

EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XVII JORNADAS
VOLUMEN 13 (2007)

Pío García
Luis Salvatico
Editores



ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



El término “Onda de Choque” en Flujo Gasdinámico Compresible: su transición de teórico a observable

*Raúl Alberto Dean**

Introducción

¿Qué es una onda de choque? Explosiones, proyectiles o móviles viajando en un medio gaseoso a velocidades superiores a la del sonido provocan grandes cambios en la presión local en tiempos muy cortos, y estos cambios importantes de presión forman lo que comúnmente se denomina “onda de choque”. A diferencia de las ondas sonoras, que son ondas de compresión de pequeñas amplitudes que se propagan a la velocidad local del sonido y dejan el estado del medio gaseoso sin alterar, una onda de choque es una onda no lineal que abruptamente cambia el estado del gas. En un lenguaje termodinámico es un proceso irreversible en flujos supersónicos, causado por viscosidad y efectos de conducción térmica dentro de la onda de choque, que se desarrolla en regiones extremadamente delgadas de fluido gaseoso –mucho más delgadas que el espesor de la página de un libro- del orden de aproximadamente cuatro veces la trayectoria libre media de las moléculas del gas. Tal orden de distancia fue la principal razón para que este fenómeno no fuese perceptible a la visión normal, esto es, no mediada por un instrumento. Pero, en el terreno de lo empírico, a través de esta pequeña distancia ocurren grandes cambios en las propiedades del flujo mediante los cuales se originan y perciben consecuencias mecánicas y térmicas de la “invisible” onda de choque. Tal orden de distancia representa básicamente una discontinuidad en el aspecto formal matemático.

La investigación sobre ondas de choque estuvo relacionada básicamente con la dinámica de gases de alta velocidad que constituye un campo bien establecido de las ciencias de la ingeniería. Actualmente diferentes aplicaciones tecnológicas con onda de choque forman parte de investigaciones interdisciplinarias, enfatizándose que la investigación sobre ondas de choque no pertenece solamente al ámbito de los flujos compresibles de alta velocidad sino que pertenece al ámbito de la dinámica de las ondas no lineales.¹

El período 1858 – 1887

El desarrollo teórico: En el inicio del siglo XIX comienza el desarrollo teórico relacionado con ondas de amplitud finita. Poisson² en 1808 estudia el movimiento de amplitud finita. Encuentra la solución exacta para ondas progresivas como una función del potencial de velocidad, pero falla en reconocer la importancia de su solución al considerar la distorsión de la forma de onda. Limita su discusión a un pulso que comienza y finaliza con velocidad nula de la partícula y observa que la longitud de tal pulso nunca cambiará³. A posteriori, G.G. Stokes⁴ hace notar una dificultad en la teoría de Poisson, a saber, que puntos de velocidad nula de una onda coinciden con puntos de máxima velocidad. Stokes muestra por primera vez gráficos de la distorsión de la forma de onda y calcula el mínimo tiempo para que una onda desarrolle una pendiente vertical. Propone⁵ entonces la formación de una superficie de discontinuidad a través de la cual existen abruptos

* Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto - rdean@ing.unrc.edu.ar

cambios. Al debatir el trabajo de Poisson, Stokes surge como el primero en haber sugerido la posibilidad de la propagación de ondas discontinuas de presión⁶, de una superficie de discontinuidad en un gas⁷.

La teoría de las discontinuidades en flujos de fluidos compresibles ha sido tratada por muchos autores y se considera que comenzó básicamente con B. Riemann y sus contemporáneos⁸. Earnshaw y Riemann han discutido las leyes de propagación de ondas de amplitud finita y la construcción de la discontinuidad⁹. Riemann encontró que un tipo de solución lo constituyen ondas de amplitud finita, a las cuales denominó "ondas de choque". Intentó calcular las propiedades del choque, pero omitió una característica física esencial por lo que obtuvo resultados incorrectos¹⁰. Riemann en su tesis de 1860 no estuvo seguro de si las discontinuidades eran criaturas matemáticas o criaturas reales. Doce años después, 1870, W.J.M. Rankine (1820-1872), ingeniero profesor de la Universidad de Glasgow, correctamente derivó las ecuaciones apropiadas para el flujo a través de una onda de choque normal, una "discontinuidad" en el medio gaseoso perpendicular a la dirección del flujo. La contribución de Rankine a la teoría de ondas de choque se produjo dos años antes de su muerte. Investigó la termodinámica de las ondas longitudinales de perturbación finita. Estuvo involucrado en aplicar principios científicos a la ingeniería. Rankine¹¹ en 1870, presentó las ecuaciones de choque normal en la misma forma que se conocen actualmente. Pierre Hugoniot, sin conocer su trabajo, obtuvo también las ecuaciones de onda de choque normal en 1887, año en el cual publica un trabajo donde presenta las ecuaciones para las propiedades termodinámicas en una onda de choque normal. Las condiciones para una onda de tipo permanente fueron investigadas por Rankine y Hugoniot quienes proveyeron los enunciados de las condiciones para la continuidad de masa, cantidad de movimiento y energía a través de la discontinuidad en movimiento¹². Actualmente en la literatura sobre flujos gasdinámicos, las ecuaciones que describen un flujo a través de una onda de choque son denominadas relaciones de Rankine - Hugoniot, en honor a estos dos hombres¹³.

