

KIRÓL NEVEZTÉK EL?

Inzelt György

■ ELTE Fizikai Kémiai Tanszék

A Clapeyron–Clausius- vagy Clausius–Clapeyron-egyenlet

A Clapeyron–Clausius-egyenletet vagy más néven Clausius–Clapeyron-egyenletet a fizikai kémiai tanulmányok során minden egyetemi hallgató megismeri és alkalmazza. Most ennek születésével és a két tudós életútjával ismerkedhet meg az olvasó. Történetünk szorosan összekapcsolódik a termodinamika tudományának kialakulásával, ami azután döntő szerepet játszott a tudomány és az ipar fejlődésében, de meghatározta a gondolkodásunkat is a világról.

A Clapeyron–Clausius-egyenlet

Ha egy lezárt üvegedénybe folyadékot öntünk vagy szilárd anyagot helyezünk, annak egy része párolgás, illetve szublimáció útján gőzzé alakul. Állandó hőmérsékleten (izoterm körülmények között) a gőztérben egy-egy anyagra jellemző nyomás – gőznyomás – alakul ki. A párolgás (szublimáció) és a lecsapódás se-

bessége függ a hőmérséklettől. Bizonyos idő elteltével dinamikus egyensúly alakul ki, vagyis ugyanannyi részecske (molekula) kerül a gőztérbe, mint amennyi visszajut a kondenzált fázisba. Az anyagok gőznyomása, a mérések szerint, elég nagy hőmérséklet-tartományban exponenciálisan nő a hőmérséklettel (**1. ábra**).

Ha megváltozik a hőmérséklet (T) – például megnő –, akkor mindkét irányú sebesség megnő, egyensúly elérésekor egyenlővé válik, de a két fázis mennyiségi aránya a gőzfázis javára változik, ami a gőznyomás növekedésében jut kifejezésre. A gőznyomás hőmérsékletfüggése a fázisátalakulást kísérő Gibbs-energia (szabadentalpia) változásából számítható ki. Egyensúlyban a folyadék és a gőz moláris szabadentalpiája azonos. Ez az egyenlőség fennáll a nyomás (p) és a hőmérséklet változtatása után kialakuló új egyensúlyban is. A Gibbs-energia változása T és p változásával annak alapegyenletéből vezethető le. (Mivel erről a Gibbsről szóló cikkünkben már írtunk, a levezetést e helyütt mellőzzük.)

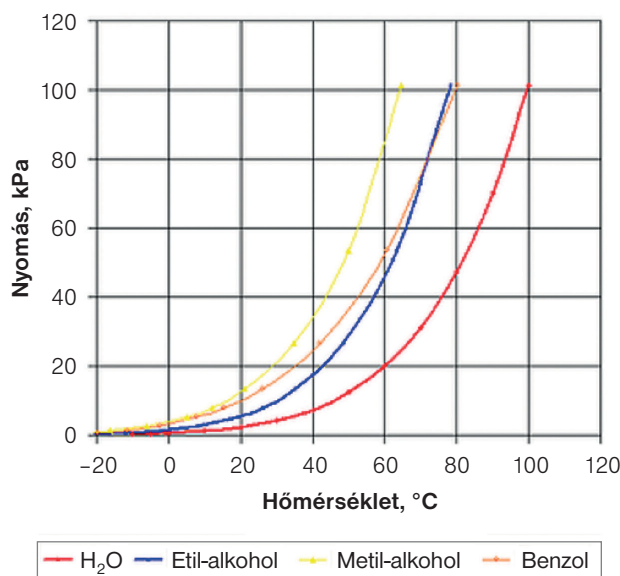
Ha élünk azzal a feltételezéssel, hogy $V_{\text{gőz}}$, a gőz moláris térfogata sokkal nagyobb, mint a folyadéké ($V_{\text{folyadék}}$), tehát a különbségükben $V_{\text{folyadék}}$ elhanyagolható, és a moláris párolgási entalpia (ΔH_{vap}) a vizsgált hőmérséklet-tartományában állandó érték (ami nem túl nagy hőmérséklet-tartományban általában teljesül), akkor a következő egyenlethez jutunk, amely szerint a gőznyomás logaritmusai lineárisan változik a hőmérséklet reciprokaival [1, 2]:

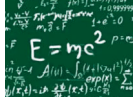
$$\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = -\frac{\Delta H_{\text{vap}}}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

Tehát ha a párolgási entalpiát ismerjük és egy hőmérsékleten megmérjük a gőznyomást, akkor egy másik hőmérsékletre kiszámítható a gőznyomás, vagy két hőmérsékleten mérve a gőznyomást a folyadék párolgási entalpiája határozható meg. A Clapeyron–Clausius-egyenlet nemcsak a párolgás vagy a szublimáció, hanem más fázisátalakulások (például a szilárd-folyadék átalakulás) esetében is érvényes [1, 2].

