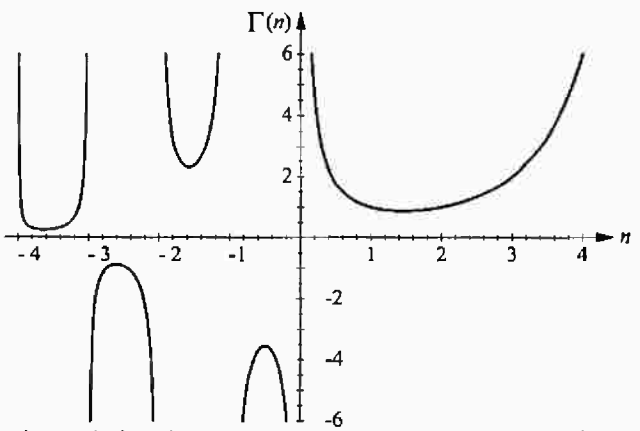
وتعطي دالة جاما معنى لبعض المضروبات الغامضة التي تمر في هذا الكتاب، فعلى سبيل المثال:

$$0! = \Gamma(1) = 1; \quad \left(\frac{d}{2} - 1\right)! = \Gamma\left(\frac{d}{2}\right) \qquad (15.ب)$$

وتظهر دالة جاما عند إجراء كثير من التكاملات المحدودة التي نواجهها في الفيزياء النظرية. وسنرى ذلك مرة أخرى في الجزء (ب.4).

السؤال ب.7: أثبت صيغة الاسترجاع (ب.14) دون أن تفرض n عددًا صحيحًا.

السؤال ب.8: احسب $\Gamma\left(\frac{1}{2}\right)$. (استخدم استبدال المتغيرات لتحويل التكامل إلى تكامل جاوسي)، ومن ثم استخدم معادلة الاسترجاع لحساب $\Gamma\left(\frac{3}{2}\right)$ و $\Gamma\left(-\frac{1}{2}\right)$.



الشكل ب.3: دالة جاما، $\Gamma(n)$. لأعداد صحيحة موجبة، $\Gamma(n) = (n-1)!$. لأعداد موجبة غير صحيحة، يمكن حساب $\Gamma(n)$ من المعادلة (ب.12) في حين أنه لأعداد غير صحيحة سالبة يمكن حساب الدالة من المعادلة (ب.14).

السؤال ب.9: احسب التكامل (ب.12) عدديًّا للحصول على $\Gamma(1/3)$ و $\Gamma(2/3)$ وتوجد متطابقة مفيدة، لكن إثباتها خارج نطاق الكتاب، وهي:

$$\Gamma(n)\Gamma(1-n) = \frac{\pi}{\sin(n\pi)}$$

تحقق من هذه الصيغة رقميًّا لقيمة $n = 1/3$.

ب.3 تقريب ستيرلنج Stirling's Approximation

لقد عُرض تقريب ستيرلنج، في الجزء.(4.2)، على النحو الآتي:

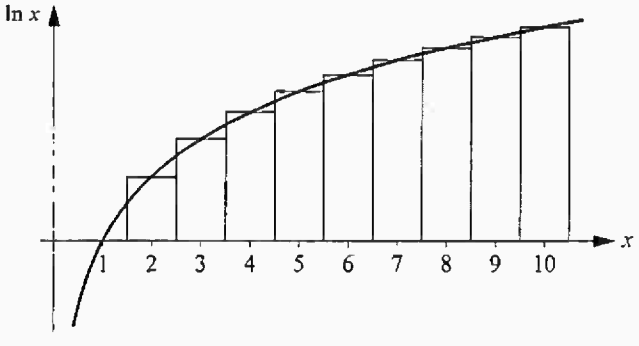
$$n! \approx n^n e^{-n}\sqrt{2\pi n} \qquad (ب.16)$$

وهي صيغة دقيقة عندما تكون $n >> 1$. ونظرًا إلى أهمية هذه الصيغة سنشتقها مرتين وبطريقتين مختلفتين، والاشتقاق الأول هو الأسهل، ولكنه أقل دقة، ونستخدم في هذا الاشتقاق اللوغاريتم الطبيعي لمضروب $n!$, n

$$\begin{aligned} \ln n! &= \ln[n.\ (n-1).(n-2)\ldots 1] \\ &= \ln n + \ln(n-1) + \ln(n-2) + \ldots + \ln 1 \end{aligned} \qquad (ب.17)$$

إن مجموع اللوغاريتمات هذا ، يمكن اعتباره مساحة تحت رسم بياني درجي (انظر الشكل (ب.4)). وإذا كانت n كبيرة، فإن المساحة تحت الرسم البياني تقرب بالمساحة تحت المنحنى المتصل للدالة اللوغاريتمية. وعليه نحصل على العلاقة الآتية:

$$\ln n! \approx \int_0^n \ln x\, dx = (x\ln x - x)\Big|_0^n = n\ln n - n \qquad (ب.18)$$



الشكل ب.4: إن المساحة تحت الرسم البياني لأي قيمة صحيحة n، تساوي $\ln n!$. لكن عندما تكون n كبيرة تضرب تلك المساحة في المساحة تحت المنحنى المتصل للدالة اللوغاريتمية.

وبكلمات أخرى، فإن $n! \approx (n/e)^n$، وتتفق هذه النتيجة مع المعادلة (ب.16) باستثناء العامل النهائي، وعندما تكون n كبيرة جدًّا، كما هو الحال دومًا في الميكانيك الإحصائي، يمكن التخلص من هذا العامل، ونحصل على النتيجة التي نريدها.

ولاشتقاق صيغة أكثر دقة، لمضروب n ، $n!$ ، يمكن إعادة الحسابات السابقة لكن باختيار أكثر حذرًا لنهايات التكامل (انظر السؤال ب.10). لكن للحصول على الصيغة الصحيحة، سنستخدم طريقة مختلفة اختلافًا كاملًا بادئين بالصيغة الصحيحة (ب.11).

$$n! = \int_0^\infty x^n e^{-x}\, dx \qquad \text{(ب.19)}$$

دعنا نفكر في الدالة $x^n e^{-x}$ عندما تكون n كبيرة. إن العامل الأول x^n ، يتزايد بسرعة كبيرة جدًّا كدالة من x في حين أن المعامل e^{-x} يتناقص أيضًا بسرعة كبيرة جدًّا ليصل الصفر. إن حاصل ضرب المعاملين يتزايد في البداية ليصل إلى قيمة عظمى، ثم يتناقص ليصل إلى الصفر، على نحو ما هو مبين في الشكل (ب.5). ويمكن أن نبين أن القيمة القصوى تحدث عند $x = n$ تمامًا، وأن ارتفاعها يساوي $n^n e^{-n}$ (انظر السؤال ب.11). وما نود حسابه هو المساحة تحت المنحنى، التي يمكن حسابها بتقريب الدالة إلى دالة جاوسية. ولإيجاد الدالة الجاوسية التي تتفق مع الدالة الأصلية أفضل ما يكون، تكتب الدالة الأصلية على صورة دالة أسية واحدة على النحو الآتي:

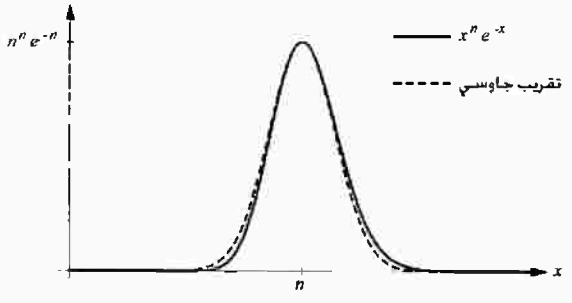
$$x^n e^{-x} = e^{n \ln x - x} \qquad \text{(ب.20)}$$

ومن ثم نعرف $y \equiv x - n$ ، ونعيد كتابة الدالة الأُسية بدلالة y ونصبح جاهزين لنشر اللوغاريتم على النحو الآتي:

$$\begin{aligned} n \ln x - x &= n \ln(n+y) - n - y \\ &= n \ln\left[n\left(1+\frac{y}{n}\right)\right] - n - y \\ &= n \ln n - n + n \ln\left(1+\frac{y}{n}\right) - y \end{aligned} \qquad \text{(ب.21)}$$

وبالقرب من قمة المنحنى، فإن y تكون أقل كثيرًا من n ، وعليه يمكن نشر اللوغاريتم على صورة سلسلة تايلور على النحو الآتي:

$$\ln\left(1+\frac{y}{n}\right) \approx \frac{y}{n} - \frac{1}{2}\left(\frac{y}{n}\right)^2 \qquad \text{(ب.22)}$$



الشكل ب.5: الدالة $x^n e^{-x}$ (الخط المتصل) مرسومة لحالة $n = 50$. إن المساحة تحت المنحنى تساوي $(n!)$. ويبين الخط المتقطع أفضل دالة جاوسية، متفقة مع الدالة $x^n e^{-x}$ ، وتعطى مساحتها تقريب ستيرلنج لمضروب n، $n!$.

ويختصر الحد الخطي في النشر مع $(-y)$الأخيرة في المعادلة (ب.21). وبتجميع ما تبقى من حدود بعضها مع بعض نحصل على التقريب الآتي:

$$x^n e^{-x} \approx n^n e^{-n} e^{-y^2/2n} \text{ , عندما } y = x - n \qquad (23ب)$$

وهذا أفضل تقريب جاوسي لدالة التكامل الدقيقة في المعادلة (ب.19)، وهي مبينة بالخط المتقطع في الشكل (ب.5). وللحصول على $(n!)$ نكامل هذه الدالة من $x = 0$ إلى $x = \infty$. لكن يمكننا بدء التكامل من $x=-\infty$، حيث إن قيم الدالة لقيم x السالبة مهملة على أي حال. وباستخدام صيغة التكامل (ب.6) نحصل على النتيجة الآتية:

$$n! \approx n^n e^{-n} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-y^2/2n}\, dy = n^n e^{-n}\sqrt{2\pi n} \qquad (24ب)$$

التي تتفق مع المعادلة (ب.16).

السؤال ب.10: اختر نهايات التكامل في المعادلة (ب.18) بعناية أكثر لاشتقاق تقريب أكثر دقة لمضروب n، $n!$. (النهاية العليا حرجة أكثر من النهاية السفلى. لا يوجد خيار أفضل من غيره للنهاية السفلى، لكن اعمل أفضل ما يمكن عمله).

السؤال ب.11 : أثبت أن الدالة $x^n e^{-x}$ تصل قيمتها القصوى عند $x = n$.

السؤال ب.12: استخدم جهاز حاسوب لرسم الدالة $x^n e^{-x}$ والتقريب الجاوسي لهذه الدالة للحالات $n = 10,\ 20,\ 50$. لاحظ كيف يتناقص العرض النسبي للقمة (مقارنة بـ n) مع زيادة n. إذا كان جهاز حاسوبك يسمح فأجرِ العملية لأعداد أكبر من n.

السؤال ب. 13: يمكن تحسين تقريب ستيرلنج بالمحافظة على حدود أكثر من سلسلة نشر اللوغاريتم (22.ب). ويمكن نشر الدوال الأسية للحدود الجديدة بدلالة سلاسل تايلور لتعطي دالة متعددة القوى بالمتغير y ، مضروبة في الدالة الجاوسية السابقة نفسها. أجرِ هذا الأسلوب، محتفظًا دومًا بجميع الحدود التي تكون أقل من الحد الأول بقوة واحدة من n. ونظرا إلى أن الدالة الجاوسية تقترب من الصفر عندما تصبح y من رتبة $\sqrt{n}$، فبإمكانك تقدير حجم الحدود المختلفة، وذلك بجعل $y=\sqrt{n}$ ، وفي نهاية العملية يجب أن تحصل على النتيجة الآتية:

$$n! \approx n^n e^{-n}\sqrt{2\pi n}\left(1+\frac{1}{12n}\right)$$

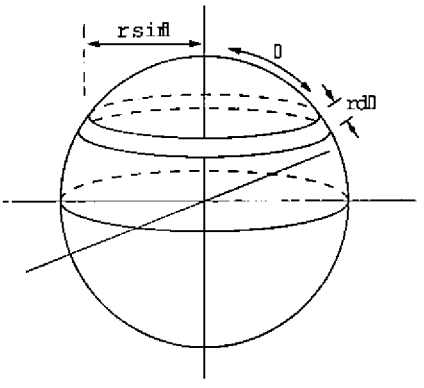
تحقق من دقة هذه الصيغة لقيم $n = 1$ و $n = 10$. (عمليًّا، فإن حد التصحيح هذا نادرًا ما نحتاج إليه، لكنه يزودنا بطريقة جيدة لتقدير الخطأ في تقريب ستيرلنج).

ب.4 مساحة كرة عالية الأبعاد، أبعادها Area of a d-Dimensional Hypersphere d

لقد ذكرنا، في الجزء (2–5) أن «مساحة» السطح لكرة عالية الأبعاد d، ونصف قطرها r تساوي:

$$A_d(r) = \frac{2\pi^{d/2}}{\left(\frac{d}{2}-1\right)!} r^{d-1} = \frac{2\pi^{d/2}}{\Gamma\left(\frac{d}{2}\right)} r^{d-1} \qquad (25.ب)$$

وفي حالة $d = 2$، تعطي هذه الصيغة محيط دائرة $A_2(r) = 2\pi r$، في حين أنه لحالة $d = 3$، فإن الصيغة تعطي



الشكل ب-6: لحساب مساحة سطح الكرة، قسم السطح إلى حلقات، ثم كامل. ولحساب مساحة كرة بأبعاد أكثر من ثلاثة افعل الشيء ذاته.

مساحة سطح الكرة $A_3(r) = 4\pi r^2$. ولحالة $d = 1$، فإنها تعطي 2، عدد النقاط على طرفي جزء من خط مستقيم.

وقبل إثبات المعادلة (ب.25) بوجه عام، لنبدأ بالحالة $d = 3$، كرة حقيقية بثلاثة أبعاد. إن مساحة سطح الكرة يبنى من حلقات، على نحو ما هو مبين في الشكل (ب.6). ولكل حلقة عرض مقداره $rd\theta$ ومحيط $A_2(r \sin\theta)$، مساوٍ $2\pi(r \sin\theta)$، وعليه، فإن المساحة الكلية للكرة تصبح على النحو الآتي:

$$A_3(r) = \int_0^{\pi} A_2(r\sin\theta)\, r\, d\theta = 2\pi r^2 \int_0^{\pi} \sin\theta\, d\theta = 4\pi r^2 \qquad (26.ب)$$

وبحسابات مماثلة كليًّا، يمكننا إثبات المعادلة (ب.25) لأي من قيم d مفترضين أنها تصلح للأبعاد $d-1$.

تخيل بناء سطح لكرة بأبعاد d من حلقات بأبعاد $d-1$، كل منها بعرض $rd\theta$ وبمحيط $A_{d-1}(r\sin\theta)$. إن المساحة الكلية هي مرة أخرى التكامل من 0 إلى π:

$$\begin{aligned} A_d(r) &= \int_0^{\pi} A_{d-1}(r\sin\theta)\, r\, d\theta \\ &= \int_0^{\pi} \frac{2\pi^{(d-1)/2}}{\Gamma\left(\frac{d-1}{2}\right)} (r\sin\theta)^{d-2}\, r\, d\theta \\ &= \frac{2\pi^{(d-1)/2}}{\Gamma\left(\frac{d-1}{2}\right)} r^{d-1} \int_0^{\pi} (\sin\theta)^{d-2}\, d\theta \end{aligned} \qquad (27.ب)$$

وفي السؤال (ب.14) سنتبين أن:

$$\int_0^{\pi} (\sin\theta)^n\, d\theta = \frac{\sqrt{\pi}\,\Gamma\left(\frac{n}{2}+\frac{1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n}{2}+1\right)} \qquad (28.ب)$$

وعليه، فإن:

$$A_d(r) = \frac{2\pi^{\frac{d-1}{2}}}{\Gamma\left(\frac{d-1}{2}\right)} r^{d-1} \cdot \frac{\pi^{\frac{1}{2}}\Gamma\left(\frac{d}{2}-\frac{1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{d}{2}\right)} = \frac{2\pi^{d/2}}{\Gamma\left(\frac{d}{2}\right)} r^{d-1} \qquad (29.ب)$$

تمامًا كما سبق أن ذكرنا.

السؤال ب.14: تُثبت المعادلة (ب.28) يتم بطريقة الاستنباط.

(أ) تحقق من صحة الصيغة للحالتين $n = 0$، $n = 1$.

(ب) بيّن أن:

$$\int_0^{\pi} (\sin\theta)^n \, d\theta = \left(\frac{n-1}{n}\right) \int_0^{\pi} (\sin\theta)^{n-2} \, d\theta$$

(اكتب $(\sin\theta)^n$ أولًا على الصورة $(\sin\theta)^{2-n}(1-\cos^2\theta)$. وكامل الحد الثاني بطريقة الأجزا. مفاضلًا حدًّا واحدًا من $\cos\theta$ ومكاملًا ما تبقى).

(ج) استخدم نتائج الجزء (أ) والجزء (ب) لإثبات الصيغة (ب.28) بالاستنباط.

السؤال ب.15: طريقة أفضل، ولكنها مليئة بالخدع الرياضية لاشتقاق الصيغة (ب.25) وتشبه الطريق التي استخدمت في الجزء (ب.1) لحساب التكامل الجاوسي الأساسي. الفكرة هي التعامل مع تكامل الدالة e^{-r^2} على جميع الفضاء بأبعاد d.

(أ) أجرِ التكامل أولًا في الإحداثيات الكارتيزية، ويجب أن تحصل على $\pi^{d/2}$.

(ب) نظرًا إلى أن التكامل متماثل كرويًّا، فيمكن إجراء التكامل في محاور كروية ذات أبعاد d. اشرح لماذا تعطي التكاملات الزاوية المعامل $A_d(1)$. $\int_0^{\infty} r^{d-1} e^{-r^2} dr$، مساحة كرة بأبعاد d ونصف قطرها الوحد الواحدة. وعليه بيّن أن التكامل جاوسيّ.

(ج) أجرِ التكامل بدلالة دالة جاما، وعندها تكون قد اشتققت المعادلة (ب.25).

