

sólo probar que una cantidad dada de calor consumido produce siempre la misma cantidad de movimiento, y recíprocamente, que á un trabajo mecánico dado y destruído corresponde siempre igual número de calorías. Procuremos dar una idea del modo cómo se ha resuelto este problema y cómo su solución ha tenido por consecuencia la nueva teoría del calor.

Pero ante todo ocupémonos con algunos detalles de los experimentos que demuestran cómo pueden producir calor las acciones mecánicas.

## III

## EQUIVALENCIA DEL CALOR Y DEL TRABAJO MECÁNICO

Los experimentos que Rumford hizo en 1798 para demostrar que la enorme producción del calor debido al frotamiento de un taladro contra el fondo de un cilindro metálico no podía explicarse atribuyéndola á una disminución del calor específico del bronce reducido á limadura, eran ya decisivas para destruir la hipótesis de la materialidad del calórico. Las de Davy, que también hemos citado, lo fueron mucho más.

Por otra parte, para producir calor, no se necesita que haya división ó alteración alguna en las superficies frotadas, y lo que decimos aquí del frotamiento es aplicable á cualquiera otra acción mecánica. Cuando una bala de fusil ó de cañón dan contra un cuerpo duro, como una placa blindada, la transformación de la fuerza viva en calor es bastante grande para que la bala de fusil aplastada por el choque conserve huellas de fusión y la de cañón se caliente hasta el rojo.

Cuando un cuerpo cae desde cierta altura y da en el suelo, resulta una destrucción de movimiento, ó más bien la transformación de este movimiento en calor (1). Esto es cierto lo mismo para los líquidos que para los sólidos; el experimento siguiente, que copiamos de una obra de M. Cazin, da un medio ingenioso de comprobar este hecho:

“A tres ó cuatro metros de altura se coloca una vasija con mercurio, cerrada con una llave provista de una palanca para poder abrirla y cerrarla fácilmente sin necesidad de elevarse hasta dicha altura. En la misma vertical y debajo de la vasija hay otra de hierro delgado que contiene también mercurio (fig. 670). Se establece un circuito termoelectrico por medio de dos empalmes que penetran respectivamente en el mercurio de cada una de las vasijas y de un galvanómetro. Hay que cerciorarse ante todo, por la posición de la aguja del galvanómetro, de la igualdad de temperatura de las dos vasijas, y si no la hay, se establece. Ábrese luego la llave; el mercurio cae en la vasija inferior y pierde en ella la velocidad que había adquirido en la caída, sin producir ningún trabajo apreciable. La aguja del galvanómetro se pone al punto en movimiento,

(1) Cuando el cuerpo y el plano en que cae son elásticos, por ejemplo una bola de billar sobre una placa de mármol bruñido, el movimiento no se destruye hasta que pasa algún tiempo. La bola rebota, y si la elasticidad del marfil y la del mármol fuesen perfectas, saltaría hasta la altura desde la que ha caído, y el movimiento podría continuar indefinidamente. Este caso ideal supone además que el medio no es resistente. En realidad el fenómeno es más complejo. Sábese que no hay cuerpo alguno de elasticidad absoluta, ni medio que no ofrezca alguna resistencia, por cuanto no se puede efectuar el vacío absoluto. Por consiguiente, el movimiento visible de la bola acaba por destruirse comunicándose á las moléculas de los cuerpos que chocan entre sí y luego á las del aire ambiente, y transformándose en ondulaciones sonoras y probablemente en parte en calor. Sobre un cuerpo blando, la fuerza viva del cuerpo, de una bala de plomo por ejemplo, desaparece casi al punto enteramente; pero se manifiesta un nuevo fenómeno, el de una elevación sensible de la temperatura de la bala.

indicando que la vasija inferior se caldea gradualmente. Compréndese, pues, que sea posible medir la elevación de la temperatura y, con arreglo á las leyes de la física, deducir de ella el número de calorías engendradas.”

Resulta de aquí que el agua de la parte inferior de una cascada debe estar más caliente que la que se escapa de su cúspide, lo cual hace también comprender el aserto de los marinos de que después de una tempestad el agua del mar está más caliente. Si se puede comprobar este aumento de temperatura, debe de consistir sin duda alguna en la agitación de las olas, en la transformación de su movimiento en calor de resultados del choque.

