

# ENSAYO Y ERROR RESTRINGIDO Y ORIENTADO. ESQUEMA DE UNA LOGICA DEL DESCUBRIMIENTO CIENTIFICO\*

ALEJANDRO CASSINI

## 1. Introducción

En la situación actual podemos constatar la existencia de un consenso básico entre los partidarios de las lógicas del descubrimiento científico. Consta de dos puntos esenciales: i) el descubrimiento científico no es el producto de un *insight* repentino ni de una intuición creadora, esencialmente irracional, y reservada a la mentalidad del genio; ii) el descubrimiento científico es el resultado de un proceso de búsqueda racional, y por tanto, involucra la aplicación de al menos algunas reglas lógicas y metodológicas. No se sigue de estos dos puntos que el descubrimiento de una hipótesis científica novedosa sea una actividad completamente racional exenta de todo aspecto intuitivo, pues probablemente ninguna actividad humana se pueda caracterizar como racionalmente pura. Tampoco se sigue que el proceso de descubrimiento científico sea reducible a una rutina que consista en la mera aplicación mecánica de algún algoritmo. Simplemente se afirma que la búsqueda de nuevas hipótesis en el campo de la ciencia, en tanto es una actividad parcialmente racional, se halla sujeta a ciertas reglas de algún tipo determinado.

La existencia de una lógica del descubrimiento científico está lejos de ser un hecho autoevidente. La presencia de numerosos casos de serendipia o descubrimiento casual (Roberts [1989]), por ejemplo, parece indicar que el azar y la irracionalidad desempeñan un papel importante en el hallazgo de las hipótesis científicas. Por otra parte, son bien conocidos los cuestionamientos de la epistemología clásica, representada por Popper, Reichenbach y muchos otros (cf. Lamb [1991], cap. II), según la cual no existen reglas generales de descubrimiento. El cargo de la prueba, entonces, recae sobre los partidarios de las lógicas del descubrimiento. Todo el que sostiene la existencia de métodos de descubrimiento científico está obligado a proporcionar un conjunto de reglas positivas aplicables a la búsqueda de hipótesis y teorías. Además, debe mostrar con ejemplos concretos que dichas reglas son eficaces tanto para la reconstrucción de casos históricos de descubrimiento como para la generación de hipótesis novedosas.

\* Este trabajo fue realizado como parte de un proyecto colectivo de investigación sobre "Descubrimiento y creatividad en ciencia" subsidiado por UBACYT y dirigido por los profesores Gregorio Klimovsky y Félix Schuster. Agradezco a todos los participantes de este proyecto por sus comentarios a una versión anterior de este artículo.

Los partidarios de las lógicas del descubrimiento mantienen diferencias muy significativas tanto en su manera de concebir las reglas heurísticas particulares como en su concepción general de la lógica del descubrimiento científico. Aquí no nos ocuparemos de revisar esas diferencias. Resulta indispensable, sin embargo, establecer ciertos requisitos mínimos que deben cumplir las reglas de descubrimiento. Podemos limitarlos a dos: i) deben ser generales, es decir, aplicables al máximo número posible de casos de descubrimiento y en el mayor número posible de teorías, disciplinas y ciencias; ii) deben poder emplearse en la generación de novedades, o sea, ser útiles para orientar la búsqueda de hipótesis desconocidas. El primer requisito no implica que las reglas sean universales, válidas para toda teoría y para toda ciencia en cualquier circunstancia, pero excluye el caso de que sean *ad hoc* y sólo puedan aplicarse a un descubrimiento particular o a un conjunto reducido de descubrimientos acotado en tiempo y lugar. El segundo requisito, por su parte, no implica que se deba poseer un método simple y más o menos automático para descubrir teorías científicas. No obstante, se sigue de él que un conjunto de reglas que sólo sirva para racionalizar *a posteriori* casos ya conocidos de hallazgos científicos no resulta suficiente para constituir una auténtica lógica del descubrimiento.

