

LA FISICA MACROSCOPICA EN EL DESARROLLO TECNOLOGICO

Ismael Herrera

Instituto de Geofísica, U.N.A.M.

Apartado Postal 21524

04510, México, D. F.

RESUMEN

La física macroscópica es un tema de gran importancia científica y tecnológica. Se presenta una visión panorámica de su potencialidad. Se recomienda aumentar la formación de físicos con esta orientación.

ABSTRACT

Macroscopic Physics is a subject of great scientific and technological relevance. An overview of its scope and potential is here presented. Expanding the training of physicists in this discipline is recommended.

Si fijamos nuestra atención en los fenómenos naturales tal y como son percibidos por nuestros sentidos, nos encontramos con una gran variedad de ellos. Muchos de estos fenómenos son complejos y su comprensión, aunque sea cualitativa, es difícil; pero aún lo es más su comprensión cuantitativa.

Fue en esta forma como lo vio Newton. La anécdota de la manzana presenta a Newton sufriendo los efectos de un evento de la física macroscópica, y su concepción de la mecánica está orientada a explicar los fenómenos observados en esta escala de las magnitudes físicas.

Sabemos que muchos años más tarde, al estudiar los fenómenos en escala atómica, fue necesario crear otra mecánica (la mecánica cuántica) para explicar los fenómenos microscópicos. En forma similar surgió la mecánica relativista, necesaria en presencia de velocidades comparables a la de la luz. A esta última sería adecuado llamarla mecánica ultramacroscópica, por su importancia en los fenómenos cósmicos.

Sin dejar de reconocer la unidad teórica subyacente en estos tres esquemas y las interrelaciones que existen entre los procesos que se efectúan en las diversas escalas, es importante enfatizar que al menos en el estado actual del desarrollo científico y tecnológico, el rango en que estos esquemas se aplican es claramente distinto. Así como sería una aberración pretender estudiar los fenómenos de la física microscópica, a la escala atómica y nuclear, utilizando los métodos de la física macroscópica, igualmente inadecuado sería utilizar la mecánica cuántica para predecir el comportamiento de sistemas macroscópicos; por ejemplo, estudiar las corrientes oceánicas utilizando la mecánica cuántica.

Quando era estudiante de física en la Facultad de Ciencias recibí la impresión, en diversas formas tanto explícitas como implícitas, de que la física macroscópica era un producto terminado y que desde el punto de vista de la investigación era un tema del pasado. Adquirí entonces la convicción de que bastaba con que profundizara en la mecánica cuántica y un poco en la relativista, para que los procesos naturales se volvieran transparentes. Fui adquiriendo también una cierta suficiencia petulante, basada en la creencia de que comprendía a la perfección todos los fenómenos macroscópicos, los cuales eran tan obvios que era indigno dedicar

tiempo para su reflexión y análisis. Sin embargo, no dejaba de inquietar me el hecho de que con cierta frecuencia surgieran aquí y allá procesos básicos que no entendía; así era incapaz de profundizar la explicación de cosas tan sencillas en apariencia, como la lluvia o las ondas en un sólido.

Más tarde, diversas circunstancias en mi desarrollo personal me llevaron a tener un contacto estrecho con varios aspectos de la física macroscópica e inclusive a adquirir cierta visión panorámica del desenvolvimiento mundial que ha tenido en las últimas décadas. De entre esas circunstancias destacan el haber trabajado en problemas de la industria petrolera, la ingeniería civil y los recursos hidráulicos, así como mi responsabilidad como director del Instituto de Geofísica. Pero tal vez el motivo principal que me ha vinculado a la física macroscópica ha sido mi empeño permanente por orientar mis actividades de investigación físico-matemática hacia cuestiones relacionadas con el desarrollo tecnológico.

La verdad es que la física macroscópica está lejos de ser una ciencia terminada, y, desde un punto de vista internacional, su desenvolvimiento durante este siglo, y especialmente en la segunda mitad, ha sido muy vigoroso. Son varios los motivos del interés que despierta.

