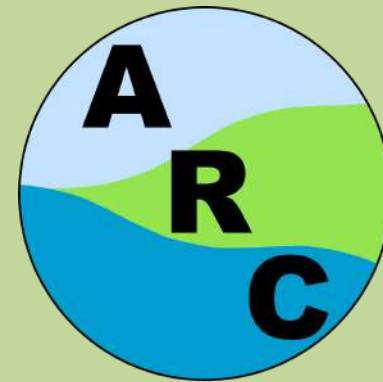


# El gradiente adiabático

Juan Sebastián Galaz Villasante - Investigador independiente



## Una controversia científica sin resolver

La inclusión de un campo gravitatorio es algo natural que inevitablemente conduce a gradientes de presión, y por tanto también a gradientes de temperatura. La teoría actual predice la persistencia de un **gradiente de temperatura** en un sistema aislado en equilibrio. Sin embargo, la existencia de dicho gradiente es un **anatema para la tradición**, y se requiere más investigación para encontrar una manera de evitarlo o de convivir con él. En ausencia de experimentación, la cuestión podría considerarse académica, ya que tiene poca o ninguna relevancia para la aplicación de la teoría a atmósferas reales. Sin embargo, afecta a los fundamentos de la termodinámica y merece ser resuelta, o al menos debatida. [1]

300 *Molecular Theory.*

to another, so that the proportion of oxygen and nitrogen at different heights is much more uniform than if these gases had been allowed to take their places by diffusion during a dead calm.

The second result of our theory relates to the thermal equilibrium of a vertical column. We find that if a vertical column of a gas were left to itself, till by the conduction of heat it had attained a condition of thermal equilibrium, the temperature would be the same throughout, or, in other words, gravity produces no effect in making the bottom of the column hotter or colder than the top.

This result is important in the theory of thermodynamics, for it proves that gravity has no influence in altering the conditions of thermal equilibrium in any substance, whether gaseous or not. For if two vertical columns of different substances stand on the same perfectly conducting horizontal plate, the temperature of the bottom of each column will be the same; and if each column is in thermal equilibrium of itself, the temperatures at all equal heights must be the same. In fact, if the temperatures of the tops of the two columns were different, we might drive an engine with this difference of temperature, and the refuse heat would pass down the colder column, through the conducting plate, and up the warmer column; and this would go on till all the heat was converted into work, contrary to the second law of thermodynamics.

But we know that if one of the columns is gaseous, its temperature is uniform. Hence that of the other must be uniform, whatever its material.

This result is by no means applicable to the case of our atmosphere. Setting aside the enormous direct effect of the sun's radiation in disturbing thermal equilibrium, the effect of winds in carrying large masses of air from one height to another tends to produce a distribution of temperature of a quite different kind, the temperature at any height being such that a mass of air, brought from one height to another without gaining or losing heat, would always find

James C. Maxwell, *Theory of Heat*, 1872

La tradición aludida en el párrafo que encabeza este póster se refiere a una hipótesis propuesta por James C. Maxwell en la segunda mitad del s. XIX, según la cual una columna de gas aislada en un campo gravitatorio tendría que ser isotérmica, pues de otro modo se incumpliría la segunda ley de la termodinámica [2]. Con el tiempo esta hipótesis acabó convirtiéndose en “dogma”, sin embargo, desde el primer momento hubo científicos que la cuestionaron, haciendo notar que un campo gravitatorio inevitablemente tendría que dar lugar a temperaturas más altas en la base de la columna de gas, debido a la transformación de energía potencial en energía cinética [3] [4].

La *cuestión*, lejos de estar resuelta, sigue generando controversia en la actualidad, tal como ilustra un conocido libro de texto [5] según el cual “*el perfil de temperatura de equilibrio de una columna de aire aislada en el campo gravitatorio terrestre suscita debates tan acalorados como los de la política y la religión ... Insistir, como hacen algunos incluso vehementemente, en que el perfil de equilibrio de un gas aislado en un campo gravitacional es isotérmico, es creer que las moléculas de gas pueden tener mágicamente el mismo grado de inmovilidad que las moléculas de un sólido. ... A esto lo llamamos la falacia de la atmósfera sólida.*”

Es pertinente señalar que los científicos que estudian el clima son mayoritariamente fieles a la tradición iniciada por Maxwell sosteniendo que, a pesar de la presencia de un campo gravitatorio, la atmósfera en equilibrio debe ser isotérmica, y que un gradiente térmico únicamente puede darse como resultado de la presencia de ciertos gases parcialmente opacos a la radiación infrarroja [6]. Dado que hay acuerdo general en que un gradiente de temperatura es condición necesaria para que exista un **efecto invernadero** [7], es comprensible que aquellos gases supuestamente causantes del gradiente térmico atmosférico sean conocidos popularmente como “gases de efecto invernadero”.

