مثال- ظرفی شیشه‌ای که ازجیوه $20^\circ C$ پراست $200 cm^3$ حجم دارد . هرگاه آنرا تا $100^\circ C$ گرم کنیم چقدرازجیوه ازظرف بیرون میریزد. ضریب انبساط حجمی‌شیشه $1/2 \times 10^{-5} (^\circ C)^{-1}$ است .

ازدیاد حجم ظرف برابراست با :

$$\Delta V = 1/2 \times 10^{-5} \times 200 \times (100^\circ - 20^\circ) = 0/192 cm^3$$

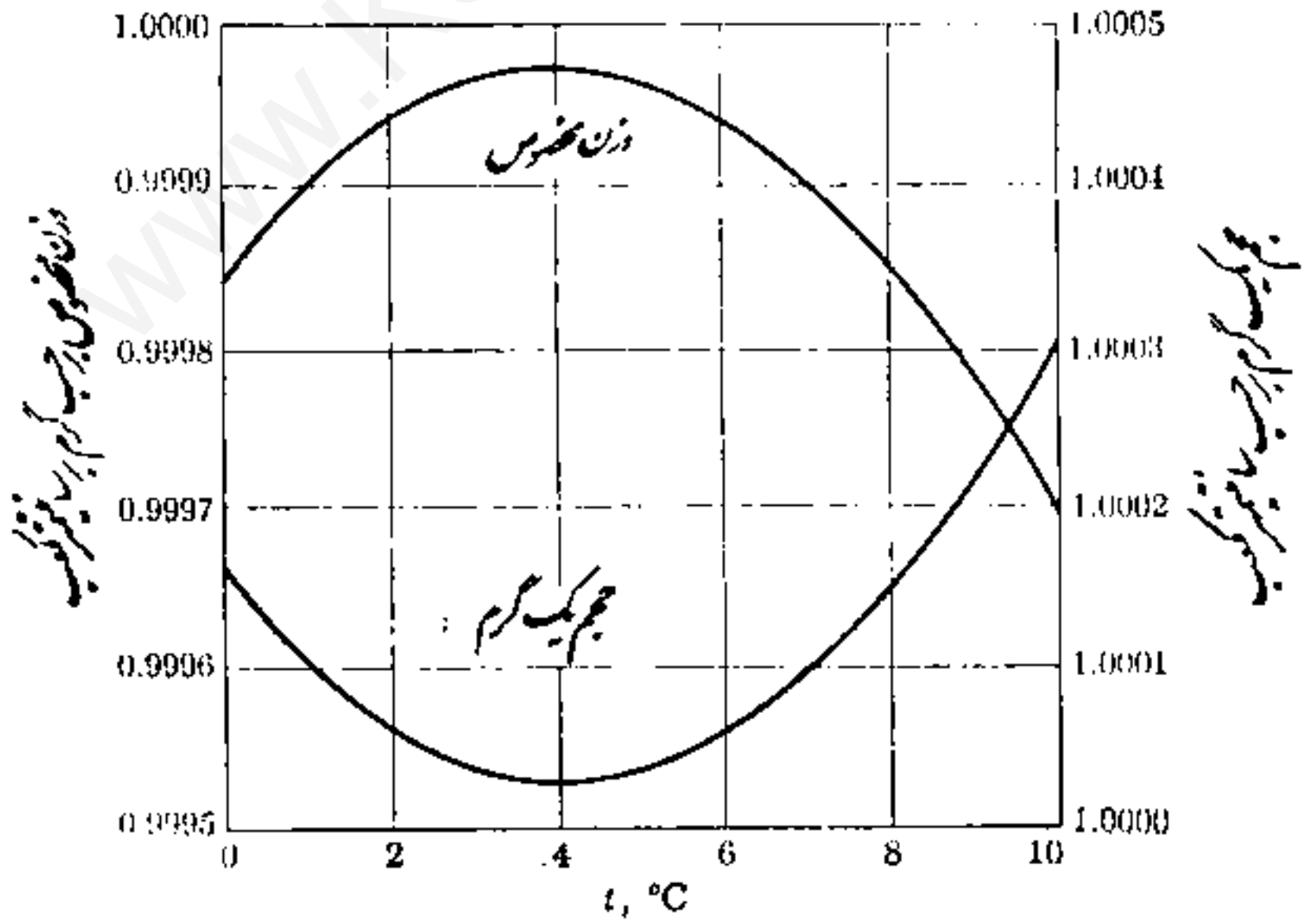
ازدیاد حجم جیوه عبارتست از :

$$\Delta V = 18 \times 10^{-5} \times 200 (100^\circ - 20^\circ) = 2/88 cm^3$$

و حجم جیوه‌ای که ازظرف بیرون میریزد عبارتست از :

$$2/88 - 0/19 = 2/69 cm^3$$

آب درفاصله دمائی $0^\circ C$ و $4^\circ C$ باافزایش‌دما، کاهش حجم پیدا میکند یعنی‌برعکس اکثراجسام درحالیکه انقباض میابد . در حالیکه بالاتر از $4^\circ C$ با افزایش دما انبساط میابد . بنابراین‌حجم‌مقدارمعینی‌ازآب دردمای $4^\circ C$ کمترین‌مقدارممکن را دارد لذاتوده ویژه‌آب دراین دماماکزیموم‌مقدار خود را دارا است . علت اینکه سطح‌آب دریا یخ‌میزند ولی زیر یخ آب‌است و موجودات دریائی‌سالم میمانند همین موضوع است . درشکل ۱۵-۱۰



شکل ۱۵-۱۰ توده ویژه‌آب و حجم یک‌گرم ازآن درفاصله صفر و 10° سلزیوس .

انقباض و انبساط آب ، در فـاصله دمائی صفر و ده سلزیوس نشانداده شده‌است . در جدول ۱۵ـ۴ تغییرات توده ویژه وحجم مخصوص را درفاصله دمائی بیشتری ثبت کرده‌اند .

جدول شماره ۱۵ـ۴ توده ویژه حجم مخصوص آب

$C^\circ t$	توده ویژه gm/cm^3	حجم مخصوص cm^3/gm
۰	۰/۹۹۹۸	۱/۰۰۰۲
۴	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰
۱۰	۰/۹۹۹۷	۱/۰۰۰۳
۲۰	۰/۹۹۸۲	۱/۰۰۱۸
۵۰	۰/۹۸۸۱	۱/۰۱۲۱
۷۵	۰/۹۷۴۹	۱/۰۲۵۸
۱۰۰	۰/۹۵۸۴	۱/۰۴۳۴

درمورد اجسامی نظیر یك میله یاتیرآهن که فقط یك بعدآنها مورد نظراست . **ضریب انبساط خطی** α را تعریف میکنند . هرگاه L طول میله باشد :

$$\alpha = \frac{1}{L}\frac{dL}{dT} = \frac{1}{L}\frac{dL}{dt} \qquad (۱۰-۱۵)$$

و درفاصله دمائی معین‌خواهیم داشت :

$$\Delta L = L_0 \bar{\alpha} \Delta T = L_0 \bar{\alpha} \Delta t$$

که درآن $\bar{\alpha}$ ضریب متوسط انبساط طولی در فاصله دمائی Δt و L_0 طول اولیه میله است .

میتوان بین‌ضریب‌انبساط‌طولی وضریب انبساط حجمی‌رابطه‌ای‌بطریق زیر بدست‌آورد. مکعب مستطیلی درنظر گیریدکه اضلاع‌آن L_1 و L_2 و L_3 باشد. بنابراین‌حجم‌آن‌برابر خواهد بود با :

$$V = L_1 L_2 L_3$$

و ازآنجا :

$$\frac{dV}{dT} = L_2 L_3 \frac{dL_1}{dT} + L_1 L_3 \frac{dL_2}{dT} + L_1 L_2 \frac{dL_3}{dT}$$

هرگاه طرفین تساوی فوق را بر $L_1L_2L_3$ تقسیم کنیم خواهیم داشت :

$$\frac{1}{V}\frac{dV}{dT}=\frac{1}{L_1}\frac{dL_1}{dT}+\frac{1}{L_2}\frac{dL_2}{dT}+\frac{1}{L_3}\frac{dL_3}{dT}$$

هرگاه انبساط گرمائی جسم در امتدادهای مختلف یکسان باشد هرسه عبارت طرف راست تساوی مساوی و برابر α هستند یعنی :

$$\beta=3\alpha \qquad (۱۲-۱۵)$$

ضریب انبساط طولی را با دستگاه انترفرومتراپتیکی اندازه می گیرند .

۱۵-۶ ، تنش گرمائی

هرگاه دو انتهای میله‌ای را بدونقطه ثابت بسته مانع انبساط یـا انقباض آن شویم و سپس دمای آنرا تغییردهیم درآن تنش کششی یاتراکمی بوجود میاید که **تنش گرمائی** نامیده میشوند . اندازه تنش گرمائی گاهی اوقات باندازه‌ای زیاد میشود که ازحد ارتجاع یا حتی ازحد گسیختگی جسم نیز بیشترمیشود . بنابراین درموقع ساختن کلیه انواع دستگاههائی که دمای عناصرسازنده آن متغیراست باید پیش بینی لازم برای انبساط گرمائی و جلوگیری از بوجودآمدن تنش گرمائی درجسم بشود . درلوله‌های ناقل بخار قسمی ازلوله را بشکل U خم میکنند و درپلهای فلزی یکطرف پل را آزاد میگذارند تا انبساط ممکن باشد .

محاسبه تنش گرمـائی درمیله‌ای که‌آزاد نیست بسیارآسان است . فرض کنیم دوطرف میله‌ای دردمای t بجائی بسته وثابت شده وسپس دمای آن به t_0 تقلیل داده شود .

هرگاه میله‌آزاد میبودکاهش طول نسبی‌آن برابر است با :

$$\frac{\Delta L}{L_0}=\bar{\alpha}(t-t_0)=\bar{\alpha}\Delta t \qquad (۱۳-۱۵)$$

چون میله‌آزاد نیست تا انقباض یابدپس باید ازدوطرف تحت تأثیرچنان تنش کششی قرارگیرد که بهمین اندازه تغییرطول پیداکند با استفاده از تعریف مدول یونگ خواهیم داشت :

$$Y=\frac{F/A}{\Delta L/L_0} \quad , \quad F=AY\frac{\Delta L}{L_0}$$

چنانچه $\frac{\Delta L}{L_0}$ را ازفرمول ۱۵-۱۳ بدست‌آورده درفرمول اخیرقراردهیم خواهیم داشت :

$$F=Ay\bar{\alpha}\Delta t$$

که نیروی کشش مؤثر برمیله است . تنش درمیله عبارتست از :

$$\frac{F}{A}=y\bar{\alpha}\Delta t \qquad (۱۵-۱۵)$$

مسائل

۱۵ـ۱ حد نسبت فشار گازی در نقطه ذوب سرب و نقطه سه گانه آب ، وقتی حجم گاز ثابت نگاهداشته شود برابر ۲/۱۹۸۱۶ است . دمای ذوب سرب چند درجه کلوین است ؟

۱۵ـ۲ (a) هرگاه بشما بگویند دمای بدن تان ۴۰°C است تب شدید دارید یا نه ؟ (b) دمای عادی بدن چه درجه‌ای از درجه بندی سلزیوس است. (c) دمای جوش اکسیژن مایع ۱۸۲/۹۷°C — است. معادل این دما را در درجه بندیهای کلوین و رانکین مشخص کنید. (d) درجه دمائی اندازه عددی سلزیوس وفارنهایت معادل آن یکی است .

۱۵ـ۳ بعدا خواهیم دید که بین فشار **p** و حجم **V** ودمای **T** وتعداد ملکولگرمهای **n** یك گاز کامل رابطه $p.V=nR'T$ برقراراست . ثابت کنید که ضریب انبساط حجمی برابراست با معکوس دمای کلوین گاز .

۱۵ـ۴ (a) رابطه بین توده ویژه ρ جرم **m** و حجم **V** عبارتست از $\rho=\frac{m}{V}$

ثابت کنید که :

$$\beta=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial T}$$

(b) توده ویژه نمك طعام درفاصله ۱۳°C — و ۱۹۳°C — از فرمول تجربی زیر بدست میاید :

$$\rho=2/1680(1-11/2\times10^{-5}t-0/5\times10^{-7}t^2)$$

β را در ۱۰۰°C — حساب کنید .

۱۵ـ۵ تغییرحجم نسبی $\frac{\Delta V}{V}$ یك فلز را وقتی دما از $T_1=-300°k$ تا T_2 (دمای ذوب فلز) ازرابطه زیربدست میاید :

$$\frac{\Delta V}{V} = \int_{T_r}^{T_m} \beta dT$$

با استفاده ازمنحنی شکل ۱۵ـ۹ نشان دهیدکه $\frac{\Delta V}{V}$ برای‌مس‌وپالادیوم‌وپلاتین‌یکی‌است. $\frac{\Delta V}{V}$ متوسط برای این سه فلزچه اندازه است .