ب.5 تكاملات الإحصاء الكمي Integrals of Quantum Statistics

كثيرًا ما واجهنا في الإحصاء الكمي (الوحدة السابعة) تكاملات من النوع الآتي:

$$\int_0^{\infty} \frac{x^n}{e^x \pm 1} dx \tag{ب.30}$$

عند الجمع على حالات نظام من البوزونات (الإشارة السالبة في المقام)، أو نظام من الفيرميونات الإشارة الموجبة في المقام. وحقًّا، يمكن إجراء هذه التكاملات عدديًّا، لكن عندما تكون n عددًا صحيحًا فرديًّا، يمكن عندها كتابة الجواب تمامًا بدلالة π والخطوة الأولى هي كتابة التكامل على صورة سلسلة لا نهائية، واضعين لحظة، المعامل x^n جانبًا، ويلاحظ إمكانية كتابة ما تبقى من دالة التكامل على صورة متوالية هندسية، فنحصل على الآتي:

$$\begin{aligned} \frac{1}{e^x \pm 1} = \frac{e^{-x}}{1 \pm e^{-x}} &= e^{-x} \mp (e^{-x})^2 + (e^{-x})^3 \mp \cdots \\ &= e^{-x} \mp e^{-2x} + e^{-3x} \mp e^{-4x} + \cdots \end{aligned} \tag{ب.31}$$

ومن السهل الآن الضرب في الحد x^n ومن ثم التكامل حدًّا حدًّا، وفي حالة $n = 1$ نحصل على الآتي:

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} \frac{x}{e^x \pm 1} dx &= \int_0^{\infty} (xe^{-x} \mp xe^{-2x} + xe^{-3x} \mp \cdots) \, dx \\ &= 1 \mp \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{4^2} + \cdots \end{aligned} \tag{ب.32}$$

إن هذا النوع من المتوالية اللا نهائية يتكرر كثيرًا في الرياضيات؛ لذا، فقد سمّاها علماء الرياضيات دالة **زيتا لريمان** $\zeta(n)$، التي تعرف على النحو الآتي:

$$\zeta(n) \equiv 1 + \frac{1}{2^n} + \frac{1}{3^n} + \cdots = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^n}. \tag{ب.33}$$

وعليه، يمكننا الكتابة بسهولة:

$$\int_0^{\infty} \frac{x}{e^x - 1} dx = \zeta(2) \tag{ب.34}$$

وعندما تحتوي دالة التكامل الإشارة الموجبة في المقام، فإن المتتالية تتغير بين الموجب والسالب؛ لذا، فإننا نحتاج إلى بعض الإجراءات لنحصل على:

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} \frac{x}{e^x - 1} dx &= \left(1 + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \cdots\right) - 2\left(\frac{1}{2^2} + \frac{1}{4^2} + \frac{1}{6^2} + \cdots\right) \\ &= \zeta(2) - \frac{2}{2^2}\left(1 + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \cdots\right) \\ &= \zeta(2) - \frac{1}{2}\zeta(2) \\ &= \frac{1}{2}\zeta(2). \end{aligned} \tag{ب.35}$$

وإليك لأصعب قليلًا (انظر السؤال ب.17) اشتقاق النتيجة الأكثر عمومية:

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} \frac{x^n}{e^x - 1} dx &= \Gamma(n+1)\zeta(n+1) \\ \int_0^{\infty} \frac{x^n}{e^x - 1} dx &= \left(1 - \frac{1}{2^n}\right)\Gamma(n+1)\zeta(n+1) \end{aligned} \tag{ب.36}$$

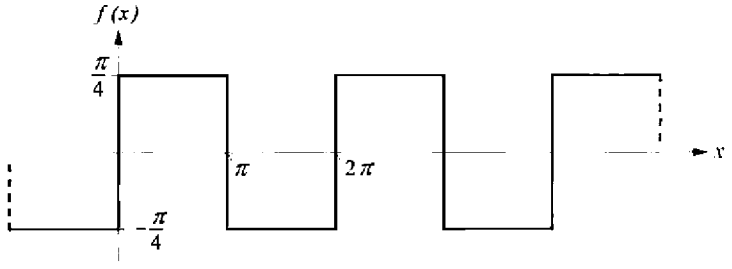
(وعندما تكون n عددًا صحيحًا نحصل على $\Gamma(n+1) = n!$)، والمشكلة الآن، وببساطة هي جمع المتوالية اللا نهائية (ب.33)، التي تعرف بدالة زيتا لريمان. لكن لسوء الحظ، فالحصول على جواب بسيط ليس بالشيء السهل على الإطلاق. وسنحاول الحصول على ذلك الجواب بطريقة مليئة بالحيل الرياضية، ونستخدم سلاسل فوريير[96].

وتعتمد طريقة الحل على اختيار دالة مربعة، وبدورة مقدارها 2π وسعة $\pi / 4$. (انظر الشكل ب.7). وتنص نظرية فوريير على إمكانية كتابة أي دالة دورية بدلالة تركيب من الجيوب وجيوب التمام. ولدالة فردية كالدالة التي نتعامل معها، فإن الجيوب فقط هي التي نحتاج إليها، وعليه يمكن كتابة العلاقة الآتية:

$$f(x) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \sin(kx), \tag{ب.37}$$

---

(96) لا أعلم كيف فكر أحدهم في هذه الطريقة، ولكنني وجدتها في كتاب Mandl 1988.



الشكل ب.7 : دالة موجية مربعة وبدورة 2π وسعة $\pi / 4$. إن سلسلة فوريير لهذه الدالة تعطى قيمًا للدالة $\xi(n)$ عندما تكون n زوجية.

لمجموعة بعض المعاملات a_k. ويلاحظ أن أول موجة جيبية في المجموع، لها الدورة نفسها التي تمتلكها الدالة $f(x)$، في حين تأخذ الموجات المتتالية دورات مساوية 1/4 ,1/3 ,2 / 1 دورة الدالة $f(x)$ وهكذا. ولإيجاد حل للمعاملات نضرب طرفي المعادلة في الدالة $\sin(jx)$. (حيث j أي عدد صحيح موجب)، ومن ثم نكامل على دورة واحدة للدالة:

$$\int_0^{2\pi} f(x)sin(jx)dx = \sum_{k=1}^{\infty} a_x \int_0^{2\pi} sin(kx)sin(jx)dx \qquad (38.ب)$$

ويساوي التكامل على الجهة اليمنى من المعادلة صفرًا، إلا إذا كان $k = j$، عندها تكون قيمته π، محتفظين فقط بهذا الحد اللا صفري، وبإعادة تسمية $j \rightarrow k$، نحصل لأي قيمة من k على الآتي:

$$a_k = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(x)sin(kx)dx = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} f(x)sin(kx)dx \qquad (39.ب)$$

وتعطي هذه الصيغة معاملات فوريير لأي دالة فردية $f(x)$ ذات دورة 2π. وتكون قيم معاملات فوريير لدالة الموجة المربعة على النحو الآتي:

$$a_k = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} \frac{\pi}{4} sin(kx)dx = \begin{cases} 1/k & \text{for } k = 1,3,5,\cdots \\ 0 & \text{for } k = 2,4,6,\cdots \end{cases} \qquad (40.ب)$$

وعليه، فمن قيم x الواقعة بين الصفر و π، ($0 < x < \pi$)، نحصل على الآتي:

$$\frac{\pi}{4} = \sum_{\text{odd } k} \frac{\sin(kx)}{k} \qquad (41.ب)$$

والخطوة الأخيرة هي تكامل هذه الصيغة بالتتابع بالنسبة إلى المتغير x، ومن ثم حساب النتيجة عند $x = \pi / 2$، وبالتكامل بحرص من $x = 0$ إلى $x = x'$ نحصل على:

$$\frac{\pi x'}{4} \sum_{\text{odd } k} \frac{1}{k}\int_0^{x'} \sin(kx)dx = \sum_{\text{odd } k} \frac{1}{k^2}(1 - \cos kx') \qquad (42.ب)$$

وبتعويض $x' = \pi / 2$ نحصل على النتيجة الآتية:

$$\frac{\pi^2}{8} = \sum_{\text{odd } k} \frac{1}{k^2} \qquad (43.ب)$$

لكن بالجمع على جميع الأعداد الصحيحة الموجبة نحصل على:

$$\begin{aligned}\zeta(2) &= \sum_{\text{odd } k}\frac{1}{k^2}+\sum_{\text{even } k}\frac{1}{k^2}\\ &= \frac{\pi^2}{8}+\left(\frac{1}{2^2}+\frac{1}{4^2}+\frac{1}{6^2}+\cdots\right)\\ &= \frac{\pi^2}{8}+\frac{1}{4}\left(\frac{1}{1^2}+\frac{1}{2^2}+\frac{1}{3^2}+\cdots\right)\\ &= \frac{\pi^2}{8}+\frac{1}{4}\zeta(2)\end{aligned} \tag{ب.44}$$

وبكلام آخر:

$$\zeta(2)=\frac{4}{3}\frac{\pi^2}{8}=\frac{\pi^2}{6}. \tag{ب.45}$$

وتكفي هذه النتيجة لحساب التكامل الأصلي (ب.30) في حالة $n=1$ ومع أي إشارة في المقام. ولقيم فردية أعلى من n فإن الطريقة هي أخذ مشتقات أكثر للمعادلة (ب.24)، ومن ثم مرة أخرى حساب النتيجة عند $\pi/2$، والتعامل مع المتتالية (انظر السؤال ب.19). ولسوء الحظ، فإن هذه الطريقة لا تعطي أي قيمة للدالة $\zeta(n)$ عندما تكون n فردية، وفي الحقيقة لا يمكن كتابتها بدلالة π؛ لذا يجب حسابها عدديًّا.

السؤال ب.17: اشتق الصيغة العامة للتكامل (ب.36).

السؤال ب.18: استخدم جهاز الحاسوب لرسم مجموع الأمواج الجيبية على الطرف الأيمن للمعادلة (ب.41)، موقفًا المجموع أولًا عند $k=1$ وبعدها عند $k=3,5,15,25$. ولاحظ كيف أن المتتالية تقترب من دالة الموجة المربعة التي بدأنا بها، لكن الاقتراب ليس سريعًا.

السؤال ب. 19: كامل المعادلة (ب.42) مرتين إضافيتين، ثم عوض $x=\pi/2$ للحصول على صيغة للمتتالية $\sum(1/k^4)$. استخدم هذه الصيغة لتبين أن $\zeta(4)=\pi^4/90$، ومن ثم احسب التكاملات (ب.36) في حالة $n=3$. وضّح لماذا لا تعطي هذه الطريقة قيمة للدالة $\zeta(3)$.

السؤال ب.20: احسب المعادلة (ب.41) عند $x=\pi/2$ للحصول على المتتالية المشهورة π للنسبة التقريبية. ما عدد الحدود من هذه المتتالية التي يجب حسابها للحصول على قيمه π بثلاثة أرقام معنوية؟

السؤال ب.21: في حسابنا للسعة الحرارية لغاز فيرمي المتشعب، في الجزء (7. 3) احتجنا إلى التكامل.

$$\int_{-\infty}^{\infty}\frac{x^2e^x}{(e^x+1)^2}dx=\frac{\pi^2}{3}$$

ولاشتقاق هذه النتيجة، بيّن أولًا أن دالة التكامل دالة زوجية، وعليه يكفي التكامل من 0 إلى ما لا نهاية، ومن ثمّ اضرب في اثنين، وبعد ذلك كامل بطريقة الأجزاء، واربط هذا التكامل بالتكامل في المعادلة (ب.35).

السؤال ب.22: احسب الدالة $\zeta(3)$ بجمع المتتالية عدديًّا. كم حدًّا يجب الاحتفاظ به للحصول على جواب دقيق لغاية ثلاثة أرقام معنوية؟

Suggested Reading اقتراحات للقراءة

Undergraduate Thermal Physics Texts

Callen, Herbert B., Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics, second edition (Wiley, New York, 1985). Develops thermodynamics from an abstract, logically rigorous approach. The application chapters are somewhat easier, and clearly written.

Carrington, Gerald, Basic Thermodynamics (Oxford University Press, Oxford, 1994). A nice introduction that sticks to pure classical thermodynamics.

Kittel, Charles, and Herbert Kroemer, Thermal Physics, second edition (W. H. Freeman, San Francisco, 1980). An insightful text with a great variety of modern applications.

Mandl, F., Statistical Physics, second edition (Wiley, chichester, 1988). A clearly written text that emphasizes the statistical approach.

Reif, F., Fundamentals of Statistical and Thermal Physics (McGraw-Hill, New York, 1965). More advanced than most undergraduate texts. Emphasizes the statistical approach and includes extensive chapters on transport theory.

Stowe, Keith, Introduction to Statistical Mechanics and Thermodynamics (Wiley, New York 1984). Perhaps the easiest book that takes the statistical approach. Very well written, but unfortunately marred by an incorrect treatment of chemical potential.

Zemansky, Mark W., and Richard H. Dittman, Heat and Thermodynamics, seventh edition (McGraw-Hill, New York, 1997). A classic text that includes good descriptions of experimental results and techniques. Earlier editions contain a wealth of material that didn't make it into the most recent edition; I especially like the fifth edition (1968, written by Zemansky alone).

Graduate-Level Texts

Chandler, David, Introduction to Ivfodern Statistical Mechanics (Oxford University Press, New York, 1987). My favorite advanced text: short and well written, with lots of inviting problems. A partial solution manual is also available.

Landau, L. D., and E. M. Lifeshitz, Statistical Physics, third edition, Part I, trans. J. B. Sykes and M. J. Kearsley (Pergamon Press, Oxford, 1980). An authoritative classic.

Pathria, R. K., Statistical Mechanics second edition (Butterworth-Heinemann, Oxford, 1996). Good systematic coverage of statistical mechanics.

Pippard, A. B., The Elements of Classical Thermodynamics (Cambridge University Press, Cambridge, 1957). A concise summary of the theory as well as several applications.

Reichl, L., A Modern Course in Statistical Physics, second edition (Wiley, New York, 1998). Encyclopedic in coverage and very advanced.

Introductory Texts

Ambegaokar, Vi nay, Reasoning About Luck: Probability and its Uses in Physics (Cambridge University Press, Cambridge, 1996). An elementary text that teaches probability theory and touches on many physical applications.

Fenn, John B., Engines, Energy, and Entropy: A Thermodynamics Primer (W. H. Freeman, San Francisco, 1982). A gentle introduction to classical thermodynamics, emphasizing everyday applications and featuring cartoons of Charlie the Caveman.

Feynman, Richard P., Robert B. Leighton, and Matthew Sands, The Feynman Lectures on Physics (Addison-vVesley, Reading, MA, 1963). Chapters 1, 3, 4, 6, and 39-46 treat topics in thermal physics, with Feynman's incredibly high density of deep insights per page.

Moore, Thomas A., Six Ideas that Shaped Physics, Unit T (McGraw-Hill, New York, 1998). This very clearly written text inspired my approach to the second law in Sections 2.2 and 2.3.

Reif, F., Statistical Physics: Berkeley Physics Course-Volume 5 (McGraw-Hill, New York, 1967). A rather advanced introduction, but much more leisurely than Reif (1965).

Popularizations

Atkins, P. VV., The Second Law (Scientific American Books, New York, 1984). A nice coffee-table book with lots of pictures.

Goldstein, Martin, and Inge F. Goldstein, The Refrigerator and the Universe (Harvard University Press, Cambridge, MA, 1993). An extensive tour of thermal physics and its diverse applications.

Zemansky, Mark W., Temperatures Very Low and Very High (Van Nostrand, Princeton, 1964; reprinted by Dover, New York, 1981). A short paperback that focuses on physics at extreme temperatures. Very enjoyable reading, except when the author slips into textbook mode.

Engines and Refrigerators

Moran, Michael J., and Howard N. Shapiro, Fundamentals of Engineering Thermodynam-ics, third edition (wiley, New York, 1995). One of several good encyclopedic texts.

Whalley, P. B., Basic Engineering Thermodynamics (Oxford University Press, Oxford, 1992). Refreshingly concise.

Chemical Thermodynamics

Atkins, P. W., Physical Chemistry, sixth edition (W. H. Freeman, New York, 1998). One of several good physical chemistry texts, packed with information.

Findlay, Alexander, Phase Rule, ninth edition, revised by A. N. Campbell and N. O. Smith (Dover, New York, 1951). Everything you ever wanted to know about phase diagrams.

Haasen, Peter, Physical Metallurgy, third edition, trans. Janet Mordike (Cambridge University Press, Cambridge, 1996). An authoritative monograph that doesn't shy away from the physics.

Rock, Peter A., Chemical Thermodynamics (University Science Books, Mill Valley, CA, 1983). A well-written introduction to chemical thermodynamics with plenty of interesting applications.

Smith, E. Brian, Basic Chemical Thermodynamics, fourth edition (Oxford University Press, Oxford, 1990). A nice short book that covers the basics.

Biology

Asimov, Isaac, Life and Energy (Doubleday, Garden City, NY, 1962). A popular account of thermodynamics and its applications in biochemistry. Old but still very good.

Stryer, Lubert, Biochemistry, fourth edition (W. H. Freeman, New York, 1995). Marvelously detailed, though not as quantitative as one might like.

Tinoco, Ignacio, Jr., Kenneth Sauer, and James C. Wang, Physical Chemistry: Principles and Applications in Biological Sciences, third edition (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995). Less comprehensive than a standard physical chemistry text, but with many more biochemical applications.

Earth and Environmental Science

Anderson, G. M., Thermodynamics ofNatural Systems (Wiley, New York, 1996). A practical introduction to chemical thermodynamics, with a special emphasis on geological applications.

Bohren, Craig F., Clouds in a Glass ofBeer: Simple Experiments in Atmospheric Physics (Wiley, New York, 1987). Short, elementary, and delightful. Begins by observing that "a glass of beer is a cloud inside out." Bohren has also written a sequel, What Light Through Yonder Window Breaks? (Wiley, New York, 1991).

Bohren, Craig F., and Bruce A. Albrecht, Atmospheric Tlwrmodynamics (Oxford University Press, New York, 1998). Though intended for meteorology students, this textbook will appeal to anyone who knows basic physics and is curious about the everyday world. Great fun to read and full of food for thought.

Harte, John, Consider a Spherical Cow; A Course in Environmental Problem Solving (University Science Books, Sausalito, CA, 1988). A wonder:fy.Ybook that applies undergraduate-level physics and mathematics to dozens of interesting environmental problems.

Kern, Raymond, and Alain Weisbrod, Thermodynamics for Geologists, trans. Duncan McKie (Freeman, Cooper and Company, San Francisco, 1967). Features a nice selection of worked examples.

Nordstrom, Darrell Kirk, and James L. Munoz, Geodlemical Thermodynamics, second edition (Blackwell Scientific Publications, Palo Alto, CA, 1994). A well-written advanced textbook for serious geochemists.

Astrophysics and Cosmology

Carroll, Bradley W., and Dale A. Ostlie, An Introduction to !vfodern Astrophysics (Addison-Wesley, Reading, MA, 1996). A clear, comprehensive introduction to astrophysics at the intermediate undergraduate level.

Peebles, P. J. E., Principles ofPhysical Cosmology (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1993). An advanced treatise on cosmology with a detailed discussion of the thermal history of the early universe.

Shu, Frank H., The Physical Universe: An Introduction to Astronomy (University Science Books, Mill Valley, CA, 1982). An astrophysics book for physics students, disguised as an introductory astronomy text. Full of physical insight, this book portrays all of astrophysics as a competition between gravity and the second law of thermodynamics.

