

PRÓLOGO¹

Este material está dirigido primordialmente a los estudiantes de las carreras de ciencias, ingeniería o licenciatura en Física (y otras carreras afines) que abordan la mecánica newtoniana en su primer curso de Física, y que deseen entender realmente los abstrusos conceptos y principios de esta importante rama del conocimiento, yendo más allá de la mera resolución algorítmica de ejercicios numéricos estructuralmente idénticos a los resueltos por el profesor. El propósito de la obra es, entonces, proporcionar al docente de Física un recurso didáctico *de apoyo*, que podría complementar, de acuerdo con su enfoque didáctico, los textos universitarios clásicos dirigidos a esta población, es decir, aquellos textos cuyo objetivo es desarrollar formalmente, y por extenso, la mecánica newtoniana y que han tenido éxito en el mercado editorial educativo. Quizás también podría ser utilizado con provecho por quienes, no estando directamente interesados en aprender la Física enseñada en los cursos de ciencias y de ingeniería, desean introducirse o profundizar en el complejo y abstracto entramado conceptual que constituye la mecánica newtoniana sin ahondar en su for-

¹ Este prólogo, escrito por amable sugerencia de los anónimos evaluadores del texto, se dirige no tanto a los potenciales usuarios del texto, a saber, los estudiantes universitarios y los docentes activos de Física en la educación media, sino a los docentes universitarios de los cursos introductorios de Física. Su propósito es analizar uno de los obstáculos más notables en la enseñanza de la Física: las formidables dificultades de comprensión de sus conceptos básicos, dificultades que malogran los esfuerzos de un número considerable de estudiantes. Precisamente, la finalidad del texto, como detallo en estas páginas, es contribuir a remediar tales dificultades conceptuales ofreciendo a los docentes un recurso didáctico de apoyo complementario a los muchos, actualmente disponibles, en esta era informática, pero diseñado a partir de los estudios sistemáticos sobre las mismas.

mulación matemática, pues están interesados en conocer este aspecto tan decisivo en la historia del pensamiento. Por ejemplo, podría servir para los cursos complementarios electivos dirigidos a estudiantes de carreras no científicas.

No obstante, podría decirse que quienes más podrían beneficiarse del material son los profesores de Física, especialmente de la enseñanza básica y media. Quienes hemos tenido a cargo programas de formación permanente de docentes en esta área, sabemos que la cinemática y la dinámica de una partícula (y, en general, casi toda la Física de décimo grado) se enseña a menudo como si fuera una especie de recetario algebraico. Es decir, lo que al final terminan aprendiendo los estudiantes es un conjunto de algoritmos mecánicos para resolver ejercicios estereotipados². Entre otras razones, esta situación se explica por el escaso tiempo dedicado a la discusión de los conceptos, en comparación con el tiempo dedicado a la resolución de ejercicios de aplicación³. Por ejemplo, el tratamiento de la primera ley de Newton no suele hacer justicia al enorme esfuerzo de clarificación conceptual del concepto de inercia efectuado por los pensadores que antecedieron a Newton, que, incluso, a estas alturas, todavía suscita perplejidad en mentes tan eminentes como Richard Feynman⁴. Así, pues, este texto también pretende contribuir a la formación conceptual de los docentes de Física de secundaria, quienes, en diversos foros en los que he participado, han manifestado vivo interés en disponer de materiales dirigidos a la clarificación de los conceptos básicos de la mecánica. Por último, el material se ofrece como un posible objeto de estudio en los cursos de didáctica de las ciencias naturales o similares, para favorecer desarrollos en torno a cómo elaborar materiales apoyados en los resultados de la investigación

² En algunos trabajos de investigación educativa en los que he participado como investigador he podido constatar directamente las debilidades de la enseñanza de la Física en la educación secundaria y en la formación científica de los mismos docentes. El eminente educador en Física e investigador educativo Arnold B. Arons, a quien me refiero por extenso en la Guía y agradecimientos bibliográficos, documenta las falencias en la comprensión de la Física de los docentes en su importante manual de referencia *Teaching Introductory Physics* (John Wiley, New York, 1997): ver especialmente sección 12.10, *The Problem of Teacher Education*.

³ De ninguna manera deben leerse estas líneas como una crítica a nuestros sufridos docentes de Física del nivel medio, pues, precisamente, la idea central del prólogo es que los obstáculos cognitivos que se interponen en la comprensión de algunos principios claves de la Física, como la primera ley del movimiento de Newton, son tales que su superación requiere repensar profundamente la manera cómo se enseña la Física.

⁴ Refiriéndose a lo que Feynman llama principio de inercia en su ameno y profundo libro *El carácter de la ley física* (Tusquets Editores, Barcelona, 2005), afirma: “el movimiento en línea recta de un planeta no tiene explicación. La razón por la cual las cosas se mueven en línea recta no ha sido descubierta” (p. 18).

didáctica contemporánea, de modo que favorezcan el aprendizaje a fondo de los conceptos y principios newtonianos.