Hemos visto que la compresión desarrolla calor. Sabemos por otra parte que el hielo á 0° se funde y disminuye de volumen sin que cambie su temperatura, si se le suministra calor. La razón de que en este caso la absorción de calor no caliente el agua de fusión consiste en que todo este calor se invierte en el trabajo de contracción. Pero si, según hace observar M. Berbin, “suministramos este trabajo con una compresión exterior, el calor necesario para la fusión será menor, y el hielo podrá derretirse á -0°. Así pues, el punto de fusión del hielo debe bajar por efecto de la compresión, y lo propio sucederá con todos los cuerpos que se dilatan al solidificarse. Lo contrario sucederá con los que se contraen, que son los más numerosos.” En el capítulo VII hemos descrito los experimentos que confirman la exactitud de esta explicación.

En el fenómeno de las estrellas fugaces y de los bólidos tenemos un interesante ejemplo de la transformación del movimiento en calor. Nadie ignora que estos cuerpos extraños á la Tierra penetran en nuestra atmósfera en virtud de su movimiento de traslación en el espacio, combinado con el doble movimiento de rotación y traslación de la Tierra. La velocidad de que están animados en el momento en que ocurre dicha penetración es á las veces considerable, pudiendo comparársela con las velocidades planetarias y cometarias y llegando hasta á 20 kilómetros por segundo y aun pasando de ellos. Así es que el calor desarrollado es bastante fuerte para dar origen á la incandescencia de la materia que forma esas masas. De aquí resultan esos rastros de fuego que surcan el cielo y que se apagan muy luego, ya porque el cuerpo haya sufrido una combustión completa, ó ya porque sólo atraviesa la atmósfera y continúa su marcha por el espacio, ó ya en fin, si se trata de una masa sólida, porque no habiéndola podido penetrar el calor por completo, sólo se haya puesto incandescente una delgada capa. Los fragmentos de bólido de superficie vitrificada y fundida, recogidos cuando aún

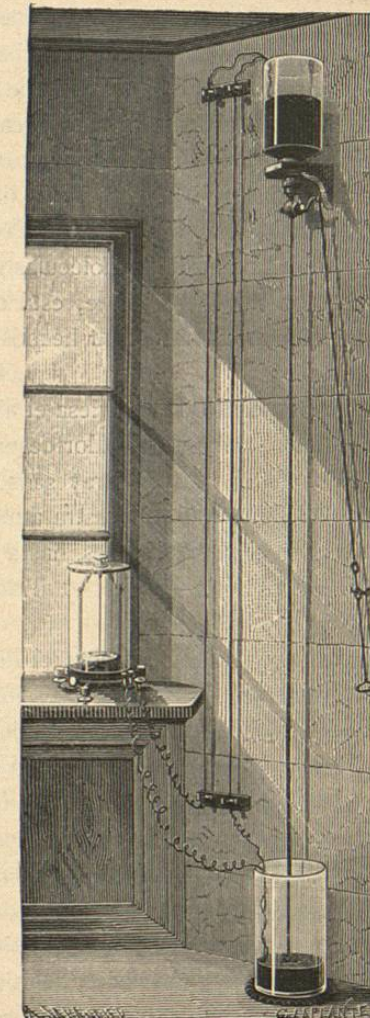


Fig. 670.—Calor producido por la caída de un chorro líquido



estaban calientes, son otros tantos testimonios auténticos de la realidad de esta última hipótesis.

Para explicar la elevada temperatura á que llegan las estrellas fugaces y los bólidos en su paso por las altas capas del aire, han supuesto unos físicos que el frotamiento era la causa del calor desarrollado, atribuyéndolo otros á la compresión. Helmholtz admite la primera explicación, diciendo en su *Tratado elemental de la transformación de las fuerzas naturales*: "La incandescencia y la elevada temperatura que conservan algunos aerolitos en los primeros instantes que siguen á su caída, se explican hace tiempo por su frotamiento. En efecto, bastaría una velocidad de unos 1000 metros por segundo para elevar á 1000 grados la temperatura del hierro meteórico y hacerle luminoso, si él sólo absorbiera todo el calor emanado del frotamiento."