Cualquier fenómeno físico que está dentro del rango de las percepciones humanas directas o aun de la escala planetaria, cae dentro del campo cubierto por la física macroscópica: La voz y el sonido en general; las olas del mar y las ondas en un sólido; incluso la luz y los fenómenos electromagnéticos, ya que su descripción matemática se basa en ecuaciones diferenciales parciales similares a las del sonido o a las de las ondas elásticas; el transporte y difusión de calor y de materia; la termodinámica de los medios continuos; los terremotos y las corrientes oceánicas. También, las corrientes atmosféricas, el viento, la evolución del estado del tiempo y aun el clima. Las corrientes de convección en el interior de la Tierra, que generan la expansión de los fondos submarinos y crean montañas en la costa y en los continentes. El viento solar, que viene a través del espacio interplanetario y da lugar a ondas de choque en su interacción con el campo magnético terrestre.

Otros fenómenos que también caen dentro del campo de la física

macroscópica son: El transporte y difusión de la materia orgánica en los océanos, que determina la distribución y variabilidad de la vida marina. El transporte y la difusión de las sustancias que participan en una reacción química. Inclusive, la conducción y difusión de los nutrientes en la célula de un organismo vivo, son adecuados para ser analizados con los métodos de la física macroscópica. Es claro entonces por qué el progreso logrado en esta parte de la física está teniendo importante influencia en otras ramas de la ciencia.

Desde el punto de vista de los servicios prestados al ser humano, tanto para satisfacer sus necesidades básicas como para mejorar sus condiciones de vida, el progreso alcanzado ha sido también muy importante. En efecto, muchos avances tecnológicos han sido posibles gracias al adelanto alcanzado. El objetivo central del desarrollo de la física macroscópica en las últimas décadas ha sido el de adquirir la capacidad para predecir el comportamiento de los sistemas macroscópicos complejos que existen en la naturaleza. Esto es consecuente no tan sólo con los objetivos que se propusieron los físicos de la época de Newton, sino con el anhelo humano más general, que se ha manifestado desde épocas prehistóricas, de tener la capacidad de predecir el futuro.

La capacidad de predecir el comportamiento sería valiosa para el hombre aunque fuéramos seres pasivos incapaces de modificar nuestro medio circundante, porque el conocimiento del futuro nos permite ajustar con ventaja nuestros actos. Pero nos resulta aún más útil porque somos agentes activos con una capacidad cada vez mayor de modificar nuestro medio circundante. Nuestra facultad para predecir el comportamiento, es un medio muy poderoso para poner a prueba diferentes alternativas de modificación de la naturaleza y escoger aquellas que mejor se ajusten a necesidades y deseos.

En el caso de muchos desastres naturales, carecemos aún de la posibilidad de impedir su ocurrencia; como en un sismo, una erupción volcánica o un ciclón tropical. Sin embargo, sus efectos destructivos pueden reducirse considerablemente gracias al aumento habido en nuestra capacidad predictiva, que descansa tanto en el perfeccionamiento de los medios de observación como en la modelación físico-matemática. Resulta in-

interesante destacar que en el caso de los sismos, la predicción más efectiva es la probabilística; la cual es base del diseño sísmico de las construcciones civiles.

La protección de las avenidas de los ríos y otras corrientes, se logra construyendo obras preventivas y utilizando sistemas de alarma.

También la predicción probabilística se utiliza en diseño; como por ejemplo, la altura de diseño de un puente que cruza un río. depende de la distribución y probabilidades para la altura de las crecientes.

En la utilización de los recursos naturales deben distinguirse dos fases: la exploración y la producción o aprovechamiento. La ampliación de las reservas mundiales de petróleo fue posible por el progreso de los métodos geofísicos (método de la física macroscópica), que permitió identificar estratos petroleros a profundidades mayores. La producción o aprovechamiento también ha progresado mucho debido a la capacidad para modelar, con el auxilio de la computadora, el comportamiento de los yacimientos petroleros. Se evitan así desperdicios en la producción primaria y es posible efectuar ciclos de producción secundaria y terciaria. Hay que observar que los desperdicios en un campo petrolero importante pueden representar muchos miles de millones de pesos.