Az egyenlet első formájában Benoît Paul Émile Clapeyron „Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur” („Értekezés a hő mozgató erejéről”) című, 1834-es cikkében jelent meg (**2. és 3. ábra**). Mivel az egyenlet termodinamikai megalapozását és vég-

1. ábra. Néhány folyadék gőznyomásának hőmérsékletfüggése (Báder Imre rajza)





MÉMOIRE

SUR LA

PUISSANCE MOTRICE DE LA CHALEUR,

PAR F. CLAPEYRON,
INGÉNIEUR DES MINES.

§ I.

Il est peu de questions plus dignes de fixer l'attention des géomètres et des physiciens, que celles qui se rapportent à la constitution des gaz et des vapeurs; le rôle qu'ils jouent dans la nature et le parti qu'en tire l'industrie, expliquent les nombreux et importants travaux dont ils ont été l'objet; mais cette vaste question est loin d'être épuisée. La loi de Mariotte et celle de M. Gay-Lussac établissent les relations qui existent entre le volume, la pression et la température d'une même quantité de gaz; toutes deux ont obtenu depuis long-temps l'assentiment des savans. Les expériences nouvelles faites par M. Arago et Dulong ne laissent plus aucun doute sur l'exactitude de la première entre des limites très étendues de la pression; mais ces résultats importants n'apprennent rien sur la quantité de chaleur que possèdent les gaz, et qu'en dégagent la pression ou un abaissement de température, ils ne donnent pas la loi des caloriques spécifiques à pression cons-

XXIII^e Cahier.

50

2. ábra. Clapeyron, E. (1834) „Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur” (Journal de l'École Polytechnique XIV: 153–90.) cikkének első oldala, amely tartalmazza a Boyle–Mariotte- és a Gay-Lussac-törvények összevonását

168

PUISSANCE MOTRICE

ture; elle est essentiellement positive et sert de mesure à la quantité d'action *maximum* que peut développer la chaleur.

Nous avons vu que des quatre quantités Q , t , p et v , deux étant connues, les deux autres s'ensuivent; elles doivent donc être liées entre elles par deux équations; l'une d'elles,

$$pv = R(\alpha\gamma + t),$$

résulte des lois de Mariotte et de Gay-Lussac combinées. L'équation

$$Q = R(B - C \log p),$$

que nous déduisons de notre théorie, est la seconde. Toutefois, la détermination numérique des changemens qu'éprouvent les gaz quand on fait varier d'une manière arbitraire le volume et la pression, exigent que l'on connaisse les fonctions B et C .

Nous verrons plus tard que l'on peut obtenir une valeur approchée de la fonction C dans une étendue considérable de l'échelle thermométrique; d'ailleurs, étant déterminée pour un gaz, elle le sera pour tous. Quant à la fonction B , elle peut varier d'un gaz à l'autre; cependant, il est probable qu'elle est la même pour tous les gaz simples: c'est au moins ce qui paraît résulter de ce que l'expérience indique, qu'ils ont tous la même capacité pour la chaleur.

Reprenons l'équation

$$Q = R(B - C \log p).$$

Comprimons un gaz occupant le volume v sous la pression p jusqu'à ce que le volume devienne v' , et laissons-le se refroidir jusqu'à ce que sa température revienne au même point. Soit p' la nouvelle valeur de la pression; soit Q' la nouvelle valeur de Q , on aura

$$Q - Q' = RC \log \frac{p}{p'} = RC \log \frac{v}{v'}.$$

4. ábra. Az egyesített gáztörvény egyenlet formájában Clapeyron cikkében

lomban a bányáktól az üzemi, mezőgazdasági gépekig, először a történelemben felváltva az izomerőt. Abban az időben, amikor Clapeyron cikke megszületett, már gőzhajtású vonatok közlekedtek és hajók szeltek a vizeket. Sok évtizedes előzmények után George Stephenson (1781–1848) gőzmozdonyai, a Locomotion (1825), majd a Rocket (1829) már intenzív utasforgalmat bonyolítottak le, akár 40 km/óra – korábban elképzelhetetlen – sebességgel. Robert Fulton (1765–1815) gőzhajóinak 7–8 km/óra sebessége is forradalmasította a szállítást.

Clapeyron cikkében még egy fontos dolog feltűnik. Nevezetesen a gáztörvények egyesítése (2. ábra, 4. ábra). Ez az első megjelenése az egyesített gáztörvénynek, amit ma így írunk: $PV = RT$. Ugyan Boyle neve kimaradt, és csak Mariotte neve szerepel (2. ábra) de egy franciánál ezen nem igazán csodálkozunk. Igaz, hogy Clausius is csak így emlegette ezt a gáztörvényt (lásd később a 10. ábrát).