En su *Memoria sobre la expansión de los gases* prueba Regnault con una serie de experimentos que "cuando circula un gas, aun con grandísima velocidad, por un espacio de paredes muy dilatadas, no hay desprendimiento perceptible de calor que se pueda atribuir al roce de las moléculas gaseosas sobre dichas paredes."

"Esta conclusión, añade, está en oposición con las ideas generalmente admitidas, pudiendo citar muchos hechos que parecen contradecirla. Indicaré los más importantes.

"Un proyectil que atraviesa el aire con gran velocidad se calienta mucho. Atribúyese esta circunstancia al calor desprendido por el frotamiento del proyectil contra las moléculas del aire por él atravesado.

"Los bólidos cruzan nuestra atmósfera con velocidad extraordinaria; se calientan hasta ponerse incandescentes, hasta fundirse del todo, ó únicamente en su superficie. Atribúyese también este hecho al calor desprendido por la fricción contra las moléculas gaseosas.

"Creo que en ambos casos el desprendimiento de calor procede de otra causa, y que únicamente dimana del calor desarrollado por la compresión del aire."

Para justificar su opinión, el eminente físico da cuenta en los siguientes términos del modo como ocurren las cosas en su concepto: "Cuando un móvil atraviesa el aire con una velocidad mayor que la del sonido, la elasticidad del aire queda anulada en sus efectos, y la compresión producida por el móvil no tiene tiempo de llegar á las capas contiguas antes que éstas hayan sido comprimidas á su vez por el móvil. A consecuencia de esta inercia, el aire resulta comprimido como podría estarlo en un eslabón de aire. El calor procedente de esta compresión pasará en gran parte al móvil, elevando su temperatura. La expansión del aire que produce frío no influirá en el móvil, porque no tendrá lugar sino cuando éste haya pasado. Así pues, en mi concepto, el móvil marchando con la misma velocidad recogerá siempre el calor que desprende al comprimir el aire, y no sufrirá el enfriamiento producido por la expansión subsiguiente de las capas de aire que acaba de atravesar.

"Aparte de esto, es evidente que la compresión del aire será tanto más enérgica cuanto mayor sea la velocidad de que esté dotado el móvil; la temperatura de éste subirá hasta que llegue á igualar á la que adquiere una capa de aire que sufre instantáneamente la misma compresión en un eslabón de aire. Así se explica muy bien la elevadísima temperatura que adquiere un bólido al atravesar nuestra atmósfera con una velocidad mucho más considerable que la de propagación del sonido.

"Un móvil que cruce el aire con velocidad menor que la del sonido adquirirá un caldeo del mismo género, pero más débil. Aun en este caso, el móvil sufrirá la influen-

cia del calor desprendido por la compresión más bien que la del absorbido por la expansión. Ambos efectos se compensarán sensiblemente cuando la velocidad del móvil sea muy escasa (1)."

Si la compresión desarrolla calor, consiste en que necesita consumir fuerza viva, en que se destruye cierta cantidad de trabajo. Por el contrario, la dilatación de un gas origina un descenso de temperatura que corresponde á una producción de trabajo ó de fuerza viva. Gay-Lussac ha demostrado con su experimento célebre que las variaciones termométricas que resultan de una compresión y de una dilatación iguales de un gas son iguales á su vez. Valiase al efecto de dos grandes redomas reunidas por un tubo provisto de una llave. Haciendo un vacío parcial en una de ellas, y aguardando luego que la temperatura fuese uniforme en ambas redomas, abría la llave. El experimento revelaba una elevación de temperatura en la primera y otra igual en la segunda. Joule ha repetido el experimento haciendo un vacío tan completo como pudo en un recipiente metálico A (fig. 671), y comprimiendo en un recipiente semejante y de la misma capacidad B, aire atmosférico á 22 atmósferas.