También los métodos geofísicos para fines mineros se han perfeccionado. Para México, el recurso agua es de importancia fundamental. Las fuentes para el suministro del agua pueden ser superficiales o subterráneas. Internacionalmente, esta última es cada vez más importante; en parte, porque al desarrollarse los países se han agotado las fuentes superficiales, y en parte también porque la calidad del agua subterránea es generalmente superior. Para nuestro país, en el que el 60% del territorio es árido, ella es aún más importante; en la actualidad el 50% del agua utilizada proviene del subsuelo. Como en el caso del petróleo, la física macroscópica es básica para la localización (exploración) y para el diseño y planeación de su aprovechamiento. El problema fundamental de las técnicas geofísicas de exploración lo constituye "el problema inverso", es decir, dada la respuesta de un sistema físico deducir sus propiedades. Por cierto, que éste es también el problema básico que plantea el conocimiento de la estructura del interior profundo de la Tierra, ya que

ella se deduce de observaciones efectuadas en su superficie. Por lo que se refiere al diseño y planeación del aprovechamiento de los sistemas hidrológicos, es necesario predecir el comportamiento del sistema para escoger la estrategia más conveniente y evitar los problemas económicos y sociales que involucra el establecimiento de instalaciones agrícolas o industriales, así como poblaciones que exceden la capacidad del agua disponible. Los sistemas subterráneos son particularmente delicados en este aspecto, ya que generalmente sus respuestas se presentan con un tiempo de retraso muy considerable.

Algo similar sucede con los yacimientos geotérmicos subterráneos que se utilizan para generar electricidad. Como se sabe, en México hay dos en producción: el de Cerro Prieto, que genera 300 MW, y Los Azufres, Michoacán, cuya producción no alcanza aún los 110 MW previstos para su primera etapa. Para el diseño de plantas geotérmicas es necesario asegurar que su producción se sostenga durante un período mínimo (generalmente de entre 25 y 30 años) que garantice la recuperación de la inversión. Para su operación, es necesario establecer la estrategia de producción y de reemplazo de los pozos.

El acelerado desarrollo mundial, tanto desde el punto de vista industrial como humano, ha dado lugar a que la influencia del hombre en su medio ambiente haya llegado a niveles alarmantes. Los efectos de la acción directa de grandes concentraciones humanas, la utilización de recursos naturales cada vez mayores para fines industriales o de consumo humano, así como el retorno al medio ambiente de los desperdicios correspondientes, da lugar a un deterioro ambiental que requiere ser controlado. La metodología científica para hacerlo es por medio de la modelación físico-matemática de los sistemas macroscópicos involucrados. Una parte importante corresponde a transporte y difusión de contaminantes en la atmósfera o en las aguas, ya sean superficiales, subterráneas u oceánicas. El alarmante, pero aparentemente ya inevitable efecto de invernadero de que se ha hablado recientemente, cae dentro de esta categoría.

Vale la pena destacar que en el aspecto puramente biológico del problema, la modelación matemática de los sistemas ecológicos correspondientes juega un papel central, y que en ella la metodología es similar a la de la mecánica de los medios continuos. Es por ello que investi

gadores que hicieron contribuciones fundamentales a la mecánica de los medios continuos son los mismos que han sido pioneros en el desarrollo de la dinámica de poblaciones.

En la física macroscópica como en otras ramas de la física, se pueden distinguir dos grandes aspectos: los observacionales o experimentales y los teóricos. Sin duda que la capacidad para observar sistemas físicos macroscópicos ha crecido grandemente; la electrónica, la espectrometría, la computación y la automatización, han sido básicas en este progreso, aunque hay muchos otros aspectos del avance tecnológico mundial que también han sido importantes. La tecnología de satélites, por ejemplo. No sólo es más fácil ahora obtener datos de los sistemas físicos, sino también archivarlos, organizarlos y procesarlos. Sin embargo, en esta plática no intentaré analizar los métodos observacionales, ya que me ocuparé principalmente de la parte teórica.

La metodología para el análisis de los sistemas físicos macroscópicos incluye los siguientes aspectos:

- i) Formulación de las leyes que gobiernan los procesos locales.
- ii) Aplicación de balances globales (principios de conservación).
- iii) Derivación de ecuaciones, generalmente diferenciales, que se satisfacen en cada punto.
- iv) Métodos matemáticos de solución de las ecuaciones.
- v) Incorporación de los datos observacionales de los sistemas físicos.
- vi) Modelación de los efectos de la incertidumbre.