3. ábra. Részlet Clapeyron cikkéből. S. Carnot nevével nem az előnév, hanem a monsieur = úr rövidítése

DE LA CHALEUR.

155

les quantités de chaleur absorbées ou dégagées par ce gaz sont en progression arithmétique, si les accroissements ou réductions de volume sont en progression géométrique.

Ce nouveau moyen de démonstration me paraît digne de fixer l'attention des géomètres; il me semble à l'abri de toute objection, et acquiert une nouvelle importance depuis la vérification qu'il trouve dans les travaux de M. Dulong, qui a démontré par l'expérience le premier théorème dont je viens de rappeler l'énoncé.

Je crois qu'il est de quelque intérêt de reprendre cette théorie; M. S. Carnot, évitant l'emploi de l'analyse mathématique, arrive par une série de raisonnemens délicats et difficiles à saisir, à des résultats qui se déduisent sans peine d'une loi plus générale, que je vais chercher à établir. Mais avant d'entrer en matière, il est utile de revenir sur l'axiome fondamental qui sert de base aux recherches de M. Carnot, et qui sera aussi mon point de départ.

§ II.

On a remarqué depuis long-temps que l'on peut employer la chaleur à développer de la force motrice, et réciproquement, qu'avec de la force motrice on peut développer de la chaleur. Dans le premier cas, on doit observer qu'il y a toujours passage d'une quantité déterminée de calorique d'un corps d'une température donnée à un corps d'une température inférieure; ainsi, dans les machines à vapeur, la production de force mécanique est accompagnée du passage d'une partie de la chaleur que la combustion développe dans le foyer, dont la température est très élevée, à l'eau du condenseur, dont la température est beaucoup moindre.

Réciproquement, il est toujours possible d'utiliser le passage du calorique d'un corps chaud à un corps froid pour la production d'une force mécanique: il suffit pour cela de construire un appareil semblable à celui des machines à vapeur ordinaires, dans lequel le corps

30.

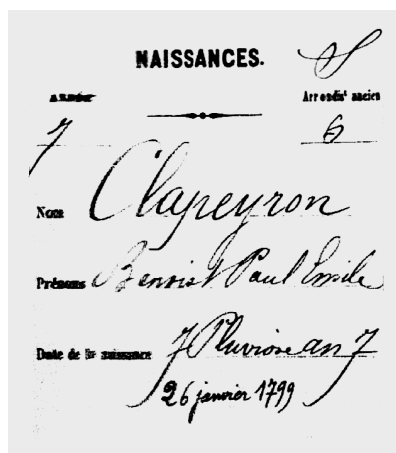
leges formába öntését Clausius végezte el, sok könyvben, így a magyar tankönyvekben is Clausius–Clapeyron-egyenletként találjuk meg [1, 2].

Clapeyron ebben a munkájában Nicolas Léonard Sadi Carnot (Párizs, 1796. június 1. – Párizs, 1832. augusztus 24.) tüzüértiszt, fizikus és mérnök 1824-ben megjelent, „Elmélkedések a tűz mozgatóerejéről” című munkáját elemezte, amelyben Carnot a hőerőgépek energetikai működését, hatásfokát vizsgálta. A két izotermából és két adiabatából álló reverzibilis körfolyamat, a Carnot-ciklus [1, 3], amellyel a hő munkává alakíthatóságának hatásfokát lehetett levezetni, később elvezetett a termodinamika második főtételének megállapításához is. De akkor még nem létezett az a fogalom, hogy termodinamika, és a főtételek megállapítása is még évtizedeket váratott magára. A maximális hatásfok elméleti meghatározásával vált világossá, hogy mi az a határ, amit technológiai fejlesztésekkel, például a súrlódás csökkentésével még el lehet érni. Carnot nem tudta továbbfejleszteni művét, mert fiatalon, az első nagy kolerajárványban meghalt. De tudósok sora vette át tőle a stafétabotot, így elsőként Clapeyron, majd Clausius lesz az, aki igazán sokat tesz a termodinamika megalapozásáért. Természetesen ők is támaszkodhattak sok kiváló tudós, így például James Prescott Joule, William John Macquorn Rankine, William Thomson, Henri Victor Regnault eredményeire. Miért is foglalkoztak a hő munkává alakíthatóságának problémájával a kor legkiválóbb tudósai? Azért, mert a hőerőgépek (gőzgépek) alapvető szerepet játszottak az ipari forrada-

Benoît Paul Émile Clapeyron



5. ábra. Benoît Paul Émile Clapeyron



6. ábra. Clapeyron születési anyakönyvi kivonata

Benoît Paul Émile Clapeyron (Párizs, 1799. január 26. – Párizs, 1864. január 28.) (5. ábra) Claude Clapeyron (1755–1834) kereskedő és de Marie Agathe Godde (1771–1868) gyermekeként született. [A magyar Wikipédia-szócikkben február 26. a születésnapja. Ez hibás, lásd az anyakönyvi kivonatát (6. ábra)].