۱۵ـ۶ حجم یك ظرف شیشه‌ای پراز جیوه دردمای $0°C$ برابر $1000 cm^3$ است. هرگاه آنرا تا $100°C$ گرم‌کنیم $15/2 cm^3$ جیوه‌ازظرف بیرون میریزد. هرگاه ضریب انبساط حجمی جیوه $0/000182$ باشد ضریب انبساط‌طولی شیشه چقدراست ؟

۱۵ـ۷ دردمای $20°C$ حجم بالن انبساط سنج شیشه‌ای تا روی خط معینی‌که روی دهانه آن کشیده شده است برابر $100 cm^3$ است. بالن از مایعی بضریب انبساط حجمی 120×10^{-5} پر است دمای مایع‌و بالن $20°C$ است. ضریب انبساط طولی شیشه $8 \times 10^{-6}/°C$ و سطح مقطع دهانه $1 mm^2$وفرضاً اندازه‌آن ثابت‌است . هرگاه دماتا $40°C$ بالا رود جیوه تا چه ارتفاعی درلوله بالا میرود .

۱۵ـ۸ برای اطمینان میخ پرچهای آلومینیومی‌که جهت‌اتصال بال هواپیما بکار میرود تا $-78°C$ بکمك یخ خشك (CO^2 جامد) سرد میشود تا بتوان قطرمیخ پرچ را ضخیم‌ترازسوراخ انتخاب نمود . هرگاه قطرسوراخ $0/2500 in$ باشد قطر میخ پرچ را در $20°C$ بدست‌آورید .

۱۵ـ۹ وقتی دمای میله‌ای $0°C$ به $100°C$ برسد طول آن از $30 cm$ به $30/075 cm$ میرسد میله دیگری باهمین طول و ازجنس دیگر وقتی همین تغییر دما را پیدا کند $0/045$ سانتیمتر برطولش اضافه میشود و میله سوم با همین تغییردما $0/065$ سانتیمتر اضافه طول میابد . هرگاه میله سوم از قرص‌هائی از جنس میله اول و میله دوم تشکیل شده باشدکه یکدرمیان رویهم قرارگرفته باشند . نسبت ضخامت قرصهای نوع اول و دوم را دریك واحد طول پیداکنید .

۱۵ـ۱۰ دردمای $20°C$ سوراخی درون برنج‌بقطر $1/000 in$ ایجاد شده است. وقتی دما به $200°C$ برسد و ضریب انبساط ثابت باشد قطرسوراخ رادر $200°C$ پیداکنید؟

۱۵ـ۱۱ فرض‌کنیدکمربندی آهنی بدور استوای زمین‌کشیده شده است در دمای $20°C$ کاملا بآن‌چسبیده است هرگاه دمای‌کمربند $1°C$ اضافه شود فاصله‌آن از زمین چه‌اندازه میشود .

۱۲-۱۵ پاندول ساعتی هردوثانیه یك نوسان کامل می‌کند . در دمای $25^{\circ}C$ ساعت درست کارمیکند . (a) هرگاه دمای‌آن به $15^{\circ}C$ برسد کاهش نسبی طول پاندول را بدست آورید . (پانـدول راآهنی و ساده فرض‌کنید) . (b) ساعت در دمای $15^{\circ}C$ در شبانروز چقدر تند یاکند میرود .

۱۳-۱۵ ساعتی با پاندول برنجی در دمای معینی درست‌کارمیکند . (a) تغییر دما چه اندازه باشد تا ساعت بیش ازیك ثانیه درشبانروز تند یـاکند نرود ؟ (b) اگردما زیاد شود ساعت تندکارمیکند یا کند ؟

۱۴-۱۵ طول پل‌آهنی $2000\,ft$ است . (a) هرگاه یکطرف‌آن‌آزاد ویکطرف‌آن مقیدباشد اندازه جابجائی انتهای‌آزاد درفاصله دمائی یك روز زمستانی با دمای $-20^{\circ}F$ ویك روز تابستانی بادمای $100^{\circ}F$ چقدر است . (b) هرگاه در تابستان دوطرف را مقید میکردیم تنش گرمائی درزمستان چقدر میشد ؟

۱۵-۱۵ سطح مقطع میله آهنی $1/5\,in^2$ است. کمترین نیروئی‌که از انقباض‌آن جلوگیری میکند چقدراست درحالیکه دمای‌آن از $520^{\circ}C$ به $20^{\circ}C$ درجه تنزل‌یابد .

۱۶-۱۵ طول سیم آهنی در $20^{\circ}C$ برابر $20\,ft$ است . هرگاه‌آنرا تا $520^{\circ}C$ گرم‌کنند $\frac{3}{4}\,in$ برطولش اضافه میشود (a) ضریب متوسط‌انبساط طولی‌آنرا بدست‌آورید. (b) اگردوطرف‌آنرا در $520^{\circ}C$ محکم به‌بندیم سپس‌آنرا تا $20^{\circ}C$ سرد کنیم‌بدون‌اینکه منقبض شود تنش حرارتی آنرا حساب‌کنید .

۱۷-۱۵ دوسیم یکی‌آهنی بطول $40\,cm$ و دیگری مسی بطول $36\,cm$ از یکطرف بهم وصل و دوانتهای‌آزادآنها بدونقطه بسته شده است اگر دراینحال دمای‌آندو را $50^{\circ}C$ بالابرند تنش درهریك چه اندازه است ؟

۱۸-۱۵ مقطع میله‌ای بـرنجی مطابق شکل ۱۵-۱۱ میباشد و دوسیم آهنی مطابق شکل بدو طرف میله برنجی وصل است . وقتی دما صفرسلزیوس است تنش مؤثر برآهن و برنج صفراست. هرگاه مجموعه را تا $300^{\circ}C$ گرم کنیم تنش‌کششی مؤثربرسیم‌آهنی چه انـدازه است . قبلا مفروضاتی راکه برای تسهیل کارانجام میدهید بیان‌کنید .

شکل ۱۵-۱۱

۱۹-۱۵ طول یك ریل‌آهنی $10,000\,ft$ است و پیش ازکارگذاشتن ،آنرا باندازه $3\,ft$ کشیده‌اند . (a) strian یاتغییر طول نسبی ریل چه‌اندازه است ؟ (b) هرگاه مدول کشسی $30 \times 10^6\,lb/in^2$ باشد نیروی تنش رابدست‌آورید . (c) هرگاه مقطع $50\,in^2$

باشد نیروی لازم برای ایجاد این تنش چه‌اندازه است ؟ (d) هرگاه ریل‌در دمای $60^\circ F$ کشیده به مقرآن وصل‌کرده باشند چنانچه دما به $0^\circ F$ تقلیل داده شود اندازه تنش چقدر میشود ؟ (e) درچه دمائی تنش‌کششی به تراکمی تبدیل میشود .

۱۵ـ۲۰ ثابت‌کنیدکه اگرجسمی تحت فشارهیدروستاتیکی درموقع گرم شدن نتواند منبسط‌شود ازدیاد فشارآن برابر است با :

$$\Delta P = B\bar{\beta}\Delta t$$

که درآن $\bar{\beta}$ ضریب انبساط حجمی متوسط و B مدول حجمی وهردوثابت ومثبت اند .

۱۵ـ۲۱ قطعه فلزی را در دمای $20^\circ C$ و فشار $1 atm$ درحجم ثابت نگاه داشته دمای‌آنرا به $32^\circ C$ میرسانند . فشار انتهائی را بدست‌آورید ؟ (b) هرگاه حجم فلز را بادیواره جامدی ثابت نگاه داریم‌که حداکثر تا ۱۲۰۰ آتموسفر فشار را تحمل میکند تاچه دمائی فلز رامیتوان گرم‌کرد ؟ B و $\bar{\beta}$ را عملا ثابت وبترتیب برابر $1/5 \times 10^{12} \frac{dynes}{cm^2}$ و $8 \times 10^{-5} (C^\circ)^{-1}$ فرض‌کنید .

۱۵ـ۲۲ چه فشار هیدروستاتیکی لازم است‌تاازانبساط حجمی قطعه‌ای مس در فاصله دمائی $20^\circ C$ و $30^\circ C$ جلوگیری‌کند ؟

۱۵ـ۲۳ با استفاده ازجدول ۱۵ـ۴ معین‌کنید هرگاه ظرفی‌آهنی‌که حجم‌آن ثابت فرض میشودازدمای $10^\circ C$ به $75^\circ C$ برسد ازدیادفشاردرآن‌چه‌اندازه است.

۱۵ـ۲۴ مایعی درون سیلندرفلزی است وروی‌آن پیستنی‌از همان جنس قرار دارد فشار و دما بترتیب $1 atm$ و $80^\circ C$ است پیستن‌راپائین میاوریم تا فشار $100 atm$ شود. درهمین حال‌آنرا به‌چه‌دمائی‌برسانیم تا فشار مجدداً بیك آتمسفر برسد ؟ پیستن وسیلندرفقط انبساط گرمائی‌داردودراثرفشارتغییرحجم نمی‌دهد ضریب‌تراکم مایع $50 \times 10^{-6} atm^{-1}$ ضریب انبساط حجمی مایع $\beta = 5/3 \times 10^{-4} (C^\circ)^{-1}$ وضریب انبساط طولی فلز برابر $(\alpha) = 10 \times 10^{-6} (C^\circ)^{-1}$ میباشد .

فصل شانزدهم

اندازه گیری گرما

۱۶ـ۱ ، گرما نوعی انرژی است

دمای جسم عاملی‌است که مشخص میکند که آیااین جسم باجسم دیگر که باآن درتماس است تعادل گرمائی دارند یانه . اینك فرض کنید دوجسم A و B که دمای A بیش‌ازدمای B است درتماس باشند . پس ازمدتی A با B بحال تعادل گرمائی میرسند . امانمیتوان استنباط کرد که برای‌رسیدن به‌تعادل دمائی جسم A «چیزی» ازدست میدهد که جسم B همان «چیز» را دریافت میکند . قدما نمی‌دانستند که‌آنچه از A به B جریان پیداکرده است چیست ولی‌امروزه‌محقق شده است که دراین میان‌آنچه‌از A به‌B منتقل میشود **صورت‌خاصی از انرژی است** که‌آنرا **گرما** مینامند .

گرماانرژی منتقله از یك دستگاه بدستگاه دیگراست و عامل این انتقال ، اختلاف دمای موجود بین دو جسم میباشد .

قدما انتقال گرما را نتیجه انتقال مایع نـافذ و نامرئی بنام **کالریك** میدانستند که بعقیده‌آنها ازسوختن اجسام بدست‌میاید ونیزمیتوانست ازطریق هدایت، درون جسم حرکت کند . ردنظریه‌کالریك یکی از قدمهای اساسی تکامل فیزیك درقرون هیجدهم و نوزدهم بود . دونفر که نقش اساسی را دراین زمینه بعهده داشته‌اند کنت رومفورد(۱۷۵۳ـ۱۸۱۴) وسرجیمز پرسکات ژول (۱۸۱۸ـ۱۸۸۹) بودند .

رومفورد سرپرست قسمت برقو زدن توپ بـرای دولت باواریا (بایر) بود . برای خنك‌کردن توپ در اطراف‌آن‌آب قـرار میدادند تا باجوشیدن وتبخیر، مانع ازداغ‌شدن توپ شود . عقیده بر این بود که وقتی جسمی بـذرات کوچك تقسیم شود (نظیرعمل تولید براده‌دربرقوزدن) ظرفیت‌آن برای‌نگهداری کالریك‌کم میشود وکالریك‌آن به‌آب‌منتقل‌شده آب را بجوش میاورد .

رومفورد ملاحظه کرد که حتی وقتی برقو کند میشود وبرادهای تولید نمی‌کند باز هم آب بجوش میاید و **مادام‌که‌کار مکانیکی انجام شود** حتی برقوی‌کند نیز قادر است کالریك بآب بدهد .

یکی ازاصول اساسی درفیزیك «اصل بقاء» است که بموجب‌آن ماده ، انرژی ، و .. خودبخودتولید نشده‌وازبین نمی‌روند ولی‌دراینجا کارمکانیکی ازبین‌میرفت‌وکالریك بخودی خودتولید میشد . باوجوداینکه رومفورد خود باین صراحت موضوع را چنین بیان نکرده ولی مسلماً باین فکرافتاده است که بجای اینکه دوکمیت کاروکالریك دوکمیت مستقل ولی فتا پذیرفرض شوند منطقی‌تراست که هردورا یکی پنداریم ولی تـابع «اصل بقاء» باشند . بنابراین وی معتقد شدکه‌آنچه قبلا کالریك نامیده میشد چیزی جزصورت دیگری ازانرژی نیست. حال دیگرتولیدگرما هنگام‌برقوزدن‌همراه‌باازبین رفتن‌یك چیزدیگرنبودبلکه تغییر شکل یك چیزازصورتی بصورت دیگربود . امروزه یکی ازمثالهائی‌که برای نشاندادن‌اصل بقاء انرژی بیان میشود تبدیل انرژی مکانیکی بگرماست .

رومفورد اندازه‌گیریئی انجام داد وکارمصرفی ومقدارآب تبخیرشده را اندازه‌گرفت ولی چون اندازه‌گیری‌هـــــای او با دقت توأم نبود به نتیجه کمی‌نرسید ولی ژول در سالهای۱۸۴۳ تا ۱۸۷۸ باانجام‌آزمایشهای دقیق‌نشانداد که هرجا تحت‌هرشرائط، انرژی مکانیکی معینی‌بگرمای مشخصی‌تبدیل میشود و بدین ترتیب هم‌ارزی‌کار وگرما ثابت شد .

