

Teoría Cinética de los Flujos Granulares

J. Javier Brey

The relevance of the study of granular flows both for technological progress and for a better understanding of many nonequilibrium processes is discussed. In this context, kinetic theory plays a crucial role. Some comments are made about the origins of research on this field in Spain.

1. El experimento del diablillo de Maxwell

Realicemos una sencilla experiencia que puede llevarse a cabo fácilmente en cualquier laboratorio [1]. Tomemos una caja abierta por arriba y dividida en dos compartimentos iguales por una pared vertical que llega hasta una cierta altura, y coloquemos en cada uno de los dos recintos unos cientos de pequeñas bolitas de vidrio o acero. Para ser más específicos, el diámetro de las bolas puede ser de 1 ó 2 mm, la altura de la pared central de 25 mm y el área de la base de la caja de 10 cm². Todos estos valores no son en absoluto críticos para que se produzca el fenómeno que vamos a describir, sino que se dan a un nivel meramente orientativo. Situemos la caja sobre un vibrador tal y como se indica en la Figura 1.



Ejemplo de flujo granular en la Naturaleza. Alud en el K2 (Karakorum-Himalaya). Fotografía tomada por Luis Fraga en Julio de 2002.

Disminuyamos a continuación la potencia suministrada por el vibrador bajando la frecuencia. Sucede entonces que, al llegar a un cierto valor de la frecuencia, el número de partículas en uno de los compartimentos comienza a ser mayor que en el otro, aumentando la diferencia según se va disminuyendo la frecuencia. Si el experimento se repite, se observa siempre el mismo comportamiento, variando únicamente el compartimento en que las partículas se concentran. Así pues, la simetría del sistema a ambos lados del tabique se rompe, sin que ello haya sido inducido por

una causa externa asimétrica. Se dice que se ha producido una *ruptura espontánea de simetría*. Además, las bolitas que se encuentran en el compartimento más denso se mueven con mayor velocidad que las que están en el menos denso. Parece como si hubiera un diablillo de Maxwell en el tabique de separación, seleccionando las partículas que deben pasar de un compartimento a otro. Señalemos que el resultado del experimento no se altera si el tabique central se extiende indefinidamente hacia arriba, y se le practica un pequeño agujero a la altura en que antes terminaba.

Evidentemente, el experimento no puede llevarse a cabo con un gas o un líquido, ya que las moléculas se escaparían del recipiente por su parte superior. Sin embargo, el comportamiento que acabamos de describir es similar a otros exhibidos por los fluidos normales o moleculares bajo condiciones muy distintas. Procediendo de modo análogo a cómo se hace en estos últimos, podemos caracterizar la transición mediante un *parámetro de asimetría u orden* definido como

$$\varepsilon = \frac{N - 2N^{(izq)}}{N},$$

donde N es el número total de bolitas y $N^{(izq)}$ el número de ellas que hay en el compartimento de la izquierda, una vez que se ha alcanzado el estado estacionario cuando se vibra al sistema con una frecuencia dada. Este cantidad varía en el intervalo $-1 \leq \varepsilon \leq 1$, correspondiendo al estado simétrico el valor $\varepsilon = 0$. El *parámetro de control* en el experimento, determinando la aparición o no de ruptura espontánea de simetría, es la frecuencia de la vibración. La representación del parámetro de asimetría en función del parámetro de

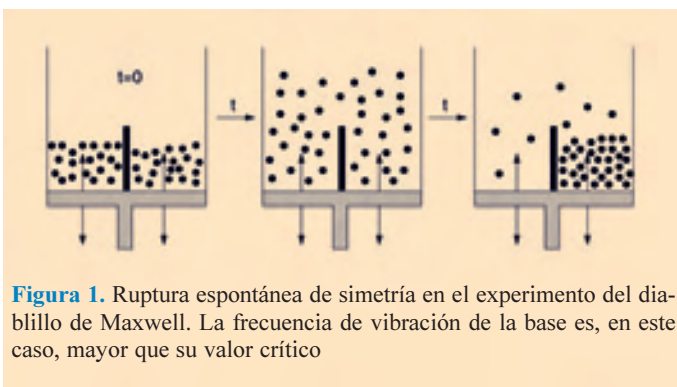


Figura 1. Ruptura espontánea de simetría en el experimento del diablillo de Maxwell. La frecuencia de vibración de la base es, en este caso, mayor que su valor crítico

