



**Rafael Andrés Alemañ Berenguer<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Departamento de ciencia de materiales, óptica y tecnología electrónica. Universidad Miguel Hernández, Avda. Universidad, s/n. Edif. Torrevaillo - 03202l - Elche (Alicante – España)*

<sup>2</sup>*Sociedad Astronómica de Alicante (Grupo de gravitación y mecánica celeste), Apartado de Correos (Alicante – España)*

**E-mail:** agrupación.astroalicante@gmail.com

(Recibido el 8 de Octubre de 2008; aceptado el 27 de Noviembre de 2008)

## Resumen

En esta obra monumental de Jesper Lützen sobre la mecánica de Heinrich Hertz encontramos una magnífica exposición de la vida y obra de este insigne físico germano. Un interesante relato de las influencias intelectuales que modelaron su pensamiento científico, culmina con un exhaustivo análisis de la reformulación de la mecánica clásica que Hertz planteó poco antes de su prematuro fallecimiento.

**Palabras clave:** Hertz, Mecánica, Geometría, Historia de la Física

## Abstract

In this great book of Jesper Lützen on Heinrich Hertz's mechanics we find a superb exposition of the life and works of this outstanding german physicist. A very interesting narration of the intellectual influences that modelled Hertz's scientific mind, ends with a thoroughful explanation of the new formulation of classic mechanics elaborated by him short time before his premature death.

**Keywords:** Hertz, Mechanics, Geometry, History of Physics

**PACS:** 01.30.Ee, 01.30.-y

**ISSN 1870-9095**

## *Mechanistic Images in Geometric Form. Heinrich Hertz's Principles of Mechanics*

Jesper Lützen

333 pp., editado por Oxford University Press,  
Great Clarendon Street, Oxford OX2 6DP, 2005  
ISBN 0-19-856737-5

## I. INTRODUCCIÓN

En el libro cuya reseña se ofrece aquí el profesor Jesper Lützen, del Departamento de Matemáticas de la Universidad de Copenhague, ha realizado una auténtica labor enciclopédica sobre uno de los físicos más interesantes del siglo XIX. Heinrich Hertz, bien recordado por su demostración experimental de la existencia de ondas electromagnéticas, y por su descubrimiento del efecto fotoeléctrico, no lo es tanto por sus contribuciones teóricas a la fundamentación de la mecánica clásica. Y ese es el tema principal de este magnífico libro: recuperar esa porción hoy casi olvidada de la obra de Hertz poniéndola en perspectiva con el trasfondo de un siglo en el cual las imágenes mecánicas y geométricas de los procesos físicos bullían en el agitado caldero de las discusiones epistemológicas sobre los fundamentos de la física.

Los cuatro primeros capítulos del libro de Lützen nos introducen magistralmente en la física decimonónica poniendo un especial acento en los problemas

epistemológicos heredados de la mecánica de los siglos XVII y XVIII. Desde los tiempos de Newton y Euler persistía la duda sobre la naturaleza físicamente real del espacio y el tiempo absolutos, o si se trataba meramente de entequeias imaginarias introducidas en la mecánica para el auxilio de los cálculos matemáticos. La necesidad de materializar de algún modo la evanescente idea de un espacio absoluto, estuvo en el origen del no menos extravagante concepto del “éter” que abarcó casi toda la física del siglo XIX.

El dilema parecía tan intrincado que el científico austriaco Ernst Mach (1838-1916) no vio más salida que una reconstrucción profunda de la mecánica clásica. Admiraba a Newton y apreciaba la importancia de sus descubrimientos, pero sostenía con la misma firmeza que la forma usual de presentar sus teorías estaba gravemente equivocada. A este respecto, Mach opinaba que el formato de la mecánica clásica se debía a un mero accidente histórico –podía haber preponderado el formalismo de Huygens en lugar del euleriano– y reflejaba la honda

influencia que en ella tuvieron las convicciones teológicas de sus creadores.

Entregado en cuerpo y alma a la refundación de la ciencia de su tiempo, Mach buscaba unificar la física –reducible, en su opinión, a la mecánica– con la fisiología de la percepción. Su propia lógica le condujo a extirpar de la mecánica todos los conceptos que no fuesen cinemáticos, ya que sólo estos –ligados a datos espaciales y temporales– son susceptibles de observación directa.