۲-۱۶ ، واحدگرما ـ معادل مکانیکی‌گرما

پیش از آنکه معلوم شودگرما نوعی انرژی است در واحد برای اندازه‌گیری‌گرما معمول بوده‌است .کالری راواحد انگلیسی مقدارگرمابا **British thermal Unit**. کالری را مقدارگرمائی مینامندکه بتواند دمای یك‌گرم‌آب را یك درجه سلزیوس بالابرد و **Btu** مقدارگرمائی است‌که دمای یك پـوندآبرا یك درجه فارنهایت افزایش دهد * با وجود اینکه این واحدها هنوز معمول‌اند معذالك تعریف آنها کمی تغییر کرده است . بدودلیل : اول اینکه امروزه مسلم است‌که‌گرما نوعی انرژی است ونباید واحدهای‌دلخواهی برای‌گرما تعریف‌کرده سپس‌آنرا باصرف وقت وزحمت زیاد به واحدهای‌کار و انرژی‌یعنی ژول و فوت پوند تبدیل نمود . دلیل دوم این‌است‌که مقدارگرمای لازم برای‌گرم‌کردن

---

* درحقیقت میبایست واحدگرما را دردستگاه صنعتی‌گرمای لازم برای افزایش دمای یك واحد جرم بمقدار یك درجه فـارنهایت تعریف کنیم لیکن چون **Slug** واحـدی است‌که چندان معمول نیست $\frac{1}{32/174}$ آنرا یك‌پوند جرم نامیده بعنوان واحد جرم انتخابمیکنیم.

یك گرم آب بمقدار یك درجه سلزیوس ، ثابت نیست یعنی مثلا وقتی آب از ۱°C به ۲°C میرسد یا وقتیکه از ۳۷°C به ۳۸°C دومقدار گرمای متفاوت دریافت میکند . این تغییرات درجدول ۱۶ـ۱ نشانداده شده است . اما بنابر یك موافقت نامه بین‌المللی کالری و Btu را امروزه بصورت مضاربی از ژول تعریف میکند یك کالری دقیقاً برابر $\frac{۱}{۸۶۰}$ وات ساعت است که با کالری قدیم تقریباً بیك اندازه است . Btu را برحسب کالری با استفاده از رابطه زیر بدست میاورند .

جدول ۱۶ـ۱

گرمای لازم برای کردن یك گرم آب بمقدار یك درجه سلزیوس

دمای سلزیوس	۰	۲۰	۴۰	۱۰۰	۸۰	۶۰
کالری لازم	۱/۰۰۸۷	۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۷۶	۱/۰۰۶۵	۱/۰۰۳۴	۰/۹۹۹۳

$$۱Cal/gm°C = ۱Btu/lbm°F$$

و ازاین روابط چنین نتیجه میشود :

$$۱cal = \frac{۱}{۸۶۰} WaH.hr = ۴/۱۸۶۰ \ j$$

$$۱Btu = ۷۷۸/۲۶ ftlb = ۲۵۱/۹۹۶ Cal$$

ضرایب ژول کالری ۴/۱۸۶۰۵ و $۷۷۸/۲۶ \frac{ftlb}{Btu}$ را معادل مکانیکی واحد گرما مینامند . اعداد مذکور براساس تعریف بدست آمده‌اند نه تجربه. هرگاه کمی منطقی فکر کنیم باین نتیجه میرسیم که بایدکالری و Btu را از عدد واحدهای انرژی خارج کرده ، ارگ، ژول وفوت‌پوند را بعنوان واحد بکاربیریم . اما این‌دو واحد آنقدر رایج شده‌اندکه حذف آنها مستلزم گذشت زمان زیادی است.

۱۶ـ۳ ، ظرفیت گرمائی

فرض کنیم بین یك جسم ومحیط خارج مقدار گرمای dQ مبادله شده است . هرگاه دمای

جسم باندازه dt تغییر کند بنابر تعریف نسبت $\frac{dQ}{dt}$ را **ظرفیت گرمائی** جسم مینامیم . چون گرمای مبادله شده dQ معمولا متناسب با m جرم جسم است C **گرمای ویژه** جسم چنین تعریف میشود :

$$C=\frac{dQ}{mdt} \qquad (۱-۱۶)$$

نسبت گرمای مبادله شده بین جسم ومحیط (dQ) به حاصلضرب جرم جسم در تغییر دمای آنرا (mdt) گرمای ویژه جسم مینامیم . گرمای ویژه آب $1cal/gmC^\circ$ و یا $1Btu/lbF^\circ$ است که دراکثر محاسبات مورد استفاده قرارمیگیرد .

دراغلب موارد، جرم اجسام را برحسب ملکولگرم آنها می‌سنجند. هرگاه جرم ملکولی جسمی برابر M باشد M گرم ازآن جسم راملکولگرم آن جسم مینامند . هرگاه بخواهیم تعداد ملکول گرم موجود درمقدار معینی ازجسم رابدست آوریم کافی است بنویسیم $n=\frac{m}{M}$.

هرگاه درفرمول ۱۶–۱ بجای m مقدار آنرا دهیم خواهیم داشت :

$$M.C=\frac{dQ}{ndt}$$

حاصلضرب $M.C$ را به C نمایش داده آنرا گرمای ویژه ملکولی مینامیم. بنابراین خواهیم داشت :

$$C=\frac{dQ}{ndt}=M.c$$

گرمای ویژه ملکولی آب برابر $18\,cal/mdaC^\circ$ است .

ازفرمول ۱۶–۱ میتوان درمحاسبه گرمای کل مبادله شده توسط جسم بامحیط رادر فاصله دمائی t_1 و t_2 بطریق زیرمحاسبه نمود :

$$Q=m\int_{t_1}^{t_2} cdt \qquad (۳-۱۶)$$

گرمای ویژه اجسام با دما تغییرمیکند . بنابراین باید c بصورت تابعی از t بیان شود تا انتگرال فوق قابل محاسبه شود . هرگاه در فاصله دمائی معین بتوان c را ثابت فرض نمود فرمول ۱۶–۳ بصورت زیردرمیاید :

$$Q = mc(t_2 - t_1) \qquad (۴-۱۶)$$

گرمای ویژه متوسط $\bar{c}$ درهرفاصله دمائی عبارت است از نسبت گرمای مبادله شده دراین فاصله برحاصلضرب جرم جسم در تغییردمای آن . پس داریم :

$$Q = m\bar{c}(t_2 - t_1) = m\int_{t_1}^{t_2} cdt \qquad (۵-۱۶)$$

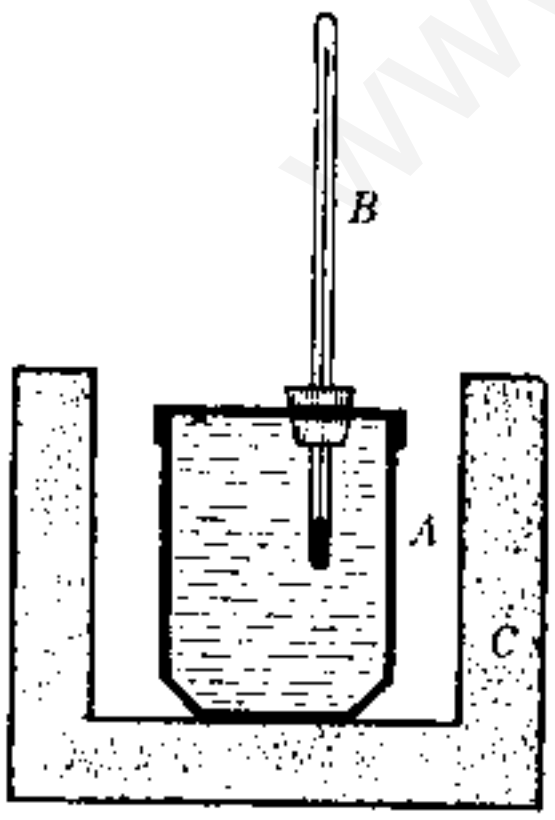
فرمولهای مشابه ۱۶ـ۳ و ۱۶ـ۴ و ۱۶ـ۵ را میتوان برای m و c و $\bar{c}$ نوشت .

تنها گرمای ویژه و گرمای ویژه ملکولی نیستند که برای اندازه گیری آنها بایدمقدار گرما را اندازه گرفت . ضریب هدایت گرمائی ، گرمای نهان ، ارزش گرمائی سوختها ، گرمای تبخیر ، گرمای انحلال و گرمای فعل وانفعال ، کمیاتی هستند که تعیین آنها مستلزم اندازه گیری گرماست . مقادیر مذکور معرف خواص گرمائی یك جسم هستند . مبحثی از فیزیك وشیمی ـ فیزیك راکه به اندازه گیریهای گرمائی اختصاص داده شده **گرماسنجی** نام نهاده‌اند که یکی ازپرزحمت‌ترین رشته‌های فیزیك تجربی است .

۱۶ـ۴ ، اندازه‌گیری گرمای ویژه

ساده‌ترین روش اندازه گیری گرمای ویژه متوسط یا گرمای ویژه ملکولی متوسط در فاصله دمائی ۰°C و ۱۰۰°C اندازه گیری با **گرماسنج آبی** و استفاده از **روش اختلاط** است .

گرماسنج تشکیل شده‌است ازظرفی فلزی با جدار نازك (A) (شکل ۱۶ـ۱) که سرپوشی روی آن قرار دارد . درون ظرف مقداری آب ریخته شده است . دماسنج B از سرپوش عبورکرده درون آب قرارمی گیرد . اطراف جدار ظرف را پوشش عایق (عایق گرمائی) C پوشانیده است و بدین ترتیب مبادله گرما بین گرماسنج و محیط بمقدار ناچیزی تنزل داده میشود . هرگاه قبل ازآنکه گرمای Q به گرماسنج داده شود وبعد ازآن دمای دماسنج را بخوانیم افزایش دمای آب و گرماسنج معلوم بودن و با معلوم بودن آن گرمای Q قابل اندازه گیری است .



شکل ۱۶ـ۱ کالریمتر آبی

گرمای ویژه متوسط را بدین طریق اندازه میگیرند . نمونه‌ای ازجسمی راکه باید گرمای ویژه‌آن اندازه گرفته شود درکوره و یا در بخارآب تا دمای معینی گرم میکنند . سپس‌آنرا بسرعت واردکالریمترکرده‌آنرا بهم میزنندتا تعادل دمائی برقرارشود. سپس‌دمای آبرامجدداً میخوانند. هرگاه اتلاف گرما ازطریق دیواره ناچیزفرض شود ، گرمائی که جسم از دست داده برابر گرمائی است که گرماسنج وآب درون‌آن ، دریافت داشته‌اند .

مقادیرمربوط به‌آب، گرماسنج وجسم را بترتیب با اندیس‌های w و c و s مشخص میکنیم . دمای اولیه جسم t_s و دمای اولیه آب و گرماسنج t_1 و دمای تعادل را t_2 مینامیم . هرگاه گرمای ویژه هرسه جسم را ثابت فرض‌کنیم خواهیم داشت :

$$m_s c_s(t_s - t_2) = m_w c_w(t_2 - t_1) + m_c c_c(t_2 - t_1)$$

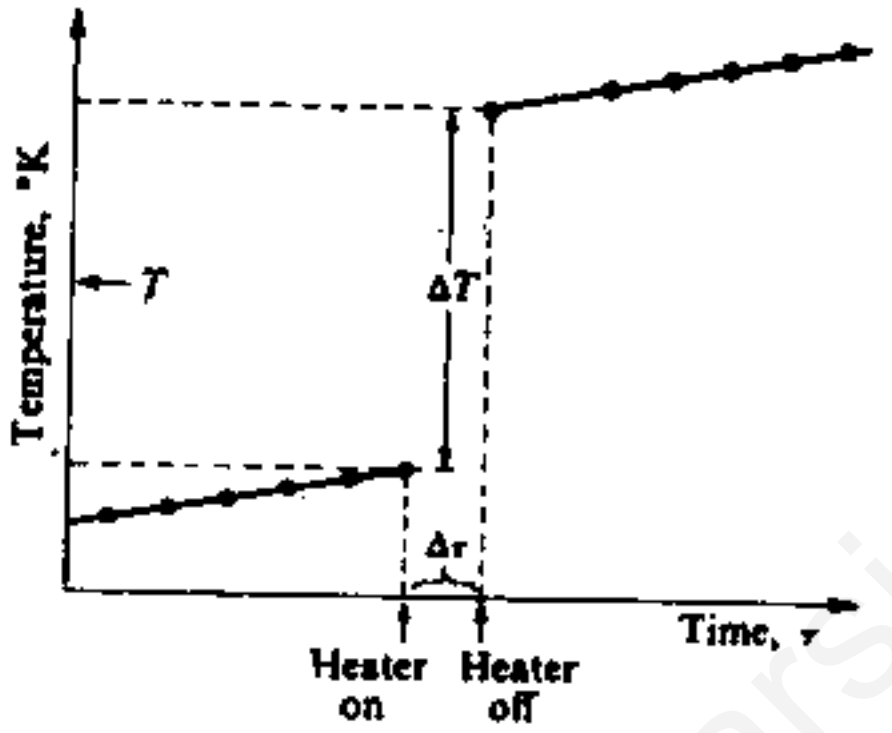
گرمائیکه گرماسنج گرفته + گرمائیکه‌آب گرفته = گرمائیکه جسم ازدست داده

درعمل گرماسنج حتماً بامحیط‌خارج مبادله گرمائی میکند، مگراینکه پیش بینی لازم برای جلوگیری ازاین مبادله گرمائی بشود . راه بسیار ساده‌ای برای جلوگیری از این مبادله این است که وضع راطوری ترتیب دهند که گرماسنج، ازدمائی پائین‌تر ازدمای‌محیط تادمائی بالاترازدمای محیط گرم‌شود. وقتی‌دمای گرماسنج پائین‌تراز دمای محیط‌است گرما ازخارج دریافت‌کرده و همینکه دمای‌آن بالا رفت گرما بخارج پس میدهد و مجموع دو گرمای مبادله شده‌تقریباً برابرصفراست . بازهم تأکید میکنیم که بااین روش، گرمای ویژه متوسط جسم رادرفاصله t_2 و t_s بدست میاوریم . گرچه این گرمای ویژه متوسط ، درصنعت بیشترمورد استفاده است ، امادرفیزیك مدرن که بمقادیر دقیق گرمای ویژه هرجسم ، ازصفر مطلق تانقطه ذوب احتیاج دارند گرمای ویژه متوسط ارزشی ندارد .