Evidentemente, mientras el vibrador está apagado, las partículas permanecen en reposo en el fondo de la caja. Pongamos el vibrador a funcionar a gran potencia, lo que para los parámetros especificados quiere decir, por ejemplo, una frecuencia de 50 Hz y una amplitud del orden del diámetro de las esferas. Se observa que las bolitas se ponen en movimiento, sobrepasando muchas de ellas la altura de la separación, pero distribuyéndose, al cabo de un cierto tiempo, en partes iguales entre los dos compartimentos. Y esto ocurre aún cuando inicialmente las hubiéramos colocado todas en el mismo lado. El comportamiento de las bolitas recuerda en cierto modo el de las moléculas de un gas.

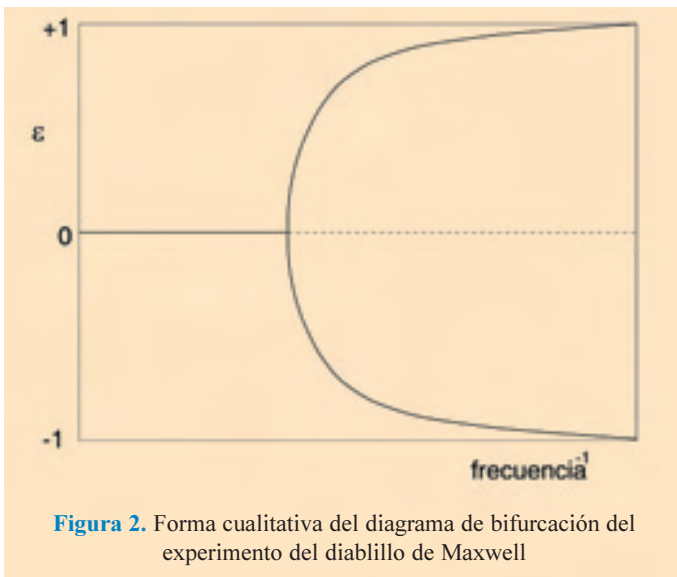


Figura 2. Forma cualitativa del diagrama de bifurcación del experimento del diablillo de Maxwell

orden determina el *diagrama de bifurcación* que se muestra en la Figura 2, y tiene la forma típica de una transición de segundo orden. Puede profundizarse en la caracterización de la transición, midiendo, por ejemplo, el exponente y la amplitud crítica [2].

2. Medios granulares

¿Qué es lo que hace que el sistema descrito en el apartado anterior presente un aspecto a un cierto nivel análogo al de un fluido normal, pero su fenomenología sea tan diferente? La respuesta es que se trata de un *medio granular*, es decir, un sistema constituido por un gran número de partículas macroscópicas a las que se denomina *granos* que se encuentran en el vacío o en el seno de un fluido intersticial. Es importante señalar que en el presente contexto “un gran número” pueden ser en la práctica unos pocos miles o incluso centenares de partículas. En principio, no existe ninguna fuerza de cohesión entre los granos, sino únicamente fuerzas repulsivas. Además, y ésta es otra característica esencial, dichas fuerzas tienen carácter disipativo, es decir, las interacciones no son elásticas y la energía mecánica no se conserva. Los ejemplos de sistemas granulares en la naturaleza son muy numerosos e incluyen desde el contenido de un salero hasta la arena de una playa, desde el medicamento envasado en un frasco hasta el cereal contenido en un silo, desde una avalancha de piedras o un alud de nieve hasta las arenas movedizas de un pantano. A una escala mayor, también son sistemas de tipo granular los anillos que rodean a Saturno e incluso, según algunos autores, los “gases” de estrellas o galaxias.

El interés tecnológico de los medios granulares es enorme. Señalemos algunos datos tomados de la bibliografía. Se calcula que algunas plantas industriales disminuyen hasta un 60% su rendimiento debido a deficiencias en el proceso de transporte y manipulación de material granular. Esto es particularmente cierto en la industria química, en que del orden de la mitad de las sustancias que se manejan, tanto en forma bruta como transformada, están en forma de granos. Una parte muy significativa de la producción de cereales, en algunos casos superior al 30%, se pierde en el proceso de manipulación, transporte y almacenado. La energía eléctrica consumida en la tecnología de partículas representa una por-

ción importante del consumo total en los países industrializados. Existen, además, numerosos fenómenos que en la actualidad no se es capaz de controlar debido al conocimiento limitado que tenemos de estos medios y que producen efectos catastróficos indeseados. En algunos casos, se trata de problemas de diseño industrial, como los miles de silos y tolvas que explotan cada año y, en otros, de fenómenos naturales, como los corrimientos de tierras y los aludes de nieve.