## II. LA MECÁNICA DE HERTZ

Tan profunda y justificada en algunos aspectos como pudiera ser la crítica de Mach, su análisis de la mecánica clásica resultaba meramente negativo. Considerado en su conjunto, no consistía más que en una desaprobación explícita de la fragilidad del armazón conceptual en el que se sustentaba la mecánica de Newton-Euler. Ciertamente, algunas de sus premisas se mostraban confusas, endebles y empíricamente discutibles; pero, ¿qué alternativa ofrecía Mach? Ninguna en realidad, y ese fue uno de los acicates que impulsó a Heinrich Hertz (1857-1894) a elaborar su propia propuesta.

El capítulo 5 del libro de Lützen relata de modo muy atractivo el perfil biográfico de este insigne físico alemán. Por el contrario, del capítulo seis al diez se narran las influencias físicas y filosóficas que fueron dando forma al pensamiento de Hertz y que finalmente le llevarían a su nueva formulación de la mecánica clásica. La publicación de su obra monumental *Los Principios de la Mecánica* (1894) constituyó una declaración pública sobre la necesidad de refundar las bases conceptuales de la mecánica en bien de su consistencia lógica. En la introducción, Hertz reconoce su deuda intelectual con las ideas críticas de Mach. Sus instrumentos teóricos principales serán la distancia espacial, la duración temporal y la partícula material; ni la fuerza, ni la masa, ni la energía tienen cabida en la nueva lectura de la mecánica que hace Hertz.

Los capítulos que van del once al quince nos preparan con una introducción al repertorio de conceptos físicos y matemáticos de los cuales se servirá Hertz para madurar su obra. D'Alembert había tratado de proporcionar una visión unificada de la mecánica reduciendo la dinámica a la estática; Hertz emprendió un camino similar cuando trató de reducir la dinámica a la cinemática. Con ello evitaba recurrir a conceptos –como masa, fuerza o energía– que juzgaba prescindibles a causa de la excesiva laxitud con la que sus contemporáneos los interpretaban. Hertz se decidió a conseguirlo invocando “movimientos ocultos” de partículas, a los cuales atribuir la complejidad de los movimientos visibles. Sin esos cuerpos ocultos, los objetos perceptibles no describirían más que movimientos simples. La idea resulta poderosamente atractiva: cualquier sistema mecánico (un agregado de partículas móviles con ciertas conexiones entre ellas) que se mueve de una manera más o menos complicada, puede considerarse incluido en un sistema mayor, algunas de cuyas partes no son observables, el conjunto del cual se mueve de una forma mucho más simple.

Hertz comienza por tomar una colección de partículas en el espacio euclídeo tridimensional, donde la posición del sistema es el agregado de las posiciones de cada uno de sus componentes. Como en la mecánica de Lagrange, un conjunto de  $n$  partículas se representa con  $3n$  coordenadas en total. La trayectoria de un sistema vendrá dada por la totalidad de sus posiciones a lo largo del tiempo. Entre dos posiciones sucesivas infinitamente próximas se dice que hay un “elemento de trayectoria” o “camino elemental”. La magnitud de la trayectoria de un sistema entre dos posiciones dada, se define como el promedio ponderado con la masa de los correspondientes desplazamientos de las partículas individuales. En concreto, si la posición  $x$  se compone de  $3n$  coordenadas  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_j, x_{3n}\}$ , las masas se denotan como  $m_k$  (no todas las  $m_k$  son diferentes, ya que cada partícula posee tres coordenadas espaciales) y  $m$  es la suma de todas ellas, la trayectoria entre dos posiciones  $x'$  y  $x$  tendrá una magnitud  $s$ , dada por la igualdad

$$ms^2 = \sum_{k=1}^{3n} m_k (x'_k - x_k)^2. \quad (1)$$

Hertz considera que cada objeto físico se halla compuesto por un número determinado de partículas infinitesimales, todas ellas iguales, inmutables e indestructibles. La masa de un cuerpo concreto, así pues, se define como el cociente entre el número de partículas –“átomos” estaríamos tentados a decir– en ese cuerpo entre el número correspondiente a un objeto patrón. El gran físico alemán dio por sentado más adelante que este número podía obtenerse en la práctica mediante el uso de las balanzas.

Si dos trayectorias parten de una misma posición  $x$  para llegar respectivamente a  $x'$  y a  $x''$ , el ángulo  $\theta$  entre ellas queda establecido por la igualdad

$$\cos \theta = \frac{1}{m s_1 s_2} \sum_{k=1}^{3n} m_k (x'_k - x_k)(x''_k - x_k). \quad (2)$$

Esta fórmula permite conocer la dirección de una trayectoria a partir de otra dirección elegida como referencia. Obviamente, las definiciones (1) y (2) son enteramente arbitrarias, pero también muy plausibles.