Weinberg, Steven, The First Three Minutes (Basic Books, New York, 1977). A classic account of the history of the early universe. Written for lay readers, yet gives a physicist plenty to think about.

Condensed Matter Physics

Ashcroft, Neil W., and N. David Mermin, Solid State Physics (Saunders College, Philadelphia, 1976). An excellent text that is somewhat more advanced than Kittel (below).

Collings, Peter J., Liquid Crystals: Nature's Delicate Phase of Matter (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1990). A short, elementary overview of both the basic physics and applications

Goodstein, David L., States of Jl.latter (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1975; reprinted by Dover, New York, 1985). A well written graduate-level text that surveys the properties of gases, liquids, and solids.

Gopal, E. S. R., Specific Heats at Low Temperatures (Plenum, New York, 1966). A nice short monograph that emphasizes comparisons between theory and experiment.

Kittel, Charles, Introduction to Solid State Physics, seventh edition (Wiley, New York, 1996). The classic undergraduate text.

Wilks, J., and D. S. Betts, An Introduction to Liquid Helium, second edition (Oxford University Press, Oxford, 1987). A concise and reasonably accessible overview.

Yeomans, J. M" Statistical Mechanics of Phase 'Transitions (Oxford University Press, Oxford, 1992). A brief, readable introduction to the theory of critical phenomena.

Computer Simulations

Gould, Harvey, and Jan Tobochnik, An Introduction to Computer Simulation Methods, second edition (Addison-Wesley, Reading, MA, 1996). Covers far-ranging applications at a variety of levels, including plenty of statistical mechanics.

Whitney, Charles A., Random Processes in Physical Systems: An Introduction to Probability-Based Computer Simulations (Wiley, New York, 1990). A good elementary textbook that takes you from coin flipping to stellar pulsations.

History and Philosophy

Bailyn, Martin, A Survey of Thermodynamics (American Institute of Physics, New York, 1994). A textbook that gives a good deal of history on each topic covered.

Brush, Stephen G., The Kind of !vfotion We Call Heat: A History of the Kinetic Theory of Gases in the 19th Century (North-Holland, Amsterdam, 1976). A very scholarly treatment.

Kestin, Joseph (ed.), The Second Law of Thermodynamics (Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, PA, 1976). Reprints (in English) of original papers by Carnot, Clausius, Thomson, and others, with helpful editorial comments.

Leff, Harvey S., and Andrew F. Rex (eds.), Maxwell's Demon: Entropy, Information, Computing (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1990). An anthology of important papers on the meaning of entropy.

Mendelssohn, K., The Quest for Absolute Zero, second edition (Taylor & Francis, London, 1977). A popular history of low-temperature physics, from the liquefaction of oxygen to the properties of superfluid helium.

Von Baeyer, Hans Christian, !vfaxwell's Demon: Why Warmth Disperses as Time Passes (Random House, New York, 1998). A brief popular history of thermal physics with an emphasis on the deeper issues. Highly recommended.

Tables of Thermodynamic Data

Keenan, Joseph Frederick G. Keyes, Philip G. Hill, and Joan G. Moore, Steam Tables (S.!' Units) (Wiley, New York, 1978). Fascinating.

Lide, David R. (ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 75th edition (Chemical Rubber Company, Boca Raton, FL, 1994). Cumbersome but widely available. Editions published since 1990 are better organized and use more modern units.

National Research Council, International Critical Tables ofNumerical Data (McGraw-Hill, New York, 1926-33). A seven-volume compendium of a great variety of data.

Reynolds, William C., Thermodynamic Properties in S1 (Stanford University Dept. of Mechanical Engineering, Stanford, CA, 1979). A handy compilation of properties of 40 important fluids.

Vargaftik, N. B., Handbook of Physical Properties of Liquids and Gases (Hemisphere, Washington, DC, 1997). Detailed property tables for a variety of fluids.

Woolley, Harold W., Russell B. Scott, and F. G. Brickwedde, "Compilation of Thermal Properties of Hydrogen in its Various Isotopic and Ortho-Para Modifications," Journal of Research of the National B~of Standards 41, 379-475 (1948). Definitive but not very accessible.

* * *

An awkward aspect of reading any new textbook is getting used to the notation. Fortunately, many of the notations of thermal physics have become widely accepted and standardized through decades of use. There are several important exceptions, however, including the following:

Quantity	This book	Other symbols
Total energy	U	E
Multiplicity	Ω	W, g
Helmholtz free energy	F	A
Gibbs free energy	G	F
Grand free energy	Φ	Ω
Partition function	Z	Q, q
Maxwell speed distribution	$D(v)$	$P(v)$
Quantum length	ℓ_Q	λ, λ_T
Quantum volume	v_Q	$\lambda_T^3, 1/n_Q$
Fermi-Dirac distribution	$\bar{n}_{\mathrm{FD}}(\epsilon)$	$f_{(\epsilon)}$
Density of states	$g(\epsilon)$	$D_{(\epsilon)}$

بيانات مرجعية

الثوابت الفيزيائية

$$
\begin{aligned}
k &= 1.381 \times 10^{-23}\ \text{J / K} \\
&= 8.617 \times 10^{-5}\ \text{eV/ K} \\
N_A &= 6.022 \times 10^{23} \\
R &= 8.315\ \text{J/mol·K} \\
h &= 6.626 \times 10^{-34}\ \text{J·s} \\
&= 4.136 \times 10\text{-}^{15}\ \text{eV·s} \\
c &= 2.998 \times 10^{8}\ \text{m/}s \\
G &= 6.673 \times 10^{-11}\ \text{N.m}^2\text{/kg}^2 \\
e &= 1.602 \times 10^{-19}\ \text{C} \\
\text{m}_e &= 9.109 \times 10^{-31}\ \text{kg} \\
m_p &= 1.673 \times 10^{-27}\ \text{kg}
\end{aligned}
$$

تحويلات الوحدة

$$
\begin{aligned}
1\ \text{atm} &= 1.013\ \text{bar} = 1.013 \times 10^{5}\ \text{N / m}^2 \\
&= 14.7\ \text{lb/in}^2 = 760\ \text{mm Hg} \\
(T\ \text{in °C}) &= (T\ \text{in K}) - 273.15 \\
(T\ \text{in °F}) &= \frac{9}{5}\ (\text{T in °C}) + 32 \\
1\ \text{°R} &= \frac{5}{9}\ \text{K} \\
1\ \text{cal} &= 4.186\ \text{J} \\
1\ \text{Btu} &= 1054\ \text{J} \\
1\ \text{eV} &= 1.602 \times 10^{-19}\ \text{J} \\
1\ \text{u} &= 1.661 \times 10^{-27}\ \text{kg}
\end{aligned}
$$

العدد الذري (أعلى اليسار) هو عدد البروتونات في النواة. وتقاس الكتلة الذرية (أسفل) بتوافر النظائر في سطح الأرض. وترتبط الكتل الذرية بكتلة نظير كربون -12 الذي حُدِّد بأنه يساوي تمامًا 12 وحدة كتلة ذرية مجتمعة. وتتراوح الشكوك من 1-9 في آخر رقم عشري. وغالبًا ما تتباين وفرة النظائر النسبية، في كل من العينات الطبيعية والتجارية. ويعني الرقم الموجود بين الأقواس كتلة النظير الأطول عمرًا لذلك العنصر- لا وجود لنظير ثابت. ومع ذلك، فعلى الرغم من أنه لا يوجد لكل من Th, Pa, U نظائر ثابتة، لكنها تتمتع بخصائص تركيبات التربة، ويمكن إعطاؤها كتلًا موزونة. وبالنسبة إلى العناصر من 110-112، فقد وردت أعداد كتل النظائر المعروفة مأخوذة من مراجعة الفيزياء الجزيئية، المصدر: مجلة الفيزياء الأوروبية، (1998).

الجدول الدوري للعناصر

hydrogen 1 H 1.0079																	helium 2 He 4.0026
lithium 3 Li 6.941	beryllium 4 Be 9.0122											boron 5 B 10.811	carbon 6 C 12.011	nitrogen 7 N 14.007	oxygen 8 O 15.999	fluorine 9 F 18.998	neon 10 Ne 20.180
sodium 11 Na 22.990	magnesium 12 Mg 24.305											aluminium 13 Al 26.982	silicon 14 Si 28.086	phosphorus 15 P 30.974	sulfur 16 S 32.065	chlorine 17 Cl 35.453	argon 18 Ar 39.948
potassium 19 K 39.098	calcium 20 Ca 40.078		scandium 21 Sc 44.956	titanium 22 Ti 47.867	vanadium 23 V 50.942	chromium 24 Cr 51.996	manganese 25 Mn 54.938	iron 26 Fe 55.845	cobalt 27 Co 58.933	nickel 28 Ni 58.693	copper 29 Cu 63.546	zinc 30 Zn 65.39	gallium 31 Ga 69.723	germanium 32 Ge 72.61	arsenic 33 As 74.922	selenium 34 Se 78.96	bromine 35 Br 79.904	krypton 36 Kr 83.80
rubidium 37 Rb 85.468	strontium 38 Sr 87.62		yttrium 39 Y 88.906	zirconium 40 Zr 91.224	niobium 41 Nb 92.906	molybdenum 42 Mo 95.94	technetium 43 Tc [98]	ruthenium 44 Ru 101.07	rhodium 45 Rh 102.91	palladium 46 Pd 106.42	silver 47 Ag 107.87	cadmium 48 Cd 112.41	indium 49 In 114.82	tin 50 Sn 118.71	antimony 51 Sb 121.76	tellurium 52 Te 127.60	iodine 53 I 126.90	xenon 54 Xe 131.29
caesium 55 Cs 132.91	barium 56 Ba 137.33	57-70 *	lutetium 71 Lu 174.97	hafnium 72 Hf 178.49	tantalum 73 Ta 180.95	tungsten 74 W 183.84	rhenium 75 Re 186.21	osmium 76 Os 190.23	iridium 77 Ir 192.22	platinum 78 Pt 195.08	gold 79 Au 196.97	mercury 80 Hg 200.59	thallium 81 Tl 204.38	lead 82 Pb 207.2	bismuth 83 Bi 208.98	polonium 84 Po [209]	astatine 85 At [210]	radon 86 Rn [222]
francium 87 Fr [223]	radium 88 Ra [226]	89-102 * *	lawrencium 103 Lr [262]	rutherfordium 104 Rf [261]	dubnium 105 Db [262]	seaborgium 106 Sg [266]	bohrium 107 Bh [264]	hassium 108 Hs [269]	meitnerium 109 Mt [268]	ununnilium 110 Uun [271]	unununium 111 Uuu [272]	ununbium 112 Uub [277]		ununquadium 114 Uuq [289]				

*Lanthanide series	lanthanum 57 La 138.91	cerium 58 Ce 140.12	praseodymium 59 Pr 140.91	neodymium 60 Nd 144.24	promethium 61 Pm [145]	samarium 62 Sm 150.36	europium 63 Eu 151.96	gadolinium 64 Gd 157.25	terbium 65 Tb 158.93	dysprosium 66 Dy 162.50	holmium 67 Ho 164.93	erbium 68 Er 167.26	thulium 69 Tm 168.93	ytterbium 70 Yb 173.04
**Actinide series	actinium 89 Ac [227]	thorium 90 Th 232.04	protactinium 91 Pa 231.04	uranium 92 U 238.03	neptunium 93 Np [237]	plutonium 94 Pu [244]	americium 95 Am [243]	curium 96 Cm [247]	berkelium 97 Bk [247]	californium 98 Cf [251]	einsteinium 99 Es [254]	fermium 100 Fm [257]	mendelevium 101 Md [258]	nobelium 102 No [259]

الخصائص الحرارية للمواد المختارة

إن جميع القيم الواردة في هذا الجدول تخص "مولًا" واحدًا من المادة على أساس 298K, 1 bar. وتمثل المعادلة الكيميائية الآتية حالة المادة، سواء أكانت صلبة (s)، سائلة (l)، غازية (g)، أو المحلول المائي (aq). وعند وجود أكثر من حالة صلبة معروفة، فيُعطى الاسم الفلزّي أو التركيب البلوري. أما البيانات الخاصة بالمحلول المائي فهي بتركيز مقدار "مول" واحد لكل كيلوجرام من الماء. ويمثل المحتوي الحراري وتكوين جيبس الحر للطاقة، $\Delta_f G, \Delta_f H$ التغيرات في H وG عند تكوين مول واحد من المادة بدءًا بالعناصر في أكثر حالاتها النقية الثابتة (مثل،C،-جرافيت-O2-g-..إلخ). وإذا ما أردنا التوصل إلى قيمة ΔH أو ΔG لغاية تفاعل آخر، واطرح Δ_f للمواد المتفاعلة من Δ_f للنواتج. وبالنسبة إلى الأيونات في أي محلول، فهناك غموض في قسمة الكميات الحرارية بين الأيونات الموجبة والأيونات الثابتة. وكما هو مصطلح عليه، تعطى H^+ قيمة صفر، وتختار لألأيونات الأخرى جميعها على أساس مطابقتها لهذه القيمة. البيانات مأخوذة من أتكنز، لايد، وأندرسون At-kins, 1998, Lide, 1994, Anderson,1996. الرجاء ملاحظة أنه على الرغم من أن هذه البيانات دقيقة إلى حد كبير ومطابقة للأمثلة والمسائل في هذا الكتاب، لكن الأرقام العشرية الواردة ليست بالضرورة ذات دلالة، ويتعيَّن عليك لغايات البحث أن تعود دائمًا إلى الكتابات الأصلية لتحديد عدم اليقين في التجربة.

Substance (form)	V(cm^3)	Cp(J/K)	S (J/K)	Δ_fG(kJ)	Δ_fH (kJ)
Al (s)	0	0	28.33	24.35	9.99
Al_2SiO_5 (kyanite)	-2594.29	-2443.88	83.81	121.71	44.09
Al_2SiO_5 (andalusite)	-2590.27	-2442.66	93.22	122.72	51.53
Al_2SiO_5 (sillimanite)	-2587.76	-2440.99	96.11	124.52	49.90
Ar (g)	0	0	154.84	20.79	
C (graphite)	0	0	5.74	8.53	5.30
C (diamond)	1.895	2.900	2.38	6.11	3.42
CH_4 (g)	-74.81	-50.72	186.26	35.31	
C_2H_6 (g)	-84.68	-32.82	229.60	52.63	
C_3H_8 (g)	-103.85	-23.49	269.91	73.5	
C_2H_5OH (l)	-277.69	-174.78	160.7	111.46	58.4
$C_6H_{12}O_6$ (glucose)	-1268	-910	212	115	
CO (g)	-110.53	-137.17	197.67	29.14	
CO_2 (g)	-393.51	-394.36	213.74	37.11	
H_2CO_3 (aq)	-699.65	-623.08	187.4		
HCO_3^- (aq)	-691.99	-586.77	91.2		
Ca^{2+}(aq)	-542.83	-553.58	-53.1		
$CaCO_3$ (calcite)	-1206.9	-1128.8	92.9	81.88	36.93
$CaCO_3$ (aragonite)	-1207.1	-1127.8	88.7	81.25	34.15
$CaCl_2$ (s)	-795.8	-748.1	104.6	72.59	51.6
Cl_2	0	0	223.07	33.91	
Cl^- (aq)	-167.16	-131.23	56.5	-136.4	17.3
Cu (s)	0	0	33.150	24.44	7.12
Fe (s)	0	0	27.28	25.10	7.11

Substance (form)	$\Delta_f H$ (kJ)	$\Delta_f G$(kJ)	S (J/K)	Cp(J/K)	V(cm^3)
H_2 (g)	0	0	130.68	28.82	
H (g)	217.97	203.25	114.71	20.78	
H^+ (aq)	0	0	0	0	
H_2O (l)	-285.83	-237.13	69.91	75.29	18.068
H_2O (g)	-241.82	-228.57	188.83	33.58	
He (g)	0	0	126.15	20.79	
Hg (l)	0	0	76.02	27.98	14.81
N_2 (g)	0	0	191.61	29.12	
NH_3 (g)	-46.11	-16.45	192.45	35.06	
Na+ (aq)	-240.12	-261.91	59.0	46.4	-1.2
NaCl (s)	-411.15	-384.14	72.13	50.50	27.01
$NaAlSi_3O_8$ (albite)	-3935.1	-3711.5	207.40	205.10	100.07
$NaAlSi_2O_6$ (jadeite)	-3030.9	-2852.1	133.5	160.0	60.40
Ne (g)	0	0	146.33	20.79	
O_2 (g)	0	0	205.14	29.38	
O_2 (aq)	-11.7	16.4	110.9		
OH^- (aq)	-229.99	-157.24	-10.75	-148.5	
Pb (s)	0	0	64.81	26.44	18.3
PbO_2 (s)	-277.4	-217.33	68.6	64.64	
$PbSO_4$ (s)	-920.0	-813.0	148.5	103.2	
SO_4^{2-} (aq)	-909.27	-744.53	20.1	-293	
HSO_4^- (aq)	-887.34	-755.91	131.8	-84	
SiO_2 (α quartz)	-910.94	-856.64	41.84	44.43	22.69
H_4SiO_4 (aq)	-1449.36	-1307.67	215.13	468.98	