Por todo lo anterior, los medios granulares ha sido ampliamente estudiados desde hace mucho tiempo, pero se trataba en la mayor parte de los casos de investigaciones que se centraban en la obtención de criterios empíricos, adoptándose una visión mecanicista en la que el papel fundamental lo jugaban las propiedades específicas del grano, considerado aisladamente. No obstante, es cierto que existen excepciones de grandes científicos, como Coulomb y Reynolds, que ya en el siglo XIX se dieron cuenta de la importancia que estos medios tienen también desde una perspectiva científica.

La situación ha cambiado de forma radical en los últimos tiempos. Los medios granulares han comenzado a atraer de forma significativa y creciente el interés de los físicos [3]. Ello se ha debido, entre otras, a dos causas fundamentales. La primera es que los medios granulares han resultado ser conceptualmente mucho más complejos y ricos de lo que se esperaba, exigiendo en muchos casos reformular en forma no trivial conceptos y métodos de los sistemas moleculares. La segunda razón es que estos sistemas se manifiestan en muchos casos como prototipos de fácil accesibilidad de lo que sucede en otros sistemas dinámicos de naturaleza muy variada. Así, por ejemplo, la relajación de un montículo de arena presenta similitudes con la de los vidrios y los fluidos reticulares.

El comportamiento de un medio granular cambia de forma dramática en función de las condiciones en que se encuentre, y es tan peculiar que algunos autores han llegado a referirse a los sistemas granulares como un cuarto estado de la materia, con identidad propia frente a los tres tradicionales de sólido, líquido y gaseoso.

El desarrollo de un marco teórico para los medios granulares parte de la constatación de que su comportamiento cualitativo viene determinado por propiedades colectivas del sistema, y no por los detalles individuales de los granos que los componen. Así, el fenómeno de ruptura de simetría descrito al principio lo presenta un medio granular con independencia de cual sea la naturaleza de los granos utilizados. Estos determinan únicamente propiedades cuantitativas tales como el valor de la frecuencia para el que se presenta la bifurcación en la Figura 2. Esta característica es la que permite la construcción de modelos teóricos simplificados, en los que los granos se idealizan, de manera que el análisis sea lo más sencillo posible.

En los sistemas que hemos venido denominando moleculares, la base para una descripción macroscópica en términos de unos pocos parámetros la proporcionan disciplinas como la Termodinámica y la Hidrodinámica. ¿Hasta qué punto son directamente trasladables sus resultados y procedimientos a los medios granulares, manteniendo su utilidad? La respuesta a esta pregunta no es obvia. Consideremos el caso de la temperatura. Sabemos que la velocidad de un grano individual en equilibrio con sus alrededores a una temperatura T

experimenta fluctuaciones cuya dispersión viene dada por $3 k_B T/m$, siendo k_B la constante de Boltzmann y m la masa del grano. Este es el origen del denominado movimiento Browniano. Como el grano es macroscópico, estas fluctuaciones son despreciables sobre la escala determinada por las dimensiones del grano y no afectan su estado de reposo o movimiento. Además, dado el carácter intrínsecamente inelástico de las colisiones entre granos, un sistema granular aislado no puede caracterizarse tampoco por su energía, que es siempre nula en el estado final.

A pesar de lo anterior, la experiencia ha demostrado que es útil introducir una magnitud que mida la dispersión de las velocidades de las partículas en un medio granular, lo que suele hacerse extendiendo directamente la expresión cinética de la temperatura en sistemas moleculares (aunque omitiendo la constante de Boltzmann). En un principio se le denominó *temperatura granular*, aunque en la actualidad es frecuente referirse a ella simplemente como temperatura. En todo caso, lo importante es tener presente que se trata de una medida de la dispersión de las velocidades de los granos y que no posee las propiedades de la temperatura termodinámica.