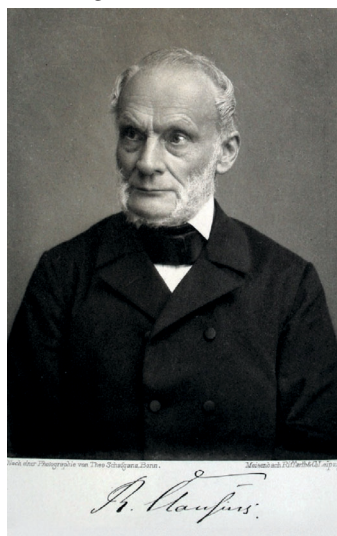
Tanulmányait 1808-ban kezdte a Congregatio Oratorii egyik is-

kolájában, Juillyben. Utána az elitegyetemek következtek: 1815-től az École Polytechnique-ben tanult, majd 1818–1820 között az École des mines de Paris-n (röviden: Mines ParisTech; bányamérnöki egyetem) folytatta. 1821-ben a Le Corps des Mines tagja lett, ami a legtehetségesebb fiatalok gyűjti össze a fenti iskolák valamelyikén való végzés után, és amely mind a mai napig ugrodéskál szolgál az államigazgatási karrierhez. 1820-ban a Szentpétervárott újonnan létrehozott Közlekedési Egyetemre szegődött el Gabriel Lamé (1795–1870) matematikussal együtt. 1830-ban mindketten hazatértek, de továbbra is dolgoztak együtt. Clapeyron a vasútvonalak tervezésén kívül, a hidak rugalmasságával foglalkozott, valamint a gőzmozdonyok tolattyújának fejlesztésével sikerült nagyobb hatásfokot elérnie. 1834-ben feleségül vette Mélanie Bazaine-t (1808–1852). [Nagy éve volt ez Clapeyronnak, mert nevezetes cikke (lásd fentebb) is ekkor jelent meg.] Megjegyzendő, hogy bár felesége mindenhol ezen a néven szerepel, a házasságlevélen Mélanie Vasseur áll, Vasseur anyja családi neve volt. Felesége apja, Pierre-Dominique Bazaine (1786–1838) szintén mérnök és tudós volt. Őt Napóleon ajánlotta be I. Sándor orosz cárnak. Oroszországban nagy karriert futott be, hidakat, gátakat, csatornákat, épületeket tervezett. Megkapta a legnagyobb kitüntéseket, katonai rangban pedig altábornagysággig jutott. 1912-ben ugyan a francia–orosz háború alatt Szibériába száműzték, de ez csak egy kétéves epizódnak bizonyult. A Műszaki Egyetem professzorának, majd 1824-ben igazgatójának nevezték ki. (Oroszországban és sok más országban, így Franciaországban is a műszaki egyetemetek Intézetnek vagy Iskolának hívták egészen a közelmúltig vagy még ma is így nevezik, és nem egyetemnek.) Clapeyron itt került kapcsolatba a családdal. Bazaine 1834-ig dolgozott Oroszországban, és hazatérte után, négy év múlva Párizsban halt meg.

1844 és 1859 között Clapeyron professzorként tevékenykedett az École des Ponts et Chaussées mérnöki „iskolában” (itt híd- és útmérnököket képeztek, illetve képeznek.) 1858-ban akadémikussá választották. Clapeyron nevét utca őrzi Párizsban, szerepel a legkiválóbb francia tudósok nevei között az Eiffel-tornyon, a rugalmasságtanban a Clapeyron-szabályban és minden fizikai kémiai tankönyvben.

Rudolf Clausius

Rudolf Julius Emanuel Clausius [Köslin (Cöslin), Pomeránia, Poroszország (ma Koszalin, Lengyelország) 1822. január 2. – Bonn, 1888. augusztus 24.] (7. ábra) C. E. G. Clausius protestáns lelki-



pásztor, iskolai tanácsnok és tanfelügyelő hatodik gyermeke volt [5–7]. Rudolf apja iskolájában, Ueckermündében kezdte a tanulmányait, majd a gimnázium következett Stettinben. A Berliini Egyetemet 1840-ben kezdte, matematika-fizika tanári diplomáját 1844-ben kapta meg. Próbatanítását a kor egyik elit középiskolájában

7. ábra. Rudolf Clausius fényképe (Theo Schafgans (1859–1907) bonni felvétele; fénynyomat: Meisenbach, Riffarth & Co., Berlin)