Index الفهرس

Abbott, Larry, 383 أبوت، لاري
Absolute temperature scale,4-5,129 مقياس درجة الحرارة المطلقة
Absolute zero, 4-5, 94-95, 146, 148 الصفر المطلق
Absorption, by a surface, 303 الامتصاص، عن طريق سطح
by an atom, 293-294 عن طريق ذرة
Absorption refrigerator, 130 ثلاجة الامتصاص
Abt, Helmut A., 226 أبت، هيلموت أ.
Accessible states, 57-58, 67, 76, 225 حالات يمكن الوصول إليها
Acids, 215, 217 الأحماض
Adiabat, 25 أديابيتيكي
Adiabatic compression/expansion انضغاط / تمدد أديابيتيكي
24-27, 125-126, 159, 175
Adiabatic cooling, 27, 142, 146, 177-178 التبريد الأديابيتيكي
Adiabatic exponent, 26, 132 الأس الأديابيتيكي
Adiabatic lapse rate, 27, 177-178 معدل المرور الأديابيتيكي
Adiabatic, relation to isentropic,112 أديابيتيكية، فيما يتعلق
بعملية أيزونتروبية
Adler, Ronald J., 383 أدلر، رونالد ج
Adsorption, 259-260 الامتصاص
Age of the universe, 58 عمر الكون
Ahlborn, B., 127 أهلبورن، ب.
Air, 7-8, 17,39,43,45,47 الهواء
liquefaction of, 186, 193-194 تسييل
Air conditioners, 127-129, 137-138, 141 مكيفات الهواء
Albite, 176, 195 الألبايت
Albrecht, Bruce A., 48, 399 البرخت، بروس
Alloys, 186, 191, 194, 198-200, 346, 353 السبائك
α(expansion coefficient), 6 α(معامل التمدد الحراري الطولي)
Altitude, effect on boiling water, 175 الارتفاع، تأثيره في
درجة غليان الماء
effect on speed of sound, 27 تأثيره في سرعة الصوت
Aluminum, 30, 97 الألمنيوم
Aluminum silicate, 172, 176 سليكات الألمنيوم
Ambegaokar, Vi nay, 398 أمبيجوكار فيناي
Ammonia, 137, 152, 210-213 الأمونيا
Andalusite, 172, 176 الأندلوسايت
Anderson, G. M., 399, 404 أندرسون، ج. م
Angular momentum, 105, 234,374-379 الزخم الزاوي
Anharmonic oscillator, 233, 371 متنبذب توافقي
Annihilating a system, 33, 149-150 إفناء النظام
Anorthite, 195 الأنورثايت
Antiferromagnet, 339, 346 المادة الفرومغناطيسية المعاكسة
Antifreeze, 198-200 مانع التجمد
Antiparticles, 297-300, 382 الجسيمات المضادة
Approximation schemes, 285, 327 التقريبات
Aqueous solutions, 216 المذاب في السائل
Aragonite, 171 الأرجونايت
Area of a hypersphere, 70-71, 391-393 مساحة كرة
عالية، الأبعاد
Argon, 152, 241, 336 الأرجون
Arnaud, J., 270 أرنود . ج
Ashcroft, Neil W., 272, 400 أشكروفت ، نيل. و
Asimov, Isaac, 399 أسيموف، إسحاق
Astronomical numbers, 84 الأرقام الفلكية
Astrophysics, see also فيزياء الفلك، ظر أيضًا الثقوب السوداء
Black holes, Cosmology, Stars, Sun الكوسمولوجيا، والنجوم ، والشمس
Asymptotic expansion, 387 نشر الاقتراب
Atkins, P. W., 377, 398, 404 أتكينز، ب. و
atm (atmosphere), 5, 402 ضغط جوي (الغلاف الجوي)
Atmosphere, density of, 8, 120, 228 الغلاف الجوي، كثافة
molecules escaping from, 246 إفلات الجزيئات من
opacity of, 306 تعتيم
solar, 226-227 الشمسي
temperature gradient of, 27, 177-178 التدرج في درجة الحرارة
Atmospheric pressure, 7, 402 الضغط الجوي
Atomic mass (unit), 8 وحدة الكتل الذرية
Atoms, excitation of, 226-227, 293 إثارة الذرات
ATP (adenosine triphosphate)156 ATP، (الأدينوسين ثلاثي الفوسفات)
Automobile engine, 131-133 محرك المركبة
Available work, 150 الشغل المتوافر
Average energy, 12-15, 229-231 متوسط الطاقة
number of particles, 261, 266-268 عدد الجسيمات
pressure, 11-12 الضغط
Average speed, 13, 245-256 السرعة المتوسطة
values, 11-13, 229-231 القيم
Avogadro, Amedeo, 44 أفوجادرو، أميديو
Avogadro's number, 7, 44, 61, 67, 119, 210, 402 عدد أفوجادرو
Azeotrope, 195-196 Azeotrope (أزيتروب)
B (bulk modulus), 27 B (معامل المرونة الحجمي)
B (magnetic field), 98 B (شدة المجال المغناطيسي)
B (T) (second virial coefficient), 9 B (T) (المعامل الحدي الثاني)
Bagpipes, 27 موسيقا القرب
Baierlein, Ralph, 67 بيرلين، رالف
Bailyn, Martin, 400 بيلين، مارتن
Balloon, hot-air, 2-3, 8 بالون الهواء الساخن
Balmer lines, 226-227 خطوط بالمر
bar (unit of pressure), 7 (bar) البار (وحدة الضغط)، 7
Barometric equation, 8, 178 المعادلة الباروميترية

Barrow, Gordon M., 372, 377 بارو، غوردون م.
Baseball, wavelength of, 362 طول موجة كرة القاعدة
Basic solution, 215 الحل الأساسي
Battery, 19, 154-155 البطارية
Battlefield Band, 27 فرقة ميدان المعركة
Beckenstein, Jacob, 84 بيكنشتاين، يعقوب
Bed-spring model of a solid, 16 نموذج زنبركات السرير للجوامد
Beginning of time, 83 بداية الكون
Benefit/cost ratio, 123, 128 الفائدة / التكلفة
Bernoulli, Daniel, 10 برنولي، دانيال
β (1/kT), 229 β (1/kT)
β (critical exponent), 186, 346 β (الأس الحرج)
β (expansion coefficient), 6 β (معامل التمدد الحجمي)
Betelgeuse, 307 النجم بتلجوس
Betts, D. S., 321, 400 بيتس، د. س.
Bicycle tire, 14, 26 إطار الدراجة
Big bang, see Early universe الانفجار الأعظم، انظر بداية الكون
Billiard-ball collision, 246 تصادم كرات البلياردو
Binomial distribution, توزيع ذي الحدين، انظر
see Two-state systems الأنظمة ثنائية الحالة
Binomial expansion, 9 مفكوك ذي الحدين
Biological applications, 36, 47, التطبيقات الحياتية
97, 156, 204-205, 259-260, 304, 399
Bird, R. Byron, 337 بيرد، ر. بايرون
Black holes, 83-84, 92, 304, 326 الثقوب السوداء
Blackbody radiation, 302-307, 359 إشعاع الجسم الأسود
Block spin transformation, 355-356 تحويل وحدة بناء الزخم المغزلي
Blood, 259-260 الدم
Body temperature, 5 درجة حرارة الجسم
Body, radiation from, 304 الجسم، الإشعاع من
Bohr magneton, 105, 148, 234, 313 بور ماجنتون للبارامانجنت
الإلكتروني ثنائي الحالة
Bohr radius, 227 نصف قطر بور
Bohren, Craig F., 48, 399 بورين، كريج و
Boiling point, effect of solute, 206-208 نقطة الغليان، تأثير المذاب
Boiling water, 33-35, 175 غليان الماء
Boltzmann distribution, 223, 268-269 توزيع بولتزمان
Boltzmann factor, 223-256, 321-322, 347 معامل بولتزمان
Boltzmann, Ludwig, 129 بولتزمان، لودفيج
Boltzmann statistics, 220-256, 265, 270 إحصاء بولتزمان
applicability of, 264-265, 268-269, 271 إمكانية تطبيقه
Boltzmann's constant, 7, 12-13, 75, 402 ثابت بولتزمان
Bose gases, 290-326 غازات بوز
Bose, Satyendra Nath, 263 بوز ساتيندرا ناث
Bose-Einstein condensation, تكاثف بوز وأينشتاين
144, 315-325
Bose-Einstein distribution, توزيع تكاثف بوز وأينشتاين
268-271, 290, 308, 315-316
Bosons, 238, 263, 265, البوزونات
267-271, 290, 315, 326, 380-383
Boundary between phases, 178 الحدود الفاصلة بين الأطوار
Bowen, N. L., 195 بوين. ن. ل.
Box, particles in, 252, 255, صندوق، جسيمات محصورة في
290, 368-370
Brass, 191 النحاس الأصفر
Breaking even, 124 كسر حتى
Brick, dropping, 162 إسقاط الطوب
Brillouin function, see Paramagnet دالة بريلوين، انظر البارامانجنت
Brush, Stephen G., 340,400 برش، ستيفن ج.
Btu (British thermal unit), 39 Btu (الوحدة البريطانية للتوصيل الحراري)
Bubbles expanding, 26 تمدد الفقاقيع
Bulk modulus, 27, 159, 275-276 معامل التمدد الحجمي
Bull, H. 205 بول، هـ.
c (specific heat), 28 c (السعة الحرارية النوعية)
C (heat capacity), 28 C(السعة الحرارية)
Cailletet, Louis, 141 كايليتيت، لويس
Calcium carbonate (calcite), 171, 176 كربونات الكالسيوم (الكالسايت)
Calculus, ix, 384 9 حساب التفاضل والتكامل، مقدمة المؤلف صفحة
Callen, Herbert B., 397 كالين، هربرت ب.
Calorie, 19 سعر (أو كالوري)
Campbell, A. J. R. and A. N., 190 كامبل، أ. ج. ر. وأ. ن.
Canonical distribution, 223 التوزيع الكانوني
Canonical ensemble, 230 التجمع الكانوني
Carbon dioxide, 16, 137, 167-168, 217,237,306,336 ثاني أكسيد الكربون
Carbon monoxide, 95, 235-236, 371, 377 أول أكسيد الكربون
poisoning, 259-260 التسمم
Carbon, phases of, 170-171, 173-174 أطوار ذرة الكربون
Carbonic acid, 217 حمض الكربونيك
Cards, playing, 52 أوراق اللعب
shuffling, 75-77 إعادة توزيع أوراق اللعب
Carnot cycle, 125-126, 128 دورة كارنو
Carnot, Sadi, 125, 129, 148 كارنو، سادي
Carrington, Gerald, 160, 397 كارينجتون، جيرالد
Carroll, Bradley W., 37, 399 كارول، برادلي و.
Casey, Brendan, 383 كيسي، بريندان
Cells, biological, 47, 202, 204 الخلايا الحيوية
Celsius temperature 3-6 درجة الحرارة المئوية
Centered-difference approximation, 102
طريقة تقريبية لحساب المشتقات عن طريق الفرق بين قيمتين
Centigrade, 3 درجة مئوية
Chandler, David, 397 تشاندلر، ديفيد
Chemical equilibrium, 208-219, 290 الاتزان الكيميائي
Chemical potential, 115-120 الجهد الكيميائي
and Gibbs free energy, 157, 164-165 وطاقة جيبس الحرة
at equilibrium, 210-211 عند الاتزان
in quantum statistics, 267-269 في الإحصاء الكمي
of Bose gases, 315-319, 324 لغازات بوز
of an Einstein solid, 117-119 لجامد أينشتاين

of Fermi gases, 272, 281-288 لغازات فيرمي
of an ideal gas, 118-120, 165-166, 255 لغاز مثالي
of multiparticle system, 251, 270 لنظام متعدد الجسيمات
of gases in blood, 259 لغازات في الدم
of a photon gas, 290 لغاز من الفوتونات
of solute, solvent, 201-202 من المذاب، المذيب
Chemical thermodynamics, 149, 398 الثرموديناميكا الكيميائية
Chemical work, 117 الشغل الكيميائي
Chlorofluorocarbons, 137-138 مركبات الكربون الكلورية الفلورية
Choosing n from N, 51 اختيار n من N
Chu, Steven, 147 تشو، ستيفن
Classical partition function, 239, 256 دوال التجزيء الكلاسيكية
Classical physics, 239--240, 288-289 الفيزياء الكلاسيكية
Classical thermodynamics, 120 الثرموديناميكا الكلاسيكية
Clausius, Rudolf, 95, 129 كلاوسيوس، رودولف
Clausius-Clapeyron relation, 172-179 علاقة كلاوسيوس كلابيرون
Clay-firing temperature, 4, 293 درجة حرارة فرن يستخدم في شيّ الفخار
Clouds, 47,177-179,305 الغيوم
Cluster expansion, 332-333 نشر التجمعات
Clusters of dipoles, 351-355 تجمعات من العزوم
Clusters of molecules, 181, 332-333 تجمعات من الجزيئات
Coefficient of performance, 128, 130-131, معامل الإنجاز
Coin flipping, 49-52, 67 تشكيلات القطع النقدية
Colligative properties, 208 الخواص الموحدة
Collings, Peter J., 400 كولينجز، بيتر ج.
Collision time, 42 زمن التصادم
Collisions, 11, 41-42, 246 التصادمات
Combinations, 51 ، N (التوافيق) عدد الطرق المختلفة لاختيار n من
Combinatorics, 49-55, 92, 279, (الصفة التوافقية) عدّ الطرق
331-332 ,322-323 المختلفة لترتيب الأشياء
Complex functions, 363-366 الدوال المركبة
Composite systems, 249-251 الأنظمة المركبة
Compressibility, 32, 159, 171, 186 159 ، 32 الانضغاط
Compression factor, 185 معامل الانضغاط
Compression ratio, 131-133 نسبة الانضغاط
Compression work, 20-26 شغل الانضغاط
Computer problems, ix مشكلات الحاسوب، مقدمة المؤلف صفحة 9
Computer simulations, 346-356, 400 المحاكاة الحاسوبية
Computing, entropy creation during, 98 حساب قيمة الإنتروبي خلال حدوثه
Concentration, and chemical potential, 118, 201-202 التركيز، والجهد الكيميائي
Concentration, standard, 155, 404 التركيز، القياسي
Condensate, 318 المتكاثفات
Condensation temperature, 317-320, 325 درجة حرارة التكثف
Condensed matter physics, 400 فيزياء المادة المتكثفة
see also Critical point, Helium, انظر أيضا: نقطة حرجة هيليوم
Low temperatures, Magnetic systems, درجات حرارة منخفضة أنظمة مغناطيسية
Phase transformations, Quantum statistics, تحويلات الطور، إحصائيات كمية
Solid state physics
تظر أيضا النقطة الحرجة، غاز الهيليوم، درجات الحرارة المنخفضة، الأنظمة المغناطيسية، تحولات الطور، الإحصاء الكمي، وفيزياء الجوامد
Condenser, 134-135, 138 المكثف
Conduction electrons, 38, 271-288, 311 الإلكترونات التوصيلية
Conduction, of heat, 19, 37-44 التوصيل، الحراري
Conductivity, electrical, 287 الموصلية، الكهربائية
Conductivity, thermal, 38-44 الموصلية، الحرارية
Cone diagrams, 374, 379 منحنيات مخروطية
Cones, potter's, 4 مخروط فخارية
Configuration integral, 329-333 تكامل الوضعية
Conservation of energy, 17-19 قانون حفظ الطاقة
Constants, 402 الثوابت
Convection, 19, 27, 37, 177-178, 306 الحمل الحراري
Conversion factors, 402 معاملات التحويل
Cookie-baking temperature, 294 درجة الحرارة التي تستخدم لخبز البسكويت
Cooking pasta, 31, 175, 208 طهي المعكرونة
Cooking time, at high altitude, 175 زمن الطهي، عند ارتفاع كبير
Coolant, 198-200 المبرد
Cooling, see Adiabatic cooling, Evaporative cooling, Refrigerators
التبريد، انظر تبريد أديابيتيكي، التبريد التبخيري، الثلاجات
COP (coefficient of performance), 128 COP (معامل الإنجاز)
Copper, 39, 276, 278, 311, 313 النحاس
Corak, William 311 كوراك، وليام
Corn flakes, 36 الكورن فليكس
Corrections to this book, ix تصويبات لهذا الكتاب، مقدمة المؤلف صفحة 9
Correlation function, 354-355 دالة الارتباط
cosh function, 104 دالة cosh x
Cosmic background radiation, 228, 295300, 359 خلفية الإشعاعات الكونية
Cosmological constant, 383 الثبت الكوني
Cosmology, 83, 228, 295-300, 399 علم الكونيات
Costly energy, 150 الطاقة المكلفة
Coulomb potential, 373 جهد كولوم
Counting arrangements, 49-59, 68-71, 262-263, 321-323 عدّ الترتيبات
Counting wavefunctions, 367, 369 عد دوال الأمواج
Cox, Keith G., 174 كوكس، كيث ج.
Creating a system, 33, 149-150 استحداث نظام
Critical exponents, 186, 346, 356 الأسس الحرجة
Critical point, 167-169, 184-186, 339 النقطة الحرجة
of Ising model, 343, 345-346, 351-356 نموذج أيسنج
Crystal structures, 166, 343 التركيب البلوري
Cumulus clouds, 177-178 التجمعات الركامية للغيوم
Curie temperature, 169, 339-340, 345 درجة حرارة كوري
Curie's law, 105 قانون كوري
Curie, Pierre, 105 كوري، بيير
Curtiss, Charles F., 337 كيرتس، تشارلز ف