3. Flujos granulares rápidos

A partir de ahora nos restringiremos a medios granulares *secos*, es decir sin fluido intersticial, y a situaciones en que presentan un comportamiento que recuerda al de los fluidos moleculares. Se habla entonces de *flujos granulares rápidos*, caracterizados porque las partículas se mueven libre e independientemente, excepto cuando colisionan entre sí. El experimento del diablillo de Maxwell corresponde a este régimen. Para sistemas en estas condiciones se han propuesto ecuaciones de tipo hidrodinámico, análogas a las convencionales de Navier-Stokes para fluidos moleculares. Para ello, se parte de las ecuaciones exactas de balance, que expresan la evolución temporal de la densidad, la cantidad de movimiento y la energía. En el caso de sistemas moleculares, se trata de ecuaciones de conservación de las correspondientes magnitudes, pero ahora, al ser las colisiones inelásticas, la energía no se conserva, lo que se manifiesta en la aparición de un nuevo término de tipo sumidero en su ecuación de balance.

Las ecuaciones de balance, aunque exactas, no son útiles en tanto no se cierren con expresiones explícitas para los flujos de cantidad de movimiento y energía y, en el caso de un

medio granular, para el término asociado a la disipación de la energía. Para los fluidos normales estas relaciones, denominadas ecuaciones constitutivas, las proporcionan en el límite de gradientes pequeños, dos leyes fenomenológicas: la expresión de Newton del tensor de presiones y la ley del calor de Fourier. Se obtienen así las ecuaciones de Navier-Stokes que contienen tres coeficientes de transporte desconocidos: el de viscosidad tangencial, el de viscosidad de volumen y el de conductividad térmica. Por sencillez, nos estamos limitando al caso de un fluido monocomponente. Si se quieren fundamentar teóricamente las leyes de Newton y Fourier, es decir la validez de la descripción hidrodinámica, obteniendo además expresiones para los coeficientes de transporte en función de las propiedades de las partículas, es necesario considerar una descripción más microscópica del sistema. Dicha descripción la proporciona la Teoría Cinética o, en un contexto más amplio, la Mecánica Estadística de los procesos irreversibles.

Para los medios granulares no existen leyes empíricas análogas a las de Newton y Fourier, en parte porque no han sido estudiados en forma tan sistemática como los fluidos moleculares y, en parte, por las dificultades que presentan para realizar experimentos sencillos y directos que permitan identificar leyes de este tipo. Lo que se hizo entonces en los primeros trabajos fue admitir la validez de ecuaciones hidrodinámicas de transporte análogas a las de Navier-Stokes, realizando estimaciones de los coeficientes de transporte y del término de disipación mediante argumentos de campo medio. Estas ecuaciones se esperaba que fuesen válidas al menos en el límite de muy pequeña disipación o inelasticidad. Sin embargo, este modo de proceder distaba mucho de ser satisfactorio. En primer lugar, se obviaba el problema fundamental de la propia validez de la descripción hidrodinámica para un medio granular. En segundo lugar, no era evidente (y los estudios posteriores lo han confirmado) que la forma funcional de las leyes de Newton y Fourier siguiera siendo válida para sistemas granulares. En tercer lugar, muchos de los fenómenos más importantes exhibidos por los medios granulares van asociados a lo que se denominan *efectos reológicos* no lineales, que requieren ir más allá del primer orden en los gradientes que es el que se retiene en la aproximación de Navier-Stokes. Hoy se sabe que esto es debido a que existe un acoplo entre los gradientes y el grado de inelasticidad.

Al abordar el estudio de los aspectos que acabamos de señalar, surge de un modo natural la idea de tratar de extender a los medios granulares la misma metodología que con tanto éxito se ha utilizado en los sistemas normales moleculares. Dado que los granos son de dimensión macroscópica, les son aplicables las leyes de la Mecánica Clásica. Además, al estar constituidos por un gran número de partículas, es de esperar que se puedan trasladar, en principio, las ideas y métodos de la Teoría Cinética. Aunque es cierto que el número típico de granos en un sistema es mucho menor que el número de Avogadro característico de los sistemas moleculares, es bien sabido, y las técnicas de simulación en ordenador lo han corroborado, que unos cientos de partículas son suficientes en muchos casos para que un sistema muestre un comportamiento estadístico acorde con las leyes macroscópicas.

No es pues de extrañar que, dentro del contexto de los medios granulares, se haya producido en los últimos años un auténtico renacer de la Teoría Cinética, que ha llevado a un aumento espectacular tanto del número de investigadores como del de trabajos publicados.