La trayectoria de un sistema se considera “recta” si tiene la misma dirección en todas sus posiciones, por otra parte, se juzgará “curva” si varía su dirección con la posición. La curvatura de la trayectoria se define como el límite del cociente de la diferencia de direcciones en los dos extremos de un elemento de la trayectoria, entre la magnitud de dicho elemento. Un elemento de trayectoria se dirá “más recto” que otro si su curvatura es menor. La trayectoria de curvatura mínima es aquella cuyos elementos presentan una curvatura menor que la de cualquier otro elemento de trayectoria con la misma posición y la misma dirección.

## III. EL PRINCIPIO DE MÍNIMA CURVATURA

Con su nuevo planteamiento, Hertz buscaba reorganizar axiomáticamente la mecánica de un modo que prescindiese, muy especialmente, de las acciones a distancia. Y creyó conseguirlo mediante su “principio de mínima curvatura” (*straigesth path*, en inglés), como se nos explica en el capítulo 16 del libro de Lützen, titulado “The Fundamental Law”. Entre las partículas de un sistema mecánico existen vínculos especificados analíticamente mediante ciertas relaciones entre sus coordenadas. Si tales relaciones no dependen del tiempo, sino tan solo de las posiciones mutuas de las partículas, hablamos de un sistema “libre”; en caso contrario, se llamaría “ligado”. Sentadas estas premisas, el lema fundamental de la mecánica de Hertz dice así: *Todo sistema libre permanece o bien en estado de reposo o bien en movimiento uniforme a lo largo de la trayectoria con curvatura mínima*. El objetivo de la mecánica, según el físico alemán, consistiría en investigar todas las consecuencias lógicas que se desprenden del anterior enunciado, y compararlas con los datos experimentales. Cabría objetar que la mayoría de los sistemas realmente existentes no son libres en absoluto. El ejemplo más sencillo es el de una partícula abandonada a sí misma en un campo gravitatorio. Aunque la redujésemos inicialmente al reposo, una vez se deja en libertad no permanece quieta en absoluto.

A ello Hertz respondió suponiendo que los sistemas ligados pueden considerarse pertenecientes a un sistema libre mayor, algunas de cuyas partes no percibimos directamente. Los movimientos de los sistemas libres, o de aquellos que no lo son pero obedecen el principio de mínima curvatura, se llaman *movimientos naturales*. Deducimos la existencia de los cuerpos ocultos –que reunidos con los visibles formarían el sistema libre total– precisamente porque los cuerpos observables no describen movimientos naturales.

Hertz sabía que el recurso a masas ocultas ponía en entredicho la respetabilidad epistemológica de su teoría. Por eso tuvo buen cuidado en destacar que (1) tales masas eran necesarias para la consistencia lógica de su sistema y (2) la fuerza y la energía de la mecánica clásica también eran entidades ocultas –de una clase especial, además– en tanto sus masas son cuerpos ordinarios, solo que no siempre visibles. En efecto, podemos admitir que hay algo oculto funcionando, y sin embargo negar que ese algo pertenezca a una categoría especial. Somos libres de suponer que ese algo oculto sea de nuevo nada más que movimiento y masa –movimiento y masa que difieren de los visibles no en sí mismos sino en relación a nosotros y a nuestros medios usuales de percepción.

Es importante subrayar que la consistencia lógica de la mecánica hertziana exige invocar la existencia de cuerpos y movimientos en el universo, muchos de los cuales no son directamente discernibles por el observador. No era una idea tan extraña; Urban LeVerrier había predicho correctamente la existencia Neptuno en 1846 basándose en las irregularidades del movimiento de Urano. ¿Por qué no pensar que sucede igual con el resto de los cuerpos de la naturaleza?

Así, la mecánica acaba expurgada también de la noción de fuerza, pues ésta queda privada de cualquier desempeño

en la teoría de Hertz. Si se introduce, aparece como la influencia mutua entre las partes no libres de un sistema libre más amplio y abarcador; es decir, siempre podemos imaginar que una parte de un sistema libre ejerce una “fuerza” sobre otra parte de ese mismo sistema. No es más que una cuestión de conveniencia.