Curzon, F. L., 127 كرزون، ف. ل.
Cutoff ratio, 132-133 نسبة القطع
Cyanogen, 228 CN (سيانوجين)
Cyclic processes, 23, 122-141 عمليات تتم في دورة كاملة
Dark matter, see Neutrinos المادة المظلمة، انظر النيوترونيات
Data, tables of, 136, 140, 143, 401-405 بيانات، جداول لـ
De Broglie wavelength, 252-253, طول موجة ديبرولي
264, 336-337, 360-361, 369
De Broglie, Louis, 360 دي برولي، لويس
Debye temperature, 310-314 درجة حرارة ديباي
Debye theory, 307-313 نظرية ديباي
Debye, Peter, 309 ديباي، بيتر
Decay, atomic, 293-294 الهبوط الذري
Deficit, national, 84 العجز، الوطني
Definite-energy wavefunctions, دوال الأمواج بطاقات محددة
252, 367376, 379، 252 ، 367376
Definition, operational, 1 التعريف، التشغيلي
Degeneracy pressure, 275-277 ضغط التشعب
Degenerate Fermi gases, 272-288 غازات فيرمي المتشعبة
Degenerate states, 221, 224, الحالات المتشعبة
227-228, 243, 369, 372
Degrees of freedom, 14-17, درجات الحرية
29, 72, 92, 238-240, 290-291, 310, 376-377
Degrees (temperature), 4 درجات (درجة الحرارة)
δ (critical exponent), 186 δ (الأس الحرج)
ΔG° (standard ΔG), 211 ΔG° (التغير في G، تحت الشروط القياسية)
Demon, Maxwell's, 76-77 ديمون، ماكسويل
Density of energy in the universe, 296 كثافة الطاقة في الكون
Density of states, 280-282, 316 كثافة الحالات
in a harmonic trap, 325 في فخ أو مصيدة توافقية
in a magnetic field, 288 في مجال مغناطيسي
in a semiconductor, 286-287 في شبه موصل
in two dimensions, 282 في بعدين
of a relativistic gas, 293 من الغاز النسبية
Derivatives, numerical, 102 المشتقات المالية، العددية
Desalination, 202, 205 تحلية مياه البحر
Detailed balance, 57, 348 التفصيلية التوازن
Deuterium (HD, D_2), 237-238 ذرة ديوتيريوم (HD, D_2)
Dew point, 177-178 نقطة الندى
Dewar, James, 142 ديوار، جيمس
Diagrammatic perturbation series مبياني سلسلة اضطراب
327, 331-333, 338
Dial thermometer, 4, 6 طلب الترمومتر
Diamond, 170-171, 173-174, 176 الماس
entropy of, 114, 176 إنتروبي
heat capacity of, 30, 114, 312 السعة الحرارية لـ
Diamond, formation of, 174 الماس، وتشكيل لـ
Diatomic gases, 15-16, 29-30 الغازات ثنائية الذرة
233-238, 255, 371-372, 375-377
Diesel engine, 26, 132-133 محرك مكنة الديزل
Differentials, 18 التفاضلية
Differentiating under the integral, 386 التفاضل داخل التكامل
Diffraction, 360-362 حيود
Diffusion, 46-48, 67 الانتشار
Diffusive equilibrium, 2-3, 115-116, 120 اتزان الانتشار
Dilute solutions, 200-210, 214-217 المحاليل المخففة
Dilution refrigerator, 144-145, 320 ثلاجة التخفيف
Dimensional analysis, 70, 83, 278, تحليل الأبعاد
285, 294, 302
Dimensionless variables, 108 185 246 متغير عديم الوحدات
286, 297, 323-324
Dipoles, magnetic, 52-53, 98-107 ثنائي قطب
232234, 339-356, 378-379
field created by, 148 المجال المغناطيسي المستحدث
interactions among, 146, 148, 339-356 التفاعلات بين
Dirac, Paul A. M., 263 ديراك، بول أ. م.
Disorder, 75 الفوضى
Dissociation of hydrogen, 30, 233, 256 تفكك الهيدروجين
Dissociation of water, 208-210, 214-215 تفكك الماء
Distinguishable particles, 70, 80-81 الجسيمات المتماثلة
235237, 249-250, 262, 321-322, 376, 379
Distribution functions, in quantum statistics, 266-269 دوال التوزيع
في الإحصاء الكمي
Distribution of molecular speeds, 242-247 توزيع السرعات الجزيئية
Dittman, Richard H., 198, 397 ديتمان، ريتشارد هـ.
Domains, 339, 351-352 المناطق
Doppler effect, 147, 295 ظاهرة دوبل
DPPH, 105-107 DPPH (مادة عضوية)
Dry adiabatic lapse rate, 27 معدل المرور الأديابايتيكي الجاف
Dry ice, 141, 167 جليد جاف
Du Pont, 137 دو بونت
Dulong and Petit, rule of, 29 قاعدة ديولنج – بيتت
Dumbbell model of a molecule, 375 نموذج دمبل للجزيء
Dymond, J. H., 336 دايموند، ج. هـ.
e (efficiency), 123 e (الكفاءة)
e (fundamental charge), 373 هـ (الشحنة الأساسية)
E (energy of a small system), 223, 230 E (طاقة النظام الصغير)
Early universe, 228, 295-300, 304 بداية الكون
Earth, heat flow from, 40 الأرض، انتقال الحرارة من
surface temperature of, 305-306 ذات درجة حرارة سطح
Earth science, see Geological applications, Meteorology
Economical numbers, 84
علوم الأرض، انظر التطبيقات الجيولوجية، الأرقام الاقتصادية للأرصاد الجوية
Edge effects, 350 أثر الحواف
Efficiency, of engines, 123-127, 132-137 كفاءة المكنات
of fuel cells, 154 خلايا الوقود
Efficiency of human body, 36, 156 كفاءة جسم الإنسان
of incandescent bulb, 304 مصباح كهربائي حراري

see also Coefficient of performance Effusion, 14, 46 انظر أيضا معامل إنجاز الانتشار
Effusion, تدفق
Einstein A and B coefficients, 293-294 معامل A وB، لأينشتاين
Einstein, Albert, 263, 293, 359 أينشتاين، البرت
Einstein relation, 291, 359-361, 363 علاقة أينشتاين
Einstein solid, 53-55, 107-108, 117-119, 233, 307, 312 جامد أينشتاين
in high-T limit, 63-66, 75, 91, 92, 231 عند درجة حرارة عالية
in low-T limit, 64, 91, 93, 307, 312 عند درجة حرارة منخفضة
pair of, exchanging energy, 56-60, 64-66, 77, 86-88, 224 زوج من، تبادل الطاقة
Electrical conductivity, 38, 287 الموصلية الكهربائية
Electrical work, 19, 21, 152-156 الشغل الكهربائي
Electrolysis, 152-153 التحليل الكهربائي
Electromagnetic field, 288-289, 380-381 المجال الكهرومغناطيسي
Electron-positron pairs, 298-300 أزواج الإلكترونات والبوزوترونات
Electron-volt, 13 eV
Electronic states, 251-252, 375 حالات إلكترونية
see also Hydrogen انظر أيضا الهيدروجين
Electrons, as magnetic dipoles, 52, 105107, 145, 288 الإلكترونات، ثنائيات القطب
diffraction of, 360-361 حيود
in chemical reactions, 154-156 في التفاعلات الكيميائية
in metals, 38, 271-288 في المعادن
in semiconductors, 261, 286-288 في أشباه الموصلات
wave nature of, 360-361 طبيعة موجة
Elementary particles, 382 جسيمات أولية
Emission, see Blackbody radiation, Spectrum الانبعاث، انظر في إشعاع الجسم الأسود، الطيف
Emissivity, 303-304 الانبعاثية
Energy, 1-383 الطاقة
capacity, 228 السعة
definition of, 17 تعريف
conservation of, 17-19 حفظ
exchange of, 2, 56-60, 64-66, 72, 85-91 تبادل
fluctuations of, 65-66, 72, 231 تذبذب
in quantum mechanics, 367-383 في ميكانيكا الكم
of interacting particles, 17, 240-241, 329, 335, 341 من الجسيمات المتفاعلة
of mixing, 188-192, 195-196 خلط
of the vacuum, 382-383 من الفراغ
relation to temperature, 2-3, 10, 12-17, 85-92, 229-231 متعلق بدرجة الحرارة
relativistic, 240, 276, 291, 299, 370 النسبية
tendency to decrease, 162 ميل إلى الانخفاض
see also Free energy, Heat, Work Energy levels, of a harmonic oscillator, 53-54, 289, 370-371 انظر أيضا الطاقة الحرة، الحرارة، مستويات الطاقة والشغل، الهزاز التوافقي
of a hydrogen atom, 221, 373 ذرة الهيدروجين
Energy levels, of a magnetic dipole 99, 228, 232, 234,378 مستويات الطاقة، لثنائي القطب
of a particle in a box, 252, 368-369 لجسيم في صندوق
of a rotating molecule, 234-238, 376 ، 376 ، 234-238 للجزيئات الدوارة،
probabilities of being in, 220-224 احتمالات وجود في
Engines, 122-137, 175, 398 المكنات
English units, 39 الوحدات الإنجليزية
Enlightened behavior, 90 السلوك المستنير
Ensembles, 230, 258 التجمعات
Enthalpy, 33, 149-160 الإنثلبي
capacity, 34 سعة
for magnetic systems, 160 لأنظمة مغناطيسية
in refrigeration, 138-144 في التبريد
in a throttling process, 139-144 في عملية الخنق بالتمدد (تجربة جول ثومسون)
of formation, 35, 404 التشكيل
of hydrogen, 143 الهيدروجين
of nitrogen, 143 النيتروجين
of water and steam, 135-137 الماء والبخار
Entropy, 75-84 إنتروبي
alternative definition, 249 تعريف جديد
analogy to happiness, 89-90 منظرة للسعادة
and human action, 76 فعل الإنسان
and information, 76, 98 المعلومات
and phase changes, 171-176, 179 تغيرات الطور
fluid model of, 96-97 نموذج المائع
in cyclic processes, 122-130 في عمليات تتم في دورة كاملة
measurement of, 93-95, 112-114, 255 قياس
of system plus environment, 161-162 الكون (النظام +المحيط)
of mixing, 79-81, 187-188, 194 الخلط
order-of-magnitude estimates of, 79 تقديرات
origin of term, 129 أصل المصطلح
original definition of, 95, 129 التعريف الأصلي
relation to heat, 78-79, 92-98, 112-115, 129 فيما يتعلق بالحرارة
relation to multiplicity, 75 فيما يتعلق بالتعددية
relation to pressure, 108-110 فيما يتعلق بالضغط
relation to temperature, 85-92 فيما يتعلق بدرجة الحرارة
residual (at T = 0) , 94-95 متبق
tabulated values, 95, 136, 140, 404 سجل قيم
see also entries under various systems انظر أيضا المدخلات تحت أنظمة مختلفة
Environment, 161-162 المحيط
Environmental science, 399 علوم البيئة
Enzymes, 156, 212 محفزات كيميائية
$\in$ (small amount of energy), 88, 266, 340 $\in$، (كمية صغيرة من الطاقة)
$\in_F$ (Fermi energy), 272 $\in_F$ (طاقة فيرمي)
Equation of state, 9, 180 معادلة الحالة
Equilibrium, 2-3, 66, 72-74, 85, 212 الاتزان

diffusive, 115-116 الانتشار
chemical, 208-219 الكيميائي
in contrast to kinetics, 37, 44, 213 على النقيض من نظرية النقل
internal, 20-21 داخلي
Equilibrium, mechanical, 108-110 الاتزان، الميكانيكي
thermal, 2-3, 85, 110 الحراري
Equilibrium constant, 212-217, 256 ثابت الاتزان
Equipartition theorem, 14-17, 25, 29-30, 91, 238-240, 290-291, 307, 311, 357 نظرية التجزيء المتساوي
Error function, 387 دالة الخطأ
Errors in this book, ix أخطاء في هذا الكتاب، مقدمة المؤلف صفحة 9
Escape of gas from a hole, 14 إفلات الغاز من فتحة
Escape of photons from a hole, 300-302 إفلات الفوتونات من فتحة
Escape velocity, 300 سرعة الإفلات
Ethylene glycol, 198-200 جليكون الإثيلين
Eutectic, 197-200 انصهاري
Evaporation, 176-177 التبخر
Evaporative cooling, 36, 124, 144 تبريد التبخر
Evaporator, 138 المبخر
Everest, Mt., 9 أفرست، جبال
Exchanged quantities, 2, 85, 120 الكمية المتبادلة
Exclusion principle, 263, 275, 339, 380 مبدأ باولي للاستثناء
Exhaling water vapor, 177 خروج بخار الماء في أثناء الزفير
Expansion of a gas, 24, 31, 78 تمدد الغاز
Expansion of the universe, 295 تمدد الكون
Expansion, thermal, 1-6, 28 التمدد، الحراري
Expansion work, 21-26 الشغل الناتج عن تمدد النظام
Explosives, 212 المتفجرات
Exponential atmosphere, 8, 120, 228 الجوي الأسي
Exponential function, 61-62, 364 الدالة الأسية
Extensive quantities, 163-164, 202 الكميات الشاملة
Extent of reaction, 209 الجزء المتفكك من جزيئات الماء
f (number of degrees of freedom), 15-16 f (عدد درجات الحرية)
f (frequency), 53, 370 f (التردد)
f-function, Mayer, 330-335, 339 دالة f لماير
F (Helmholtz free energy), 150 F، (طاقة هلمهولتز الحرة)
Factorials, 51, 53, 62, 387-391 المضروبات
Fahrenheit scale, 5 التدريج الفهرنهيتي
Feldspar, 194-195 خام
Fenn, John B., 398 فين، جون ب.
Fermi-Dirac distribution, 267-288 توزيع فيرمي وديراك
Fermi energy, 272-288 طاقة فيرمي
Fermi, Enrico, 263 فيرمي، أنريكو
Fermi gases, 271-288, 326 غازات فيرمي
relativistic, 276-277, 298-300 النسبية
two-dimensional, 282, 285 ثنائي الأبعاد
Fermi temperature, 275 درجة حرارة فيرمي
Fermions, 237, 263, 265-288, 297-300, 321, 326, 380-383 الفيرميونات
Ferromagnets, 52, 169, 179, 339-359 المواد الفيرومغناطيسة
low-energy excitations of, 313-314 التهيجات قليلة الطاقة
Fertilizers, 212 الأسمدة
Feynman, Richard P., 55, 84, 398 فاينمان، ريتشارد ب.
Fiberglass batting, 40 الألياف الزجاجية العازلة
Fick, Adolph Eugen, 47 فيك، أدولف يوجين
Fick's laws, 47-48 قانون فيك
Field theory, quantum, 380-383 نظرية المجال، الكمي
Fick, Adolph Eugen, 47 Fick's laws, 47-48 Field theory, quantum, 38 Field, electromagnetic, 290-291, 380-383 المجال، الكهرومغناطيسي
Findlay, Alexander, 398 فندلي، الكسندر
First law of thermodynamics القانون الأول في الثرموديناميكا 19,123-124,128
First-order phase transition, 169 تحولات الطور من الدرجة الأولى
Flipping coins, 49-52, 67 تشكيلات القطع النقدية
Fluctuations, 66, 230--231, 261, 344 تذبذب
Fluid, energy as, 17 المائع، طاقة
entropy as, 96-97 إنتروبي
Ising model of, 346 نموذج أيسنج
near critical point, 168, 356 بالقرب من النقطة الحرجة
van der Waals model of, 180-186 نموذج فاندر – ويلز
Flux of energy, 48 تدفق الطاقة
Flux of particles, 47 تدفق الجسيمات
Food coloring, 46-48 المادة الملونة
Force, see Interactions, Pressure, Tension القوة، انظر التفاعلات والضغط والشد
Formation, enthalpy of, 35, 404 التشكيل، إنثلبي
free energy of, 152, 404 الطاقة الحرة
Fourier, J. B. J., 38 فورييه، ج. ب. ج.
Fourier analysis, 365-366, 381, 394-396 تحليلات فورييه
Fourier heat conduction law, 38, 43 قانون فورير للتوصيل الحراري
Fowler, Ralph, 89 فاولر، رالف
Frautschi, Steven, 83 سثيفن، فراوتشي
Free energy, 149-165 الطاقة الحرة
see also Gibbs f. e., Helmholtz f. e. انظر أيضا طاقة جبس الحرة
Free expansion, 78-79, 113 وطاقة هلمهولتز الحرة، التمدد الحر
Free particles, 272 الجسيمات الحرة
density of states for, 280 كثافة الحالات
Freezing out, 16, 29-30, 95, 240, 255, 290, 308,310 يتجمد
see also Third law of thermodynamics انظر أيضا القانون الثالث في الثرموديناميكا
Freezing point, of a solution, 208 نقطة التجمد، لمحلول
French, A. P., 357 فرينش، أ. ب.
Freon, 137-138 الفريون
Frequency, 53, 307-308, 370 التردد
in quantum mechanics, 361, 367 في ميكانيكا الكم
Friction, during compression, 21 الاحتكاك، خلال الانضغاط
Fried, Dale G., 323 فريد، دايل ج.

Frying pan, 40 مقلاة
Fuel cell, 154-156, 158 خلايا الوقود
Fundamental assumption, 57, 270, 323 الإفتراض الأساسي
Fundamental particles, 382 الجسيمات الأساسية
Furnace, electric, 130 الفرن، الكهربائي
g (ϵ) (density of states), 280 g (ϵ) (كثافة الحالات)
G (Gibbs free energy), 150 G(طاقة جبس الحرة)
γ (adiabatic exponent), 26 γ (الأس الأديابايتيكي)
γ (critical exponent), 186, 346 γ (الأس الحرج)
Gamma function, 387-389 دالة جاما
Gas thermometer, 4 الثرمومتر الغازي
Gases, diffusion through, 47 الغازات، الانتشار من خلال
liquefaction of, 141-144 تسييل
nonideal, 9, 180-186, 328-339 غير مثالي
thermal conductivities of, 39-43 الموصلية الحرارية
virial coefficients of, 336 المعاملات الحدية
viscosity of, 45-46 اللزوجة
weakly interacting, 328-339 ضعيفة التفاعل
see also Ideal gas انظر أيضًا الغاز المثالي
Gasoline engine, 131-133 مكنة الاحتراق الداخلي التي تعمل بالجازولين
Gasoline, combustion of, 36 الجازولين، احتراق
Gaussian functions, 65, 240, 244, 390 الدوال الجاوسية
integrals of, 384-387, 393 التكاملات
General Motors, 137 جنرال موتورز
Generosity, 89-90, 101 الكرم
Geological applications, 40, 170-176, 194-195, 200, 217, 399 التطبيقات الجيولوجية
Geometric series, 233, 234, 267, 289, 393 سلسلة هندسية
Geothermal gradient, 40 التدرج الحراري الأرضي
Gibbs factor, 258-260, 262, 266 معامل جبس
Gibbs free energy, 150-217 طاقة جبس الحرة
for magnetic systems, 179, 160 لأنظمة مغناطيسية
how to measure, 151-152 كيفية قياس
of a dilute solution, 201 للمحلول المخفف
of mixtures, 187-192 للمخاليط
of reaction, 153, 211 للتفاعل
of van der Waals fluid, 182 لمائع فاندر – ويلز
pressure dependence of, 170-171 اعتمادها على الضغط
tabulated values of, 404 لسجل قيم
temperature dependence of, 171-172 اعتمادها على درجة حرارة
tendency to decrease, 162 ميل إلى الانخفاض
Gibbs, J. Willard. 81 جبس، ج ويلارد
Gibbs paradox, 81 مفارقة جبس
Gibbs sum, 258 مجموع جبس
Glacier, 174 الجليد
Glass, thermal conductivity of, 39 الموصلية الحرارية للزجاج
Glucose, metabolism of, 36, 156 عملية حرق الجلوكوز
Gluons, 382 جلويونات
Goates, J. Rex, 199 جويتس،ج ريكس
Goldstein, I. F. and M" 219, 398 جولدشتاين، ي. ف. اوم.
Goldstein David L., 55, 84, 400 جولدشتاين ديفيد ل.
Gopal, E. S. R., 255,400 جوبال، إ. س. ر.
Gould, Harvey, 400 جولد، هارفي
Grand canonical ensemble, 258, 338 التجمعات الكانونية العظمى
Grand free energy, 166, 262, 326 الطاقة الحرة العظمى
Grand partition function, 258-260, 262, 266-267, 338-339, 346 دالة التجزيء العظمى
Grand potential, 166, 262, 326 الجهد الكبير
Graphite, 114, 170-171, 173-174, 176 الجرافيت
Grass, 97 عشب
Gravitationally bound systems, 36-37, 83-84, 90-92, 97, 276-277 أنظمة مرتبطة بالجاذبية
Greediness, 89, 101 بخل
Greenhouse effect, 306-307 أثر البيت الزجاجي
Griffin, 321 جريفين
Griffiths, David J., 160, 323, 357 جريفيث، ديفيد ج.
Grimes, Patrick, 154 جريمز، باتريك
Grobet, 106 جروبت
Ground state energy, 53, 224-225, 315, 370-371, 381-383 طاقة الحالة الأرضية
Ground state occupancy, 315-325 مشغولية الحالة الأرضية
Gutfreund, H., 205 جاتفريند، هـ.
h (Planck's constant), 53, 359 h (ثابت بلانك)
$\hbar$ (h/2π) , 53, 374 $\hbar$ (h/2π)
H (enthalpy), 33 H (الإنثالبي)
B (magnetic field), 160 B (المجال المغناطيسي)
H_2O, 166-168 H_2O
see also Ice, Steam, Water انظر أيضًا الجليد والبخار والماء
Haasen, Peter, 398 هاسين، بيتر
Haber, Fritz, 212 هبر، فريتز
Hailstorm, 14 عاصفة من البرد
Hakonen, Pertti, 102, 146 هاكونين، بيرتين
Hampson, William, 142 هامبسون، ويليام
Hampson-Linde cycle, 142-144 دورة هامبسون – لندي
Happiness, entropy as, 89-90 السعادة، إنتروبي
Hard disks, gas of, 347 قرص صلب، غاز
Hard spheres, gas of, 338 كرات صلبة، غاز
Hardy, G. H., 279 هاردي، ج. هـ.
Harmonic oscillator, 16, 53-55, 107-108, 233, 288, 370-372 المتذبذب التوافقي
free energy of, 249 الطاقة الحرة
in field theory, 288-289, 381-382 في نظرية المجال
partition function of, 233 دالة التجزيء
two-and three-dimensional, 372 ثنائي وثلاثي الأبعاد
see also Einstein solid, Vibration انظر أيضًا جامد أينشتاين
Harmonic trap, 265, 270-271, 325 جهد توافقي اهتزازي
Harte, John, 399 هارت، جون
Hawking radiation, 304 إشعاعات هوكنج