El propósito de este prólogo, cuyos destinatarios son los docentes de Física y no los estudiantes mismos a los que va dirigido el libro, es discutir brevemente la raíz fundamental de las dificultades de comprensión tan considerables que encuentran los estudiantes cuando abordan por primera vez la dinámica newtoniana, tan bien conocidas por todos los docentes que hemos intentado evaluar esa comprensión sin limitarnos a la resolución estereotipada de ejercicios de aplicación⁵. Desafortunadamente, a menudo atribuimos la responsabilidad de ese fracaso a una multiplicidad de factores que quizás no son los más decisivos. Hace ya un buen tiempo Frederick Reif invitaba a los físicos a reflexionar sobre la inconsistencia que significa abordar la problemática de la enseñanza de nuestra disciplina con el enfoque de caja negra. Es decir, sostenía, asumimos posible contentarnos con mirar el sistema cognitivo humano como algo cuyo funcionamiento interno podemos ignorar, a pesar de su importancia para nuestra tarea formadora⁶. Si bien este sistema es mucho más complejo que cualquiera de los que estamos acostumbrados a estudiar, no parece necesario tener que llegar hasta sus confines para repensar nuestra tarea educativa. Los docentes de ciencias que hemos orientado nuestra actividad investigadora hacia el campo educativo, nos inclinamos a pensar que la investigación cognitiva y psicoeducativa en las tres últimas décadas del siglo XX, y la primera década del siglo XXI, acerca de las dificultades conceptuales para el aprendizaje de las ciencias, ya está empezando a rendir algunos frutos, aunque hace falta todavía un gran esfuerzo para trasladarlos del campo teórico al aplicado⁷.

⁵ Véase P.C. Peters, "Even Honors Students have Conceptual Difficulties with Physics". *American Journal of Physics*, 50, 501-508 (1982). Este conocido artículo es uno de los muchos que muestran que la maestría en la resolución de los típicos ejercicios de fin de capítulo no garantiza de ninguna manera la comprensión del sistema conceptual de la dinámica newtoniana.

⁶ "Scientific Approaches to Science Education", *Physics Today* (noviembre, 1986), pp. 48-54.

⁷ La bibliografía especializada es muy abundante, pero desafortunadamente se han hecho pocos esfuerzos para traducirla a un lenguaje accesible a los docentes sin formación en psicología cognitiva o educativa. Remito al lector al interesante libro (aunque muchas de sus tesis son desde luego bastante discutidas) *Aprender y enseñar ciencia: del conocimiento cotidiano al conocimiento científico*, escrito por Juan Ignacio Pozo (catedrático de Psicología de la Universidad Autónoma de Madrid) y Miguel Ángel Gómez (docente de Química de la Institución Educativa Secundaria Victoria Kent, Madrid), publicado por Ediciones Morata (Madrid, 2001). Estos autores se dirigen primordialmente a docentes de secundaria, en las áreas de química y física, con el propósito de brindarles una panorámica de lo que la investigación cognitiva, psicoeducativa y didáctica tiene para ofrecerles, especialmente para ayudarles a "comprender por qué sus estudiantes no comprenden" (Gastón Bachelard), con un último capítulo en el que revisan las grandes familias de enfoques didácticos que los teóricos han propuesto para ayudar a los

Desde luego, apenas es posible en unas cuantas páginas ir más allá de un análisis esquemático de un problema tan arduo como el de la naturaleza de las dificultades de comprensión de los conceptos físicos. Me limitaré, por tanto, a señalar el resultado básico de este análisis, y sobre el cual hay un consenso unánime: *existe un profundo conflicto entre la “mecánica de los físicos” con lo que podría llamarse la “mecánica intuitiva”, un saber práctico y experiencial sobre el movimiento que todos los seres humanos poseemos, independientemente del nivel de escolaridad y de la cultura*⁸. A pesar de las marcadas diferencias epistemológicas, ontológicas y conceptuales entre una y otra, es claro no obstante que ambas tienen una estrecha relación, por cuanto se refieren al mismo ámbito de fenómenos, el movimiento macroscópico⁹. Por ello no extraña que lo que “el estudiante ya sabe” (para usar una difundida expresión de un conocido psicólogo educativo norteamericano, el profesor David Ausubel¹⁰), y sabe muy firmemente, a veces discrepe con lo que nos gustaría llegara a saber y, en

docentes a que sus estudiantes comprendan un poco más. Con excepción de este último capítulo, mucho más orientado hacia el nivel educativo secundario, casi todas las consideraciones de los siete capítulos precedentes son enteramente aplicables a los estudiantes universitarios, quienes encuentran esencialmente las mismas dificultades de comprensión de los conceptos de la química y la física que los de secundaria.