La teoría cinética en España a finales del siglo XX

La Teoría Cinética no ha sido un campo científico muy activo en España. En cualquier caso, no voy a tratar de realizar aquí una revisión de las contribuciones de nuestros investigadores a su desarrollo. No creo que sea esta la ocasión adecuada ni tampoco que fuera capaz de realizarla en una forma satisfactoria. Simplemente esbozaré unas ideas generales de cual es mi visión subjetiva, basada en las propias experiencias personales.

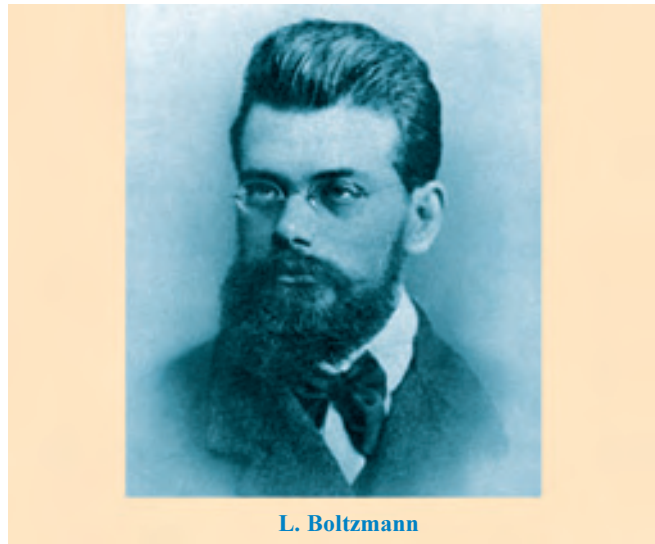
Hace treinta y cinco años, la percepción de un recién licenciado en Físicas era que en nuestro país no se llevaba a cabo investigación alguna en Teoría Cinética, y seguramente tampoco en ningún otro aspecto de la Mecánica Estadística. Sin embargo, justo por esa época se produjeron una serie de hechos que, vistos desde la perspectiva actual, fueron el origen del espectacular cambio cuantitativo y cualitativo producido. Esos hechos van unidos para mí a tres personas con las que creo que tenemos una deuda de gratitud todos los que en la actualidad trabajamos en esta disciplina. Son las únicas a que me referiré en forma individualizada. Se trata de los Profesores Luis Garrido, Juan de la Rubia y Manuel G. Velarde. Los tres pusieron en marcha grupos de investigación de excelencia de los que han ido saliendo relevantes investigadores a lo largo de los años, aunque no es éste el aspecto que quiero resaltar aquí.

Luis Garrido fundó, dirigió y organizó durante muchos años, la Escuela de Sitges de Mecánica Estadística, que enseñada alcanzó un gran prestigio mundial, del que aún goza en la actualidad. Ella contribuyó en forma esencial a la formación de sucesivas generaciones de investigadores, algunos dedicados a la Teoría Cinética, permitiéndoles además establecer contactos con investigadores extranjeros de primera línea, lo cual no era fácil, especialmente en los tiempos de las primeras ediciones de la escuela. Cómo tuvo el valor de intentar ponerla en marcha, y hacerlo con éxito en el contexto en que lo hizo es para mí inexplicable.

Juan de la Rubia fue el primer Catedrático de Mecánica Estadística que hubo en España, concretamente en la Universidad de Sevilla. Para quien no conozca las implicaciones que en aquella época tenía la denominación de las plazas, éste hecho puede parecerle irrelevante, pero no lo fue ni a nivel institucional ni personal. Representó el reconocimiento oficial de la Mecánica Estadística como una parte de la Física con entidad propia y, por otro lado, conllevó un riesgo, y en la práctica un precio, que él asumió con generosidad.

¿Cómo resumir en unas pocas líneas las aportaciones de Manolo Velarde? Su vuelta a España significó un auténtico revulsivo para la Mecánica Estadística en nuestro país. Su entusiasmo, incluso pasión, por la Física, su defensa a ultranza de la necesidad de realizar una investigación de calidad homologable con la de otros países, su capacidad para emprender y desarrollar con éxito numerosos proyectos simultáneamente, ejercieron una maravillosa atracción sobre muchos de los que nos iniciábamos en aquella época a la

investigación. Pero es que, además, sus trabajos representaron las primeras aportaciones relevantes y permanentes de un científico español a la moderna Teoría Cinética. Así, por ejemplo, en su Tesis Doctoral, realizada en la Universidad Libre de Bruselas acerca de la divergencia del desarrollo en la densidad de los coeficientes de transporte de un fluido cuántico, supo captar con claridad la esencia física de un fenómeno del que, hasta entonces, se habían destacado sus aspectos matemáticos formales, en muchos casos enmarcados en complejos, e innecesarios, formalismos.