Algunos resultados de la elasticidad y de la mecánica de fluidos se obtuvieron en el siglo XIX, pero no fue hasta la década de los cincuenta que la mecánica de los medios continuos inició su desarrollo sistemático, que incluye la termodinámica de los medios continuos. Básico en la formulación de la mecánica de los medios continuos es el tomar un punto de vista macroscópico que ignora la estructura atómica de la materia y considera a los sólidos, líquidos y gases como medios que no tienen interrupciones.

Las leyes que gobiernan los procesos locales, frecuentemente

están asociadas a lo que en la terminología de la mecánica de los medios continuos se conoce como ecuaciones constitutivas; las relaciones esfuerzo-deformación son un ejemplo. Pero el concepto es mucho más amplio y puede incluir materiales en los que coexistan más de una fase o en las que reacciones químicas tengan lugar. Entre los resultados que aporta la mecánica de los medios continuos se cuentan las reglas básicas que debe satisfacer toda ecuación constitutiva para ser consistente, así como las implicaciones que la simetría con respecto a grupos de transformaciones, tiene en su forma. En la actualidad las ecuaciones constitutivas de los sistemas macroscópicos se derivan experimentalmente, ya que se carece de procedimientos efectivos para derivarlas a partir de la estructura atómica o molecular de la materia.

El desarrollo postulacional de la mecánica de los medios continuos se basa en los llamados principios de conservación. Entre los más conocidos, destacan el principio de conservación de masa, de momento y de energía. La conservación de momento, en la mecánica de los medios continuos, juega un papel similar al de la segunda ley de Newton en la mecánica de partículas; sin embargo, no es posible deducirla de ella en forma rigurosa, por lo que se le adopta como un postulado. Los principios de conservación global, constituyen balances que nos dicen que lo que en una región del espacio sale es igual a lo que entra más lo que se crea, y de esta forma son aplicables a sistemas de naturaleza muy diversa, que puede incluir poblaciones formadas por seres vivos.

La mecánica de los medios continuos ha desarrollado también procedimientos muy sistemáticos para derivar ecuaciones que se satisfacen puntualmente, a partir de los principios de conservación global.

En gran medida los cambios más radicales que ha habido en los últimos años y la posibilidad de estudiar y predecir el comportamiento de sistemas macroscópicos muy complejos y de gran diversidad, se deriva de la gran capacidad computacional disponible como consecuencia del desarrollo de las computadoras electrónicas. Durante mucho tiempo los métodos matemáticos que se podían aplicar a los sistemas físicos eran los analíticos, exclusivamente. Por eso, los problemas tenían que ser simples; las propiedades materiales y las configuraciones geométricas consideradas

debían ser sencillas. Problemas unidimensionales como el de la cuerda vibrante. La propagación compresiva de ondas, como por ejemplo, el sonido. Materiales isotrópicos que ocupan todo el espacio o la mitad del mismo. Fluidos incompresibles y fluidos desprovistos de viscosidad. La teoría linealizada de los fluidos compresibles. La linealidad era una hipótesis inevitable que limitaba los resultados en casi todos los campos.

Sin embargo, no sería apropiado disminuir la importancia de lo logrado durante ese período. En realidad, fue de gran utilidad para comprender de manera cualitativa situaciones más complejas: el carácter ondulatorio de la luz; el principio de Huygen's y la capacidad del sonido para transmitir señales; la diferencia fundamental entre el flujo subsónico y el supersónico; la formación de ondas de choque; la estructura de muchas singularidades; la analogía entre la difusión del calor y el movimiento browniano, y la analogía entre el potencial eléctrico y el flujo a través de medios porosos. Estas analogías, por cierto, fueron muy valiosas porque permitieron hacer predicciones sin tener que realizar cálculos complicados. Sin embargo, su aplicabilidad resultaba bastante limitada.