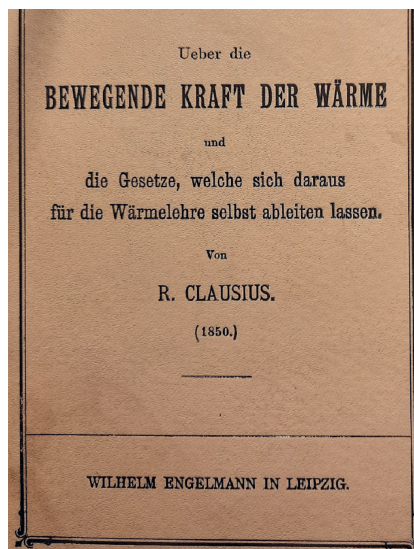
a Friedrich-Werdersches Gymnasiumban végezte. Doktorátusát A fényt visszaverő részecskék hatása a Föld légkörében (De iis atmosphaerae particulis quibus lumen reflectitur) című disszertációjával a Hallei Egyetemen nyerte el 1848-ban. Megjegyezzük, hogy Clausius rosszul gondolta, az égbolt színe (miért kék az ég?) fényszórási jelenségen alapul, és nem visszaverődésen, ahogy dolgozata tárgyalja, de ez későbbi tudományos felismerés volt (Lord Rayleigh, akkor még eredeti nevén, J. W. Struttként publikálta 1871-ben, de a jelenséget Rayleigh-szóródásnak hívjuk).

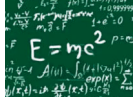
1850-ben a berlini Királyi Tüzér és Mérnöki Iskola fizikaprofesszorává nevezték ki. Egyidejűleg a Berliini Egyetem magántanáraként is tanított. 1855-től 1867-ig Zürichben, az Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) egyetemen professzor. 1867 és 1869 között Würzburgban professor, ezután Bonnba ment, ahol haláláig tanított. A francia–porosz háborúban 1870-ben egy mentőegység vezetőjeként szolgált, és betegszállítás közben súlyosan megsebesült a gravelotte-i csatában. A francia csapatokat, amelyek vereséget szenvedtek, François Achille Bazaine tábornok vezényelte, aki Clapeyron feleségének féltestvére volt. Clausius 1859-ben feleségül vette Adelheid Rimpau-t (1833–1875), aki fiatalon meghalt skarlátban. Hat gyermekük közül két fiúk és két lányuk érte meg a nagykorúságot. Halála előtt két évvel, 1886-ban nősült másodszer, Sophie Sacktól egy fia született.

Clausius tudományos munkásságának jellemző vonása az volt, hogy mindig nagyobb, elméletileg megalapozott szintézisre törekedett. Így volt ez a gázelmélete, az ehhez kapcsolódó hőelmélete kidolgozása során éppúgy, mint ezeket folytatva a molekulaszervezet fontosságának felismerésénél. Clausius személyében kétségtelenül a termodinamika egyik legjelentősebb alakját tisztelhetjük. Az 1840-es években a tudósok azzal kínlódtak, hogy Carnot axiómáját, miszerint a hőanyag, a caloricum elpusztíthatatlan, összeegyeztessék Rumford, Davy, Mayer, Joule kétségtelen bizonyítékaival, miszerint a munka hővé alakítható. William Thomson 1849-ben ennek eldöntésére további kísérleteket javasolt. Clausius úgy gondolta, hogy elég kísérleti anyag van ahhoz, hogy a termodinamika elmélete megfogalmazható legyen. Megírta első nagy művét, amely az *Ueber die bewegende Kraft der Wärme, und die Gesetze* címet viselte (8. ábra), és amelyről a

8. ábra. Clausius első könyve A hő mozgatóerejéről és a hőtán törvényeiről, amelyek ebből maguktól levezethetők.

Itt az Ostwalds Klassiker sorozat 99. kötetének (1898) címlapja látható, a kötethez Max Planck írt megjegyzéseket



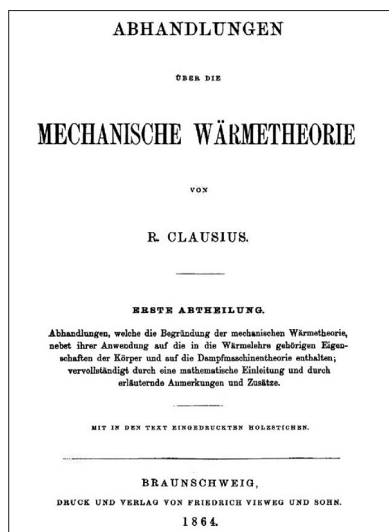


Berlini Tudományos Akadémián felolvasást tartott 1850. február 18-án. E művében található a termodinamika második főtételének első megfogalmazása.