L. Boltzmann

Con todo, en los años, y décadas que siguieron, la Teoría Cinética en España no alcanzó niveles de excelencia semejantes a otros aspectos de la Mecánica Estadística. Ciertamente hubo notables excepciones, en las que no vamos a entrar aquí, pero la situación general distaba mucho de ser satisfactoria. Esto era en parte reflejo de una cierta atonía en el campo a nivel mundial. Eddie Cohen, uno de los mejores especialistas en Teoría Cinética del siglo XX, al realizar una revisión histórica de la misma en el año 1992 concluía su artículo con las siguientes reflexiones bastante pesimistas:

A mí me parece que la Teoría Cinética se encuentra al final del siglo veinte de nuevo en un impás y en una situación no muy distinta de la que se encontraba al final del siglo diecinueve. Pudiera ser por ello apropiado justificar esta revisión citando algunas palabras que Boltzmann utilizó en su preámbulo del segundo volumen de su *Vorlesungen über Gastheorie*:

“En mi opinión sería una tragedia para la ciencia que la teoría de los gases fuera temporalmente olvidada debido a la momentánea hostilidad hacia ella... Sin embargo, para contribuir en todo lo que pueda, de manera que cuando la teoría de los gases vuelva a ser considerada no sea demasiado lo que haya que redescubrir...”

Más adelante tendré ocasión de comentar el papel que juegan en la actualidad nuestros investigadores en el contexto internacional de la Teoría Cinética, pero antes volvamos al problema de los medios granulares.

Teoría cinética de los flujos granulares

Como ya he indicado, la Teoría Cinética aparece como una herramienta indispensable a la hora de abordar el desa-

rollo de un esquema teórico para describir el comportamiento de los flujos granulares rápidos. Para ello es necesario, en primer lugar, derivar una ecuación cinética para la función de distribución y , en segundo lugar, resolver esa ecuación. A partir de la función de distribución pueden calcularse todas las propiedades del sistema, tanto estáticas como dinámicas. Ambos pasos, si no es posible hacerlos en forma exacta (que es lo que sucede en la práctica), hay que procurar realizarlos manteniendo el mayor control posible sobre las aproximaciones que se introduzcan, en el sentido de conocer el posible rango de validez de los resultados obtenidos.

El modelo más sencillo de medio granular lo constituye un sistema de esferas duras, lisas e inelásticas. Para este sistema se han obtenido, generalizando los argumentos utilizados en sistemas moleculares, ecuaciones cinéticas que son extensiones para sistemas inelásticos de las famosas ecuaciones de Boltzmann y de Enskog. Hay que señalar que la validez de estas ecuaciones más allá de un denominado límite de casi-elasticidad es cuestionada por algunos autores, por lo que sigue siendo objeto de activa investigación. Supongamos aquí, en todo caso, que se conoce la ecuación cinética que obedece la función de distribución. A continuación hay que abordar el problema de resolverla. El procedimiento habitual para obtener soluciones aproximadas de esta clase de ecuaciones es el desarrollo perturbativo de Chapman-Enskog, que lleva en el primer orden a las ecuaciones hidrodinámicas de Navier-Stokes. Este procedimiento, con modificaciones no triviales, se ha aplicado a las ecuaciones de Boltzmann y de Enskog inelásticas, obteniéndose las extensiones de las leyes de Newton y Fourier. Como muestra de los efectos sorprendentes que introduce la inelasticidad de las colisiones, podemos reseñar la forma de la segunda:

$$\mathbf{q} = -\kappa \nabla T - \mu \nabla n,$$

donde \mathbf{q} es el flujo de calor, T la temperatura y n la densidad granular. El primer término es el análogo a la ley de Fourier en un sistema molecular, siendo κ el coeficiente de conductividad térmica. El segundo, que representa un acoplo entre el flujo de calor y el gradiente de densidad, no existe en un medio elástico. Más exactamente, deberíamos decir que se anula, dado que su existencia no violaría ninguna de las leyes de invarianza o simetría. De hecho, su origen es fácil de entender. A igualdad de temperatura, en las regiones más densas se producen más colisiones que en las menos densas. Si las colisiones son inelásticas, la densidad de energía tenderá a disminuir más rápidamente en las regiones densas, lo que el sistema tratará de compensar produciendo un flujo de calor en sentido opuesto al gradiente de densidad. La presencia de este nuevo término en la expresión del flujo de calor ha sido corroborada por simulaciones de dinámica molecular en ordenador y también por resultados experimentales cuya explicación requiere dicho término.