تغییرات گرمای ویژه برحسب دما نزدیکترین ومستقیم‌ترین وسیله‌ایست که تغییرات انرژی ذرات متشکله یك جسم را برای ما مشخص میکند . اندازه‌گیری گرمای ویژه ترکیبات شیمائی ، فلزات معمولی ، آلیاژها ، فلزات فوق رسانا وغیره یکی ازجالبترین‌و بهترین‌کارهای تجربی فیزیك مدرن است .

تقریباً تمام گرماسنج‌های جدید ، الکتریکی هستند. گرمائیکه بایدبه‌نمونه‌ای ازجسم داده شود تا دمای‌آن بالارود ، با عبورجریان ازسیم پیچی ایجاد میشود همینکه دمای سیم‌پیچ کمی زیادتر از دمای جسم شد (جسم را درون سیم پیچ قرارمیدهند) گرما ازسیم پیچ به جسم منتقل میشود . میتوان طوری ترتیب داد که گرمای تلف شده بمقدار بسیار ناچیز تقلیل داده شود دماسنج دراین نوع گرماسنجی معمولا دما سنج مقاومتی یا ترموکوپل است که‌هم حساس‌وهم سریع‌العمل‌است. دماراقبل ازآنکه‌کلید وصل شودمیخوانند(سمت‌چپ‌شکل۱۶ـ۲) باید متوجه این واقعیت بود که قبل ازوصل‌کلید ، گرما ازمحیط بجسم جریان دارد وبهمین

دلیل پیش از برقراری جریان ، جسم گرم میشود ، مدت عبورجریان ازسیم‌پیچ $\Delta\tau$ است . (τ علامت‌اختصاری زمان است) دراین فاصله زمانی هیچگونه‌اندازه گیری دمائی بعمل‌نیامده است . پس ازقطع‌جریان (سمت راست‌شکل۱۶ـ۲) بازهم دمای جسم روبافزایش‌است و این نشان میدهدکه هنوز دمای محیط بیش ازدمای جسم است .



شکل۱۶ـ۲ منحنی دما–زمان درمدتیکه‌گرمای ویژه جسمی باگرماسنج‌اندازه‌گرفته میشود .

هرگاه اختلاف پتانسیل الکتریکی دوسرسیم پیچ V و شدت جریان در زمان $\Delta\tau$ برابر I باشدگرمای دریافتی جسم $VI\Delta\tau$ وگرمای ویژه ملکولی چنین محاسبه‌میشود :

$$C = VI\Delta\tau / n\Delta T$$

دراین فرمول C برحسب $\frac{\text{ژول}}{\text{mole}C^\circ}$ ، Iبرحسب‌آمپر، V برحسب ولت، τ برحسب‌ثانیه و ΔT برحسب درجه سلزیوس سنجیده میشود . گرمای ویژه ملکولی در دمای T یعنی دمای متوسط درفاصله دمائی ΔT است .درآزمایشهای دقیق$\Delta T = 0/01^\circ K$است .

شکل ، اندازه و ساختمان گرماسنج ، سیم‌پیچ ، دماسنج وغیره به طبیعت جسم مورد آزمایش و فاصله دمائی بستگی دارد . نمیتوان‌گرماسنجی ساخت‌که برای عموم آزمایشها مناسب باشد. بطورکلی اندازه‌گیری گرمای ویژه مسئله‌ایست‌که درآن مهارت شخص ،دقت درساختن اسبابها وشیشه‌گری خوب لازم است .

۱۶ـ۵ ، مقادیرتجربی ظرفیت‌گرمائی وگرمای ویژه

مقدارگرمائی‌که‌بجسمی داده یا ازآن‌گرفته میشود به نحوه‌کنترل دستگاه در حین انتقال‌گرما بستگی دارد. مثلاآیا انتقال‌گرما **درحجم ثابت** ویا **درفشارثابت** صورت‌گرفته

است . گرمای ویژه درفشارثابت رابه c_p (یا C_p) و درحجم ثابت را به c_v (یا C_v) نشان میدهند .در روش اختلاط ونیر درروش الکتریکی فشار مؤثر برجسم ثابت نگاهداشتهمیشود. پس گرمای ویژه در این حالات c_p (بـا فشارثابت) است. باید این حقیقت را خاطر نشان ساخت که عملا اندازه گیری دقیق c_v غیرممکن‌است. چه‌عملاممکن نیست حجم‌جسمی راثابت نگاهداشته‌ترتیبی دادکه گرما ازدیواره ظرف‌نیزعبور کند .

برای ساختن دستگاه‌ها مثلا لوله‌های بخار یادیگهای بخار و غیره کافی است گرمای ویژه متوسط درفشارثابت معلوم باشد . دراین مواردکافی است گرمای ویژه ازطریق‌اختلاط اندازه گیری شود (یعنی دقت بیش ازاین موردنیاز نیست) ونتایج چنداندازه گیری ازاین قبیل درجدول ۲-۱۶ ثبت‌شده است .گرمای ویژه اجسام معمولا از $1 cal/gm.^\circ C$ کمتر است وهرچه جرم ملکولی جسم بیشتر باشد گرمای ویژه‌آن کمتراست . درستون آخر جدول نظم جالبی که اولین بار دو دانشمند فرانسوی دولن وپتی در ۱۸۱۹ کشف کردند نشانداده شده است . گرمای ویژه ملکولی متوسط (در فشار ثابت) برای همه فلزات (باستثنای چند فلزسبك) مساوی و برابر $6 cal/mole C^\circ$ است . بـا وجوداینکه این نتیجه‌ک بقانون دولن وپتی مشهوراست‌بطورتقریبی ومتوسط درفاصله دمائی معین صحیح است یعنی پایه‌علمی مشخص نـداردمعذالك اهمیت علمی خاصی دارد . درشیمی خوانده‌ایم که تعداد ملکولهای موجود در ملکولگرم کلیه اجسام مساوی یکدیگراست . نتیجه میشود که گرمای لازم برای

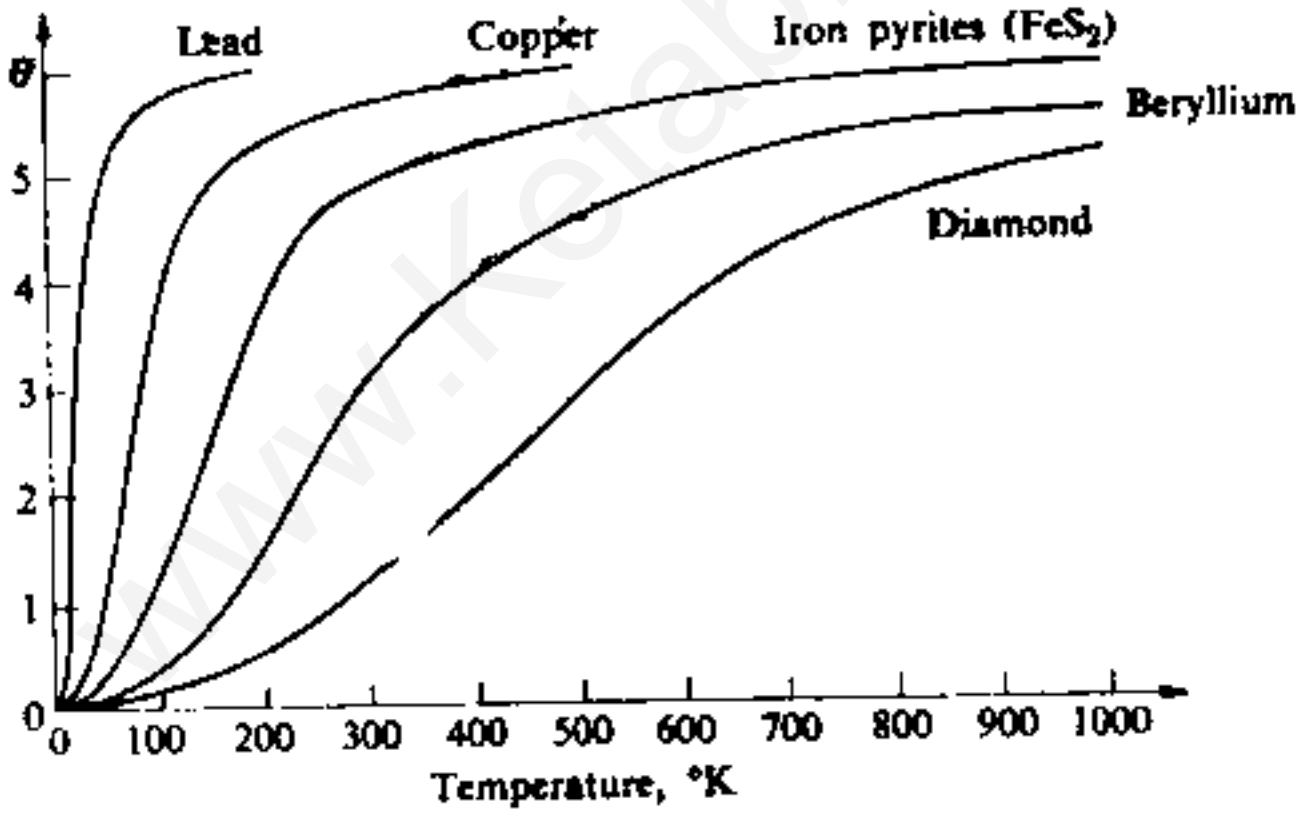
جدول ۲-۱۶
گرمای ویژه متوسط ملکولی چند فلز

نام فلز	$\bar{C}_p$ برحسب cal/gmC°	حدوددما $^\circ C$	M ملکولگرم	$\bar{C}_p$ گرمای‌ویژه ملکولی برحسب $cal/mole\text{-}C^\circ$
بریلیوم	۰/۴۷۰	۲۰ — ۱۰۰	۹/۰۱	۴/۲۴
آلومینیوم	۰/۲۱۷	۱۷ — ۱۰۰	۲۷/۰	۵/۸۶
آهن	۰/۱۱۳	۱۸ — ۱۰۰	۵۵/۹	۶/۳۱
مس	۰/۰۹۳	۱۵ — ۱۰۰	۶۳/۵	۵/۹۰
نقره	۰/۰۵۶	۱۵ — ۱۰۰	۱۰۸	۶/۰۵
جیوه	۰/۰۳۳	۰ — ۱۰۰	۲۰۱	۶/۶۴
سرب	۰/۰۳۱	۲۰ — ۱۰۰	۲۰۷	۶/۴۲

دمای یك ملکول از هر جسم مقداریست ثابت و تابع جرم ملکولی نیست . مثلا گرمای لازم برای هراتم سرب (۲۰۷) که جرم اتمی آن تقریباً ده‌برابر جرم اتمی آلومینیوم(۲۷) است باگرمای لازم برای هراتم آلومینیوم باهم برابراند. بعبارت دیگر گرمای لازم برای بالابردن دمای یك جسم تابع تعداد ملکولهای موجود درجسم است نه جرم آن. این اولین قدم درشناختن خاصیت فیزیکی معینی ازجسم است که مستقماً باساختمان ملکولی جسم مربوط میباشد .