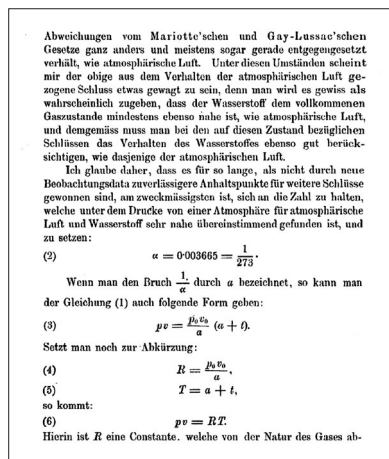
Clausius – Carnot-val ellentétben, aki szerint ugyanakkora hőmennyiség távozik a kisebb hőmérsékletű résznél, mint amennyi bekerült a nagyobb hőmérsékleten – kimondta, hogy az itt leadott hő sokkal kisebb, mint a felvett, éppen annyival, amennyi munkát végzett a gőzgép. Ez következik a termodinamika 1. főtételéből. Abból a megállapításából pedig, hogy a hő önként mindig a melegebb test felől áramlik a hidegebb felé, a termodinamika 2. főtétele következik. Másik fontos megállapítása pedig az volt, hogy a hő nem alakítható teljes mértékben munkává, noha ezt a termodinamika első főtétele megengedné.

Bár viták továbbra is voltak, Clausius könyve azonnal nagy sikert aratott. Clerk Maxwell ezt írta: „Clausius először tárgyalta úgy Carnot elvét, hogy az igazán konzisztens a hő igazi elméletével.” „Clausius világította meg először Carnot elméletének sötét és kétszeges voltát.”

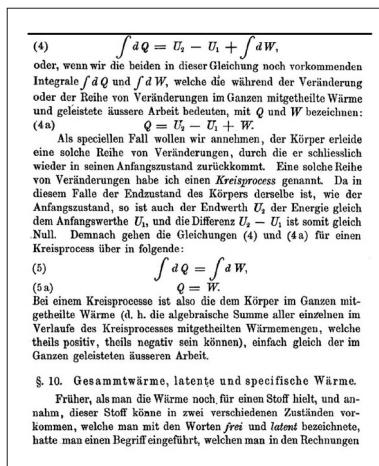
Willard Gibbs pedig így kommentált: „Az a kérdés, hogy a hőből származó munka (A) mennyisége mennyi, tökéletesen megválaszoltatott Clausius tanulmányában, és ezzel a termodinamika tudománya megszületett. E publikációt követően e tudomány szilárd alapokra került. Azóta sem ingatták meg, a meghatározások világosak, a határai egyértelműek.” Clausius az ezutáni időkben továbbfejlesztette a termodinamika elméletét és annak gyakorlati vonatkozásait. Másik jelentős könyve először 1864-ben jelent meg (9. ábra), ennek bővített második kiadása pedig 1876-ban (10–12. ábra).



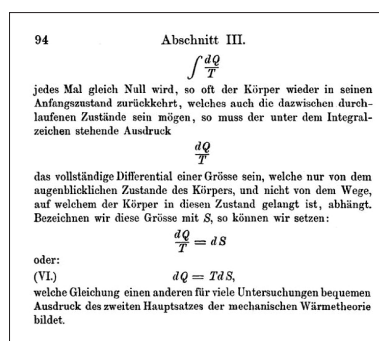
9. ábra. Clausius *Értekezés a mechanikus hőelméletről* könyvének címlapja



10. ábra. Részlet Clausius *Die mechanische Wärmetheorie* könyvéből. A gáztörvény és a gázállandó Clausius könyvében. Itt már 273 szerepel, tehát az abszolút nulla hőmérsékletet már pontosabban közelítették, mint 1834-ben (4. ábra)



11. ábra. Részlet Clausius *Die mechanische Wärmetheorie* könyvéből. Az 1. főtétel megfogalmazása



12. ábra. Részlet Clausius *Die mechanische Wärmetheorie* könyvéből. A 2. főtétel megfogalmazása és az entrópia (S) bevezetése

Clausius az anyagok hőtartalmát összekapcsolta a részecskék kinetikus energiájával és a köztük lévő kölcsönhatásokkal. Nagy lépést tett az entrópia fogalmának bevezetésével (1865). Megállapította, hogy ha tetszés szerinti zárt körfolyamaton reverzibilis módon futtatjuk végig a gázt, akkor a dQ/dT mennyiség csak a kezdő és a végállapottól függ (állapotfüggvény), tehát $dQ/T = dS$, ahol Q a hőmennyiség és T a hőmérséklet, és ezt az új állapotfüggvényt entrópiának (jele: S) nevezte el. Irreverzibilis folyamatokra – ha a rendszerrel közölt hőt tekintjük pozitívnak – Clausius megállapítja, hogy $dQ/dT < 0$. Így a termodinamika első és második főtétele a következő alakban írható fel: $dU = dQ + dA$, azaz egy zárt rendszer energiája állandó, $dQ \leq TdS$, azaz egy zárt rendszer energiája csak növekedhet.