Hawking, Stephen, 84 هوكنج، ستيفن
Haystack, needle in, 188 إبرة في كومة من القش النقي
Heat capacity, 28-34 السعة الحرارية
at absolute zero, 95 عند درجة الصفر المطلق
empirical formula for, 114 صيغة تجريبية
measurement of, 31 قياس
negative, 36-37, 90 سالبة
of a Bose gas, 324 لغاز بوز
of an Einstein solid, 92-93, 107-108, 233, 307, 312 لجامد أينشتاين
of a Fermi gas, 277-279, 396 لغاز فيرمي
Heat capacity, of a ferromagnet, 313, 354 السعة الحرارية لمادة فيرومغناطيسية
of an ideal gas, 29-30, 92, 254 لغاز مثالي
of the Ising model, 354 لنموذج أيسنج
of nonideal gases, 338 لغازات غير مثالية
of a paramagnet, 102-103, 105 لبارامانجنت
of a photon gas, 295 لغاز من الفوتونات
of solids, 29-30, 93, 97, 278, 311-312, 357 لمواد صلبة
predicting, 92-93 التنبؤ
relation between Cp and Cv, 159 علاقات تربط بين Cp وCv
relation to energy fluctuations, 231 فيما يتعلق بتذبذب الطاقة
relation to entropy, 93-94, 114 فيما يتعلق بالإنتروبي
rotational, 30, 236-238 الدورانية
tabulated values, 112, 404 سجل قيم
vibrational (of gases), 30, 108, 233 الاهتزازية (للغازات)
Heat, 2, 17-20, 49 الحرارة
cause of, 56, 59 سبب
during compression, 23-24 في أثناء الانضغاط
flowing out of earth, 40 انتقالها من الأرض
rate of flow, 37-44, 126 معدل الانتقال
relation to entropy, 92-98, 112-115 فيما يتعلق بالإنتروبي
reversible, 82 العكسية
waste, 122-124, 154 مفقودة
Heat conduction, 37-44 التوصيل الحراري
Heat death of the universe, 83 موت حراري للكون
Heat engines, 122-137, 175, 398 المكنات الحرارية
Heat equation, 40, 48 معادلة الحرارة
Heat exchanger, 142, 144-145 مبدل الحرارة
Heat pump, 130 المضخة الحرارية
Heisenberg uncertainty principle, 69-70, 364-366 مبدأ عدم التحديد لهايزنبرج
Helium (general and ^{4}He), 17, 22, 43-44, 78, 118, 181, 246, 326, 336, 382 الهيليوم (العادي و ^{4}He)
cooling with, 144-145 التبريد مع
isotopes of, 94, 168-169 نظائر
liquefaction of, 141-142 تسييل
phases of, 168-169 أطوار
phonons in liquid, 313 الفونونات في سائل
superfluid, 168-169, 320-321, 323 المائع الفائق
Helium-3, 144-145, 168-169, 175, 278279, 285, 288, 320-321 الهيليوم الثلاثي
Helium dilution refrigerator, 144-145, 320 ثلاجة الهيليوم المخفف
Helmholtz free energy, 150-152, 155-165, 224 طاقة هلمهولتز الحرة
in the early universe, 299 في بداية الكون
of a Bose gas, 324 لغاز بوز
of a harmonic oscillator, 249 لمتذبذب توافقي
of an ideal gas, 254 لغاز مثالي
of a magnetic system, 160 لنظام مغناطيسي
of a photon gas, 290, 297 لغاز من الفوتونات
of a multiparticle system, 251 لنظام متعدد الجسيمات
Helmholtz free energy, cont. طاقة هلمهولتز الحرة، يتبع
of a nonideal gas, 333 لغاز غير مثالي
of a van der Waals fluid, 185 لمائع فاندر– ويلز
relation to Z, 247-248 فيما يتعلق بـ Z
tendency to decrease, 161-163 ميل إلى الانخفاض
Helmholtz, Hermann von, 19 هلمهولتز، هيرمان فون
Helsinki University, 146 جامعة هلسنكي
Hemoglobin, 205, 259-260 الهيموجلوبين
Henry's law, 217 قانون هنري
Henry, W. E., 106 هنري، و. إ.
HFC-134a, 138, 140-141 المبرد HFC-134a
High-temperature limit,see Equipartition theorem درجة حرارة عالية، انظر نظرية التجزيء المتساوي
Hiking, 36 هايكنج
Hirschfelder, Joseph O.,337 هيرشفيلدر، جوزيف أ.
Historical comments, ix, 4, 10, 19, 76-77, 95, 129, 141-142, 213, 357 تعليقات تاريخية
مقدمة المؤلف صفحة
Historical references, 400 مراجع تاريخية
Hole, escape of gas from, 14 إفلات الغاز من فتحة
escape of photons from, 300-303 إفلات الفوتونات من فتحة
Hooke's law, 115 قانون هوك
Human intervention, 76 تدخل الإنسان
Humidity, 177, 179 الرطوبة
Humpty Dumpty, 83 هامتي دامتي
Hydrofluorocarbons, 138 مركبات الكربون الهيدروجينية الفلورية
Hydrogen, 13, 35, 152-155, 158, 319, 323, 336, 401 الهيدروجين
atomic excitations of, 163, 221, التهيجات الذرية
dissociation of, 30, 36, 256 تفكك
heat capacity of, 29-30, 254 السعة الحرارية
ionization of, 166, 218-219, 227, 260-261 تأيين
liquefaction of, 141-143 تسييل
normal, 238 العادي
rotation of, 236-238 دوران
vibration of, 108, 233 اهتزاز
Hyperbolic functions, 104 الدوال زائدية القطع
Hypersphere, 70-71, 391-393 قطع كروي زائد

Ice, 33, 94, 174-175 الجليد
Ice cream making, 199 صنع أيس كريم
Ideal gas, 6-17, 68-74, 93,121,139,251-256 الغاز المثالي
  chemical potential of, 118-120, 165-166, 255 الجهد الكيميائي
  diffusion in, 48 الانتشار في
  energy of, 12, 15-17, 91, 254 طاقة
  entropy of, 77-78, 255 إنتروبي
  free energy of, 254 الطاقة الحرة
  heat capacity of, 29-30, 92, 254 السعة الحرارية
Ideal gas, cont. الغاز المثالي، يتبع
  mixing of, 79 خلط
  multiplicity of, 68-72 التعددية
  pair of, interacting, 72 زوج من، المتفاعلة
  partition function of, 251-254 دالة التجزيء
  pressure of, 6--7, 110, 255 ضغط
  thermal conductivity of, 41-44 الموصلية الحرارية
  viscosity of, 45-46 اللزوجة
Ideal gas law, 6-7, 12 قانون الغاز المثالي
  correction to, 9, 333-336 تصحيح
  derivation of, 110, 255 اشتقاق
Ideal mixture, 81, 187-188, 191, 202 الخليط المثالي
Ideal paramagnet, 98, 146, 232-234, 339 البارامانجنت المثالي
Ideal systems, 327 أنظمة مثالية
Identical particles, 70-71, 80-81, الجسيمات المتماثلة
 236, 250~251, 262-265, 322-323, 376, 379
Igneous rocks, 186, 194-195 الصخور النارية
  mmiscible mixtures, 144, 189-192 مخاليط لا يمتزج بعضها ببعض
Importance sampling, 347 أهمية العينات
Incandescent light, 303-304 مصباح كهربائي حراري
Independent wavefunctions, 69, 367, 379 دوال الأمواج المستقلة
Indistinguishable, see Identical غير مميزين، انظر متماثلان
Inert gas, effect on vapor pressure, 176 الغاز الخامل، تأثير في ضغط البخار
Inexact differentials, 18 المعادلة التفاضلية غير التامة
Infinite temperature, 101, 103 درجة الحرارة اللا نهائية
Infinitesimal changes, 18, 21 التغيرات متناهية الصغر
Information, and entropy, 76, 84, 98 المعلومات، والإنتروبي
Inhomogeneities, 181 عدم التجانس
Initial conditions, 59 الشروط الابتدائية
  in Monte Carlo, 350 في مونتي كارلو
  of the universe, 83 للكون
Insulator, 286 عازلة
Integrals, 384-396 التكاملات
  see also Sums انظر أيضًا المجاميع
Intensive quantities, 163-164 الكميات المركزة
Interactions (between systems), 56-60, التفاعلات (بين الأنظمة)
72,85-87, 108-110, 115-116, 120, 161-162, 220-223,257
Interactions (between particles), التفاعلات (بين الجسيمات)
57,146, 148, 180-181, 320, 327-356
Interchanging particles, 70, 81, 201, 250 الجسيمات المتبادلة
Interference, two-slit, 360-361 التداخل من شقين
Intermolecular potential energy, طاقة الوضع بين الجزيئات 17 عاما
17, 241, 329-330, 334-338
Internal combustion engines, 122, 131-133 مكنات الاحتراق الداخلي
Internal energy, of gas molecules, 251, 254 الطاقة الداخلية، لجزيئات الغاز
Internal partition function, 251-256 دالة التجزيء الداخلية
Internal temperature variations, 93 تغيرات درجة الحرارة الداخلية
Inversion temperature, 142-143 درجة حرارة التحول
Ionization of hydrogen, 166, 218, 227, 297 تأيين الهيدروجين
Ions in solution, 208-210, 214-215 الأيونات في المحلول
Iron ammonium alum, 106, 148 ملح باراماجنت
Iron, 39, 40, 169, 313-314, 339, 345 الحديد
Irreversible processes, 49, 56, 59, 82-83 العمليات غير العكسية
Isentropic, 112 الأيزونتروبية
Isentropic compressibility, 159 معامل الانضغاط الأيزونتروبي
Ising, Ernst, 340 أيسنج ، إرنست
Ising model, 340-356 نموذج ليسنج
  exact solution of, 341-343 الحل التام
  in one dimension, 341-343, 345, 355 في اتجاه واحد
  in two dim., 340-341, 343, 346-356 في بعدين
  in three dimensions, 343, 353, 355 في ثلاثة أبعاد
  with external magnetic field, 345 مع مجال مغناطيسي خارجي
  ising program, 348-356 برنامج أيسنج
Isotherm, 24-25, 181-186 أيزوثرمال
Isothermal compressibility, 32, 159 معامل الانضغاط الأيزوثرومي
Isothermal processes, 24-25, 78,125-126 العمليات الأيزوثرومية
Isotopes, 13, 94-95, 237-238, 376 النظائر
Jacob, Ovid C., 383 يعقوب، أوفيد ج.
Jadeite, 176 الجاديات
Joule (unit), 19 الجول (وحدة الطاقة)
Joule, James P., 19 جول، جيمس
Joule-Thomson process, 139 تجربة جول ثومسون
k (Boltzmann's constant), 7 k (ثابت بولتزمان)
K (equilibrium constant), 212 K (ثابت الاتزان)
Kartha, Sivan, 154 سيفان، كارثا
Keenan, Joseph H., 401 كينان، جوزيف هـ.
Kelvin temperature scale, 4-6 مقياس درجة حرارة كلفن (تدريج كلفن)
Kelvin, Baron, 4 كلفن، بارون
Kern, Raymond, 399 كيرن، ريمون
Kestin, Joseph, 400 كيستين، جوزيف
Kiln, 293, 294, 297, 300 فرن
Kilowatt-hour, 40 كيلوواط - ساعة
Kinetic energy, 12 الطاقة الحركية
Kinetic theory, 43-44 النظرية الحركية
Kinetics, 37 نظرية النقل
Kittel, Charles, 272, 397, 400 كيتيل، تشارلز
Kroemer, Herbert, 397 كرومير، هربرت
Kyanite, 172, 176 Kyanite
l_Q (quantum length), 253 l_Q (الطول الكمي)

L (latent heat), 32, 173 L (الحرارة الكامنة)
Lamb, John D., 199 لامب، جون د.
Laminar flow, 44-45 الحركة الرقائقية
Landau, L. D., 397 لانداو، ل. د.
Langmuir adsorption isotherm, 260 منحنى امتصاص لانج مير
Large numbers, 61, 84 عدد كبير من
Large systems, 60-67 الأنظمة الكبيرة
Laser, 293, 359, 360 أشعة الليزر
Laser cooling, 147-148, 319 تقنية تبريد الليزر
Latent heat, 32-33, 36, 167, 173-178, 186 الحرارة الكامنة
Lattice gas, 346 غاز الشبيكة
Lattice vibrations, 38, 102 اهتزازات الذرات في الشبكات البلورية
see also Einstein solid, Debye انظر أيضًا جامد أينشتاين،
Law of mass action, 212 ونظرية ديباي وقانون الفعل الكتلي
Le Chatelier's principle, 212 مبدأ شاتلر
Lead, 5, 17,30, 169, 198-199,312 الرصاص
Lead-acid cell, 154-155 خلية رصاص - حمضية
Leadville, Colorado, 9 ليدفيل، كولورادو
Leff, Harvey S., 20, 76, 400 ليف هارفي س.
Legendre transformation, 157 تحويلات ليجندر
Leighton, Robert B., 398 لايتون، روبرت ب.
Lennard-Jones potential, 241, 335-338 جهد ليونارد وجونز
Lenz-Ising model, 340 نموذج لينز وأيسنج
Lever rule, 195 قاعدة تحديد المراحل
License plates, 55 لوحة سيارة تحمل رقم
Lide, David R., 143, 167, 194, 401, 404 لايد، ديفيد ر.
Life, and entropy, 76, 97 الحياة والإنتروبي
Lifshitz, E. M., 397 ليفشيتس، إ. م.
Ligare, Martin, 325 ليجير، مارتن
Light bulb, 303-304, 359 مصباح كهربائي
Linde, Carl von ليندي، كارل فون
Linear independence, 366-367, 369 الاستقلال الخطي
Linear thermal expansion, 6, التمدد الحراري الخطي
Liquefaction of gases, 141-144, 186, 194 تسييل الغازات
Liquid crystals, 168, 198 بلورات سائلة
Liquid helium, see Helium الهيليوم السائل، انظر الهيليوم
Liquids, 16-17, 46, 166-208 السوائل
Liter, 7 لتر
Lithium, 102, 107, 228, 319 الليثيوم
Logarithm function, 61-63, 389 دالة اللوغاريتم
Lounasmaa, Olli V., 102, 144, 146 أولي ف. لاونسما
Low temperatures, 106-107, 144-148, 169, 319-320, 323 درجات الحرارة المنخفضة
see also Bose-Einstein condensation, Helium, Paramagnet انظر أيضًا تكاثف بوز وأينشتاين الهيليوم باراماجنت
Low-energy excitations, 382 التهيجات قليلة الطاقة
Luminosity, of the sun, 305 اللمعانية، للشمس
m (mass), 11 m (الكتلة)
m (molality), 202 m (المولالية)
M (magnetization), 99 M (المغنطة)
Macrostate, 50, 56, 59, 74 الحالة الجاهرية
Magician, 33, 150 الساحر
Magnetic cooling, 144-146, 148 التبريد المغناطيسي
Magnetic systems, 160, 169, 179 الأنظمة المغناطيسية
see also Ferromagnets, Paramagnets انظر أيضًا المواد
Magnetic moment, 99, 234, 321, 378 379 الفيرومغناطيسة، والعزم المغناطيسي للمواد الفيرومغناطيسة
Magnetization, 99, 160 مغنطة
of a ferromagnet, 313-314 المادة الفرومغناطيسية
Magnetization, of the Ising model, 354 مغنطة، نموذج أيسنج
of a paramagnet, 99, 102-106, 233-234 البارامانجنت
Magnons, 313-314, 340, 382 الماغنونات
Mallinckrodt, A. John, 20 مالينكرودت، أ. جون
Mandl, F., 160, 381, 394, 397 ماندل، ف.
Marquisee, J. A., 372, 377 ماركويسي، ج. أ.
Massalski, Thaddeus, 198 ملسالسكي ثاديوس
Mather, J. C., 296 ماثر، ج. ك.
Maxwell, James Clerk, 76, 244 ماكسويل، جيمس كلارك
Maxwell construction, 183-185 بناء ماكسويل
Maxwell relations, 158-159 علاقات ماكسويل
Maxwell speed distribution, 242-247 توزيع ماكسويل للسرعات
Maxwell's Demon, 76-77 شيطان ماكسويل
Mayer *f*-function, 330-335, 339 دوال-*f*، لماير
Mayer, Robert, 19 ماير، روبرت
Mean field approximation, 343-346 تقريب المجال المتوسط
Mean free path, 41-44, 67 المسار الحر المتوسط
Mechanical interaction, 2-3, 108-110, 120 تلامس ميكانيكي
Melting ice, 33,167-168,174-175 انصهار الجليد
Membrane, semipermeable, 202-205 غشاء شبه نفاذ
Mendelssohn, K., 400 مندلسون، ك.
Mercury, 1, 3, 6, 32, 159 زئبق
Merli, P. G., 361 Merli ، P. G. ، 361 ميرلي، ب.ج.
Mermin, N. David, 272, 400 Mermin ميرمن، ن. ديفيد
Metabolism of food, 36, 76, 156 أيض الطعام (حرق الجلوكوز)
Metallurgy, 199 تعدين
Metals, conduction electrons in, 280 المعادن، توصيل الإلكترونات في
heat capacity of, 311-312 السعة الحرارية لـ
heat conduction in, 38 توصيل الحرارة في
Metastable states, 166, 170, 348, 351 حالات قليلة من الاستقرار
Meteorology, 27, 177-179, 399 علم الأرصاد الجوية
Methane, 35-36, 155-156, 336 ميثان
Metropolis algorithm, 347-350 خوارزمية متروبوليس
Metropolis, Nicholas, 347 متروبوليس، نيكولاس
Microcanonical ensemble, 230 الكانوني المجهري
Microstate, 50 الحالة المجهرية
Microwave oven, 18, 20 ميكروويف
Millikan, Robert, 44 ميليكن، روبرت