El desarrollo experimental¹⁴: El siglo XIX fue también un tiempo de trabajo experimental sobre ondas de amplitud finita en flujo supersónico. Ernst Mach, un reconocido físico experimental,¹⁵ después de sus primeros experimentos en acústica y pruebas experimentales del efecto Doppler, se concentró en: las investigaciones experimentales de la propagación, atenuación e interacción de ondas de amplitud finita, al desarrollo de varias técnicas de visualización de flujo, al estudio del flujo supersónico pasando sobre cuerpos y a chorros supersónicos. Aunque Mach conocía que las ondas que estaba investigando, no eran acústicas, y si bien claramente expresó que ... *"tratamos en nuestros experimentos con ondas como las descritas por Riemann"*, no las llamó "ondas de choque" (como lo había hecho Riemann). Utilizó el nombre *Schallwelle, Funkenwelle, Explosionswelle*, o simplemente una "onda". No fue hasta su último experimento balístico donde Mach utilizó el término *onda de choque*, lo cual influyó en que algunos de sus descubrimientos pasaran desapercibidos con el tiempo y atribuidos a otros investigadores¹⁶.

Mach tenía conocimiento del trabajo de Riemann y de todos sus puntos débiles en las suposiciones termodinámicas. No obstante, para probar la teoría de propagación de ondas de choque de Riemann, decidió obtener información más detallada sobre la velocidad y perfiles de

densidad en una propagación de onda de amplitud finita. Mach escribió: “La teoría será probada solo después de que tengamos éxito en visualizar una onda en dos sucesivos intervalos de tiempo.”¹⁷

Anderson J.D. Jr. da cuenta del inicio del desarrollo experimental en el siguiente texto:

Quizás el evento más importante fue la prueba de que las ondas de choque no eran solo una invención de la imaginación – ellas realmente existían en la naturaleza. Esta prueba fue dada por el físico y filósofo Ernst Mach en 1887, mientras era un profesor de física en la Universidad de Praga, quien tomó las primeras fotografías de ondas de choque sobre un cuerpo moviéndose a velocidades supersónicas. Las ondas de choque son normalmente invisibles a la visión normal. Pero Mach diseñó un arreglo óptico especial (llamado shadowgraph)¹⁸, mediante el cual pudo ver y fotografiar ondas de choque. En 1887, presentó un trabajo a la Academia de Ciencias en Viena donde mostró una fotografía de un proyectil moviéndose a velocidades supersónicas. Utilizando su sistema de shadowgraph, la curvatura de la onda de choque y sus huellas fueron hechas visibles. Esta fotografía histórica permitió a los científicos, por primera vez en la historia, realmente ver una onda de choque. El estudio experimental de las ondas de choque estaba desconectado y se puso a funcionar¹⁹.

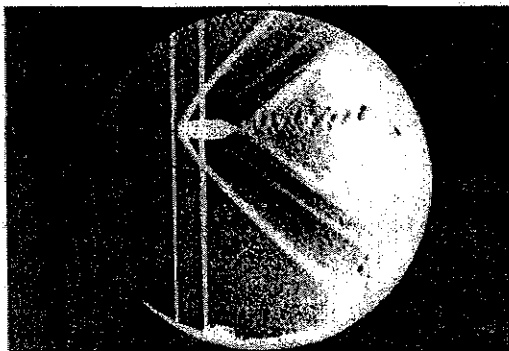


Fig. 1 Fotografía de un proyectil en vuelo supersónico, publicado por Ernst Mach en 1887
(Anderson J.D. Jr., 2001; Dvorak R. p.15)

El párrafo precedente a los fines del análisis propuesto, nos permite plantear al menos las siguientes dos cuestiones epistemológicas acerca del término “onda de choque”:

- C1 En su origen ¿Podemos clasificarlo como término teórico?, y si la respuesta es positiva:
- C2 ¿Qué favoreció su transición a entidad observable?