La enumeración aún parcial de resultados obtenidos por la Teoría Cinética de los flujos granulares sería demasiado prolífica [4]. Pero es que aún lo sería más la de las cuestiones, muchas de ellas fundamentales, que están por resolver. Como ya hemos indicado, la misma posibilidad de una descripción hidrodinámica e incluso la validez de las ecuaciones cinéticas usuales necesitan ser investigadas más detalladamente. No puedo dejar de mencionar que las ecuaciones hidrodinámicas que se han obtenido a partir de las ecuacio-

nes cinéticas son capaces de explicar los resultados del experimento del diablillo de Maxwell [1]. Para ello se igualan los flujos difusivos en ambos sentidos entre los dos compartimentos. Y sucede que la expresión de dichos flujos no es una función monótona creciente del número de partículas en el compartimento, sino que presenta un máximo. En consecuencia, dos números distintos de partículas pueden dar el mismo flujo, y es posible un estado estacionario con distintos números de partículas en cada compartimento.

Por citar otro ejemplo, muy poco es lo que se entiende de los fenómenos de segregación que ocurren en una mezcla de granos de distintas clases cuando se somete a un proceso de vibración. Los medios granulares no son fáciles de mezclar en forma macroscópicamente homogénea, contrariamente a lo que sucede con los fluidos ordinarios. Y éste es un problema de gran interés teórico y práctico, por ejemplo para la industria farmacéutica.

6. Conclusión

Los medios granulares son un campo activo de investigación que ofrece una fenomenología muy rica y, en gran parte inexplorada. Su estudio es de gran interés tecnológico, pero también científico. La comprensión detallada de los mecanismos responsables del comportamiento colectivo de los sistemas constituidos por granos llevará a la vez a un progreso tecnológico y a un avance en el conocimiento microscópico de los sistemas fuera del equilibrio.

En el estudio de los flujos granulares juegan un papel fundamental las ideas y métodos de la Teoría Cinética. Este papel está reforzado por la ausencia de leyes fenomenológicas contrastadas, análogas a las que existen en los fluidos moleculares. Consecuentemente, el interés científico por la Teoría Cinética, centrada en el contexto de los medios granulares, ha aumentado significativamente en los últimos años y es seguro que lo seguirá haciendo en el futuro.

La buena noticia para nosotros es que los físicos españoles esta vez sí que están jugando un papel relevante. Existen en nuestro país diversos grupos de investigación que están, sin ninguna duda, al nivel de los más destacados, y así son reconocidos por la comunidad científica internacional, y se manifiesta en la repercusión de sus publicaciones. Es de justicia señalar que la situación es muy distinta en lo que se refiere a la investigación aplicada de estos sistemas. Su estudio no ha atraído hasta ahora a grupos de investigación orientados a la ingeniería. Es, en mi opinión, deseable que ésto cambie lo antes posible, a fin de no perder una oportunidad importante de participar en el desarrollo tecnológico.

Referencias

- [1] J. EGGERS, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 5322 (1999).
- [2] Otro sencillo dispositivo experimental mostrando al diablillo de Maxwell en acción se describe en J. J. Brey, M. J. Ruiz-Montero, R. García-Rojo y F. Moreno, *Phys. Rev. E*, **65**, 011305 (2002).
- [3] H. M. JAEGER Y S. R. NAGEL, *Science* **255**, 1523 (1992); *Mundo Científico* **132**, 109 (1996).
- [4] *Granular gases*, editado por T. Pöschel y S. Luding, Springer-Verlag, Berlín, 2001. Esta referencia contiene varios artículos de revisión de la Teoría Cinética de los flujos granulares, así como de resultados experimentales y aplicaciones astrofísicas.

J. Javier Brey

Área de Física Teórica. Facultad de Física.
Universidad de Sevilla