Las reglas de descubrimiento no necesitan ser universales, ni infalibles, ni independientes de todo contenido cognoscitivo (como tampoco lo son, por otra parte, las reglas de justificación o validación de teorías). Pero si han de formar parte de una metodología heurística útil, deben al menos ser generales y capaces de orientar la búsqueda de hipótesis desconocidas.<sup>1</sup>

En este trabajo propondremos el esquema de una lógica del descubrimiento científico que acepta la existencia de principios heurísticos generales y los combina con el razonamiento retroductivo y el método de ensayo y error. El resultado de esta síntesis de elementos diversos es un proceso que denominamos ensayo y error restringido y orientado, el cual satisface los dos requisitos mínimos antes establecidos.

## 2. Deductivismo

Según la posición deductivista, la lógica del descubrimiento científico no emplea reglas lógicas diferentes de las de la teoría clásica de la deducción, ni tampoco reglas metodológicas específicas del contexto de descubrimiento. El descubrimiento de teorías científicas no difiere en su estructura lógica de

<sup>1</sup> Nickles (1990) sostiene un enfoque similar, pero postula requisitos más débiles que los de generalidad y novedad.

los procesos de justificación o validación de tales teorías. Lo que caracteriza a la lógica del descubrimiento es la existencia de un conjunto de principios heurísticos generales que sirven como base para la deducción de las hipótesis específicas que luego formarán parte de una determinada teoría.

Zahar (1989) es un representante típico de esta posición. Siguiendo en parte a Lakatos, Zahar sostiene que todo programa de investigación científica posee una heurística que gobierna la construcción de teorías particulares dentro de cada programa general. La heurística positiva de un programa consiste en la elección de un conjunto coherente de principios a partir de los cuales se ha de operar deductivamente. Estos son principios muy generales que “subyacen no sólo a la ciencia y la metafísica deductiva, sino también a las decisiones cotidianas” (Zahar [1989], p. 13). Son siempre enunciados metateóricos, por lo cual la lógica del descubrimiento científico es deductiva sólo en este metanivel.

Zahar no es demasiado claro y explícito ni en la caracterización ni en la clasificación de estos principios. Acepta que existen principios comunes a todos los programas de investigación y otros menos generales que son propios de programas específicos. Todos ellos son esencialmente prescriptivos, o bien se pueden reformular como prescripciones. Se trata de enunciados filosóficos en amplia medida no técnicos, que pueden considerarse innatos y genéticamente condicionados. Forman parte del conocimiento de sentido común que es previo al surgimiento de la ciencia. La explicación del surgimiento de tales principios debería hacerse, en principio al menos, en términos de la evolución biológica de la especie humana. Zahar les asigna una doble función: sirven tanto para ajustar las hipótesis ya conocidas a los requisitos heurísticos como para “generar nuevas hipótesis” (Zahar [1989], p. 23). Esta última los convierte en auténticas reglas de descubrimiento, de acuerdo con nuestro criterio. Después de enunciar sintéticamente estos principios trataremos de evaluarlos constatando si realmente son capaces de dar lugar a nuevas hipótesis de manera puramente deductiva.

Existen, según Zahar, dos principios generales fundamentales que son comunes a todo programa de investigación en ciencias empíricas. Estos son el principio de correspondencia y el principio de adaptación de las teorías a los hechos. El principio de correspondencia preserva la continuidad entre diferentes teorías de un mismo programa porque asegura que una de ellas contiene a la otra como caso límite. En general, afirma que las leyes de una teoría  $T$  tienden a ser idénticas a las de la teoría sucesora  $T'$  bajo ciertas condiciones, en particular cuando un cierto parámetro  $P$  tiende a ser nulo. Así, si  $\Phi = 0$  representa una ley de  $T$  y  $\Omega = 0$  una ley de  $T'$ , sucederá que  $(\Phi = 0)$  tiende a  $(\Omega = 0)$  si y sólo si  $P$  tiende a cero; y en el límite ocurrirá que  $(\Phi = 0) = (\Omega = 0) \leftrightarrow (P = 0)$ . Los ejemplos más conocidos de aplicación de

este principio se encuentran en la física. Así, la dinámica de la relatividad especial tiende a ser idéntica a la dinámica newtoniana cuando el parámetro  $v^2/c^2$  tiende a cero. Por su parte la mecánica cuántica no relativista se volvería idéntica a la mecánica clásica si la constante de Planck  $h$  fuera nula (recordemos que este parámetro, a diferencia del anterior, no es variable).