اندازه گیری گرمای ویژه موقعی از نظر تئوری دارای اهمیت است که بتوان نحوه بستگی C_v گرمای ویژه با حجم ثابت جسم را بادما کاملا مشخص نموده و سپس نتایج تجربی را با نتایج نظری مقایسه نمائیم. آنچه ما اندازه میگیریم C_p است. اما خوشبختانه با فرمولی که نیمه نظری نیمه تجربی است و Nernst و Lindemann آنرا بدست آورده‌اند،میتوان رابطه بین C_p و C_v را بطریق زیرمشخص نمود :

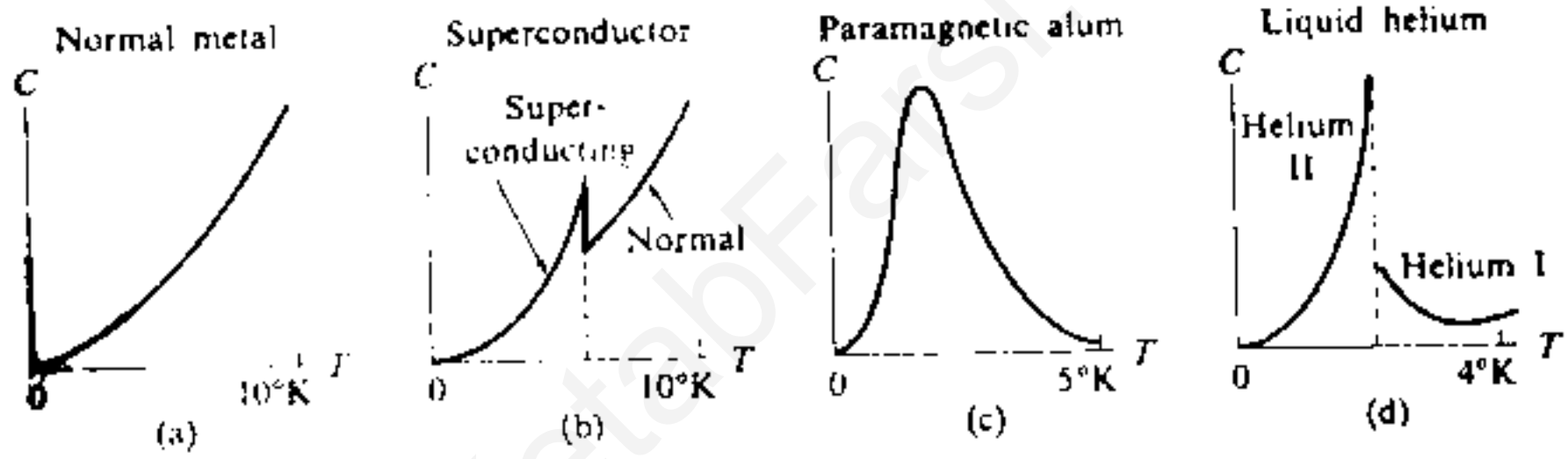
$$C_v = C_p\left(1 - 0/0214\frac{\text{molek}^\circ}{\text{cal}} C_p \frac{T}{T_m}\right)$$



شکل ۱۶–۳ تغییرات C_v چند جسم جامد برحسب دما

که درآن T_m دمای ذوب جسم است . بکمك این رابطه ومقادیر C_p حاصل ازاندازه گیری، C_v را درفاصله ۴°K تا ۱۰۰۰°K معین کرده منحنی شکل ۱۶–۳ را رسم کرده‌اند. منحنی های فلزات دیگر بین منحنی‌های مربوط به سرب والماس واقع‌اند و درحقیقت این دومنحنی، منحنی‌های ابتدائی و انتهائی هستند . میتوان باصرفنظر کردن ازبعضی استثنائات (که بحث در علل آنها ازحوصله ایـن کتاب خارج است) ادعا کرد که وقتی دما بسمت بینهایت میل کند کلیه منحنی‌ها برخط افقی 6cal/moleK° مماس میشوند . بنابراین قانون دولن‌وپتی برای تمام فلزات جامداز ۲۰۰°K ببالاو برای الماس از ۲۰۰۰°K ببالا صادق است .

شکل کلی منحنی‌های شکل ۱۶-۳ یکسان‌است. همه آنها ازصفرشروع ودرابتدا سریعاً صعودکرده سپس بـوضع افقی نزدیك ودرحدبه $6 cal/mole^{\circ}k$ میرسد . دبای Deby نشان دادکه گرمای ویژه ملکولی‌غیرفلزات مربوط به ارتعاشی است که درملکولهای موجود در شبکه بلورین آنها بـوجود میاید . اما باید دانست که تغییرات گرمای ویژه بسیاری از اجسام رانمیتوان بکمك نظریه دبای مورد تفسیرقرار داد . درشکل ۱۶-۴ وضع چهارجسم که تغییرات گرمای ویژه آنها غیرطبیعی‌است نشانداده شده است . منحنی‌ها تغییرات گرمای ویژه متعدد وگوناگون هستند وهریك معرف خواص ملکولی وطرز قرارگرفتن ملکولها و اتمها درشبکه بلور درماده بخصوصی است تفسیرهای نظری درباره تغییرات گرمای ویژه‌از مباحث پیچیده و درعین حال جالب **فیزیك حالت جامد** است .



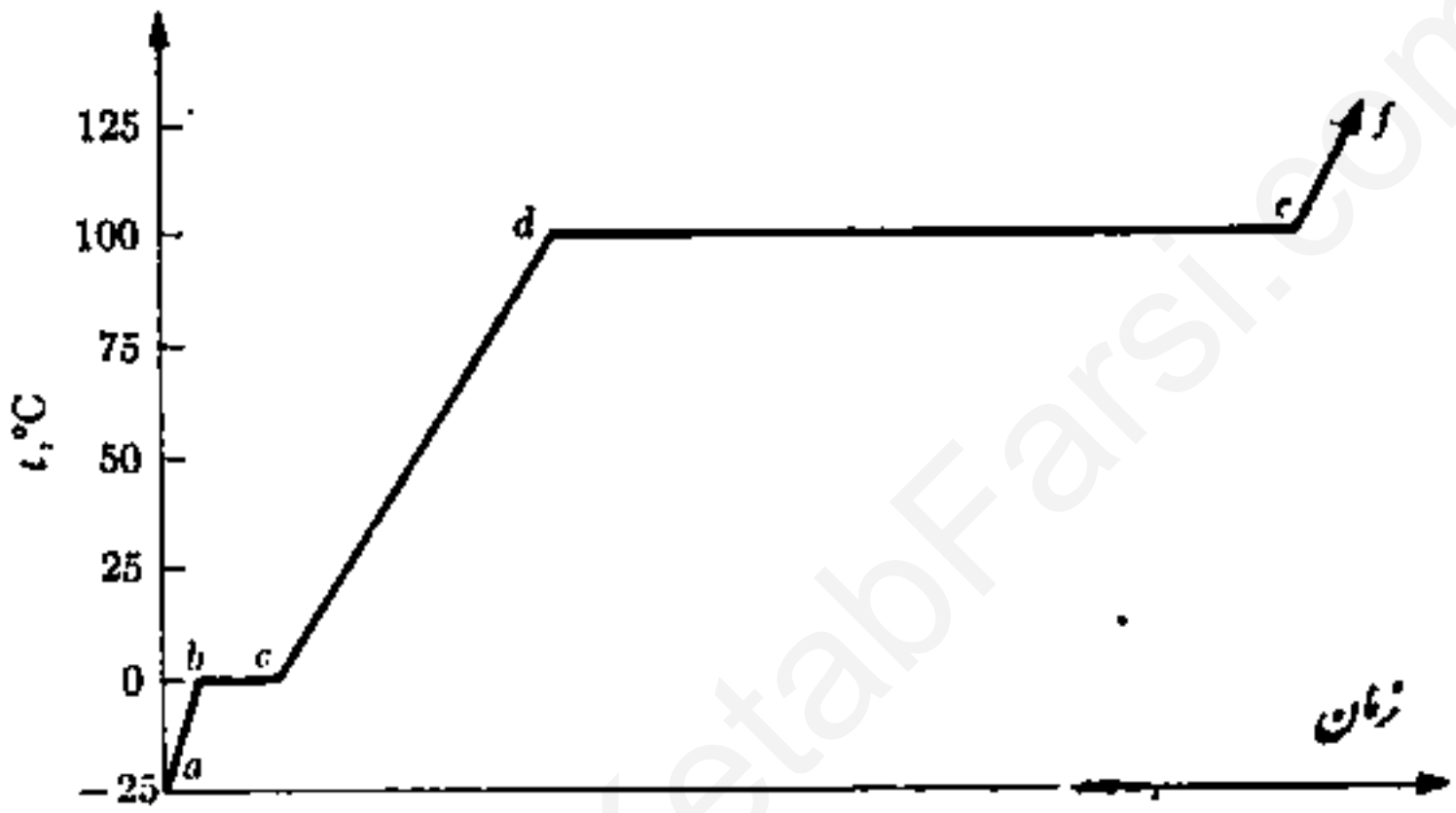
شکل ۱۶-۴ تغییرات گرمای ویژه ملکولی اجسام برحسب دما دردمای‌های پائین صورتهای مختلفی دارد که نشانه اختلاف موجود درساختمان اتمی‌آنهاست .

۱۶-۶ ، تغییرحالت

اجسام دارای سه حالت فیزیکی جامد ، مایع یاگاز هستند . مثلا H_2O ممکن‌است بصورت یخ (جامد) یا آب (مایع) و یا بخار (گاز) بـاشد . همه اجسام بجز آنهائیکه در دمای پائین‌تر از نقطه جوش تجزیه میشوند میتوانند هریك ازسه حالت فیزیکی فوق‌الذکر را داشته باشند فقط باید شرائط دما وفشار آنها درهرحالت ، مخصوص ومتناسب باآن‌حالت باشد . انتقال ازحالتی بحالت دیگر ، باگرفتن یا پس دادن **گرما ونیز** با تغییرحجم‌همراه است .

بعنوان مثال فرض‌کنید مقداری یخ $-25^{\circ}C$ دردست بـاشد . یخ را خردکرده در ظرفی میریزیم و دماسنجی را درآن قرارمیدهیم . دراطراف ظرف سیم‌پیچ الکتریکی قرار میدهیم بطوریکه بتوان گرما را درهرثانیه بمقدار معین وثابت وارد ظرف نمود وفرض‌کنیم گرما از **طریق** دیگری وارد ظرف نشود . ازدیـاد دمای یخ در قسمت **ab** ازمنحنی شکل ۱۶-۵ نشانداده شده‌است . گرم شدن یخ تا دمای $0^{\circ}C$ ادامه دارد . در این فـاصله دمائی

گرمای ویژه یخ درحدود $0/55 cal/gm C^\circ$ است . لحظه‌ای پس ازرسیدن به این دما مقداری آب درون ظرف پیدا میشود . بعبارت دیگر یخ ذوب میشود. پدیده ذوب تغییرحالت ازحالت جامد به حالت مایع است . درتمام مدت ذوب دماسنج افزایش دمائی نشان‌نمیدهد و با جودآنکه شدت جریان گرمائی بهمان اندازه قبل وجوددارد دما در $0^\circ C$ ثابت‌میماند. تا بالاخره تمام یخ ذوب شود (نقطه c) (بایدآب ویخ را مرتباً بهم زد والافقط دمای آب اطراف یخ صفردرجه است .



شکل ۱۶–۵ دما درحین تغییرحالت ثابت می‌ماند

همینکه آخرین ذره یخ ذوب‌شددمای آب بطورمتشابه شروع به افزایش میکند (از c تا d) . سرعت افزایش دما دراین مرحله کمتر ازمرحله گرم شدن یخ است زیرا گرمای ویژه آب بیش ازگرمای ویژه یخ است .همینکه آب بدمای $100^\circ C$ رسید حبابهای بخار(حالت گازی شکل آب) شروع ببالاآمدن ازسطح آب میکند . گوئیم آب بجوش‌آمده است . دمای آب ، مادام که تمام آن به بخارتبدیل نشده است در $100^\circ C$ باقی میماند . در اینجا نیز نوع دیگری تغییرحالت ازمایع به بخار پدید میاید .

هرگاه بخارحاصل را درظرفی جمع کرده از پخش آن جلوگیری کنیم (برای اینکار ظرف باید خیلی بزرگ باشد .) میتوان گرم کردن را بازهم ادامه داد (از e تا f) گازرا در اینحال بخار داغ Superheated steam مینامند .

نظیرمنحنی مذکورکه بـرای آب رسم شده است برای اکثرمواد دیگر نیزمیتوان چنین منحنی رسم نمود . بعضی از اجسام قبل‌ازرسیدن بنقطه ذوب، تجزیه‌شده وبرخی‌نظیر شیشه وقیر در دمای مشخص تغییرحالت نداده بلکه درحین گرم شدن بتدریج نرم میشوند . مواد بلورین نظیریخ وفلزات، دردمای مشخص تغییرحالت میدهند.شیشه و قیرمانند مایعاتی

که خارج از حد طبیعی سرد شده‌اند Supercooled liqnids و ویسکوزیته زیاد دارند میباشد .

جدول ۱۶-۳
گرمای نهان ذوب و تبخیر چندجسم

نام جسم	دمای ذوب عادی		گرمای نهان ذوب cal/gm	دمای جوش عادی		گرمای نهان تبخیر cal/gm
	°k	°C		°k	°C	
هلیوم	۳/۵	−۲۶۹/۶۵	۱/۲۵	۴/۲۱۶	−۲۶۸/۹۳	۵
هیدروژن	۱۳/۸۴	−۲۵۹/۳۱	۱۴	۲۰/۲۶	−۲۵۲/۸۹	۱۰۸
ازت	۶۳/۱۸	−۲۰۹/۹۷	۶/۰۹	۷۷/۳۴	−۱۹۵/۸۱	۴۸
اکسیژن	۵۴/۳۶	−۲۱۸/۷۹	۳/۳۰	۹۰/۱۸	−۱۸۲/۹۷	۵۱
الکل اتیلیك	۱۵۶/	−۱۱۴	۲۴/۹	۳۵۱	۷۸	۲۰۴
جیوه	۲۳۴	−۳۹	۲/۸۲	۶۳۰	۳۵۷	۶۵
آب	۲۷۳/۱۵	۰/۰۰	۷۹/۷	۳۷۳/۱۵	۱۰۰/۰۰	۵۳۹
کوکرد	۳۹۲	۱۱۹	۹/۱	۷۱۷/۷۵	۴۴۴/۶۰	۷۸
سرب	۶۰۰/۵	۳۲۷/۳	۵/۸۶	۲۰۲۳	۱۷۵۰	۲۰۸
آنتیموان	۹۰۳/۶۵	۶۳۰/۵۰	۳۹/۴	۱۷۱۳	۱۴۴۰	۱۳۴
نقره	۱۲۳۳/۹۵	۹۶۰/۸۰	۲۱/۱	۲۴۶۶	۲۱۹۳	۵۵۸
طلا	۱۳۳۶/۱۵	۱۰۶۳/۰۰	۱۵/۴	۲۹۳۳	۲۶۶۰	۳۷۷
مس	۱۳۵۶	۱۰۸۳/	۳۲	۱۴۶۰	۱۱۸۷	۱۲۱۱

مقدار گرمائیکه بهرواحد جرم از جسم جامدی باید داده شود تا در نقطه ذوب بمایع تبدیل شود **گرمای نهان ذوب** نامیده میشود . مقدار گرمائیکه یك واحد جرم از جسم مایعی میگیرد تا درنقطه جوش به‌بخار تبدیل شود **گرمای نهان تبخیر** نامیده میشود . گرمای نهان برحسب کالری برگرم یا Btu برپوند بیان میشود . مثلا گرمای نهان یخ ۸۰cal/gm یا ۱۴۴Btu/lb وگرمای نهان تبخیرآب ۵۳۹cal/gm یا ۹۷۰Btu/lb است .