Clausius az entrópia nevét a görög $\epsilon\nu$ (en) „ben” és a $\tau\rho\omicron\pi\eta$ (tropē) „átalakulás, transformation” szavakból alkotta meg, az átalakulás mennyisége, foka, „Verwandlungsinhalt” kifejezésére.

A hőhalál (vagyis az univerzum energiájának folyamatos csökkenése, hővé alakulása) fogalmának bevezetése a 19. század kedvenc világvége-elmélete lett, bár Clausius ennek elkerülésének módját is megadta. Clausius a hőerőgépek elméletének teljes megalapozásán kívül feltárta a hő és az elektromos vezetés kapcsolatát a vezetőekben, a termooszlopokban, az elektrolitokban, valamint a hősugárzás törvényeit. A molekuláris mozgás figyelembevételével magyarázatot adott a termodinamika 2. főtételére, valamint a gázok tulajdonságaira is. 1870-ben kidolgozta a viriáltételt (A „virial” szó a latin „vis”-ből származik, mely erőt, vagy energiát jelent). A viriáltétel jelentősége az, hogy lehetővé teszi az átlagos kinetikus energia kiszámítását, még bonyolult rendszerek esetén is, amikor a statisztikai mechanika módszerével ez nem oldható meg. Ez az átlagos és teljes kinetikus energia az ekvipartíció-tételhez hasonlóan kapcsolódik a rendszer hőkapacitásához.

Clausius továbbfejlesztette Bernoulli hipotézisét, aki először fejtette ki azt, hogy a gázok tulajdonságai a molekuláik mozgá-

sával vannak összefüggésben. Maxwell, aki nagy szerepet játszott a kinetikus gázelmélet kidolgozásában, Clausiust nevezi meg ennek a területnek az alapítójaként. A makroszkopikus termodinamika és a kinetikus gázelmélet együttes tárgyalása olyan, ma is használatos képletekhez vezetett, mint az állapotegyenlet alábbi képlete:

$$pV = nm u^2/3,$$

ahol p a nyomás, V a térfogat, n a részecskék száma, m a molekulák tömege, és u^2 az egyes molekulák sebességnégyzetének középértéke.

Clausius kimutatta, hogy a Dalton-, illetve a Boyle- és Avogadro-törvény a fenti elméletből következnek, de eltérések adódhatnak a molekulák közötti kölcsönhatások miatt (reális gázok). Van der Waals publikációjának megjelenése után részletesen foglalkozott a reális gázokra vonatkozó összefüggésekkel. Megállapította, hogy a gázok nyomása a molekulák mozgásának translációs mozgásához tartozó energiával van összefüggésben, a gáz belső energiája viszont a molekulák felépítésének bonyolultságával kapcsolatos, amely a molekulák atomjainak egymáshoz viszonyított mozgásából, például rezgéseiből származik.

A szabad úthossza vonatkozó vizsgálatait éppúgy alapvetőeknek bizonyultak, mint a diffúzióra és a hővezetésre vonatkozóak. Megállapította, hogy a szabad úthossz alapján magyarázható meg az a látszólagos ellentmondás, amely a molekulák nagy sebessége és lassú diffúziója között áll fenn. Az elektromosság és a mágnesesség iránti érdeklődése szintén fontos eredményeket hozott, például az elektrokinetikus jelenségek témakörében.

A statisztikus mechanika további fejlődésével viszont nem foglalkozott. Így az entrópia mibenlétének a valószínűséggel való összekapcsolása és szemléletes magyarázata is Ludwig Boltzmann munkájának (1877) köszönhető. Max Planck leveleire nem is válaszolt, pedig Planck korai termodinamikai munkálataiban központi hely jutott az entrópia fogalmának, *A mechanikai hőtan második főtétele* című disszertációja (1879) is erről szólt.

Clausius kortársi elismerését jelzi az, hogy majdnem minden rangos tudományos társaság, így a Royal Society of London (1868), a Magyar Tudományos Akadémia (1872), a Svéd Királyi Tudományos Akadémia (1878), a római Accademia Nazionale dei Lincei (1880), a német Leopoldina Tudományos Akadémia (1880), és a Holland Királyi Művészeti és Tudományos Akadémia (1886) tagjává választotta, illetve a legnagyobb kitüntetésével tisztelte meg (Copley Medal, Huygens Medal, Poncelet Prize, Pour le Mérite für Wissenschaften und Künste). A Würzburgi Egyetem díszdoktorává avatta. Szülővárosában emlékkövet kapott (13. ábra).