Introducía ambos recipientes en una vasija llena de agua, y en seguida abría la llave de comunicación. El gas comprimido en B se precipitaba en A duplicando su volumen. Pero los termómetros más delicados, metidos en el agua que bañaba las vasijas, no marcaban en el momento de abrir la llave ninguna variación de temperatura; lo cual consistía, conforme observa Verdet justamente, en que al precipitarse el gas comprimido en el recipiente vacío, "no ha encontrado otra resistencia

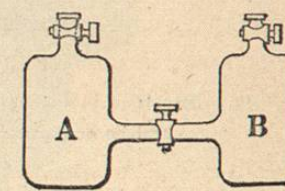


Fig. 671. — Experimento de Gay-Lussac y de Joule sobre la dilatación de los gases.

que la que le ofrece la insignificante cantidad de aire que una buena máquina neumática no puede extraer. Así pues, aunque se reduzca la fuerza elástica del gas de 22 atmósferas á 11, no se ha efectuado ningún trabajo exterior. Tampoco se ha desarrollado ninguna fuerza viva apreciable, puesto que, tanto al principio como al fin del experimento, todas las partes del aparato y el gas contenido en él han permanecido en reposo. Conforme á lo indicado por la teoría, no ha habido ninguna absorción de calor. Tal es en efecto el resultado definitivo; pero, analizando más completamente lo que ocurre, vese fácilmente que el aire comprimido del recipiente B comunica fuerza viva, mientras dura el experimento, al aire que pasa á A; por consiguiente, éste se enfría. Esta fuerza viva queda destruída en breve, ya á consecuencia del frotamiento recíproco de las moléculas de aire, ó ya por efecto de su choque contra las paredes del aparato, resultando de aquí un desprendimiento de calor precisamente igual á la absorción que se verifica en B. Los dos efectos opuestos se compensan, lo cual explica la constancia de la temperatura del agua de la vasija que rodea los recipientes.

(1) Más adelante, el sabio autor de la Memoria explica de este modo la razón de estos hechos de experiencia: "En mi opinión, dice, la fricción de dos cuerpos no desprende calor sino cuando las moléculas de uno de ellos por lo menos no están absolutamente libres, es decir, cuando se hallan bajo la influencia de una fuerza cualquiera de agregación. Según nuestras observaciones, esta libertad absoluta no debe de existir en realidad sino en los fluidos inmateriales, como el éter, que transmite las vibraciones luminosas. No es perfecta en nuestros gases, y sólo por esto el movimiento de un gas á lo largo de una pared sólida debe desprender cierta cantidad de calor que resulta únicamente de la transformación en calor de la pérdida de fuerza viva sufrida por las moléculas para vencer sus resistencias interiores. Mis experimentos prueban que este calor es tan escaso con respecto al aire atmosférico, que no podemos apreciarlo con nuestros medios de observación."



Tyndall ha presentado por ingenioso modo el doble fenómeno del enfriamiento causado por la dilatación del aire y de la elevación de la temperatura que resulta de la destrucción de un trabajo exterior. En el primer experimento se valía de un cubo metálico provisto de un orificio de llave que contenía aire comprimido durante un espacio

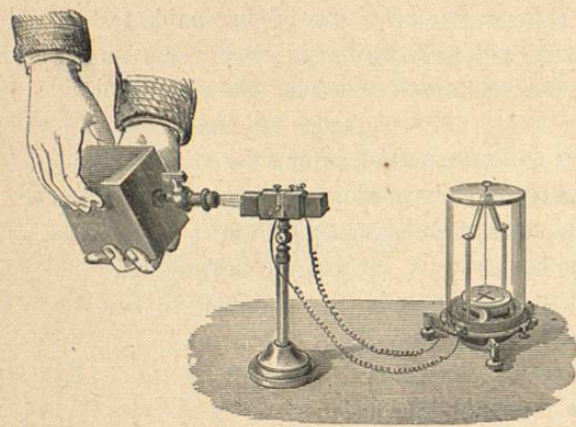


Fig. 672. — Experimento de Tyndall. Calor absorbido por el trabajo de un gas que se dilata

de tiempo lo suficientemente largo para que adquiriese la temperatura del aire ambiente. Abriendo la llave, el aire se escapa con violencia al exterior. Como es el mismo gas el que suministra la fuerza necesaria para esta expulsión, se enfría, empleando así su propio calor en producir trabajo, lo que se comprueba presentando á la corriente la cara de una pila termoeléctrica. La desviación de la aguja del galvanómetro indica un descenso de temperatura.

Si se comprime el aire de un fuelle empleando al efecto la fuerza muscular de las manos, es decir, si se expulsa el aire que contiene mediante un trabajo mecánico exterior, la destrucción de este trabajo dará lugar á una producción de calor. En efecto, la experiencia demuestra en este caso que la aguja del galvanómetro se desvía en sentido contrario, indicando una elevación de temperatura de la cara de la pila termoeléctrica (figura 673).