⁸ El psicólogo cognitivo Michael McCloskey publicó en *Scientific American* un artículo con el sugestivo título “*Intuitive Physics*” (número 248, abril 1983), pp. 114-122, que debería ser lectura obligada para todo profesor de Física en formación y, especialmente, para los universitarios. Lo que resta de este prólogo constituye una especie de ensayo para clarificar la naturaleza de este saber, con el ánimo de informar muy sucintamente al docente de física no familiarizado con las investigaciones en enseñanza de las ciencias de las últimas cuatro décadas, que desafortunadamente todavía siguen pasando inadvertidas.

⁹ En el lenguaje natural entendemos por movimiento algo semejante y, a la vez, distinto de lo que entiende el físico en cuanto físico por esa palabra. En el pensamiento científico todo se encuentra en un movimiento continuo, pero su naturaleza difiere si nos referimos a los niveles microscópicos (mecánica cuántica), a los macroscópicos (la experiencia ordinaria) o astronómicos (teoría general de la relatividad). En cambio, para el profano en física casi nada está en movimiento, según el uso que damos habitualmente a esta palabra. Es fácil menospreciar estas dificultades puramente lingüísticas, aunque en este prólogo no nos referiremos a ellas sino que queremos ir más a fondo.

¹⁰ En el epígrafe que abre su obra *Psicología educativa: un punto de vista cognoscitivo*. (Trillas, México: 1982, p. 6) se lee una conocida máxima muchas veces citada: “Si tuviese que reducir toda la psicología educativa a un único principio, enunciaría éste: el factor más importante que influye en el aprendizaje es lo que el alumno ya sabe. Averigüese esto y enséñese en consecuencia”. Si pasamos por alto sutilezas teóricas irrelevantes para nuestros propósitos, el mensaje central de este famoso párrafo es claro: si el profesor no conoce lo que su estudiante tiene en la cabeza y qué le servirá de base a éste para interpretar su discurso, es muy probable que sea malinterpretado.

ocasiones, muy profundamente. Esta discrepancia constituiría la raíz más honda de las dificultades de comprensión de nuestra disciplina experimentadas consuetudinariamente por nuestros estudiantes. Esta tesis condensa el resultado de numerosas investigaciones sobre las interacciones entre el sistema cognitivo humano y el sistema conceptual de la Física. No es posible, en este prólogo, repito, ofrecer una justificación académica de la misma, mínimamente respetable, pues ello requeriría un trabajo de una extensión mucho mayor a la que tiene toda esta obra, y ya hay muchas y muy abundantes (*cfr.* A.B. Arons, *op. cit.* en nota 2). Me limitaré entonces a explicar la tesis al docente de Física, especialmente universitario, que ha estado al margen de esta problemática.

Todos los seres humanos hemos desarrollado en nuestra primera infancia un *saber práctico* muy robusto y confiable sobre cómo mover nuestro cuerpo en el “espacio cotidiano” y sobre cómo hacer que los demás cuerpos (sobre todo, los inanimados, las cosas) se muevan como queremos. Este saber práctico, o lo que antes llamé nuestra mecánica intuitiva, tiene una gran eficacia predictiva para los problemas de la vida cotidiana. ¿Qué relaciones existen entre este saber y el conocimiento científico que posee el físico sobre el mismo ámbito de fenómenos? Una ligera reflexión nos muestra continuidades y rupturas entre uno y otro. El conocimiento científico de alguna manera ha de provenir del saber práctico, tanto desde el punto de vista epistemológico, como en la perspectiva psicológica, aunque dilucidar sus relaciones no ha sido tarea fácil y seguirán corriendo ríos de tinta al respecto. Para ser breve me detendré muy por encima en lo que quizás constituye la distinción esencial entre la mecánica de los físicos y la mecánica intuitiva: la primera constituye un *conocimiento teórico*, la segunda un saber práctico o experiencial.

El saber práctico sobre el movimiento, compartido por todos, consiste esencialmente en un sistema de informaciones sobre el comportamiento de los objetos físicos al que accedemos inconscientemente, integrado con innumerables destrezas sensorio-motrices que, en su mayor parte, se ejecutan automáticamente. En contraste, el conocimiento teórico está constituido por un sistema de enunciados explicativos y predictivos, o, si se quiere, de creencias explícitas o verbalizables, de las que podemos llegar a ser conscientes hasta el punto de poder razonar sobre ellas y desde ellas¹¹.

¹¹ Esta caracterización es válida para el conocimiento teórico, en general, no sólo para el de la física ni para el de la mecánica. Una clarificación sencilla y muy accesible sobre el concepto general de teoría, sobre el concepto de teoría explicativa (o teoría científica) y de teoría práctica se encuentra en el breve libro de T.W. Moore, *Introducción a la teoría de la Educación* (Alianza,

Es decir, el conocimiento teórico puede ser analizado como un conjunto de estructuras o sistemas conceptuales, mediante los cuales somos capaces de explicar lógicamente lo que sucede o podría llegar a suceder en el futuro subsumiendo los casos particulares a principios generales y esquemáticos. Así, pues, y volviendo al tema, el saber teórico sobre el movimiento tiene como propósito comprender por qué las cosas que vemos se mueven como se mueven, a partir de principios universales, aplicables a cualquier cuerpo en cualquier situación.