FIGURA 1. Heinrich Hertz

El capítulo 22 resulta de especial interés puesto que se dedica a una materia raramente abordada, como es la historia de la noción de ligaduras holónomas y no holónomas, ideas que tanta importancia adquirieron en el desarrollo de la mecánica analítica hasta su forma actual. El capítulo 24 expone los diversos intentos de obtener una traducción geométrica del formalismo analítico de Hamilton, y en concreto de los principios variacionales que tan brillantemente parecían funcionar en numerosísimas áreas de la física. A continuación se nos traslada en los capítulos 25 y 26 a un fascinante estudio sobre el ámbito de aplicabilidad de la mecánica de Hertz, y el tratamiento que en ella se daba al concepto de fuerza, puesto en duda por Mach y por otros filósofos de la ciencia decimonónica.

La estrategia machiana, empero, no dejaba de tener sus propias debilidades, como se nos refiere en el capítulo 27, dedicado a analizar la recepción encontrada por esta novedosa formulación de la mecánica. Una de las razones estriba en el hecho de que la mecánica clásica postula una geometría espacial y una ley de fuerzas, de modo que su combinación permita deducir la trayectoria de las partículas como geodésicas del espacio escogido. Hertz renuncia a las fuerzas, se limita a una cierta estructura espacial y postula que las trayectorias deben ser geodésicas de un cierto tipo. Como, en general, esto no es suficiente para obtener los mismos resultados que la mecánica clásica, el papel que allí desempeñaban las leyes de fuerzas, lo cumplen aquí las masas ocultas y sus movimientos.

Al fin y al cabo que los movimientos de unos cuerpos influyan por su mera presencia sobre los movimientos de otros objetos, no deja de ser igualmente enigmático, ya recurramos al concepto de fuerza o ya prescindamos de él. Antes o después encontraremos que las derivadas segundas

de la posición con respecto al tiempo de las partículas de un sistema, estarán relacionadas mediante ciertas funciones dependientes de las distancias –en ocasiones, de las velocidades y del tiempo– así como de magnitudes características (masas, cargas, etc.), que no resulta tan sencillo suprimir. Y sobre todo, ¿tiene sentido afirmar la existencia de objetos completamente iguales en todo, salvo por el hecho de que uno es observable y otro no? Significativamente Hertz no ofreció ejemplos concretos del modo en el que las masas ocultas operaban para producir los movimientos observables, por lo cual no es tan grande la ganancia obtenida si elegimos admitir su mecánica.

#### IV. CONCLUSIONES DEL LIBRO

En síntesis, la mecánica de Hertz, a juicio de Lützen, puede considerarse un vástago más de la tradición decimonónica de geometrización de la física, e influida notablemente por la crítica de Mach contra la vacuidad epistemológica de ciertos conceptos básicos en la mecánica clásica. El capítulo 28 nos ofrece una lista de conclusiones extremadamente útil, pues en cada apartado se señala el capítulo en el cual se desarrollan los argumentos que, en opinión de Lützen, conducen a las conclusiones finalmente expuestas. En una de ellas, por ejemplo, se habla de las repercusiones intelectuales de Mach sobre Einstein, las cuales parecen ínfimas, si es que hubo alguna. Einstein dispuso de mejores herramientas matemáticas y de una visión física más amplia y poderosa

que la de Hertz, aun cuando los dos se propusieron una reforma radical de la ciencia de su tiempo. Ninguno de ellos logró incorporar de manera estricta las ideas de Mach en sus respectivas teorías, o bien porque eran lógicamente insostenibles (la eliminación completa de las nociones de masa y fuerza) o bien porque resultaron físicamente erróneas (el origen relacional de la inercia). Parece seguro que la noción de fuerza no puede ser expulsada de forma consistente de la mecánica; no lo es tanto que futuras teorías acerca de la composición elemental de la materia no puedan encontrar finalmente un origen relacional a la noción de masa, en línea –al menos aproximadamente– con los pensamientos de Mach. La prematura muerte de Hertz, en todo caso, nos privó de su juicio sobre los desarrollos posteriores de la física en la primera mitad del siglo XX. Sin duda sus opiniones hubiesen sido de un valor inestimable, tanto para sus contemporáneos como para la posteridad.

Cierran el volumen de Lützen un apéndice con la lista de las obras manuscritas de Hertz todavía preservadas, una extensa y cuidada bibliografía, y un índice temático que facilitará la búsqueda alfabética de cualquier contenido deseado. Se trata en suma de un libro de extraordinaria calidad sobre una parte de la historia de ciencia poco conocida fuera del círculo de los expertos más especializados. Las páginas de Lützen deleitarán sin duda al especialista por la erudición de sus detalles, y fascinarán al neófito por la riqueza de matices que sobre la física del siglo XIX nos brinda este profesor de la Universidad de Copenhague.