Citemos otro ejemplo relativo á un cuerpo sólido. Una tira de caucho se calienta al estirarla, lo cual se conoce fácilmente aplicando la tira á los labios. ¿Cuál es la causa de esta producción de calor? Hirn ha demostrado que la densidad del caucho aumenta cuando se le estira; por consiguiente, la compresión engendra el calor de la tira.

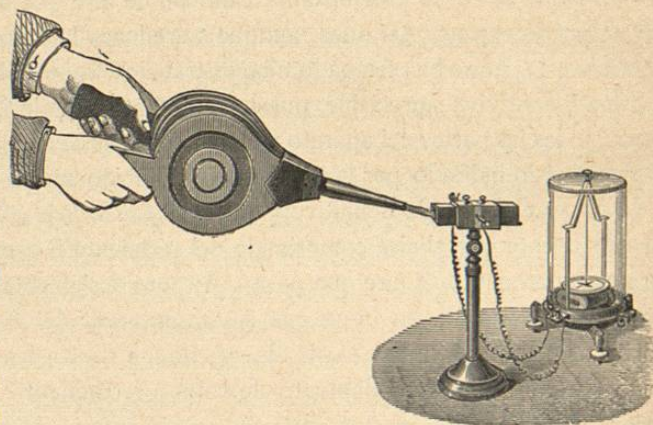


Fig. 673. — Experimento de Tyndall. Calor desarrollado por una destrucción de trabajo

Terminemos la enumeración de estos ejemplos de la transformación del trabajo mecánico en calor recordando un bello experimento de León Foucault. En la parte de este tomo consagrada á la *Electricidad* hemos visto en qué consiste este experimento. Entre los polos de un electroimán se hace girar un disco de bronce, por medio de un manubrio, con una velocidad de 150 á 200 vueltas por segundo. Supongamos que antes de animar el electroimán se imprima esta velocidad al disco; una vez obtenida, se hace pasar la corriente de seis pares Bunsen á los brazos del electroimán fijo. Al punto nacen corrientes indu-

cidas en el disco móvil y por su reacción sobre la corriente de las bobinas del electroimán se oponen al movimiento y lo hacen parar en algunos segundos, “como si, según la expresión de Foucault, se hubiera aplicado al móvil un freno invisible.” Las corrientes inducidas cesan antes de detenerse el disco, pero esta destrucción de movimiento ha producido calor, cuya existencia se puede comprobar con instrumentos termoeléctricos. Se puede dar otra forma al experimento. Primeramente se hace pasar la corriente por el electroimán, y luego se procura hacer girar el disco empujando al efecto el manubrio; pero se experimenta gran resistencia; el esfuerzo que se ha de hacer para con-