Desde luego este “saber-en-la-acción”, que nos permite, por ejemplo, dosificar inconscientemente el esfuerzo corporal de acuerdo con el tamaño del cuerpo que quiero mover, conduce a las mismas predicciones que el físico obtendría al modelar intencional y teóricamente esas situaciones, empleando sus herramientas conceptuales y matemáticas. Pero los historiadores de la ciencia han documentado otras maneras de interpretar teóricamente el saber práctico sobre el movimiento (que al parecer, esencialmente, compartiríamos todos los miembros de nuestra especie en virtud de nuestra común arquitectura cognitiva). Me refiero, claro está, a las teorías antiguas y medievales sobre el movimiento que siguieron la estela de la propuesta por Aristóteles en el siglo IV a.C., quien, según Halloun y Hestenes, fue el primer pensador que sistemáticamente explicitó nuestra mecánica intuitiva¹². Los historiadores eruditos han sacado a la luz profundas divergencias entre los diferentes “físicos pre-newtonianos” (si se permite el anacronismo). Con todo, es evidente la convergencia en el presupuesto ontológico –sobre la naturaleza de la realidad material– formulado por la escolástica medieval en el célebre axioma: *quidquid movetur ab alio movetur*. Es decir, *cualquier cosa en movimiento* (el móvil), *está siendo movida por otra cosa* (el motor). Sin entrar a los aspectos netamente filosóficos de este principio, pues no se puede entender simplistamente como

Madrid, 1986). Menciono el concepto de “teoría práctica” para llamar la atención del lector sobre la complejidad de los saberes prácticos, desde los cuales también pueden construirse cuerpos organizados de conocimientos conceptuales comunicables.

¹² Cfr. Halloun, I. y Hestenes, D. “Common Sense Concepts about Motion”. *American Journal of Physics*, 53(11), pp. 1056-1065 (1985). En esta revista se publicaron, en la década de los ochenta, varios reportes de estudios semejantes llevados a cabo por profesores universitarios de Física en Estados Unidos, en los que se enfatizó sobre la similitud entre las explicitaciones del saber cotidiano acerca del movimiento en sus estudiantes, con las racionalizaciones pre-newtonianas del mismo. Las replications en otros contextos culturales ofrecieron los mismos resultados (ver, por ejemplo, Boeha, B. “Aristotle, Alive and Well in Papua New Guinea Science Classrooms”. *Physics Education* 25, pp. 280-283; 1990). Sin embargo, los historiadores de la ciencia han protestado justificadamente por el empleo indiscriminado del término “concepciones aristotélicas del movimiento” en la literatura didáctica, que debe considerarse sólo como un modo económico de referirse al fenómeno.

un enunciado de Física *avant-la-lettre*, es claro que constituye un elemento nuclear de nuestro saber práctico sobre el movimiento. Si se lo explicáramos a un lego diría que es puro sentido común, una tonta perogrullada.

El gran debate que ocupó a la comunidad científica, desde los tiempos de Aristóteles, hasta el mismo siglo XVII, fue la naturaleza de ese tal motor en los casos de “movimiento violento” o “movimiento forzado” (lo que hoy llamamos *movimiento de proyectiles*, véase capítulo 1, p. 28). La pregunta que atormentó a los filósofos durante ese belicoso periodo fue: ¿qué es lo que continúa empujando a la flecha hacia adelante, después de haber abandonado el arco? Ahora bien, cuando en nuestros días interrogamos a los estudiantes por lo que hace volar a la pelota de béisbol después de ser bateada, es lógico que sus balbuceos de respuesta se parezcan mucho a las de aquellos. Según Peduzzi y Zylbersztajn, “las *explicaciones causales* de los estudiantes para el movimiento de un proyectil, en general, tienen una notable semejanza con el concepto, o idea de *fuerza impresa*, introducido en el siglo II a.C, por el astrónomo Hiparco, según el cual un proyectil se mueve después de haber cesado el contacto entre el proyectil y el proyectador por una fuerza ‘transmitida’ a dicho proyectil por el proyectador”¹³. Relatan estos autores los desarrollos históricos en torno al concepto que se sucedieron desde entonces, centrándose en el debate acerca de la permanencia o extinción de la fuerza impresa con el paso del tiempo. Por ejemplo, para Avicena (siglo X) esta fuerza constituye una cualidad del móvil, análoga al calor dado al agua por el fuego, que sólo puede ser consumida por la resistencia del medio. En el siglo XIV el francés Jean Buridan teorizó ampliamente en torno a este concepto; fue quien introdujo el término latino *impetus* para esa fuerza motriz (*vis motiva*), concibiéndola como proporcional a la cantidad de materia del cuerpo y a su velocidad. Hubo otros muchos aportes a este multiseccular debate, y fueron muchos los personajes que intervinieron, pero con lo dicho basta para explicar por qué tiene sentido asimilar nuestro saber práctico sobre el movimiento a la física prenewtoniana, a pesar de que, por supuesto, dicho saber, dado su carácter práctico, no se encuentra conceptualizado y organizado como se encuentra en los escritos de Aristóteles, Buridan o en los de juventud del mismo Galileo (ver capítulo 1, nota 1, p. 26). También basta esta somera discusión del tema para entender las razones por las cuales es tan difícil enseñar los conceptos básicos de la dinámica newtoniana a “estudiantes aristotélicos”, estudiantes para quienes el principio históricamente originado en la teoría causal de Aristóteles, *quidquid movetur ab alio movetur*, es mucho más creíble que su opuesto, la primera ley del movimiento de Newton.