También fueron útiles las ideas simplificadoras, como el principio de Saint-Venant. Resulta asombrosa la forma en que los ingenieros pudieron extrapolar y hacer deducciones de gran alcance con los resultados obtenidos para las situaciones tan idealizadas que eran susceptibles de solución con los instrumentos analíticos de que se disponía entonces. Retrospectivamente se reconoce que las limitaciones para la solución del problema eran demasiado grandes. De esta manera, si un método requería de mil operaciones aritméticas probablemente no se empleaba. Incluso, por la misma razón, no se usaron las soluciones analíticas de muchos problemas. En general puede decirse que, salvo en los casos más simples, no se hacían predicciones cuantitativas. En cuanto una situación se volvía un poco complicada, era imposible modelarla; y la mayoría de los fenómenos naturales son complicados.

La situación ha cambiado radicalmente como consecuencia del desarrollo alcanzado por las computadoras electrónicas. Así, se ha pasado de una situación en que un método que requería mil operaciones perdía interés práctico, a otra en que millones de tales operaciones se realizan

en segundos o, incluso, en fracciones de segundo. En la actualidad las calculadoras más rápidas efectúan cien millones de operaciones por segundo. Este cambio puede describirse apropiadamente como una revolución que ha ampliado mucho su alcance y que ha alcanzado un paso impresionante.

Los problemas, sin embargo, no los resuelven las calculadoras por sí solas; ha sido necesario crear una metodología nueva capaz de aprovechar efectivamente la capacidad computacional disponible. Las antiguas técnicas analíticas generalmente respetaban la continuidad de los modelos y buscaban soluciones que dependieran de parámetros continuos. Este procedimiento, sin embargo, no se prestaba para aplicarse en las computadoras. Fue necesario romper la continuidad del modelo, "discretizarlo", como se acostumbra decir, para poder transformar el problema en un sistema de ecuaciones algebraicas que sólo requiere operaciones aritméticas.

Los métodos de diferencias finitas que, en esencia, dependen de la aplicación de la definición dada por Newton de derivada como un cociente de incrementos, pronto tuvieron que ser complementados y, en muchos casos, reemplazados por los métodos de elementos finitos en los que la solución se representa en términos de un sistema de funciones definidas localmente.

La búsqueda que dé una eficiencia cada vez mayor ha dado lugar a un gran número de investigaciones. También la diversificación de las aplicaciones a problemas cada vez más variados. La complejidad de los sistemas tratados, se origina en la heterogeneidad de los mismos, el número de componentes y grados de libertad involucrados, así como el comportamiento altamente no lineal presente en muchos casos.

Además de poseer una capacidad de cálculo impresionante, las computadoras almacenan un enorme volumen de datos que pueden recuperarse instantáneamente. Por eso son útiles no tan sólo para realizar las operaciones del modelo matemático, sino también para colectar, almacenar e incorporar en el modelo los datos observacionales indispensables en su construcción y operación.

Frecuentemente, la incertidumbre es un elemento inseparable que es necesario incorporar en el estudio de muchos sistemas macroscópicos. Ella puede provenir de la variabilidad en el tiempo de las causas de

excitación de los sistemas. Ejemplos típicos son un sistema hidráulico para el cual sólo se conoce la distribución probabilista de la precipitación, o una estructura diseñada para resistir sismos de los que se conoce la distribución de sus magnitudes. También, el conocimiento de las propiedades del sistema puede ser incierto. Ello conduce a combinar los modelos deterministas de los sistemas macroscópicos con los modelos de la incertidumbre proporcionados por la probabilidad y la estadística. Frecuentemente el modelo resultante es un proceso estocástico de un sistema continuo.

Muchas cosas más podrían decirse del impresionante progreso que ha habido en la física macroscópica y en campos estrechamente relacionados con ella. Es evidente que los físicos mexicanos le hemos prestado poca atención y que su desarrollo ha sido escaso en México, a pesar de su interés científico y tecnológico. Creo que deberíamos reflexionar, especialmente en el seno de la Sociedad Mexicana de Física, si no es oportuno tomar medidas para asegurar un desarrollo vigoroso en el país y para estimular a muchos de los jóvenes miembros de la creciente población estudiantil a seguir tan promisorios caminos.