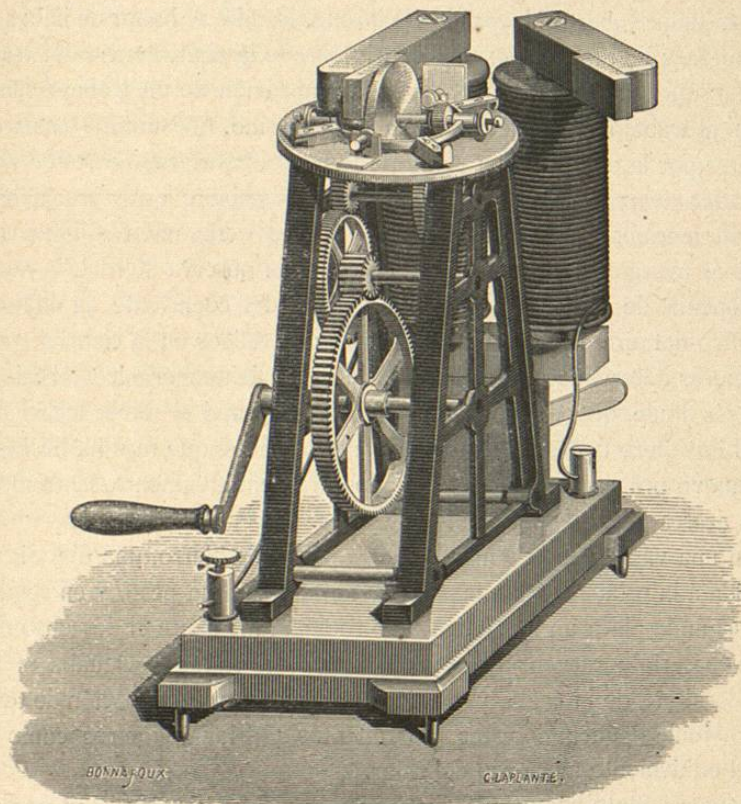


Fig. 674. — Experimento de León Foucault

tinuar el movimiento del disco algunos minutos tan sólo, es bastante considerable para que la transformación del trabajo destruido en calor eleve la temperatura del disco de 20 á 35 grados sobre la temperatura del aire. Reduciendo la pila á dos pares, y prolongando el movimiento por espacio de dos minutos, Foucault ha visto elevarse hasta 60 grados la temperatura de un disco plano de cobre rojo. Como se ve, este es un ejemplo evidente de la transformación del trabajo mecánico en calor. La fuerza viva de este trabajo, aniquilada en apariencia, se comunica en realidad á las moléculas del disco, y de su forma visible pasa á la forma invisible de trabajo de oscilación y de disgregación, según la frase de Clausius.

Los ejemplos de la transformación del trabajo en calor y viceversa, que hemos reproducido en este artículo, bastaban para hacer probable en alto grado la teoría que define el calor como un modo de movimiento. Mas para que adquiriese un carácter positivo de certidumbre, menester era dar un paso más; determinar por la experiencia



los números que marcan, ya la cantidad de trabajo creada por el consumo de una unidad de calor ó de una *caloría*, ó bien la cantidad de calorías necesarias para producir una unidad de trabajo. En una palabra, era preciso encontrar el *equivalente mecánico del calor*, ó bien el *equivalente calorífico del trabajo*.

## IV

## MEDIDA DEL EQUIVALENTE MECÁNICO DEL CALOR

Al doctor Julio Roberto Mayer, de Heilbronn, le cabe el honor de haber enunciado por vez primera y de un modo exacto el principio de la equivalencia del trabajo y del calor, á saber: que el calor producido por la realización de un trabajo cualquiera es proporcional al trabajo invertido, ó lo que es lo mismo, que una de estas cantidades puede medirse por la otra. En una Memoria titulada *Observaciones sobre las fuerzas de la naturaleza inanimada* y publicada en 1842, establece estos principios y calcula el equivalente mecánico del calor, valuándolo en 365 kilogrametros. Esta cifra difiere bastante de las averiguaciones ulteriores; pero, según observa Verdet, la razón de esta diferencia depende de la inexactitud de los valores del coeficiente de dilatación y del calor específico del aire que á la sazón pasaban por válidos en la ciencia

Las primeras determinaciones rigurosas del equivalente mecánico del calor se deben al físico inglés Joule, que en el orden cronológico ocupa el tercer lugar (después de Mayer y del ingeniero danés Colding), pero quizás sea el que más ha hecho para demostrar el nuevo principio y para que se adoptara definitivamente. Entremos en algunos detalles acerca de los experimentos de Joule.

Ponía en una vasija llena de mercurio dos placas de hierro, una fija y la otra fuertemente unida á la primera con una palanca cargada con un peso, y en seguida imprimía á esta segunda placa un movimiento de rotación mediante el descenso de un peso. El trabajo necesario para vencer el rozamiento de las placas se valuaba multiplicando el peso por la altura de la caída, y el calor producido, por la elevación de temperatura del mercurio. Joule deducía de estos experimentos 425 kilogrametros como promedio del valor del equivalente mecánico del calor.

En otro experimento comprimía aire, con una bomba impelente, en una vasija metálica sumergida en el agua de un calorímetro. Después de dar un número determinado de golpes de émbolo y de llegar la presión del aire á cierto número de atmósferas, observaba la elevación de temperatura del agua y deducía de ella la cantidad de calor cedida á este líquido. Como el caldeo no dimanaba por completo de la compresión del aire, sino también del frotamiento del émbolo, empezaba de nuevo la operación dejando el recipiente en comunicación con la atmósfera, es decir, sin comprimir el aire. El calor producido por esta nueva operación era el causado por el rozamiento en la anterior. Valiéndose de este método, Joule dedujo 438 kilogrametros como equivalente mecánico del calor.