¹³ Peduzzi, L. y Zylbersztajn, A. “La física de la fuerza impresa y sus implicaciones para la enseñanza de la dinámica”. *Enseñanza de las ciencias*, 15(3), pp. 351-359 (1997).

En efecto, el paso de uno a otro principio fue uno de las más capitales logros creativos de la mente humana. La historia de la ciencia del movimiento atestigua lo difícil que es romper la inercia mental firmemente anclada en nuestro saber cotidiano, en las innumerables experiencias que hemos tenido con el mundo no inercial que habitamos, hasta construir un nuevo mundo inercial, en el que ya no es absurdo pensar en un movimiento que prosigue *in aeternum* sin intervención de ninguna entidad motriz. El análisis de esta historia, desde el punto de vista de los cambios en las concepciones humanas acerca de la naturaleza de la realidad física y del conocimiento, es un presupuesto esencial para diseñar maneras más eficaces de ayudar a nuestros alumnos a recorrer individualmente en pocos años ese largo camino. El artículo de Peduzzy & Zylbersztajn es uno de los varios que compendian tal análisis, a los que remito al lector interesado¹⁴.

Uno de nuestros *esquemas sensoriomotrices* nos informa que para lanzar un proyectil hemos de impartirle una entidad o cualidad, cuya cantidad puede ser mayor o menor según el esfuerzo corporal realizado. De alguna manera sentimos como si, cuando la bola lanzada sale de nuestras manos, nos hubiéramos descargado de algo y se lo hubiéramos transferido a la bola. Otro esquema sensoriomotriz se pone en acción cuando detenemos un proyectil: si intentamos atraparlo en seco, mientras más velozmente se mueva y mientras más masivo sea, nos infligirá mayor daño corporal; en ese mismo proceso el proyectil impulsará nuestra mano en la misma dirección de su movimiento antecedente, de modo que la cualidad que lo mantenía en movimiento se transfiere a lo que se interponga en su camino.

¹⁴ Entre otros muchos ejemplos, véase R. Osborne, en “Construir a partir de las ideas intuitivas de los alumnos” (en: R. Osborne y P. Freyberg, editores, *El aprendizaje de las ciencias: implicaciones de las “ideas previas” de los alumnos*, 2ª ed., Narcea Ediciones, Madrid, 1995; pp. 74-89). Una investigación reciente, con cuatro personas ciegas de nacimiento y dos que perdieron totalmente la visión a los cinco años, mostró que su saber práctico sobre el movimiento es también aristotélico (Camargo, P. y otros; “Concepciones alternativas sobre reposo y movimiento, modelos históricos y deficiencia visual”. *Enseñanza de las ciencias*, 2007, 25(2), pp. 171-182.) En el capítulo “Hacia una nueva transposición didáctica para la Mecánica Elemental” (en: A.C. Zambrano, editor, *Tendencias del pensamiento educativo científico*, Universidad del Valle, Cali, 2004; pp. 95-111), incluyo una amplia lista de referencias pertinentes a este respecto. En ese trabajo encontrará el lector un desarrollo extenso de las ideas apuntadas en este prólogo, en el contexto de lo que podría llamarse el “problema curricular de la enseñanza de la Física” (¿qué hay que enseñar de Física en cada nivel educativo?), aunque formulado en términos de lo que se denota, en el lenguaje especializado de la educación en ciencias, la “transposición didáctica de la Física”. Esta última expresión técnica se refiere a la transformación de la “Física de los físicos” en contenidos a enseñar en los cursos introductorios de física, teniendo en cuenta no sólo la lógica disciplinar sino también las estructuras cognitivas del estudiante y de los escenarios pedagógicos; este doble juego de estructuras, en efecto, imponen serias restricciones al procesamiento de información y a la producción de significados por parte de los aprendices.

Parece poco probable que las personas sin una instrucción en Física nos preguntemos qué hace mover la pelota de béisbol durante su vuelo. Pero no es demasiado arriesgado imputar a esos dos esquemas, o mejor, a un único esquema con dos caras –que podemos bautizar como “*esquema aristotélico*” en honor de tan ilustre personaje–, la inequívoca tendencia que exhiben nuestros estudiantes a atribuir a los proyectiles, como tal causa, algo muy parecido al *impetus* o “fuerza impresa” de los teóricos del movimiento prenewtoniano. La “cuantificación” realizada por Buridan de su noción de fuerza impresa (recordemos, proporcional al producto de algo similar a la masa por la rapidez) nos permite asimilar al esquema aristotélico lo que ahora llamamos *cantidad de movimiento*¹⁵. Así, pues, la interpretación teórica del saber práctico que este y otros muchos esquemas sensoriomotrices nos proporcionan, acerca del movimiento, sería consistente con la concepción newtoniana del movimiento, supuesto que, en lugar de asimilarla al concepto newtoniano de fuerza, la asimila al concepto cantidad de movimiento.