Miscible mixtures, 187-188, 192-196 مخاليط قابلة للاختلاط
Miserly behavior, 90-91 سلوك بخيل
Missiroli, G. F., 361 ميسيرولي، ج. ف.
Mixing, 46-48, 186-192 خلط
  energy of, 188-192, 195-196 طاقة
  entropy of, 79-81, 94-95,187-188, 209 إنتروبي
Mixing clouds, 177 خلط الغيوم
Mixtures, 120, 158, 186-219 مخاليط
  ideal, 81, 187-188, 191, 202 مثالي
  miscible, 187-188, 192-196 قابل للاختلاط
  phase changes of, 208-2-6, 200- 186 تحولات الطور
  nonideal, 144, 188-192 غير مثالي
Modes of vibration, 309-308,16 حالة الاهتزاز
Molality, 202 مولية
Mole, 7,119 المول
Mole fraction, 120 المول الكسري
Molecular clouds, 228 السحب الجزيئية
Molecular weights, 205 الأوزان الجزيئية
Moment of inertia, 376-377 376-377 عزم القصور الذاتي
omentum, quantum, 363-364 68-71 ، 320 ، 365-366 الزخم، الكم
Momentum space, 68-71, 320, 365-366 363-364 فراغ الزخم
Momentum transport, 44-46 انتقال الزخم
Monatomic gas, see Gases, Ideal gas Money, 89-90
غاز أحادي الذرة، انظر غازات، حال الغاز المثالي
Monte Carlo simulation, 327, 346-356 محاكاة مونتي كارلو
Moon, atmosphere of, 246 القمر، الغلاف الجوي
Moore, Thomas A., 56, 398 مور، توماس أ
Moran, Michael J., 130, 140, 398 موران، مايكل ج.
Morrison, Philip and Phylis, 227 موريسون، وفيليب وفيليس
Motor oil, 45 زيت المحرك
Mt. Everest, 9 جبال إفرست
Mt. Ogden, 36 جبال أوجادين
μ (magnetic moment), 99, 378-379 عزم مغناطيسي
μ_B (Bohr magneton), 105 بور ماجنتون
μ (chemical potential), 116 جهد كيميائي
μ^0 (standard chem. potential), 165, 202 جهد كيميائي قياسي
Multiparticle systems, 249-251, 262 أنظمة الجسيمات المتعددة
Multiplicity, 50-75, 92-94, 247 التعددية
  of a classical system, 72 نظام كلاسيكي
  of an Einstein solid, 55 لجامد أينشتاين
  of an ideal gas, 68-72 الغاز المثالي
  of interacting systems, 56-60, 64-66, 72 الأنظمة المتفاعلة
  of a paramagnet, 53, 99 البارامانجنت
  of a two-state system, 51 للنظام ثنائي الحالة
Munoz, James L., 399 مونوز ، جيمس، ل.
Muscle, energy conversion in, 156 العضلات ، تحول الطاقة في
Myoglobin, 259-260 ميوجلوبين
Myosin, 156 ميوسين
n (number of moles), 6 عدد مولات
n (quantum number), 252, 369-375 عدد الكم
n (number of particles in a mode), 266 عدد الجزيئات في المول
n (average occupancy), 266 الإشغال المتوسط
N (number of particles), 7 عدد الجسيمات
N (number of atoms), 16, 307 عدد الذرات
N (number of oscillators), 54 عدد المتذبذبات
N_A (Avogadro's number), 7 عدد أفوجادرو
n-space, 273 الفضاء
Needle in a haystack, 188 إبرة في كومة قش
Negative temperature, 101-102, 228 درجة حرارة سالبة
Neon, 43, 336 43 ، 336 نيون
Neutrinos, 263, 297-300, 387 نيوترينيات
Neutron, 8, 228, 362, 370 نيوترون
Neutron star, 277 نجم نيوتروني
Never, 58, 66 أبدًا
Newbury, N. R., 147 Newbury
Newton's laws, 11 قوانين نيوتن
Nitrogen (N_2), 5, 8, 9, 13, 168, 181, 245 246, 255, 338) نيتروجين
  enthalpy table, 143 جدول إنثالبي
  liquefaction of, 141 تسييل
  mixed with oxygen, 193-194 مختلط بالأكسجين
  spectrum of, 372, 377 طيف
  vibrational states of, 371-372 الحالات الاهتزازية
Nitrogen fixation, 211-213 تثبيت النيتروجين
Noble gas solids, 241 ذرات الغازات النبيلة
Nonideal gases, 180-186, 328-339 غازات غير مثالية
Nonideal mixtures, 188-192 مخاليط غير مثالية
Nonideal paramagnets, 146, 148, 339 بارامانجنت غير مثالي
Nonideal systems, 327-356 أنظمة غير مثالية
Non-quasistatic processes, 112-113 عمليات ليست شبه ساكنة
Noodles, cooking, 31, 175, 208 طهي المعكرونة
Nordstrom, Darrell Kirk, 399 نوردستروم، داريل كيرك
Normal behavior, 89-90 سلوك طبيعي
Normal gas, 264-265 الغاز الطبيعي
Normal hydrogen, 238 الهيدروجين العادي
Notation. 18, 401 ترميز
Nuclear paramagnets, 101-102, 106-107, 146,228 بارماجنت نووي
paramagnets 101-102 ، 106-107 ، 146228 بارماجنت
Nuclear power plants, 137 محطات الطاقة النووية
Nuclear spin entropy, 95 إنتروبي البرم النووي
Nucleation, 178 تشكيل
Nucleon, 228, 370 نيوكليون
Nucleus, as a box of particles, 276, 370 276 ، 370 النواة صندوق للجسيمات
Nucleus, rotation of, 375 النواة، دوران
Numerical integration, 246, 285, 297, 299, 304, 311, 323, 335 تكامل عددي
Numerical summation, 325 جمع عددي
Occam's Razor, 323 Occam's Razor
Occupancy 266-269 مشغولية
Ocean thermal gradient, 124-125 التدرج الحراري في مياه المحيط

Ogden, Mt., 36 أوجادين، جبال
Ogden, Utah, 9 أوجادين، يوتا
Olivene, 194 الخامات المعدنية
Ogden, Utah, 9 أوجادين، يوتا
Ω (multiplicity), 50 تعددية Ω
Onnes, Heike Kamerlingh, 142 أونز، هايكه كامرلنغ
Onsager, Lars, 343 Onsager343 أنسيجار لارس
Onsager's solution, 343, 346, 352 محلول أنسيجار
Operational definition, 1, 3-4 تعريف تشغيلي
Order parameter, 356 معامل الترتيب
Orthohydrogen, 237-238 أورثوهيدروجين
Oscillator, see Anharmonic oscillator, Einstein solid, Harmonic oscillator Osmosis and osmotic pressure, 203-205
هزاز، انظر (هزاز لا توافقي)، جامد أينشتاين متذبذب توافقي أسموزية وضغط أسموزي
Ostlie, Dale A., 37, 399 اوستلي، دال أ.
Other work, 34, 151 شغل آخر
Ott, J. Bevan, 199 أوت، ج. بيفان
Otto cycle, 131 دورة أوتو
Otto, Nikolaus August, 131 أوتو، نيكولاوس أوجست
Oven, radiation in, 289 فرن، الإشعاع في
Oxygen, 13, 255, 236, 238 13 ، 255 ، 236 ، 238 الأكسجين
binding to hemoglobin, 259-260 259-260 مرتبط بالهيموجلوبين
dissolving in water, 216-217 ذوبان في الماء
liquefaction of, 141-142 تسييل
mixed with nitrogen, 192-194 مختلط بالنيتروجين
Ozone layer, 138 طبقة الأوزون
p (momentum), 68 الزخم
p (pressure), 6 6 ضغط
p° (standard pressure), 165 ضغط قياسي
P_v (vapor pressure), 167 PV ضغط البخار
P (probability), 222 احتمال
Pa (pascal), 77 باسكال
Pairs, electron-positron, 298-300، Parahydrogen أزواج ، إلكترون- بوزيترون
Parahydrogen, 237-238 ، 237-238 باراهيدروجين
Paramagnet(s), 52-53, 98-107, 145-146, 232-234, 342 بارا ماجنت
Paramagnet 342 ، 232-234 ، 145-146 ، 98-107 ، 52-53 (ق)
electronic, 105, 145, 148 إلكتروني
entropy of, 100-101, 107, 145-146, 148 إنتروبي
Fermi gas as, 288 غاز فيرمي بوصفه
heat capacity of, 102-103, 105 السعة الحرارية لـ
ideal, 98, 146, 232-234, 339 مثالي
magnetization of, 102-106, 233-234 مغنطة
multi-state, 106, 145, 228, 234 تعدد الحالة
multiplicity of, 53, 64, 67, 99 تعددية
nonideal, 146, 148, 339 غير مثالي
nuclear, 101-102, 106-107, 146, 228 نووي
pair of, interacting, 60 زوج ، تفاعل
Paramagnetic salts, 106, 148 أملاح بارماجنت
Partial derivatives, 28, 31, 32, 111, 158159 تفاضل جزئي
Partial pressure, 120, 165, 211-213 ضغط جزئي
Particles, exchange of, 2-3, 115-120, 257 جسيمات، تبادل
Particles, quantum, 358, 381-382 جسيمات، الكم
Particles, transport of, 46-48 46-48 جسيمات، نقل
Partition function, 225, 247-251 دالة التجزئ
internal, 251-252 داخلية
of a composite system, 249-251 لنظام مركب
of a harmonic oscillator, 233, 289 من هزاز توافقي
of an ideal gas, 251-256 لغاز مثالي
Partition function, cont الاقتران المتجزئ
of the Ising model, 341-342 لنموذج أيسنج
of a magnetic dipole, 232-234 ثنائيات الأقطاب المغناطيسية
of a multiparticle system, 262, 321 لنظام متعدد الجسيمات
of a weakly interacting gas, 328-333 لغاز ضعيف التفاعل
rotational, 236-238 دورانية
thermodynamic properties from, 231, 247-248 الخصائص الثيرموديناميكية من
translational, 251-253, 256 انتقالية
Partition, insertion of, 77, 81 حاجز، إدخال
Partitions (combinatoric) 279 تجزيئات (مجاميع)
Pascal, 7 باسكال
Pasta, cooking, 31, 175, 208 المعكرونة، الطبخ
Pathria, R. K., 345, 397 باثريا، ر. ك.
Pauli exclusion principle, 263, 339, 380 مبدأ باولي للاستثناء
Pauli, Wolfgang, 263 باولي، وولفغانغ
Payne, Cecilia, 227 باين، سيسيليا
Peebles, P. J. E., 399 بيبلز ب. ج. إ.
Perfume, 48 عطور
Periodic boundary conditions, 350, 353 شروط حدية دورية
Periodic table, 403 الجدول الدوري
Peritectic point, 200 نقطة قبل التصلب
Perturbation series, 331-333 القلقلة الصورية
PH, 215, 217 PH
Phase, 166 طور
Phase diagrams, 166-169 منحنيات الطور
carbon, 174 الكربون
carbon dioxide, 167 167 ثاني أكسيد الكربون
ferromagnet, 169، H_2O, 167 فيروماجنت (فرومغناطيسية) الماء
helium, 168 الهيليوم
magnetic systems, 179 أنظمة مغناطيسية
mixtures, 193-200 193-200 مخاليط
nitrogen + oxygen, 194 النيتروجين + الأكسجين
plagioclase feldspar, 195 plagioclase feldspar
showing solubility gap, 190, 192 تظهر فجوة قابلة للذوبان
superconductor, 169 موصل فائق التوصيل
tin + lead, 198 ، قصدير + رصاص
van der Waals fluid, 184 سائل فاندر - ويلز

water + phenol, 190 ماء + فينول
Phase transformations, 15, 32-33, 166200, 206-208, 279, 346 تحولات الطور
classification of, 169 تصنيف
Phenol, 190 الفينول
φ(grand free energy), 166 φ طاقة حرة كبيرة
Phonons, 308-313, 381-382 فونونات
Photoelectric effect, 358-359 تأثير كهروضوئي
Photon gas, 292-297 غاز من الفوتونات
Photons, 290-304, 359, 371-374, 381-382 290-304 ، 359 الفوتونات
Physical constants, 402 1r ثوابت فيزيائية
π, series for, 396 سلسلة لـ
Pippard, Ao Bo, 160, 397 397 بيبارد أو بو
pK,215 PK215 pK
Plagioclase feldspar, 194-195 194-195 Plagioclase feldspar
Planck distribution, 289-291, 308 توزيع بلانك
Planck length, 382 طول بلانك
Planck, Max, 290, 359 بلانك، ماكس
Planck spectrum, 292-294, 296 292-294، 296 طيف بلانك
Planck's constant, 53, 359 53 ، 359 ثابت بلانك
Playing cards, 52, 75, 77 ورق اللعب
Plumber's solder, 199 لحام السباكة
Poise, 45 Poise
Poker hands, 52 لعبة الورق
Polar coordinates, 385 إحداثيات قطبية
Polarization, of photons, 291 291 استقطاب، الفوتونات
Polarization, of sound waves, 308 308 استقطاب الموجات الصوتية
Polyatomic molecules, 16, 376-377 جزيئات متعددة الذرات
Polymers, 114-115 المبلمرات
Porous plug, 138-139 صمام مسامي
Position space, 68-69 فضاء الموقع
Positrons, 298-300 بوزيترونات
Potential energy, 14-16, 117,276 طاقة كامنة
intermolecular, 17, 139-142, 329-330, 334-338 بين الجزيئات
Potentials, thermodynamic, 151 151 دوال، ديناميكية
Pound, Ro Vo, 102, 107 102 ، 107 باوند، رو فو
Power maximizing, 127 الطاقة ، تزداد
Power of radiation emitted, 302-303 طاقة الإشعاع المنبعث
Power plants, 124, 137 محطات توليد طاقة
Pozzi, Go, 361 بوزي، جو
Pressure, 10-12, 108-110, 120 ضغط
constant, 28-35, 149, 162 ثابت
degeneracy, 275 التشعب
due to intermolecular forces, 180 نتيجة للقوى بين الجزيئات
effect on equilibrium, 215- 215-216 تأثير في التوازن
of a photon gas, 297 لغاز من الفوتونات
of an ideal gas, 6-12,110, 12،110،255 لغاز مثالي
of a nonideal gas, 333-336 لغاز غير المثالي
of quantum gases, 324, 326 لغازات الكم
of a two-dimenisional gas, 347 لغاز ثنائي الأبعاد
partial, 120 120 جزئي
under ground, 171 تحت الأرض
variation with altitude, 8 الاختلاف مع الارتفاع
Probability, 49-52, 58, 220-228, 242-247, 257-258 احتمالية
in quantum mechanics, 361-364 361-364 في ميكانيكا الكم
relation to entropy, 249 بالنسبة إلى إنتروبي
Proteins, 156, 205 بروتينات
Proton, 8, 44, 228, 370 بروتون
Purcell, Edward Mo, 102 بورسيل، إدوارد مو
Purcell-Pound experiment, 102, 107, 228 تجربة بورسل وباوند
Purpose in of a function, 243, 280, 292, 364 الغرض في وظيفة
q (number of energy units), 55 عدد وحدات الطاقة
Q (heat), 18 حرارة
Quadratic energies, 14-17, 238-240 طاقة تربيعية
Quantization of energy, 369-370, 376 تكميم الطاقة
Quantum field theory, 380-383 380-383 نظرية المجال الكمي
Quantum gas, 264-265 الكم
Quantum length, 253, 337 طول الكم
Quantum mechanics, 53, 69,240,268, 280, 289, 323, 327, 336, 357-383 ميكانيكا الكم
Quantum numbers, 375, 378 أرقام الكم
Quantum statistics, 262-326, 336 262-326 ، 336 الإحصاء الكمي
Quantum volume, 253-255, 264-265 253-255 ، 264-265 حجم الكم
Quarks, 370 370 الكواركات
Quartz, 8, 176, 217 8 ، 176 ، 217 الكوارتز
Quasiparticles, 381-382 أشباه جسيمات
Quasistatic, 21, 82, 112-113 حالة شبه ساكنة
R (gas constant), 6-7 ثابت الغاز
R value of insulation, 39-40 R 39-40 قيمة العزل
Rabbit, 33, 150, 163 أرنب
Radiation, 2, 19, 37, 288-307 إشعاع
Rainwater, 215, 217 مياه الأمطار
Ramanujan, Srinivasa, 279 راماتوجان، سرينفاسا
Random fluctuations, 66 تغيرات بسيطة
Random, meaning of, 11 عشوائية، معنى
Random processes, 11,49, 57-58 عمليات عشوائية
Random walk, 67 مشي عشوائي
Randomness, in quantum mechanics, 361 العشوائية، في ميكانيكا الكم
Rankine cycle, 134-137 دورة رانكن
Rankine temperature scale, 4-5 05/04 تدريج رانكن لدرجة الحرارة
Raoult's law, 207-208 قانون راؤول
Rates of processes, 37-48,126-127, 212,300-304,.. معدل تغير العمليات
Reference point (for energies), 152 نقطة مرجعية (لأنواع الطاقة)
Reference data, 402-405 بيانات مرجعية
Reflection of radiation, 303, 305 انعكاس الإشعاع
Refrigerants, 137-138, 140 ، مبردات
Refrigeration cycle, 138, 140-141 دورة التبريد
Refrigerators, 127-131, 137-148, 398 ثلاجات