Claramente esta *cuestión*, además de *afectar a los fundamentos de la termodinámica*, tiene una relevancia sustancial *para la aplicación de la teoría a las atmósferas reales*.

May 22, 1873] *NATURE*

Kinetic Theory of Gases

ON page 300 of the second edition of Maxwell's excellent little text-book on the "Theory of Heat," it is stated, as a result of the kinetic theory of gases therein set forth, that "gravity produces no effect in making the bottom of the column" (of gas) "hotter or colder than the top."

I cannot see how this result follows from the kinetic theory of gases. On the contrary, it seems obvious that thermal equilibrium can only subsist according to the kinetic theory, where the molecules encounter each other with equal average amounts of work or vis viva, and in order that this may be the case, the velocity of the molecules (and consequent temperature) of any upper layer must be less than that of the molecules in the layer next below; since, in order to encounter each other, the former must descend, and acquire velocity, while the latter must ascend and lose it. This would establish a diminution of temperature from the bottom to the top of a column of air at the rate (in the absence of any counteracting cause) of 1° F. for 113 ft. of height, as can easily be verified from the fact that on account of the specific heat of air 1 lb. requires 183 foot-pounds to raise its temperature 1° F. Radiation may diminish this and tend to produce equilibrium, but nevertheless it seems obvious from these two opposing tendencies a residual inequality of thermal condition would result, and that the top of a column would be cooler than the bottom. That this would be the case if the air were in general motion in the form of upward and downward currents, will not, I presume, be disputed; and surely molecular is on the same footing. If the particles of air are moving in every direction with great absolute velocity, in what respect does this differ from air currents? In fact, all the particles which at any epoch of time are moving in any given direction constitute an air-current in that direction, mingled, it is true, with currents in other directions, but moving with accelerated velocity if descending, and with retarded velocity if ascending, and thus always tending to produce a diminution of temperature with height as a condition of gaseous thermal equilibrium.

J. GUTHRIE  
Graaf Reinet, Cape Colony, April 2

Francis Guthrie, *Kinetic Theory of Gases*, 1873

## Volumen de gas aislado en un campo gravitatorio

El desarrollo matemático que se presenta a continuación está basado en [8]. Es importante tener en cuenta que todas las ecuaciones diferenciales involucradas, particularmente la que representa el nulo intercambio de calor con el entorno en un sistema adiabático,  $dQ = 0$ , se cumplen en cualquier elemento infinitamente pequeño dentro del volumen de gas. Al contrario de lo que confusamente se indica en multitud de publicaciones, **el sistema adiabático considerado no es una “parcela de gas” que asciende o desciende, sino cada uno de los infinitos puntos del volumen total ocupado por el gas.**

Primera ley de la termodinámica:  $dQ = dU + dW = n \cdot c_v dT + P dV$

Ley de los gases ideales,  $P \cdot V = n R T$ , en forma diferencial:

$$V dP + P dV = n R dT$$

Despejando  $P dV$  y teniendo en cuenta que  $R = c_p - c_v$  se tiene:

$$dQ = n c_v dT - V dP + n (c_p - c_v) dT$$

$$dQ = n c_p dT - V dP = 0 \text{ en un proceso adiabático}$$

Con  $C_p = c_p / M$  y  $\rho = n \cdot M / V$  se obtiene:

$$dT/dP = V / (n \cdot c_p) = 1 / (C_p \cdot \rho)$$

Condición de equilibrio hidrostático:  $dP = -g \rho dz$

$$dT/dz = -g/C_p$$

$$\text{Gradiente adiabático } \Gamma_a \equiv -dT/dz = g/C_p$$

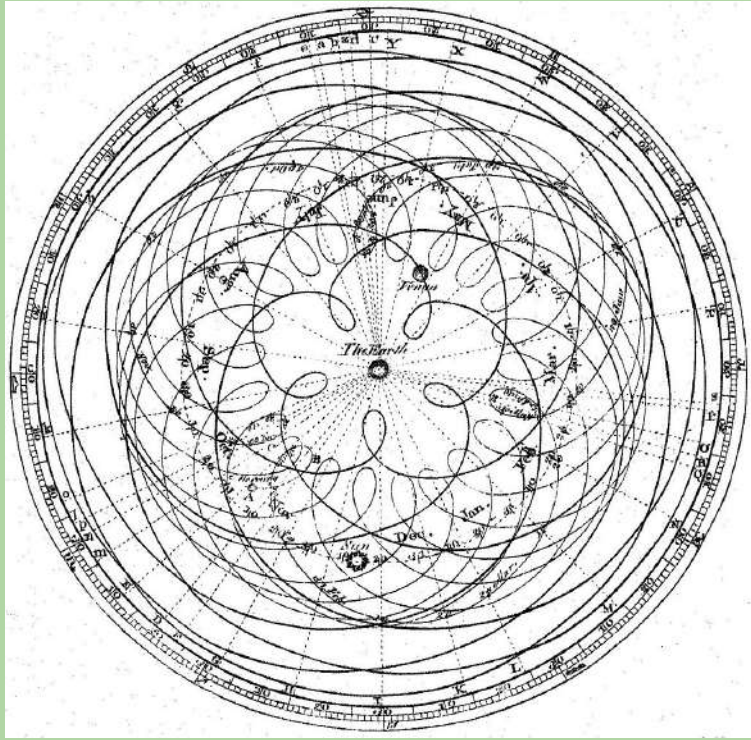
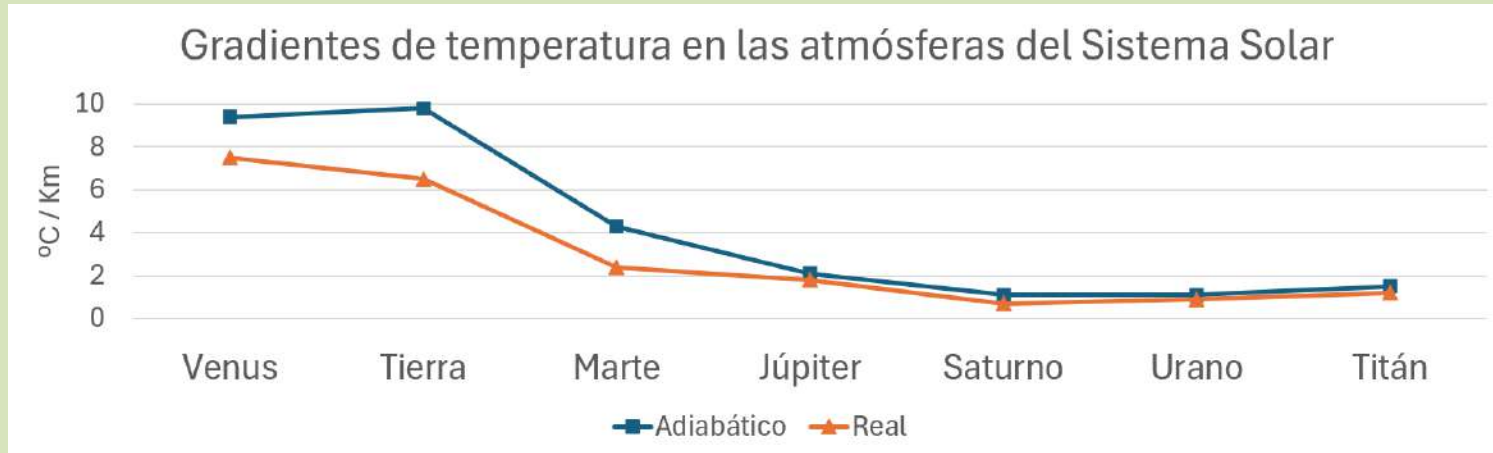
En general  $g$  (intensidad del campo gravitatorio) y  $C_p$  (calor específico isobárico del gas) variarán en función de la altura  $z$ , aunque pueden considerarse constantes en situaciones particulares como la troposfera de un planeta.

Este gradiente de temperatura, que se conoce como **gradiente adiabático**, es un caso singular al no estar asociado a una transferencia de calor entre las regiones calientes y las frías. Corresponde a un **equilibrio termodinámico perfecto** donde lo único que existe además de la masa de gas es un campo gravitatorio. No se dan transferencias de calor de ningún tipo, **ni desplazamientos de las parcelas de gas**. Si hubiera una masa gaseosa con esas características sería totalmente invisible. Un objeto teórico similar está descrito en [9], básicamente consiste en una esfera de gas autogravitante aislada y sin rotación. Tiene interés en astronomía para modelizar la formación y evolución de los planetas gaseosos. El gradiente de temperatura en su interior es similar al adiabático. En ausencia de radiación mantiene indefinidamente una apreciable temperatura interna, siendo la temperatura externa próxima al cero absoluto.

En una atmósfera real habrá diferencias entre los gradientes de temperatura ambientales y el gradiente adiabático, tanto más grandes cuanto mayores sean los desequilibrios termodinámicos asociados a la conducción, la convección o la radiación.