Este físico utilizó también con el mismo objeto el frotamiento entre sólidos y líquidos. Haciendo dar vueltas á una rueda de paletas en agua ó en mercurio (fig. 675), observaba la elevación de temperatura del líquido, y podía deducir asimismo de ella el número de calorías creadas por el frotamiento. Por otra parte, medía fácilmente el trabajo invertido para obtener el movimiento de rotación, y como éste resultaba de la caída de dos pesos enrollados con dos cordones, por un lado al eje de las paletas, y por

otro á dos poleas, el trabajo invertido era igual al producto de los dos pesos por la altura de la caída de cada uno de ellos. Joule obtuvo por este método las cifras siguientes:

Por el frotamiento del latón en el agua . . . . .	423,92 kilogrametros
— del hierro en el mercurio . . . . .	424,68 —

O sea unos 424 kilogrametros por término medio.

Favre ha determinado el equivalente mecánico del calor estudiando el calor desarrollado por el rozamiento del acero sobre sí mismo. El aparato de rozamiento estaba contenido en el calorímetro de mercurio de Favre y Silbermann, y ya hemos visto cómo se puede medir entonces el calor producido. En cuanto al trabajo consumido por el rozamiento, se medía por la caída del peso motor del aparato. El promedio del valor del equivalente mecánico determinado de esta suerte era de 413 kilogrametros, número algo inferior al de Joule.

M. Hirn de Colmar ha efectuado muchas series de investigaciones análogas, basadas la primera en el frotamiento del agua, la segunda en la salida del agua á fuertes presiones, la tercera en el aplastamiento del plomo por el choque del ariete, y por fin, la cuarta en el descenso de temperatura originada por la expansión del aire. Los valores del equivalente mecánico del calor deducidos de estas investigaciones varían entre 433 y 424,5 kilogrametros, aproximándose mucho á los resultados obtenidos por Joule. El mismo físico ha hecho asimismo experimentos de gran interés en la máquina de vapor, los cuales prueban que el calor perdido por el vapor, al pasar de la caldera por el cilindro al condensador, es proporcional al trabajo exterior efectuado por la máquina. Conociendo la cantidad de agua vaporizada en la caldera y enviada al cilindro, su tensión y su temperatura, M. Hirn pudo calcular la cantidad de calor que contenía, valiéndose de las tablas de Régnault. Midiendo por otra parte la cantidad y la temperatura del vapor condensado á su salida del cilindro, así como las del agua inyectada en el condensador, obtuvo también la medida del calor que tenía aún el vapor en tal momento. Aparte de esto, M. Hirn no tan sólo ha medido el trabajo útil de la máquina, sino también el absorbido por las resistencias pasivas, en una palabra, el trabajo total producido por el vapor en el émbolo del cilindro. "Los experimentos de M. Hirn, bien interpretados, dice Verdet, demuestran que el vapor lleva al condensador menos calor del que saca de la caldera, y que el calor consumido en el interior de la máquina es proporcional al trabajo efectivo del vapor. La relación entre ambas cantidades es una nueva determinación del equivalente mecánico del calor, que se aproxima á las anteriores determinaciones de Joule y Favre. En efecto, si los resultados individuales que se pueden deducir de los experimentos de M. Hirn oscilan entre límites bastante extensos, su valor medio es el número 413, precisamente

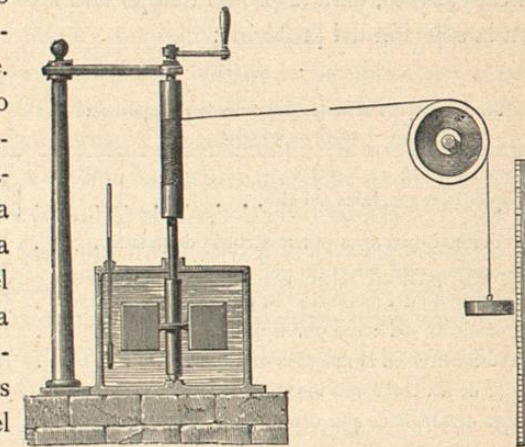


Fig. 675.—Experimento de Joule. Determinación del equivalente mecánico del calor