هر گاه از بخار گرما گرفته شود دمای آن پائین آمده در دمای جوش مجدداً بحالت مایع بازمیگردد. این نوع تغییرحالت‌را **میعان** مینامند . درحین میعان، جسم همان گرمائی راکه در تغییرحالت ازمایع بجامد گرفته است بخارج پس میدهـد . لذا گرمای میعان و گرمای تبخیر باهم مساویند . همچنین اگر ازمایعی گرما گرفته شود بدمای ذوب رسیده با از دست دادن گرما بجامد تبدیل میشود . مقدار گرمائیکه یك گرم ازمایعی از دست میدهد تابجامد تبدیل شود گرمای انجماد نامیده شده و اندازه آن برابر گرمای ذوب است . بطورخلاصه نقاط ذوب وانجماد برنقاط میعان وتبخیر برهم منطبق وگرماهای نهان ذوب و نیز گرمای نهان میعان وتبخیر باهم مساویند .

وقتی جسمی دردمای ذوب است برحسب اینکه گرما بآن داده یا ازآن بگیرند ذوب یا منجمد میشود . مثلا هر گاه بمخلوط آب ویخ گرما داده شود قسمتی ازیخ بآب تبدیل میشود و اگر از آن گرما گرفته شود قسمتی ازآب منجمد میشود . ولی در هرحال دمای مخلوط °C ۰ است. هر گاه مخلوط مبادله گرمائی با محیط نکند نسبت اختلاط ثابت میماند .

همچنین میتوان نتیجه گرفت که نقطه ذوب دمائی است که درآن جامد و مـایع یك جسم میتوانند بحال تعادل در جواریکدیگر باشند بالاتر ازاین دما جسم فقط بحال مایع و پائین‌تر ازآن فقط بحال جامد وجود دارد .

گرمای ذوب وگرمای تبخیر راگرمای تغییرحالت نیزمینامند هردو را به **L** نشان میدهند . چون L مقدار گرمائیست که یـك گرم از جسم میگیرد یا از دست میدهند تا تغییر حالت دهد مقدار گرمائی که **m** گرم ازجسم مبادله میکند برابر است با :

$$Q = mL \qquad (۸-۱۶)$$

در دستگاههای حرارت مرکزی ، تبخیر و میعان آب وسیله انتقال گرمـا از کوره بدرون ساختمان میباشد . هر کیلوگرم آب هنگام تبخیر ۵۳۹ کیلوکالری ازکوره دریافت کرده درون ساختمان ، ایـن گرما را به محیط میدهد . (این رقم بشرطی صحیح است که فشار بخار یـك آتمسفر باشد . وقتی فشار بیشترشود کمی کاهش مییابد) . بنابراین دستگاه حرارت مرکزی که با بخارکارمیکند از دستگاهی که باآب گرم کارمیکند مقدار کمتری جرم بگردش درمیاورد . وقتی آب با دمای °C ۶۰ ازمرکز گرمائی ویا دمای °C ۴۰ ازرادیاتورها خارج شود °C ۲۰ کاهش دما یـافته است . بنابراین ۲۷ گرم آب دراین مثال میتواند ۵۴۰ کالری گرما را جابجاکند درحالیکه هریك گرم بخار پس ازمیعان همین مقدار گرما از دست میدهد .

درشرائط مناسب دما وفشار ، میتوان مستقیماً جسم جامدی را ـ بدون عبوراز حالت

مایع ـ به بخار تبدیل نمود ـ تبدیل مستقیم جامد به بخار را تصعید Sublimation مینامند. جسم جامدرا جسم قابل تصعید مینامند. «یخ خشك» یا انیدرید کربنیك جامد درفشارجوقابل تصعید است . انیدرید کربنیك مایع فقطمیتواند درفشار ۵ آتمسفر وجود داشته باشد درحین تصعید، جسم گرما دریافت میکند و بالعکس . گرمائی که هرواحد جرم ازجسم درحین تصعیددریافت میکند ، گرمای تصعید نامیده میشود .

مسائل

[توجه : درحل این مسائل هرجا ازتغییرات گرمای ویژه برحسب دما صحبتی بمیان نیامده است آنرا ثابت فرض کرده مقدار عددی آنرا از جدول ۱۶ـ۲ استخراج و مسئله را بکمك آن حل کنید .]

۱ـ۱۶ درآزمایشی مخلوطی ازیك سوخت واکسیژن راکه درون ظرفی با حجم ثابت قرار دارد میسوزانند . ظرف درون آب قرار دارد . در حین آزمایش دمای آب بالا میرود . آیا مخلوط سوخت واکسیژن. (a) گرما بخارج داده است ؟ (b) کار انجام داده است ؟

۲ـ۱۶ مایعی درون ظرفی که عایق گرماست بهم زده میشود در نتیجه دمای آن بالا میرود . (a) آیا مایع با خارج گرما مبادله کرده است ؟ (b) آیا مایع با خارج کار مبادله کرده است ؟

۳ـ۱۶ اتومبیلی بجرم یك تن با سرعت $۳m/sec$ درحرکت است . هرگاه ترمز کرده بایستد چقدر گرما درترمز ایجاد میشود ؟

۴ـ۱۶ درظرفی مسی بجرم ۲۰۰ گرم ۴۰۰ گرم آب موجود است. دستگاهی که انرژی مکانیکی را بگرما تبدیل میکند درون آب قرار میگیرد وملاحظه میشود که دمای ظرف و آب در هر دقیقه $۳C^\circ$ افزایش مییابد . هرگاه از انتقال گرما بخارج صرفنظر کنیم چه توانی (برحسب وات) بگرما تبدیل میشود .

۵ـ۱۶ هرگاه دمای یك میل مکعب آب $(۱mile = ۱۶۰۹m)$ $۱C^\circ$ کاهش یابد ازگرمای حاصل ، چه مدت میتوان موتوری بتوان $۲۰۰۰hP$ را بحرکت آورد ؟ فرض کنید تمام گرما بکار تبدیل شود . چرا ازاین منبع عظیم انرژی استفاده نمی کنند .

۶ـ۱۶ (a) درخانه‌ای ۱۰ تن ذغال درفصل سرما برای گرم کردن سوخته می‌شود .

ارزش گرمائی ذغال $11000 Btu/lb$ است . هرگاه ۱۵٪ گرما در دودکش تلف‌شود ؛ چند Btu بمصرف گرم کردن خانه رسیده است ؟ (b) فرض کنید بتوانیم ازانرژی گرمائی نورخورشید استفاده کرده آب را تا $120°F$ گرم کنیم و درظرفی ذخیره نمائیم و بعد برای گرم کردن همان خانه مورد استفاده قراردهیم . هرگاه دمای ثانوی آب $80°F$ باشدابعاد ظرف مورد نیاز را حساب کنید .

۱۶ـ۷ ماهواره‌ای که‌جنس‌آن ازآلومینیوم است باسرعت $28800 km/hr$ بدور زمین درگردش است. نسبت انرژی جنبشی‌آنرا به انرژی لازم برای‌اینکه دمای‌آن $600°C$ افزایش یابد بدست آورید (دمای‌ذوب‌آلومینیوم $660°C$ است .) گرمای ویژه‌آلومینوم را ثابت وبرابر $0/20 cal/gmC°$ فرض کنید ، (b) با استفاده ازجواب قسمت (a) بگوئید با وارد شدن این ماهواره بجو زمین چه اتفاقی میافتد ؟

۱۶ـ۸ درکالریمتری $100 gm$ آب $0°C$ وجود دارد . دو استوانه مسی و سربی هریك بجرم $1000 gm$ و بـدمای $100°C$ را درون‌آب مذکور وارد میکنیم . هرگاه اتلاف گرمائی نا چیزباشد دمای تعادل را پیداکنید .

۱۶ـ۹ (a) ظرفیت گرمائی‌آب و مس و سرب را با هم مقایسه‌کنید . (b) ظرفیت گرمائی حجمی (گرمای لازم برای افزایش دمای یك واحدحجم‌ازجسم بازاء یکدرجه گرم شدن را ظرفیت گرمائی حجمی مینامند) این سه جسم را باهم مقایسه‌کنید .

۱۶ـ۱۰ ظرف آلومینیومی به جرم $500 gm$ دارای $117/5 gm$ آب با دمای $20°C$ است . قطعه‌آهنی بجرم $200 gm$ استوبدمای $75°C$ را درآن وارد میکنیم .دمای تعادل را پیداکنید . اتلاف گرمائی ناچیزاست .

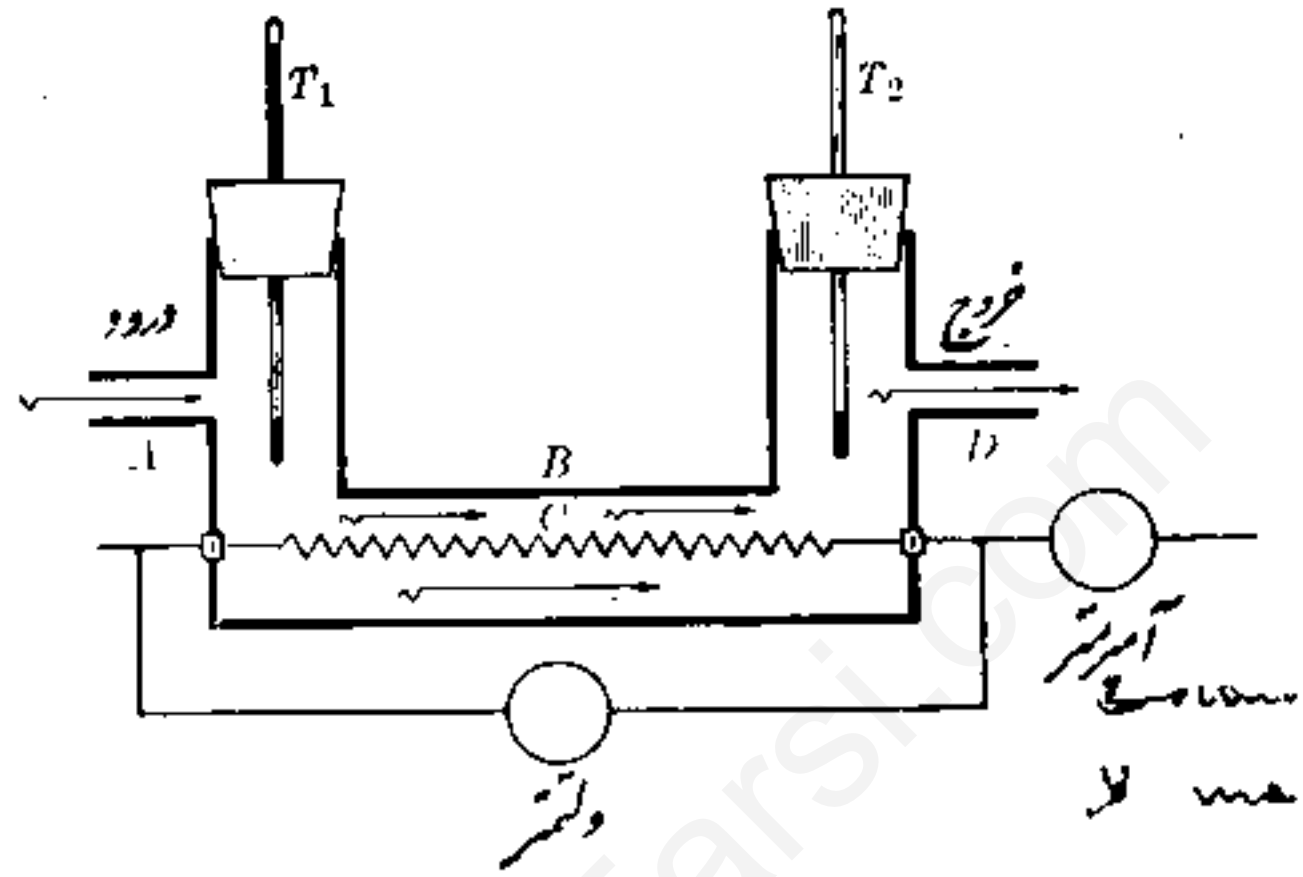
۱۶ـ۱۱ جسمی بجرم $50 kgm$ را از کوره‌ای بدمای $500°C$ در آورده در $400 kgm$ روغن بدمای $40°C$ وارد میکنیم . دمای تعادل $42°C$میشود. هرگاه گرمای ویژه روغن $0/5 cal/gmC°$ بـاشدگرمای ویژه جسم را بدست آورید . اتلاف گرمائی ناچیز است .