Los presupuestos para el análisis

P1. Se considera que el problema que concierne a la distinción entre entidades teóricas y entidades observables puede ser expresado en los siguientes términos: las entidades que pueden ser detectadas por medio de nuestros sentidos en una forma intersubjetiva debieran ser establecidas como observables, mientras que las entidades cuya existencia parece estar sugerida por alguna teoría, pero que aún no son detectadas a través de métodos indirectos hasta el momento, debieran ser consideradas como teóricas.²⁰

P2. Se considera la tesis de Hernán Miguel quien sostiene que una entidad que ha sido referenciada como teórica porque fue postulada en una cierta teoría con un cierto rol explicativo,

cambiará su estatus a uno de observable cargado de teoría bajo la siguiente condición: *un desarrollo tecnológico es logrado, basado sobre una teoría aceptada y en adición ésta es utilizada para la detección de un aspecto relacionado con la entidad en cuestión por medio de un postulado de reducción.*

Miguel propone que además de la aceptación de la teoría involucrada en garantizar el funcionamiento y construcción del artefacto, lo que usualmente se denomina la carga teórica asociada a la observación con instrumentos, también se debe aceptar un postulado de reducción que establece una relación entre entidades pertenecientes a distintas teorías. Considera y prueba que es necesario poner de manifiesto esta relación, en forma adicional a la aceptación de lo que usualmente llamamos "carga teórica" para la entidad (previamente teórica), para que ésta pueda ser considerada observable por la comunidad científica. ¿Qué características le asigna al postulado de reducción? Considera que es una nueva proposición, un tipo de conexión entre dos teorías representando una ley de conexión que describe una relación factual.

De acuerdo al contenido de su trabajo, su tesis se entiende aquí en forma ampliada de la siguiente manera: una entidad que ha sido referenciada como teórica porque fue postulada en una cierta teoría con un cierto rol explicativo, cambiará su estatus a uno de observable cargado de teoría bajo las siguientes dos condiciones independientes: (1) *Un desarrollo tecnológico es logrado, basado sobre una teoría aceptada* y (2) *en adición ésta es utilizada para la detección de un aspecto relacionado con la entidad en cuestión por medio de una proposición de conexión factual.*

Análisis de la transición

Sobre la base del presupuesto *P1* podemos dar respuesta a la cuestión *C1* afirmando que la entidad a la cual se le dio el nombre "onda de choque", en su inicio es una entidad teórica. Su existencia fue sugerida por un resultado derivado del formalismo matemático de una teoría relacionada con la dinámica de las ondas no lineales. Surge como una "discontinuidad" matemática, una pendiente infinita que representa una variación brusca de una propiedad del fluido en una distancia infinitesimal, y que no tenía una correspondencia "visible" en el flujo gaseoso. Tampoco existía en ese primer tiempo de investigación teórica una técnica de medición para detectar la realidad de la "discontinuidad" matemática que tenía correspondencia empírica en el modelo físico matemático, manteniéndose en consecuencia como una entidad teórica.

Sobre la base del presupuesto *P2* se puede dar respuesta a la cuestión *C2*. En forma no exhaustiva podemos analizar la transición investigando e interpretando en el caso de estudio las siguientes componentes de las condiciones:

a) *El desarrollo tecnológico logrado:* Fue un instrumento óptico para visualizar y registrar fenómenos en medios transparentes no homogéneos.

b) *La teoría aceptada para el desarrollo del instrumento:* El marco teórico para el desarrollo y funcionamiento del instrumento estuvo conformado por teorías de la óptica. La óptica geométrica²¹ y la óptica de los medios no homogéneos eran conocimientos ya aceptados en esa época. Robert Hooke (1635-1703), con su fascinación por la refracción atmosférica, había establecido la óptica de los medios no homogéneos como un nuevo campo de la actividad científica. Estudió la refracción de la luz debido a variaciones de la densidad en la atmósfera y en líquidos, y procedió a explicar el centelleo de las estrellas, los espejismos, entre otros²².

c) *La detección de un aspecto relacionado.* En una forma básica podemos decir que nuestros ojos -y las cámaras fotográficas ordinarias- no tienen forma de discernir las diferencias de fase en un rayo de luz. Solamente podemos ver amplitud (intensidad), contraste de color, y polarización (con lentes apropiados). Si pudiéramos ver también las fases, nuevas cosas o vistas podrían aparecer a nuestra visión. Esto es lo que los métodos de *schlieren* y *shadowgraph* realizan: convierten las diferencias de fases en amplitudes y algunas veces en diferencias de color, los cuales sí podemos ver. En consecuencia, podemos interpretar que lo que Mach buscó detectar fue la intensidad de luz refractada en cada punto de la región de gas donde se producía el fenómeno que genera la variación de densidad.