Regenerator, 133-134 مولد
Reichl, r. 337, 397 رايخل
Reif, r. 42, 397, 398 ريف
Relative humidity, 177, 179 الرطوبة النسبية
Relativistic energy and momentum, 240, 291, 299, 361, 370 الطاقة النسبية والزخم
Relativistic gases, 256, 276-277, 298-300 غازات سريعة جدًا
Relaxation time, 2, 5, 102, 348 زمن الاسترخاء
Renormalization group, 355 إعادة تسوية المجموعة
Reservoir, 122, 161, 221, 247, 257, 266 خزان
Reverse osmosis, 205 نفاذية معكوسة (أسموزية معكوسة)
Reversible processes, 82 عمليات عكسية
Rex, Andrew F., 76,400 ركس ، أندرو
Reynolds, William C., 167, 401 رينولدز ، وليام . ج.
Rhodium, magnetic cooling of, 146 روديوم، التبريد المغناطيسي
Riemann zeta function, 393-396 دالة زيتا لريمان
Rock, density of, 171 الصخرة، كثافة
thermal conductivity of, 40 موصلية حرارية
Rock, Peter A., 255, 398 روك، بيتر، أ.
Room temperature, 4, 13, 16 درجة حرارة الغرفة
Root-mean-square deviation, 231, 366 انحراف جذر متوسط المربع
Root-mean-square speed, 13, 245-246 سرعة جذر متوسط المربع
Rosenbluth, A. W. and M. N., 347 روزنبلوث، أ. و، م . ن
Rotation, molecular, 14-16,228,234-238, 254, 375-377 دوران جزيئي
Rotational heat capacity, 29-30, 236-238 السعة الحرارية الدورانية
partition function, 236-238 دالة التجزيء
Rotini Tricolore, 31 *Rotini Tricolore*,
Royal flush, 52 التسلسل الملكي
Rubber, 114-115 مطاط
Ruhidium, 148, 319-320, 323 روبيديوم
Rumford, Count, 19 رومفورد، كاونت
s (state of a system), 222 حالة نظام
S (entropy), 75 S إنتروبي
Sackur-Tetrode equation, 78-81 معادلة ساكور- تيترود
Saha equation, 218, 260-261 معادلة ساها
Salt water, 198, 200 مياه مالحة
Sands, Matthew, 398 ساندز، ماثيو
Saturation, of air, 177 تشبع، الهواء
Sauer, Kenneth, 399 سوير، كينيث
Schrödinger equation, 367-368, 370 معادلة شرودنجر
Scuba tanks, 24 24 خزانات الغطس
Seawater, 202, 205, 207-208 208 مياه البحر
Second law of thermodynamics 59,74,76, 85,120-121 القانون الثاني للديناميكا الحرارية للثيرموديناميكية
applied to an engine, 123 تطبق على محرك
applied to refrigerator, 128 تطبق على الثلاجة
early versions of, 129 الصياغة الأولى
paraphrase of, 124 إعادة الصياغة
violation of, 74, 76-77, 81, 97, 303 انتهاك
Second virial coefficient, 9, 326, 334-339 المعامل الحدي الثاني
Second-order phase transition, 169 تحول طور من الدرجة الثانية
Seismic waves, 308 موجات زلزالية
Semiconductors, 47, 261, 286-288 أشباه الموصلات
Semipermeable membrane, 202-205 غشاء شبه نفاذ
Shakespeare, 121 شكسبير
Shankar, Ramamurti, 381 شانكار، راماموتي
Shapiro, Howard N., 130).140, 398 شابيرو، هوارد
Shaw, G., 381 شو، ج
Shear stress, 45 جهد القص
Shu, Frank H., 399 شو، فرانك هـ.
Shuffling cards, 75-77 إعادة توزيع أوراق اللعب
Silicon, 261, 287-288 السليكون
Sillimanite, 172, 176 سيلامانايت
Silly analogy, 89-90 مناظرة غريبة (مناظرة مغربة)
Silver, heat capacity of, 311 المحتوى الحراري
Simulation, Monte Carlo, 346-356 محاكاة، مونتي كارلو
Single-particle state, 251 حالة جسيم مفرد
sinh function, 104 وظيفة sinh
Sirius A and B, 277, 306 سيريوس A و B
Small numbers, 61 الأعداد الصغيرة
Smith, E. Brian, 336, 398 سميث، إي. بريان
Snoke, D. W., 321 Snoke ، D321 سنوك، د. و.
Snow, C. P., 121 ثلج
Snow, melting of, 33 ثلج ، انصهار
Sodium, 319 صوديوم
Solar constant, 305 ثابت شمسي
Solder, 198-199 - لحام
Solid solution, 194 194 سائل صلب
Solid state physics, 272, 312 فيزياء الحالة الصلبة
Solids, 16, 29-30, 38, 46, 54, 107-108 see also Conduction electrons, Delbye جوامد، الإلكترونات التوصيلية theory, Einstein solid, Magnetic نظرية ، جامد أينشتاين، المغناطيسي systems, Phase transformations
Solubility gap, 189-192 فجوة قابلة للذوبان
Solute, 200 200 مذاب
Solutions, 194, 200-210, 214-217 محاليل
Solvent, 200 200 مذيب
Sommerfeld expansion, 282-285 نشر سمرفيلد
Sommerfeld, Arnold, 282 282 سمرفيلد، أرنولد
Sound, 21, 308, 312 21 ، 308 ، 312 صوت
sinh function, 104 دالة sinh
Space travelers رحلة حول الفضاء
Specific heat capacity, 28 سعة حرارية محددة
Spectrum, of nitrogen, 372, 377 طيف، النيتروجين
of thermal radiation, 292, 300, 303-307 الإشعاع الحراري
of sunlight, 226-227, 295 226-227 ، 295 أشعة الشمس
of stars, 226-228 النجوم
Speed of sound, 21, 27, 308, 312 سرعة الصوت

Speeds, of gas molecules, 13, 242-247 سرعات ، جزيئات الغاز
Spherical coordinates, 274-275, 291, 300301, 334, 374 الإحداثيات الكروية
in *d* dimensions, 393 في أبعاد *d*
Spin, 52, 95, 105, 227, 234, 261, 263, 266, 377-379 برم (دوران)
Spin waves, 313- 314 أمواج مغزلية
Spontaneous emission, 293-294 انبعاث لحظي
Spontaneous processes, 2-3, 59, 76, 162 عمليات طبيعية
Spontaneously broken symmetry, 345- التماثل ذاتيًا
Spreadsheet program, 58 الحاسب الآلي
Spring, energy stored in, 14-16, 53, 370, 372 زنبرك، الطاقة المخزونة في
Stability, of mean field solutions, 344-345 of 182-183, 185, 189192, 197 استقرار، حلول المجال المتوسط
of thermal equilibrium, 91 اتزان حراري
Standard deviation, 231, 261, 365-366 انحراف معياري
Standard states, 214, 404 شروط قياسية
Standing wave, 368 موجة مستقرة
Star clusters 36, 90 نجم
Stars, 90, 97, 226-228, 276-277, 306-307 نجوم
State, in quantum mechanics, 357, 362 حالة، في ميكانيكا الكم
micro-vs. macro-, 50 مجهرية مقابل جاهرية
of a gas molecule, 69, 252, 328 جزيء الغاز
single particle vs. system, 250-251 جسيم واحد مقابل نظام
Statistical mechanics, vii, 121, 220, 337 الميكانيكا الإحصائية، السابع
Steam engine 122, 134-137 مكنة بخارية
Steam tables 134-137 جداول البخار
Steel, expansion of, 6 الفولاذ، تمدد
Stefan's law, 302 قانون ستيفان
Stefan-Boltzmann constant, 302 ثابت ستيفان وبولتزمان
stiffness, see Bulk modulus انظر معامل المرونة الحجمي
stimulated emission, 293-294 الانبعاث المستحث
Stirling engine, 133-134 مكنة سترلنج
Stirling's approximation, 62-63, 389-391 تقريب سترلنج
Stoichiometric coefficient, 210 معامل المعادلة الكيميائية
Stowe, 397 ستو
Stringari, S., 321 سترنغر،إس.
Stryer, Lubret, 399 Stryer ، Lubret ، 399 سترير، لوبرت
Sublimation, 167 167 التسامي
Subnuclear 353 تسام
Sulfuric acid, 215 215 حمض كبريتيك
Summary, 120-121 120-121 ملخص
Sums approximated as integrals 235, 239-240, 291,316-317,389-391 تقريب المجاميع إلى تكاملات
Sun, 79, 305-306 الشمس
conditions at center, 37, 276, 285 الظروف في المركز
energy output of, 304-305 الطاقة المنبعثة من
energy received from, 33, 97, 305 الطاقة المستقبلة من
life expectancy of, 36, 83 الفترة المتوقعة لـ
spectrum of, 226-227, 305 طيف
surface conditions 219, 226-227,295 ظروف السطح
Superconduetors 169,179,321 169 ،179 ،321 موصلات فائقة
Supercooling, 166 ، 166 تبريد فائق
Superfiuid, 168-169, 320-.321 مائع فائق
see also Helium, Helium-3 انظر أيضًا هيليوم، هيليوم- 3
Surface tension, 178-179 توتر سطحي
Susceptibility, magnetic, 346 الاستجابة، المغناطيسية
Susskind, Leonard, 84 سسكيند، ليونارد
Symmetry, in Ising model, 345 التنظر، في نموذج أيسنج
System, in quantum 266 النظام، في الكم
System, magnetic, 160 النظام، المغناطيسية
System state, 251, 321-323 حالة النظام
Sze, S. M., 287 Sze, S.M
t (time), 38 الوقت
T_c (critical temperature), 184 Tc (درجة الحرارة الحرجة)
T_D (De bye temperature), 310 T_D درجة حرارة ديباي
T_F (Fermi 275 TF) فيرمي
Tables of data, 136, 140, 143, 167,401-405 جداول البيانات
tanh function, 104, 346 وظيفة tanh
Taylor, Edwin 357 تايور، إدوين
Taylor series, 63, 283, 315 315 سلسلة تايلور
Tea, sipping temperature, 33 شي، درجة الغليان
Teller, A. H., and E 347 89-90 تيلر، أ. هـ ، إ.
Temperature, 1-7, 17, 49, 8,120, 129, درجة الحرارة
held constant, 24-25, 149, 161-162, 220-223, 247 ثبيت
infinite, 101, 103 101 ، 103 لا نهائي
negative, 101-102, 107,228 سلبية
relation to energy, 28, 49, 85- -90 بالنسبة إلى طاقة
relation to entropy, 85-90, 102 بالنسبة إلى إنتروبي
Tension force, 115 قوة الشد
Thaddeus, Patrick, 228 228 ثديوس، باتريك
Therm,40 40 طاقة حرارية
Thermal conductivity, 169 الموصلية الحرارية
Thermal contact, 1-2 تلامس حراري
Thermal energy, 15 الطاقة الحرارية
Thermal equilibrium, 85, 91, 110 تزان حراري
Thermal excitation of atoms, 226-227 التهيج الحراري للذرات
Thermal expansion, 32, 159, 241 تمدد حراري
Thermal interaction, 85, 120 تفاعل حراري
Thermal physics, vii فيزياء حرارية، السابع
Thermal pollution, 124 تلوث حراري
Thermocouple, 4 مزدوج حراري
Thermodynamic data 136, 140, 143, 167, 401, 404-405 بيانات الثرموديناميكا
Thermodynamic identity 111-115, 117, 119-120, 156-158, 222, 257 المتطابقة الثيرموديناميكية
for *F*, *G*, and *H*, 157-158 for Φ, 166

Thermodynamic limit, 66 حد الترموديناميكا
Thermodynamic potentials, 151, 166 الدوال الثيرموديناميكية
Thermodynamics, vii, 37, 120, 219 7 ثيرموديناميكا،
Thermometers, 1-6, 48, 88-89 ثيرموميترات
Thermos bottle, 2 الثرموس
Third law of thermodynamics, 102, 148, 159, 278
القانون الثالث في الثيرموديناميكا
Third virial coefficient, 337, 339 المعامل الحدي الثالث
Thompson, Benjamin, 19 تومبسون، بنجامين
Thomson, William, 4, 19, 77 تومسون، ويليام
Three-component systems, 199 أنظمة تتكون من ثلاثة مكونات
Throttling process, 138-144 التمدد بالخنق
Time and rates of processes, 37-48 الزمن ومعدل العمليات
Time, beginning of, 83 الزمن ، ابتداءً من
Time between collisions, 42 الزمن بين الاصطدامات
Time scales, 2, 56, 58, 76, 77, 102, 326 ، فترات زمنية
Tin + lead, 198- 198-199 القصدير + الرصاص
Tinoco, Ignacio, 399 399 تينوكو، آجناسيو
Tobochnik, Jan, 400 Tobochnik 400 توبوشنك، جان
Toilet seats, 48 مراحيض
Touloukian, Y. S., 30 ، Y. S. ، 30 تولوكيان، واي، إس.
Transcendental equation, 344 معادلة حدية
Transitions, atomic, 226, 293, 374 انتقالات، ذرية
molecular, 371-372 371-372 الجزيئي
Translational motion and energy الحركة الانتقالية والطاقة
12, 30, 251-256
Transport theory, 37 نظرية النقل
Trimble, Virginia, 326 تريمبل، فيرجينيا
Triple point, 167, 176 نقطة ثلاثية
Troposphere, 27 تربوسفير
Tungsten filament, 303-304 شعيرة تنجستون
Turbine, 134-137 توربين
Two-dimensional systems أنظمة ثنائية الأبعاد
72 79 121 247, 347
Bose gas, 325 غاز بوس
Fermi gas, 282, 282 ، 285 غاز فيرمي
Ising model, 340-341, 343, 346-356 نموذج أيسنج
magnet, 314 314 مغناطيس
solid, vibrations of, 313 313 جامد، اهتزازات
Two-particle system, quantum, 379-380 نظام مكون من جسيمين، الكم
Two-slit interference, 360-361 التداخل بين شقين
Two-state systems, 49- 49-53 الأنظمة ثنائية الحالة
u (atomic mass unit), 8 وحدة كتلة ذرية
U (energy of a large 15, 18, 230 U الطاقة من كبير
Ultraviolet catastrophe, 288-290, 357 كارثة الأمواج فوق البنفسجية
Uncertainty principle, 69-70, 364-366 مبدأ عدم التحديد
Unit conversions, 402 تحويل الوحدات
Universe, 58, 83 الكون
see also Early Universe نشأة الكون
Unstable states, see Stability حالات غير مستقرة ، انظر استقرار
Uranium hexafluoride, 13 UF_6 خلية اليورانيوم بالفلور ينتج
Utility rates, 40 أسعار الاستهلاك
v_Q (quantum volume), 253 الحجم الكلي
V (volume), 6 حجم و
Vacuum, energy of, 382-383 فراغ، طاقة
Van den Bosch, A., 106 ، A. ، 106 فان دن بوش
Van der Waals, Johannes, 180 فاندر – ويلز، يوهانس
Van der Waals model 9, 180-186, 328, 338, 344 فاندر- ويلز
Van Gerven, 106 Gerven ، 106 فان جيرفن
Van't Hoff equation, 213 213 معادلة فان هوف
Van't Hoff's formula, 204 صيغة فان هوف
Van't Hoff, Jacobus Hendricus 204 فان هوف جاكوبوس هندريكوس
Vapor pressure, 167, 175-178, '184 ضغط البخار
effect of an inert gas, 176 تأثير غاز خامل
effect of a solute, 207208 أثر المذاب
Vapor pressure equation, 175 معادلة ضغط البخار
Vargaftik, N. 143, 401 فارجافتك، ن.
Velocity space, 243 244 فضاء السرعة
Venus, 307 فينوس
Verne, Jules, 14 فيرن، جول
Very large 61, 326 كبير جدًا
Vibration, 14-17 اهتزاز
of gas molecules, 16-17,29 -30, جزيئات الغاز
54,108, 228, 233, 254, 371 -372
of a solid, 16, 29-30, 38, 54, 307-313 الجامد (المادة الصلبة)
Violation of the second law انتهاك القانون الثاني
74, 7677, 81, 97, 303
Virial expansion 9, 326, 334-336, 339 التمدد الحدي
Virial theorem, 37, 97 النظرية الحدية
Viscosity, 169 اللزوجة
Voltage, 154 155,358-359 الجهد
Volume, of, 2-3, 72-73, 108110, 120 حجم
fluctuations in, 73 تغيرات في
held constant, 161-162 ثبوت في
of a molecule, 180, 337 جزيء
of a hydrogen atom, 223, 227 ذرة الهيدروجين
Von Baeyer, Hans Christian, 400 فون بايرء هانز كريستيان
W (work), 18 الشغل
Wang, James C., 399 وانغ ، جيمس سي.
Waste heat, 122-124, 154 الحرارة المفقودة
Water, 3, 6, 8, 19, 23, 28, 32, 35, 39, 45, 47, 181 ماء
electrolysis of, 152-153 التحليل الكهربائي لـ
individual molecule, 17, 228 جزيء مفرد
phases of, 167-168 167-168 أطوار
vapor pressure of, 167, 175-178 ضغط البخار
Water vapor, as greenhouse gas, 306 بخار الماء، بوصفه غاز بيت زجاجي
Wave equation, 381 معادلة الموجة الخطية

Wave-particle duality, 357-362, 381 ثنائية التصرف بوصفها موجة والتصرف بوصفه جسيمات
Wavefunctions, 69, 264, 362-380 دوال الأمواج
during compression, 82 في أثناء الانضغاط
for multiparticle systems, 379-380 لأنظمة متعددة الجسيمات
ground-state, 320 الحالة الأرضية
in a box, 252, 272, 368 داخل صندوق
Wavelength, in quantum mechanics طول الموجة، في ميكانيكا الكم 360-363, 368-370
Wave packet , 364-366 حزمة موجية
Weakly coupled systems, 56 أنظمة تبادل ضعيفة
Weakly interacting gases, 328-339 الغازات ضعيفة التفاعل
Weberium, 231 وبريوم
Weinberg, Steven, 300, 383, 399 واينبرج، ستيفن
Weisbrod, Alain, 399 وايزبرود، ألين
Wet adiabatic lapse rate, 178 حدود معاملات تصحيح التسخين من تكثف بخار الماء
Whalley, P. B., 398] ، P. B. ، 398 هلي، ب. ب.
Wheatley, John C., 144 ويتلي، جون سي.
White dwarf stars, 276-277, 306, 326 النجوم القزمة البيضاء
Wieman, Carl E., 147, 319-320 وايمان كارل إ.
Wien's law, 293 قانون فين
Wiggling atoms, 307 الذرات الملتوية
Wilks, J., 321, 400 ، J. ، 321 ، 400 ويلكس، ج.
Wilson, Kenneth G., 355 ويلسون، كينيث ج.
Window, heat conduction through, 38-39 نافذة ، التوصيل الحراري خلال
Window, pressure on, 14 نافذة، الضغط على
Woolley, Harold W., 30, 143, 401 وولي، هارولد و.
Work, 17-26 17-26 شغل
chemical, 117 كيميائي
different definitions of, 20 تعاريف مختلفة
during heating, 28 في أثناء التسخين
electrical, 19, 21, 152-156 كهربائي
magnetic, 160 مغناطيسي
other, 34-35 آخر
to create a system, 150 لإنشاء نظام
to make room, 33, 35 لإيجاد متسع
Work function, 359 دالة الشغل
Working substance, 125 مادة التشغيل
World-Wide Web, ix الشبكة العالمية العنكبوتية
Yeomans, J. M., 400 يومانس، ج. م.
Young, David A., 174 يونغ، دوفيد أ.
Z (partition function), 225 دالة التجزيء
Z (grand partition function), 258 دالة التجزيء العظمى
Zemansky, Mark W., 102,198,397,398 زيمانسكي، مارك وي
Zero-point energy, 53, 371, 381-383 طاقة نقطة الصفر
Zeroth law of thermodynamics, 89 القانون الصفري في الثيرموديناميكا
Zeta function, 393, 396 دالة زيتا