Ahora bien, como los estudiantes interpretan lo que ven y escuchan desde lo que ya saben, parece entonces razonable conjeturar que, en su primera aproximación a la mecánica newtoniana, entenderán más fácilmente esta última noción que la de fuerza. Pues mientras ésta tiene sentido y cobra significado en el marco de pensamiento inercial, pero no en el marco aristotélico del *quidquid movetur ab alio movetur*, aquella es perfectamente comprensible en este último marco, en el que todavía está situado el estudiante. Es por ello que algunos profesores innovadores han propuesto modificar la manera de presentar didácticamente la mecánica newtoniana. En síntesis, la propuesta consiste en introducir primero la cantidad de movimiento, a modo de toma de conciencia y explicitación de una noción intuitiva ya poseída pacíficamente por el estudiante, para posteriormente introducir progresivamente el significado asociado al significante “fuerza” en el sistema conceptual newtoniano. Por supuesto, el paso de un marco ontológico no inercial al inercial es muy complejo, y requiere una

¹⁵ Los eruditos dirían que el nombre de “*esquema aristotélico*” está mal escogido, pues Aristóteles atribuía la continuación del movimiento violento a la famosa *antiperistasis* (ver Peduzzy y Zylbersztajn, *op. cit.*), pero no encuentro mejor alternativa. A propósito de esta noción, y como una corroboración de las hipótesis sobre el origen cognitivo de la creencia implícita “*movimiento requiere fuerza*”, vale la pena citar a Piaget: “La noción de fuerza [del niño], en particular, da lugar a curiosas observaciones: activa y sustancial, es decir, ligada a cada cuerpo e intransmisible, explica, como en la física de Aristóteles, el movimiento de los cuerpos por la unión de un disparador externo y de una fuerza interior, ambos necesarios: por ejemplo las nubes las lleva el viento, pero ellas mismas hacen viento al avanzar. Esta explicación, que recuerda el famoso esquema peripatético del movimiento de los proyectiles, la extiende el niño también a estos últimos. (Seis estudios de Psicología. Bogotá: Planeta Colombiana, 1986. Cita en la p. 47. *Cursivas mías*).

“reestructuración radical” del “modelo del mundo” del estudiante, que no puede producirse en media hora de explicación¹⁶. El hecho es que en esta reconstrucción didáctica de la física se plantea introducir la fuerza como la rapidez de cambio de la cantidad de movimiento, siguiendo por cierto al mismo Newton en sus *Principia*. Hasta donde llega mi conocimiento, el grupo de investigación dirigido por el profesor Roger Osborne (codirector del *Learning in Science Project* de la Universidad de Waikato, Nueva Zelanda, 1979-1984) fue el primero en proponer esta nueva ruta de enseñanza. Los ensayos que el grupo ha hecho de su propuesta parecen indicar que abre caminos promisorios para superar las dificultades conceptuales en cuestión¹⁷.

En el trabajo teórico al que me referí en la nota 14 elaboré las reflexiones anteriores, con el objetivo de acoger y desarrollar la propuesta de Osborne en el sentido de reestructurar didácticamente los contenidos de la Física para hacerla más amigable al usuario (*user-friendly*), más accesible al sistema cognitivo que tiene el estudiante, y cuya transformación queremos inducir con nuestra enseñanza. Pues bien, el trabajo que el lector tiene ahora en sus manos constituye un paso más en esa dirección. Su objetivo es facilitar la enseñanza de la mecánica siguiendo la innovadora trayectoria a la que me acabo de referir, si el docente considera que los argumentos expresados son suficientemente convincentes para poner en marcha una innovación de esta naturaleza en su didáctica.

A pesar de saber que cambiar las prácticas docentes es, tal vez, más difícil que comprender los conceptos newtonianos, lo que me mueve a poner por escrito estas ideas son los resultados positivos que he obtenido en mi experiencia con este enfoque y usando versiones previas de este material. Los profesores inveteradamente nos quejamos de que nuestros estudiantes no nos entienden, pero nos es difícil reconocer allí un problema que puede ser abordado con mentalidad científica. Sin embargo, también hay que reconocer que no es muy claro lo que esta última pretensión significa, teniendo en cuenta las abismales diferencias entre el mundo físico y el humano. Por ello, mi aspiración es apenas que los lectores, interesados en

¹⁶ La frase está llena de tecnicismos que no he podido evitar para ser conciso. En pocas palabras, se trata de efectuar una especie de revolución mental en el estudiante. Lo que sí es importante que el lector retenga es que es extremadamente ingenuo esperar que un modelo de enseñanza puramente expositivo, siguiendo las pautas convencionales, pueda producir esa revolución conceptual (cfr. B. A. Arons, “Generalizations to be Drawn from Results of Research on Teaching and Learning”, en: C. Bernardini y otros (Eds.), *Thinking Physics for Teaching*, Plenum Press: New York, 1995, pp. 1-7).