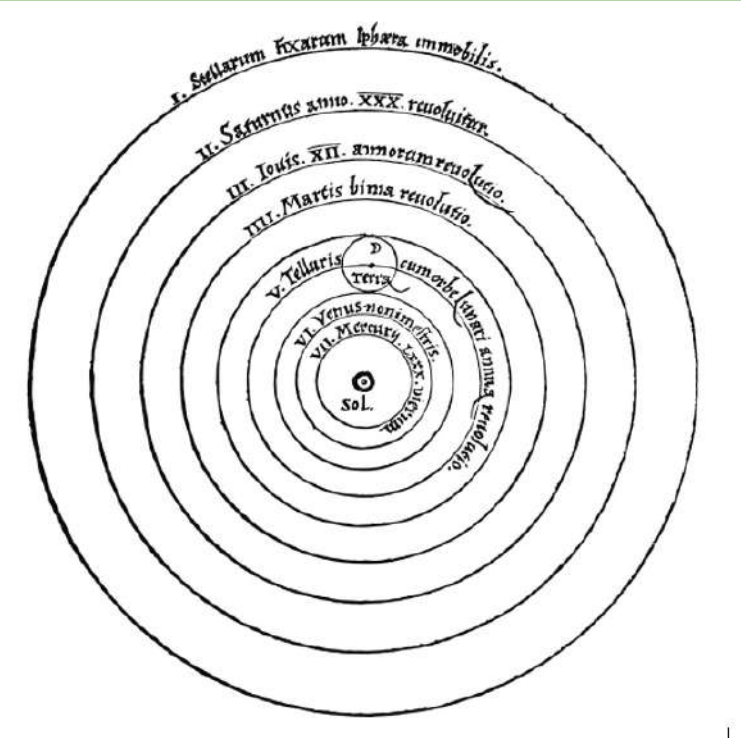
## Un laboratorio planetario

Se han llegado a realizar experimentos de laboratorio cuyos resultados parecen confirmar la existencia de gradientes de temperatura en columnas aisladas de gas, por ejemplo en [10], sin embargo la precisión de las medidas genera dudas. Fronsdal propuso en 2014 un experimento concluyente [1, pp. 1537], indudablemente resultaría muchísimo más barato que medir *in situ* la temperatura de las atmósferas del Sistema Solar mediante sondas de exploración. Si algún día se llevara a cabo, será muy interesante comparar sus resultados con los datos planetarios disponibles [11].



James Ferguson, 1771

Una temperatura uniforme, impuesta por decreto como condición inherente del equilibrio termodinámico, plantea serios problemas cuando se considera un gas en un campo gravitatorio, lo que exige recurrir a sofisticados argumentos para poder soslayar incómodas contradicciones.



Nicolás Copérnico, 1543

## Referencias

- [1] Christian Fronsdal, "Heat and Gravitation: The Action Principle". Entropy 2014, pp 1539
- [2] James C. Maxwell, "Theory of Heat". 2<sup>nd</sup> edition 1872, pp. 300
- [3] Guthrie, J. [May 1873]: 'Kinetic Theory of Gases', Nature, 8, pp. 67, ISSN: 1476-4687
- [4] Loschmidt, J. [1876]: "Über den Zustand des Warmgleichgewichtes eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf die Schwerkraft I", Wien. Ber., 73, pp. 128–42.
- [5] Craig F. Bohren, Bruce A. Albrecht, "Atmospheric Thermodynamics". Oxford University Press, 2nd ed. [2023], pp. 260-265
- [6] W. A. van Wijngaarden, W. Happer, "Atmosphere and Greenhouse Gas Primer" [2023], pp. 10
- [7] Wikipedia, "Greenhouse effect – Effect of lapse rate", [https://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_effect) [Si el gradiente térmico fuera cero (de modo que la temperatura atmosférica no variara con la altitud y fuera la misma que la temperatura de la superficie), entonces no habría efecto invernadero (es decir, su valor sería cero)]
- [8] Adiabatic Lapse Rate, Dry. Planetary Data System [https://pds-atmospheres.nmsu.edu/education\\_and\\_outreach/encyclopedia/adiabatic\\_lapse\\_rate.htm](https://pds-atmospheres.nmsu.edu/education_and_outreach/encyclopedia/adiabatic_lapse_rate.htm)
- [9] G. C. Paul, M. C. Barman, A. A. Mohit "Implementation of polytropic method to study initial structures of gas giant protoplanets" NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 2014
- [10] R. Graeff, "Measuring Temperature Distribution in Gas Columns", July 2002, AIP Conference Proceedings 643, pp. 225-230.
- [11] Ivan R. Kennedy "Computation of planetary atmospheres by action mechanics using temperature gradients consistent with the virial theorem", International Journal of Energy and Environment Volume 9, 2015 [pp. 145]