d) *Una ley de conexión factual.* Entre el índice de refracción n y la densidad del gas ρ existe una relación funcional. Se asume que para el aire y otros gases hay una simple relación lineal entre el índice de refracción y la densidad del gas²³, y por lo tanto pueden ser utilizados como sinónimos, siendo K la constante de Gladstone - Dale:

$$n = 1 + K \cdot \rho \tag{1}$$

Esta proposición constituye un nexo factual que establece una relación entre las bases empíricas metodológicas²⁴ de las teorías. Asocia el índice de refracción n , que puede ser considerado un elemento de la base empírica metodológica de las teorías ópticas, con la densidad del fluido, elemento de la base empírica metodológica de la teoría termodinámica y de la dinámica de fluidos. En este caso de estudio el postulado de reducción constituye una ley empírica que establece un nexo entre elementos de bases empíricas metodológicas, esto es, entre la base empírica de la teoría donde se encuentra el término teórico y la base empírica de la teoría del instrumento. Básicamente, los cambios de densidad dentro de un flujo compresible deflecan la luz que atraviesa el flujo. Esto conduce a variaciones de la intensidad de luz sobre una pantalla de registro, y en consecuencia los cambios de densidad en el flujo determinan una sombra.

Ernst Mach en 1887 logró diseñar un instrumento óptico sobre este principio de funcionamiento, logrando generar una imagen de la estructura del flujo supersónico de un medio gaseoso sobre un cuerpo sólido. Esta imagen permitió observar la “discontinuidad” en el medio gaseoso delante del cuerpo, invisible en condiciones no mediadas por un instrumento. Presentó su trabajo a la Academia de Ciencias en Viena donde mostró una fotografía de un proyectil moviéndose a velocidades supersónicas. Utilizando la técnica de fotografía de sombras, la onda de choque resultó visible (Fig. 1). Los registros obtenidos en el instrumento de medición pudieron ser utilizados directamente, sin un ulterior procesamiento, y permitió una descripción cualitativa / fenomenológica de la estructura del flujo²⁵ y los mecanismos que lo establecen. Mach proveyó una prueba experimental para la discontinuidad y sugirió la importancia de la relación²⁶ de la velocidad local del fluido a la velocidad local del sonido. El valor fundamental de su trabajo pionero es que marca el real comienzo del campo de la aerodinámica supersónica. Utilizó las variaciones de la densidad de un gas (aire) para mostrar claramente la línea de choque en el frente de un proyectil. Esto lo logró al diseñar un instrumento de medición utilizando una técnica refractiva de visualización de fenómenos en medios transparentes no homogéneos. El trabajo de Mach de 1876 demostró la existencia de las ondas de choque (discontinuidad). En la etapa histórica en que se desarrolla este caso las teorías de la óptica estaban aceptadas, lo cual permitió una rápida aceptación y transición de esta entidad teórica a entidad observable.

A modo de conclusión

En este caso de estudio se cumple la condición propuesta por Miguel. Se corrobora su afirmación de que los desarrollos tecnológicos nos permiten "observar" entidades que han sido propuestas por alguna teoría antes que estos desarrollos fuesen logrados y que resulta necesario explicitar y aceptar una ley de conexión factual, en forma adicional a la aceptación de la "carga teórica" de la observación (debida a la teoría que describe el funcionamiento y rige la construcción del instrumento), para que la entidad teórica pueda ser considerada observable por la comunidad científica. Particularmente en este caso la ley de conexión factual describe una relación entre elementos de las bases empíricas metodológicas. El caso muestra que la transición de teórico a observable se puede sintetizar, como un proceso de interrelación de teorías. En este caso quedan interrelacionadas tres teorías: la teoría de la óptica geométrica, la teoría óptica de los medios no homogéneos, y la teoría de la dinámica de gases, una de las cuales es la que aporta el nexo o ley de conexión factual. En particular se interpreta que el nexo se dio a través de las bases empíricas metodológicas. Como se puede observar la proposición de conexión factual es independiente²⁷ de la óptica geométrica y de la teoría de la dinámica de fluidos, y pertenece a la teoría de la óptica de los medios no homogéneos. Esta independencia se postula e incorpora como una condición adicional en la tesis de Miguel, que se propone ampliarla estableciendo que una entidad que ha sido referenciada como teórica porque fue postulada en una cierta teoría con un cierto rol explicativo cambiará su estatus a uno de observable cargado de teoría bajo las siguientes condiciones:

- (1) *Un desarrollo tecnológico es logrado, basado sobre una teoría aceptada,*
- (2) *en adición ésta es utilizada para la detección de un aspecto relacionado con la entidad en cuestión por medio de una proposición de conexión factual, y*
- (3) *la proposición de conexión debe ser independiente y contrastable.*

Notas

¹ Takayama K. (2002)

² Siméon Denis Poisson, (1781-1840), "A paper on the Theory of Sound"(1808). *Cit. en* Lipkens B.