۱۶ـ۱۲ گلوله‌ای سربی بافرعت $350 m/sec$ بهدف برخوردکرده ساکن میشود. هرگاه همه‌گرمای حاصله بسرب داده شود افزایش دمای‌آنرا بدست‌آورید :

۱۶ـ۱۳ گرماسنجی مسی‌بجرم $300 gm$ دارای $500 gm$ آب $15°C$ است . قطعه مسی‌که جرم‌آن $560 gm$ و دمای آن $100°C$ است بدرون گرماسنج وارد میکنیم . دمای گرماسنج $22/5°C$ افزایش میابد . از اتلاف گرمـا صرفنظرکرده گرمای ویژه مس را حساب کنید .

۱۶ـ۱۴ جسمی بجرم $50 gm$ راکه دمای‌آن $100°C$ است واردگرماسنجی‌میکنیم

که ۲۰۰ گرم آب $20^{\circ}C$ دارد . جنس گرماسنج مس و جرم آن ۱۰۰ گرم است . هرگاه دمای تعادل $22^{\circ}C$ باشد گرمای ویژه جسم را بدست آورید .



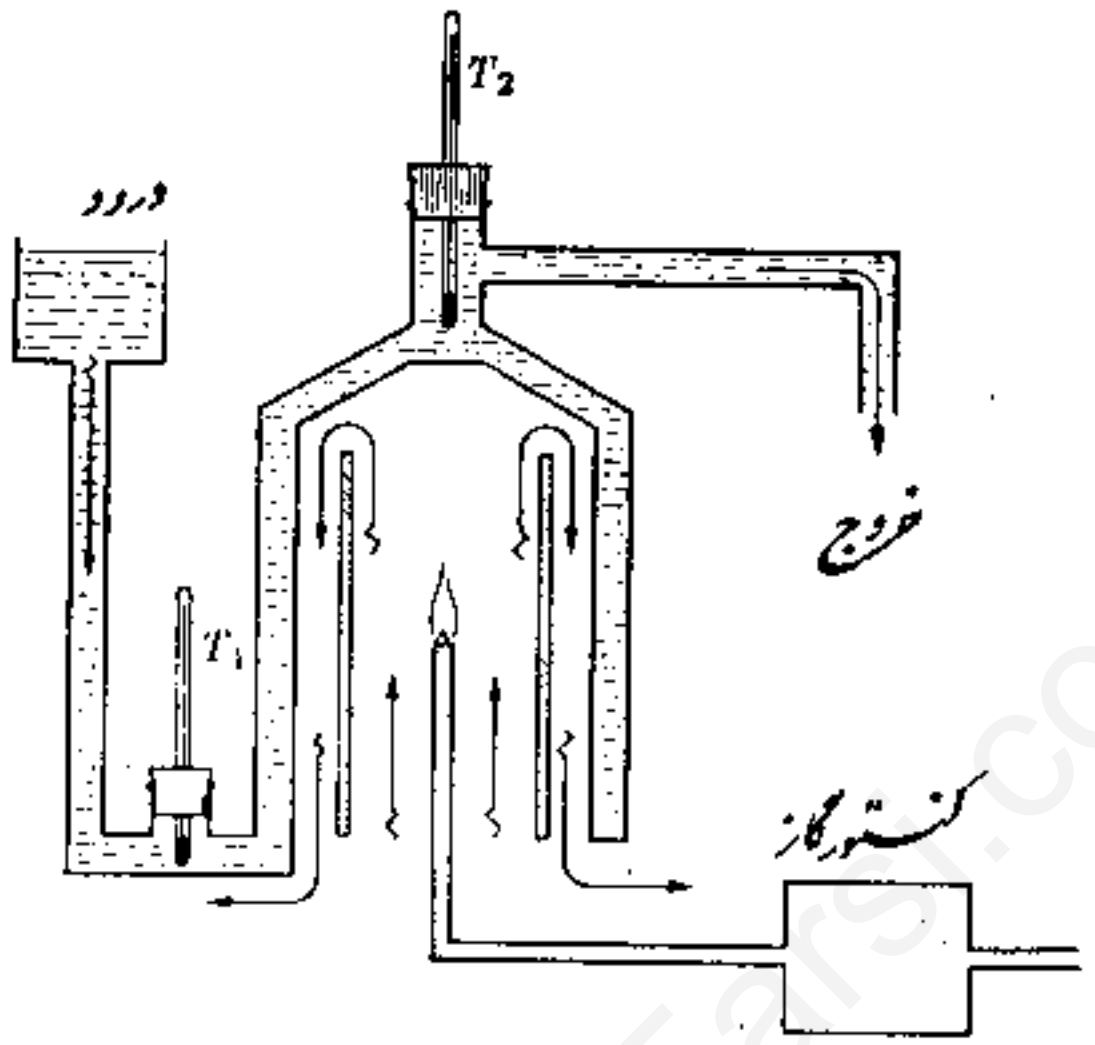
شکل ۱۶–۶

۱۵–۱۶ آب گرم‌کن الکتریکی مطابق شکل ۱۶–۶ مفروض است . در هر ثانیه $300\,gm$ آب از آن عبور میکند. دمای آب ورودی را $15^{\circ}C$ ولتاژ ۱۲۰ ولت وشدت جریان ۱۰ آمپر است (a) پس از حصول ثبات دمائی دمای آب خروجی چه اندازه است؟ (b) چرا لازم نیست ظرفیت گرمائی دستگاه ($m.c$ یا $n.C$) را در نظر گیریم ؟

۱۶–۱۶ شکل ۱۶–۷ طرح گرماسنج با جریان دائم را نشان میدهد که برای اندازه‌گیری ارزش گرمائی سوختها بکار میرود . درهردقیقه $12/5\,lb$ آب و $0/020\,ft^3$ گاز سوختنی وارد گرماسنج میشود. دمای ورودی آب $60^{\circ}F$ و دمای خروجی $76^{\circ}F$ است . ارزش گرمائی هر فوت مکعب گاز چه اندازه است؟ چرا گاز را باید حتی‌المقدور کم کم سوزانید ؟

۱۷–۱۶ (a) منحنی تقریبی تغییرات دما برحسب زمان (نظیر منحنی شکل ۱۶–۲) را وقتی محیط خیلی سردتر ازجسم باشد ، رسم کنید . (b) سیم پیچی درمایعی فرورفته و بمدت $100\,sec$ توان ۵۰ وات درآن بگرما تبدیل میشود ، جرم مایع $540\,gm$ است و دمای آن از $17/64^{\circ}C$ به $20/77^{\circ}C$ میرسد . گرمای ویژه متوسط مایع را دراین فاصله دمائی حساب کنید .

۱۸–۱۶ (a) سیلندری که درآن n ملکولگرم ماده موجود است بکمك جریان برق گرم میشود . مقدار گرمائی که در واحد زمان بجسم داده میشود ثابت است . T دمای کلوین جسم را نسبت بزمان τ سنجیده منحنی $T-\tau$ را رسم میکنیم . در اطراف سیلندر مذکور یك محافظ فلزی **metal shield** قرار گرفته است که دمای آن بکمك مقاومت



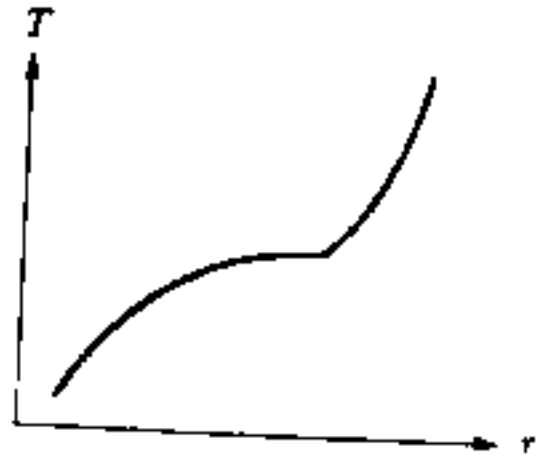
شکل ۱۶–۷

الکتریکی دیگری همیشه با دمای جسم ، مساوی نگاهداشته میشود . (تا اندازه ممکن سعی میشود که دمای جسم و محافظ یکسان باشند . چرا ؟) نشان دهید که افزایش دمای جسم از رابطه زیر بدست میاید :

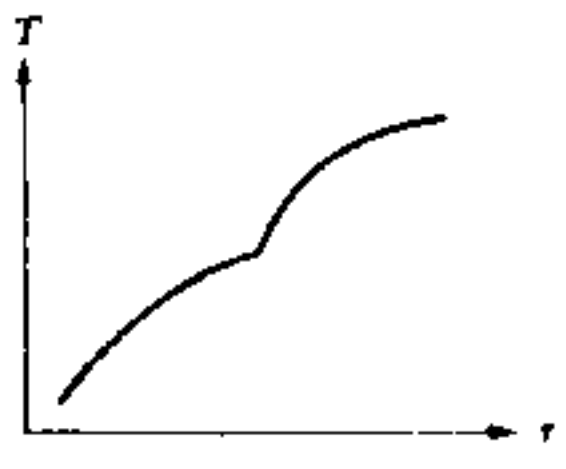
$$C=\frac{VI}{n(dT/d\tau)}$$

(b) هرگاه منحنی $T-\tau$ بشکل منحنی ۱۶–۸ باشد یك منحنی تقریبی برای تغییرات گرمای ویژه ملکولی برحسب دما رسم کنید. (c) هرگاه منحنی $T-\tau$ بشکل منحنی ۱۶–۹ باشد بازهم منحنی تغییرات گرمای ویژه را برحسب دما بدست آورید .

Problems



شکل ۱۶–۸



شکل ۱۶–۹

۱۶–۱۹ گرمای ویژه ملکولی یك جسم در فشارثابت بموجب فرمول آمپریك زیربا دما تغییر میکند .

$$C_p = ۶/۵۰ \frac{cal}{moleK^\circ} + ۱۰^{-۳} \frac{cal}{mole(K^\circ)^۲} T$$

چندکالری گرما لازم است تادمای ۱۰ ملکول گرم ازجسمی‌را از $۲۷^\circ C$ به $۵۲۷^\circ C$ برسانند

۱۶–۲۰ بنابرقانون «$T^۳$ دبای» گرمای ویژه نمك طعام در دماهای پائین چنین تغییرمی‌کند :

$$C = k\frac{T^۳}{\theta^۳}$$

که درآن $k = ۴۶۴ cal/moleK^\circ$ و $\theta = ۲۸۱^\circ K$ است . (a) چقدرگرما لازم است که دمای دو ملکول گرم نمك‌طعام را از $۱۰^\circ K$ به $۵۰^\circ K$ برساند. (b) گرمای ویژه ملکولی متوسط را دراین فاصله دمائی بدست‌آورید . (c) در دمای $۵۰^\circ K$ گرمای ویژه ملکولی چه اندازه است ؟

۱۶–۲۱ (a) بکمك فرمول Nernst – Lindemann فرمول ۱۷–۷ ثابت کنیدکه هرگاه T بسمت صفرمیل‌کند C_p و C_v مساوی میشوند . (b) اندازه واقعی گرمای ویژه ملکولی‌مس دردمای $۱۰۰^\circ K$ برابر $۳/۸۸ cal/mole\ K^\circ$ ودر $۸۰۰ K^\circ$ برابر $۶/۷۰ cal/mile^\circ k$ است . تفاضل $C_p - C_v$ را در دو دمای مذکورحساب کنید.

۱۶–۲۲ چه مقدارگرما لازم است تا یك‌گرم یخ $-۱۰^\circ C$ را به بخارآب $۱۰۰^\circ C$ تبدیل کند .

۱۶–۲۳ بشری با جرم با چیز دارای $۵۵۰ gm$ آب $۸۰^\circ C$ است . چندگرم یخ $-۲۰^\circ C$ درآن بیندازیم تا دمای‌آن $۵۰^\circ C$ شود .

۱۶–۲۴ درظرفی ۵۰۰ گرم یخ $-۲۰^\circ C$ وجود دارد . جرم ظرف ناچیز فرض میشود. بمدت ۱۰۰دقیقه ، درهردقیقه $۱۰۰۰ cal$ بظرف داده میشود . منحنی تغییرات‌دما برحسب زمان رسم‌کنید .

۱۶–۲۵ گرماسنجی مسی بجرم $۱۰۰ gm$ دارای $۱۵۰ gm$ آب و $۸ gm$ یخ که بحال تعادلند میباشد . $۱۰۰ gm$ سرب‌که دمای $۲۰۰^\circ C$ است وارد این گرماسنج‌میشود. هرگاه‌گرما با خارج مبادله نشود ، دمای تعادل را پیداکنید .

۱۶–۲۶ نهصدگرم یخ $-۱۶^\circ C$ — راواردگرماسنجی میکنندکه درآن $۱۰۰۰ gm$ آب $۲۰^\circ C$ وجود دارد. جرم گرماسنج‌که از مس‌ساخته شده‌است برابر $۲۷۸ gm$ است . هرگاه مبادله‌گرما با خارج ناچیزباشد دمای تعادل را پیداکنید .

۱۶ـ۲۷ لوله‌ای بخار را ازظرفی‌که در آن‌آب در فشارجومی‌جوشد به‌گرماسنجی هدایت میکند . جرم گرماسنج ۱۵۰gm وظرفیت گرمائی‌آن ۱۵cal/C° است . آنقدر بخار در گرماسنج بآب تبدیل میشودکه دما به ۷۱°C برسد و دراین موقع جرم کل گرماسنج ۵۲۵gm میشود . گرمای نهان تبخیرآب رابدست‌آورید .