13. ábra. Clausius emlékköve szülővárosában, az ottani műszaki egyetem előtt, a termodinamika általa megfogalmazott két főtételével



A bostoni Academy of Arts and Sciences, amely Clausiust 1873-ban tagjává választotta, Josiah Willard Gibbs-t kérte fel, hogy írjon róla nekrológot [8]. Ők ketten sohasem találkoztak, és bár Gibbs elküldte Clausiusnak a cikkeit, nem alakult ki közöttük levelezés. Gibbs elfogadta a felkérést, de válaszelevelében azt a megjegyzést tette, hogy ez egy kényes ügy [9]. Az ügy pedig azért volt kényes, mert még többen éltek azok közül, akik Clausius szerepét lebecsülték, és támadták Clausius elképzeléseit. E csoport vezetője Peter Guthrie Tait (1831–1901) skót professzor volt, aki egy ideig maga mellé tudta állítani skót kollégáit, William Thomstont (1824–1907) és James Clerk Maxwellt (1831–1879). Gibbs részletes elemzésben megvédte Clausiust beleértve Clausius elsőbbségét is a 2. főtétel tekintetében [10]. Thomson is megfogalmazta a 2. főtételt [W. Thomson, „On the Dynamical Theory of Heat”, Transactions of the Royal Society of Edinburgh, (1851), 20, 261], de egy évet késett, hiszen Clausius könyve 1850-ben jelent meg, és sokkal alaposabb bizonyítást tartalmazott.

Maxwell *Theory of Heat* című könyvében (London, 1871) alig említette Clausiust. Clausius tiltakozására Maxwell a könyve 2. kiadásában (1872) megadta neki a méltó elismerést. Tait azonban nem volt hajlandó semmit sem elismerni, és javítani a saját könyvén (*Sketch of Thermodynamics*, Edinburgh, 1868). A vita – amelyet követni lehet az 1872. évi *Philosophical Magazine* hasábjain – eldurvult, és megegyezés nélkül szűnt meg. Gibbs Tait viselkedését „scientific chauvinism” jelzővel illette. Sajnos a sovinizmus, nacionalizmus a 19. században kezdett szörnyűre szökni, és sajnos azóta is burjánzik. A tudományban gondoljunk az elemek nevére (ruténiummal kezdődött 1844-ben, azután nem volt megállás: gallium 1875, germánium 1886, polónium 1898 stb. [4] vagy az egyenletek elnevezésének változására [11–12], amelynek egy tipikus példájáról már szoltunk.

Végezetül álljon itt egy részlet egy másik nekrológból, amely azt bizonyítja, hogy nemzetiségtől függetlenül nemcsak az amerikai Gibbs hódolt egy nagy tudósnak, aki az egész emberiség haladásához járult hozzá, hanem hasonlóképp George Francis FitzGerald író fizikus, a Royal Society tagja is, aki e gyönyörű sorokkal méltatta Clausiust [5]: „Ragyogó példája volt ő annak a szellemnek, aki teljesen az emberiség javára való munkálkodásnak szenteli az életét, és nem vesztegeti az idejét divatos problémák könnyed kidolgozására. A legnagyobb mértékben gyakorlati ember volt, munkája örökkévaló, emléke mindaddig élni fog, míg az emberiség tisztelni fogja a jótevőit.”

IRODALOM

- [1] Erdey-Grúz T., Schay G., Elméleti fizikai kémia. Tankönyvkiadó, Budapest, 1962, 463–494, 687, 705, 750.
- [2] Veszprémi T., Általános kémia. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2008, 129–134.
- [3] Simonyi K., A fizika kultúrtörténete. Gondolat Kiadó, Budapest, 1981, 309–320.
- [4] Inzelt Gy., Kalandozás a kémia múltjában és jelenében. Vince Kiadó, 2003, 83–134, 194–202.
- [5] G. F. FitzGerald, Rudolf Julius Emmanuel Clausius. Obituary notices of fellows deceased. Proceedings Royal Society London (1891) 48, i–viii. <http://doi.org/10.1098/rspl.1890.0002>
- [6] J. J. O'Connor, E. F. Robertson, Rudolf Julius Emmanuel Clausius. MacTutor, University of St. Andrews, 2000. <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk>
- [7] E. E. Daub, Clausius Biography in Dictionary of Scientific Biography. New York, 1970–1990.
- [8] M. J. Klein, Gibbs on Clausius. Historical Studies in the Physical Sciences (1969) 1, 127–149.
- [9] J. W. Gibbs to J. P. Cooke, 10 June 1889. Idézi: J. G. Crowther, Famous American Men of Science. London, 1937, 292.
- [10] J. W. Gibbs, Rudolf Julius Emanuel Clausius. Proceedings of American Academy (1889) 16, 458. (Újranyomva: The Scientific Papers of J. Willard Gibbs. New York, 1906; 1961.)
- [11] Inzelt Gy., Vegykonyhájában szintén megteszi. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2006, 314–319.
- [12] G. Inzelt, Milestones of the development of kinetics of electrode reactions. Journal of Solid State Electrochemistry (2011) 15, 1373–1389.