³ Lipkens B. En revisión del libro: *Classic Papers in Shock Compression Science*, Johnson J.N. and Cheret R., Editors, Springer-Verlag (1998).

⁴ G.G Stokes, "On a difficulty in the theory of Sound", *Phil.Mag.* 33, 349 (1848)

⁵ Lipkens B. (1998)

⁶ Brineley, p.606 (1947)

⁷ Taylor, p.371. (1910)

⁸ Coburn, N. Discontinuities in Compressible Fluid Flow, p.245 (1964)

⁹ Brineley, p.606 (1947)

¹⁰ Riemann realizó la suposición incorrecta que la entropía permanecía constante a través del choque.

¹¹ "On the Thermodynamic Theory of Waves of Finite Longitudinal Disturbance" (1870)

¹² Brineley, p.606 (197)

¹³ Anderson (1990)

¹⁴ Un relato detallado del desarrollo experimental de Ernst Mach se encuentra en Dvorak R. (1988)

¹⁵ Blackmore J., An Historical Note on Ernst Mach, p. 304. (1985)

¹⁶ Dvorak, p.6 (1988)

¹⁷ Rudolf Dvorak (1988) (Traducción propia)

¹⁸ De acuerdo a Settles (p.3) la técnica *shadowgraph* usualmente es atribuida a V Dvorak en 1880. De acuerdo a Rudolf Dvorak (p.6) el método de sombra fue desarrollado por el asistente de Mach, Vincent Dvorak y publicado en 1889.

¹⁹ Anderson (2001), Chap.3

²⁰ Miguel H. (1998)

²¹ Una revisión histórica de las teorías de la óptica se encuentra en Bucci&Pelossi (1994)

²² Settles G.S., p.2 (2001)

²³ Settles G.S., p.26 (2001)

²⁴ Klimovsky, pp.39-41 (1994)

²⁵ Dvorak, p.12 (1988)

²⁶ Dvorak, p 13 (1988)

²⁷H. Miguel sugirió la independencia de esta proposición, durante la presentación y discusión del caso de estudio durante las *XVII Jornadas de Epistemología e Historia de la Ciencia* (2006), y la necesidad de incluirla como condición en el modelo. La forma en que se ha incluido, (y sus posibles errores), corre por cuenta del autor del presente trabajo.

Referencias

Anderson J. D. Jr. *Modern Compressible Fluids with Historical Perspective*, Mac Graw Hill (1990).

_____. *From Engineering Science To Big Science*, The NASA History Series (2001).

Bucci G. M., Pelosi G., *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, **36**, 4 (1994).

Blackmore J. *The British Journal for the Philosophy of Science*, **36**, 3. (1985), pp. 299-305.

Brineley S.R., Kirewood J., *Physical Review*, **71**, 9, (1947) pp.606-611

Coburn N. *Mathematics Magazine*, **27**, 5. (1954), pp. 245-264

Dvorak R., *Contribution of Ernest Mach to Gas Dynamics*, Prague (1988)

Kleine H., Grönig H., Takayama K., *Optics and Laser in Engineering*, **44**, (2006) pp.170-189

Klimovsky G., *Las desventuras del conocimiento científico*, AZ Editora (1994), pp319-337

Lipkens B. J. *Acoust. Soc. Am.*, **111**, 3, (2002), pp.1143-1144.

Martin M.H., *American Journal of Mathematics*, **65**, 3, (1943), pp.391-447.

Miguel H. "First Revelation: When Theoretical Becomes Visible". Twentieth World Congress of Philosophy, Boston, Massachusetts, (1998). In: The Paideia Archive <http://www.bu.edu/wcp/Papers/Scie/ScieMigu.htm>

Rankine W.J.M., *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **160**, (1870)

Settles G.S., *Schlieren and Shadowgraph Techniques*, Springer (2001).

Sheng W., Zhang T., *Memories of the American Mathematical Society*, **137**, 654, (1999)

Taylor G.I., *Proceedings of the Royal Society of London*, **84**, 571, (1910), pp. 371-377.

Takayama K., *JSME International Journal Series B*, **45**, 1, (2002), pp.9-14.