¹⁷ “En nuestros intentos de enseñar el concepto de cantidad de movimiento a alumnos entre los once y los trece años, hemos encontrado escasas dificultades. Los profesores nos han dicho que los estudiantes ‘parecían tener esa idea ya antes’” (op. cit. en nota 14, p. 88).

que sus estudiantes le comprendan un poco mejor, utilicen este material, si lo juzgan oportuno y de la manera en que lo estimen oportuno; en caso de que algunos lo encuentren útil, me lo hagan saber. Quizás este trabajo mancomunado nos permita afinar poco a poco nuestro repertorio de herramientas para ayudar a nuestros jóvenes a convertirse en habitantes del extraño mundo de Sir Isaac Newton.

GUÍA Y AGRADECIMIENTOS BIBLIOGRÁFICOS

Sería fabuloso poder dar un explícito reconocimiento a todas las personas y autores que han contribuido, sabiéndolo o sin saberlo, a dar contenido y forma a este material. Las referencias contenidas en las notas a pie de página que he incluido en el prólogo no son, en absoluto, representativas de la documentación que ha alimentado mis reflexiones, y que debería enlistar para hacer justicia a la enorme cantidad de trabajo ajeno sobre el que se cimienta el mío propio. El carácter didáctico de esta publicación permite eludir esa obligación, pero al precio de tener que ofrecer al docente, que desea introducirse en la literatura educativa que nutrió el trabajo cuajado en esta obra, una mínima orientación para penetrar en esta selva bibliográfica. Para que el lector se dé cuenta de que la última expresión no es una simple metáfora, lo invito a que entre en el sitio <http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/>. Allí encontrará la actualización, hasta marzo 23 de 2009, de la recopilación de estudios sobre la comprensión de los conceptos científicos por parte de los estudiantes antes de ser recibidos en nuestras aulas, sobre la evolución de esa comprensión como resultado de nuestro trabajo y, en general, sobre los diferentes aspectos de la educación en ciencias. Contiene 8.342 entradas de trabajos publicados luego del arbitraje por pares, bien en revistas especializadas de reconocimiento internacional, tanto en el campo específico de la educación en ciencias (e.g., *Journal of Research in Science Education*, *Science Education*, *International Journal of Science Education*, *Physics Education*, *The Physics Teacher*, *Journal of Biological Education*, etc.), como en otros campos científicos consolidados, en especial, diversas ramas de la psicología interesadas en los fenómenos educativos (e.g., *Cognition and instruction*), o bien, en memorias de congresos. También se incluyen, desde luego, publicaciones esporádicas en revistas generales en cada una de las áreas científicas (e.g., *American Journal of Physics*, *Physics Today*) y un copioso número de libros de investigación y sistematización, entre los que destacan, por su carácter enciclopédico y cosmopolita, los dos extensos volúmenes del *International Handbook of Science Education*, publicado en 1998 (ya en 1994 se había publicado el *Handbook of Research on Science Teaching and Learning* por parte de investigadores estadounidenses).

Es posible que, ante tal plétora de trabajos, el docente en Física que me ha acompañado hasta aquí considere que no tiene sentido dar un paso más en esta tupida selva. Pero antes de tomar esa decisión, le aconsejo echar un vistazo al importante artículo divulgativo *Research on Conceptual Understanding in Mechanics* de la profesora Lillian C. McDermott, del *Physics Education Group* de la University of Washington (publicado en *Physics Today*, 37(6), 24-32, 1984). Allí podrá constatar que la amalgama entre investigación educativa e investigación científica que un creciente número de docentes universitarios de Física, preocupados sinceramente por la comprensión de sus estudiantes, ya para ese entonces había producido resultados valiosos para usted, que también comparte la misma preocupación pero cuyos intereses investigativos están en otra parte. Otro trabajo de la misma autora, de 1998, accesible en línea (<http://www.physics.ohio-state.edu/~jossem/ICPE/C1.html>), actualiza la anterior revisión. En estos dos trabajos, en especial el segundo, se encuentran prácticamente todas las referencias a la literatura primaria en inglés consultadas sobre las dificultades conceptuales de los estudiantes en mecánica, por lo cual es innecesario transcribirlas¹⁸.