۱۶ـ۲۸ درظرفی ازآلومینیوم بجرم ۵۰۰gm ، صدگرم‌یخ‌و۷۵۰ گرم‌آب وجود دارد. ظرف‌را ازارتفاعی بزمین‌رها میکند. پس‌ازبرخورد بزمین‌دمای‌آن به ۲۵°C میرسد . هرگاه همه‌گرمای حاصل بظرف و آب و یخ داده شده باشد سرعت قبل ازبرخورد چقدر بوده است .

۱۶ـ۲۹ درگرماسنجی ۵۰۰gm آب و ۳۰۰gm یخ صفر درجه بحال تعادل‌وجود دارند . قطعه فلزی بجرم ۱۰۰۰gm را ازکوره‌ای بدمای ۲۴۰°C بیرون‌آورده‌بسرعت بدرون‌گرماسنج میاندازند . فقط همه یخ‌آب میشود.هرگاه جرم فلزدوبرابر میبودافزایش دمای گرماسنج چه‌اندازه میشد ؟

۱۶ـ۳۰ قطعه یخی بجرم ۵۰۰gm راکه دمای‌آن ۱۰°C — است درون ظرفی‌که درآن‌آب صفر درجه وجود دارد میاندازیم چندگرم‌آب یخ میزند. ازمبادله‌گرمای‌محیط صرفنظرشود .

۱۶ـ۳۱ گرماسنجی مسی بظرفیت گرمائی mC = ۳۰cal/deg دارای ۵۰gm یخ است . دمای دستگاه در ابتدا ۰°C است ، ۱۲ گرم بخار ۱۰۰°C بافشاریك‌آتمسفررا واردگرماسنج میکنیم . دمای‌انتهائی گرماسنج ومحتویات‌آنرا حساب‌کنید .

۱۶ـ۳۲ درظرفی که‌دیواره‌آن عایق‌است ۲۱۰۰gm آب و۲۰۰gm یخ صفردرجه وجود دارد . چندگرم بخارآب ۱۰۰°C را در فشار یك جو ، وارد ظرف‌کنیم تا دمای‌آن به ۲۰°C برسد؟ ازظرفیت گرمائی ظرف صرفنظرشود .

۱۶ـ۳۳ قطعه‌آهنی بجرم ۲kgm از کوره‌ای بدمای ۶۵۰°C بیرون‌آورده روی قطعه یخ بزرگی‌قرار میدهیم . دمای یخ ۰°C است . هرگاه همه‌گرما صرف ذوب شدن یخ میشود. این قطعه‌آهن چندگرم یخ را ذوب میکند .

۱۶ـ۳۴ در دستگاه شوفاژیك منزل ،آب بادمای ۱۴۰°F وارد رادیویاتورها شده با دمای ۱۰۰°F ازآنها خارج میشود . هرگاه بجای‌آب بخارآب جوش وارد رادیاتورها شده‌آب با دمای ۱۸۰°F ازآنها خارج شود هرپوندآب، معادل چه جرم ازبخارگرما باخود منتقل میکند ؟

۱۶ـ۳۵ یك مرکز استفاده از انرژی خورشید solar house قادراست۴میلیون Btu گرما در خود ذخیره‌کند فضای لازم برای ذخیره این‌گرما را درشرائط زیرحساب

کنید . (a) گرما به‌آب $70^\circ F$ داده میشود ودمای‌آن به $120^\circ F$ میرسد ؟
(b)همین گرما به سولفات‌سدیم‌متبلور(نمک$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$-(Glauber داده‌شود که مشخصات‌آن ازاینقرار است .

گرمای ویژه درحالت جامد	$0/46 Btu/lb F^\circ$
» » » مایع	$0/18 Btu/lb F^\circ$
توده ویژه	$1/6 gm/cm^3$
نقطه ذوب	$90^\circ F$
گرمای نهان‌ذوب	$104 Btu/lb$

www.KetabFarsi.com

فصل هفدهم

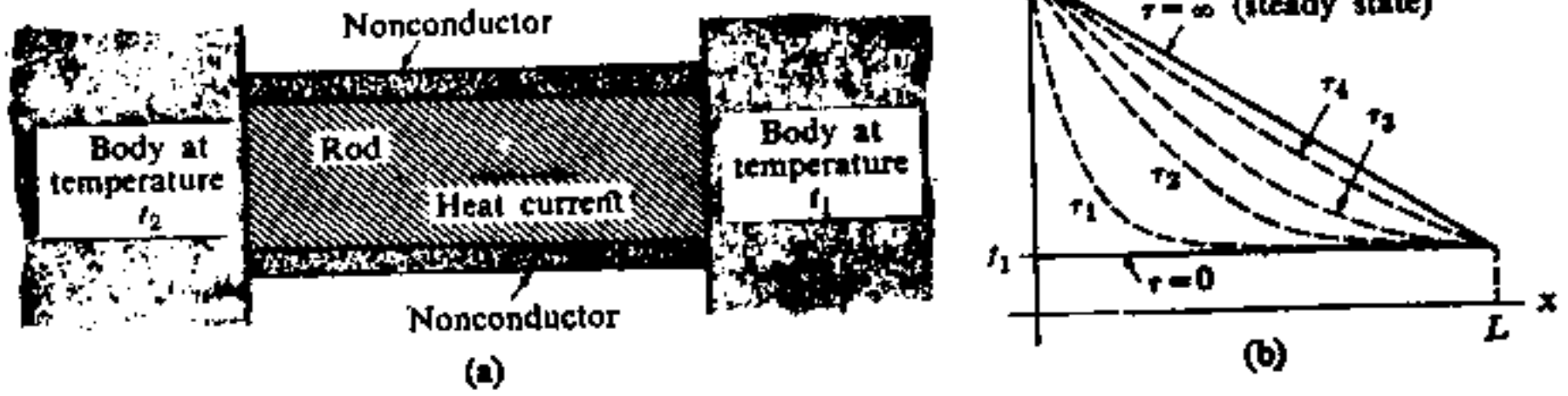
انتقال گرما

۱۷ـ۱ ، هدایت

هر گاه **یکطرف** میله فلزی را درشعله‌ای قرارداده طرف دیگر آنرا در دست بگیریم ملاحظه میکنیم که گرما ازطرف گرم بطرف دیگرمیلهٔ منتقل میشود وآنطرف میله که‌دردست ماست باوجودآنکه مستقیماً باشعله تماس ندارد گرمتر میشود . گوئیم گرما از طرف گرم میله بطرف‌سردآن ازطریق **هدایت** Conduction منتقل شده است .

هدایت درون هرجسم که دمای نقاط مختلف‌آن باهم متفاوت باشند ازنقاط گرم‌بنقاط سرد صورت می‌گیرد . جریان گرمائی گاهی اوقات درتعریف تساوی یا عدم تساوی دمای دونقطه بعنوان پایه و اساس تعریف ، مورد استفاده قرار میگیرد . بدین ترتیب که هر گاه گرما ازنقطه‌ای بنقطه دیگرجریان یابد دمای نقطه‌اول ازدمای نقطه دوم بیشتراست‌وهر گاه جریان گرمائی وجود نداشته باشد دمای دونقطه با هم مساوی است .

برای فهم بهتر ، بمثال زیرتوجه کنید . میله‌ایرا بطول L و سطح مقطع A که‌دمای تمام نقـاط آن t_1 است در نظر گیرید . درلحظه معینی طرف راست جسم را در دمـای t_1 نگاهداشته طرف چپ‌آنرا بجسمی که دمای‌آن t_2 است متصل میکنیم . فرض کنیم سطح جسم را با ماده عایقی پوشانیده‌اند بطوریکه با خارج مبادله گرمائی نکند . (چنین شرطی صد درصد صحیح نیست زیرا بهرحال هرجسمی گرما را هدایت میکند وعایق مطلق وجودندارد.) حال فرض کنیم در چند نقطه ، بدنه عایق را سوراخ کرده با ترموکوپل‌های کوچکی که در مجاورت جسم قرارداده شده است دمـای چند نقطه‌آن‌را در زمانهای τ_1 و τ_2 .. پس از آزمایش ، اندازه بگیریم . شکل ۱۷ـ۱ (a) طرزآزمایش و درشکل ۱۷ـ۱ (b) منحنی تغییرات دما درطول میله را درزمانهای مختلف نشانداده‌اند .



شکل ۱۷-۱ توزیع دمادرطول میله‌ای درحالت ثبات وعدم ثبات دمائی . دمای یکطرف میله t_1 و دمای طرف دیگر t_2 . عدم ثبات دمائی در زمانهای $\tau_2 = 5\tau_1$ و $\tau_3 = 10\tau_1$ و $\tau_4 = 20\tau_1$ مشخص شده است .

درلحظه $\tau = 0$ منحنی خطمستقیمی بعرض t_1 است . درزمانهای بعدی τ_1 و τ_2و.. دمای سمت چپ t_2 است و هرچه بطرف راست برویم دماکاهش مییابد و درهرزمان معین، وضع را بکمك یك منحنی نشانداده‌اند . پس از گذشت زمان‌کافی دمای تمام نقاط ، ثابت شده‌آن پس باگذشت زمان تغییر نمی‌کند . گویند میله بحال **ثبات دمائی** رسیده است . وضع ثبات‌دمائی درشکل با $\tau = \infty$ مشخص شده است .

بنابرتعریف **گرادیان دمائی** عبارتست ازنسبت تغییرات دما بطول یعنی :

$$\mathbf{gradt} = \frac{\mathbf{dt}}{\mathbf{dx}}$$

در روی منحنی ، گرادیان عبارت است ازشیب منحنی تغییرات دما برحسب طول یعنی‌شیب منحنی $\mathbf{t}$ برحسب $\mathbf{x}$ (درهرنقطه $\mathbf{x}$ و زمان τ)

درهرحالت ، اعم از ثبات یا عدم ثبات دمائی ، درامتداد میله ازچپ براست جریان گرمائی عبورمیکند . هرگاه $\mathbf{dQ}$ مقدارگرمائی فرض شودکه درزمان $\mathbf{d\tau}$ یعنی در فاصله زمانی τ و $\tau + d\tau$ از مقطعی واقع درفاصله $\mathbf{x}$ عبور میکند . $\frac{dQ}{d\tau}$ یعنی گرمائی که در واحد زمان از سطح مقطع عبورکرده است **جریان‌گرمائی** نامیده‌آنرا به $\mathbf{H}$ نشان میدهیم:

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{dQ}}{\mathbf{d\tau}}$$

$\mathbf{k}$ **ضریب هدایت‌گرمائی** جسم عبارتست از نسبت جریان‌گرمائی به سطح مقطعی از جسم‌که بر امتداد جریان عمود باشد بشرط آنکه گرادیان دمائی برابر واحد باشد (بـا علامت منفی) یعنی :

$$k = -\frac{H}{A(dt/dx)}$$

علامت منفی باین دلیل در فرمول آمده است که وقتی گرادیان دمائی منفی است (از چپ براست) H جریان گرمائی مثبت است (شکل ۱۷–۱) . بنابراین k همیشه مقداریست ثابت . فرمول بالا را معمولا چنین مینویسند .

$$H = -kA\frac{dt}{dx} \qquad (۱–۱۷)$$

ضریب هدایت گرمائی اکثر اجسام با دما تغییرمیکند ، یعنی افزایش بسیار ناچیزی نسبت بافزایش دما دارد که در اغلب موارد قابل اغماض است . در جدول ۱۷–۱ ضریب هدایت گرمائی چند جسم در دماهای معمولی نوشته شده است . واحد جریان گرمائی ، در دستگاه cgs برابر cal/sec و واحد سطح دراین دستگاه cm^2 وبالاخره واحد گرادیان دمائی درجه سلزیوس برسانتیمتر است . واحد همین کمیات در تجارت و زندگی روزمره چنین هستند Btu/hr واحد جریان گرمائی، فوت مربع واحد سطح و درجه فارنهایت براینچ واحد گرادیان دمائی .

ازفرمول ۱۷–۱ بآسانی معلوم میشود که هرچه ضریب هدایت گرمائی زیادتر باشد جریان گرمائی شدیدتراست . پس هرچه k یك جسم بیشتر باشد هدایت جسم بهتر است در حالیکه اگر k کوچك باشد جسم ، عایق بهتری است . جسم «هادی کامل» جسمی است که درآن $k = \infty$ باشد و در «عایق کامل» $k = 0$ است . از جدول ۱۷–۱ پیداست که فلزات بهتر از شبه فلزات و هردو بهتر از گازها گرما را هدایت میکنند .

درمیله‌ایکه درشکل ۱۷–۱ نشانداده شده است ، جریان گرمائی درحالت ثبات دمائی درتمام مقاطع مختلف میله ثابت است . هرگاه چنین نباشد مقدار گرمائی که درزمان معین ازیکطرف وارد قسمتی از میله میشود با مقدار گرمائی که ازآن خارج میشود با هم برابر نخواهند بود . بنابراین قسمت مذکور ازمیله گرما مبادله کرده دمای آن تغییرمیکند و این با ثبات دمائی مغایرت دارد . (بدین ترتیب جریان گرمائی درحالت ثبات دمائی نظیر جریان سیال غیرقابل تراکم است .) بنابراین درحالت ثبات دمائی $kA\left(\frac{dt}{dx}\right)$ در تمام مقاطع میله اندازه ثابتی دارد . لذا **اگر A ثابت باشد k در وضع ثبات دمائی مستقل از دماست** و $\frac{dt}{dx}$ گرادیان دمائی برای تمام مقاطع یکسان است . پس درحالت ثبات دمائی،