Aunque más escasos, no son pocos los trabajos que intentan ir más allá del diagnóstico del conocimiento inicial del estudiante, de la constatación de la persistencia de los errores conceptuales ante la enseñanza expositiva, incluso de alta calidad (persistencia generalmente invisible a los docentes pues los exámenes suelen valorar tan sólo la habilidad algorítmica), y de la teorización sobre el porqué tenemos tan magros éxitos como enseñantes,

¹⁸ *Invito al lector interesado en asomarse al trasfondo conceptual que sustenta este trabajo (la punta de un iceberg sostenida por una enorme estructura oculta a la vista) a consultar otro de mis trabajos anteriores publicados en Colombia (además del reseñado en la nota 14): “Investigación sobre dificultades conceptuales en el aprendizaje de las ciencias”. Publicado en: Educación y formación del pensamiento científico (A.C. Zambrano, Ed., Icfes, Bogotá, 2003), pp. 81-95. El objetivo que perseguí en el mismo fue apuntar los consensos a los que parece haber llegado la comunidad de investigadores en esta área acerca de la existencia de los obstáculos “cognitivos” que se interponen en el aprendizaje de las ciencias, de los cuales son un caso particular los abordados en la presente obra. Pero los disensos son todavía muy profundos, como lo atestigua la proliferación de designaciones (e.g., concepciones alternativas, preconceptos, concepciones erróneas –misconceptions–, conocimientos previos, ciencia intuitiva, etc.). En mi opinión, esta discusión terminológica no tiene sentido, pues responde a una pregunta mal planteada. No parece que la “creencia implícita aristotélica” que se pretende desestabilizar mediante el modelo de enseñanza de la dinámica que propongo en esta obra, y que se condensa en el axioma *quidquid movetur ab alio movetur*, sea un fenómeno cognitivo de la misma naturaleza que la tendencia de los niños de primaria a clasificar los seres vivos de forma muy diferente a la de los adultos. Por ello deberíamos olvidar el problema de encontrar una denominación a gusto de todos los investigadores común para todos los obstáculos y dificultades conceptuales en el aprendizaje de las ciencias naturales.*

para ofrecer recomendaciones prácticas teóricamente fundadas. Pero los docentes acogen esas recomendaciones con displicencia (cuando no con franca hostilidad), por muchas y explicables razones, aunque también con algunas sinrazones (ver J.M. Campanario, “Contra algunas concepciones y prejuicios comunes de los profesores universitarios de ciencias sobre la didáctica de las ciencias”, *Enseñanza de las ciencias*, 21(2), 2003, pp. 319-328). De hecho, el libro que hoy tiene en sus manos constituye un modesto intento en esta dirección.

Para concluir esta somera reseña bibliográfica, he de mencionar nuevamente uno de los trabajos donde el lector podrá encontrar una gran cantidad de recomendaciones para repensar y, si es del caso, mejorar su práctica docente, el monumental libro de Arnold B. Arons (1916-2001), *Teaching Introductory Physics*, por otra parte, una estupenda puerta de entrada a toda la literatura sobre investigación en enseñanza y aprendizaje de la Física. Se podrían añadir muchos más nombres de docentes en Física que han hecho esfuerzos para transmitir a sus colegas su “saber práctico sobre la enseñanza de la Física”. Pero ya es hora de entrar en materia.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES E INSTITUCIONALES

Este libro se realizó, en parte, gracias al apoyo de Colciencias, proyecto de investigación *La historia de las ciencias en los textos universitarios*¹⁹. El profesor Alfonso Claret Zambrano, director del proyecto, contribuyó, junto con los profesores Edwin García y Robinson Viáfara, a los análisis epistemológico, histórico, educativo y textual que concurrieron en el diseño del texto. Estas notas han sufrido un largo proceso, habiendo sido utilizadas en sucesivas versiones en los cursos de Física I (Mecánica newtoniana) para estudiantes de las carreras de Física, licenciatura en Matemática-Física, otras carreras de ciencias y, por supuesto, todas las ingenierías, ofrecidos por el autor en el Departamento de Física de la Universidad del Valle. Mi agradecimiento especial a todos los estudiantes que han puesto lo mejor de sí para estudiarlo, también por sus constructivas críticas y elogiosos comentarios. El texto también fue objeto de trabajo en el curso “La historia de las ciencias en la producción de textos” de la licenciatura en Educación Básica, énfasis en ciencias naturales y educación ambiental, ofrecido por el Instituto de Educación y Pedagogía de la misma Universidad. Igualmente, a los docentes Zoritz Lugó y Alexander Bonilla, especialmente por su trabajo en la producción de las ilustraciones

¹⁹ Proyecto cofinanciado por Colciencias-Universidad del Valle, código 1106-1114553 RC 258-2003. El informe final de investigación de este proyecto contiene una relación mucho más completa (sin ser tampoco exhaustiva) de la literatura sobre historia y epistemología de la física y sobre la didáctica de las ciencias experimentales sobre la que se construyó el texto.

y por la discusión de los conceptos. Por último, a mis amigos y colegas del Departamento de Física de la Universidad del Valle con quienes he compartido los avatares de la dura tarea de enseñar Física, especialmente a los profesores Álvaro Perea y Jairo Roldán: sus iluminadoras discusiones sobre la Física, su historia, su aprendizaje y su enseñanza, contribuyeron a perfilar estas ideas.