El principio de adaptación, por su parte, excluye el carácter *ad hoc* de las hipótesis empíricas. Zahar sostiene que una teoría T no es *ad hoc* respecto de un hecho E si y sólo si T explica E y T ha sido generada por medio de una heurística H que es independiente de E. Esto significa que E no ha sido empleado en la construcción de dicha teoría y, por tanto, es un hecho auténticamente novedoso para ella. Esta relación entre H, T y E tiene para Zahar un carácter objetivo (Zahar [1989], p. 16).

Existen, además, otros principios heurísticos generales que Zahar se limita a mencionar sin definirlos con toda precisión (Zahar [1989], pp. 23-25). Ellos son: el principio de identidad, entendido a la manera de Meyerson como búsqueda de una explicación unificada de la diversidad fenoménica derivándola de un conjunto reducido de leyes. El principio de proporcionalidad de los efectos a sus causas, según el cual un incremento en las causas produce un incremento proporcional en los efectos. El principio de razón suficiente, en su versión leibniziana. El principio de simplicidad, interpretado en forma amplia. Y, por último, una idea intuitiva de probabilidad, la cual nos lleva a suponer que en la naturaleza no ocurren largas secuencias de coincidencias porque son muy improbables. Asociado con esta idea se encuentra el principio de rechazo de las teorías conspirativas, es decir, aquellas que postulan la existencia de causas profundas junto con factores compensatorios que siempre impiden que estas causas se manifiesten en el nivel de los fenómenos.

Es indudable que todos estos principios son altamente vagos y ambiguos. Zahar lo reconoce explícitamente y agrega que probablemente si se intentara precisarlos a todos se obtendría un conjunto inconsistente (Zahar [1989], p. 33). Esto se debe al carácter de sentido común de tales principios. La heurística de un determinado programa de investigación consiste en seleccionar un conjunto coherente de principios, hacerlos más precisos (sobre todo darles una formulación matemática) y complementarlos con principios heurísticos específicos. Ejemplos de estos últimos son el principio de equivalencia entre inercia y gravitación, y el principio de covariancia general que Einstein empleó en la construcción de la Relatividad General.<sup>2</sup>

Creo que hay dos críticas fundamentales que pueden hacerse al deductivismo de Zahar. La primera se refiere al carácter de los principios y la otra

<sup>2</sup> Zahar (1989), pp. 265-282, los analiza con detalle, pero aquí nos ocuparemos de otros principios específicos tomados del ámbito de la física de partículas elementales.

a la condición de deducibilidad de la heurística. Dejando de lado la vaguedad con que los principios se hallan formulados, algunos de ellos parecen empíricamente falsos. Así, por ejemplo, la proporcionalidad entre causas y efectos no se cumple en los sistemas caóticos, ya que en ellos una pequeña variación en las causas produce grandes variaciones en los efectos, que frecuentemente se incrementan de manera exponencial (cf. Ruelle [1991]). Ya en 1877 Maxwell había rechazado este principio.<sup>3</sup> Por otra parte, muchas teorías científicas vigentes son explícitamente conspirativas, como es el caso de la teoría del confinamiento de los quarks, que explica el hecho de que éstos nunca aparezcan en estado libre postulando una fuerza cuya intensidad tiende a volverse infinita cuando la separación entre quarks ligados aumenta hasta alcanzar el diámetro de un núcleo atómico (es la llamada “libertad asintótica y esclavitud infrarroja”).<sup>4</sup> Finalmente, la versión corrientemente aceptada de la mecánica cuántica parece violar el principio de razón suficiente, ya que admite la existencia del azar objetivo para los sucesos singulares.<sup>5</sup>

La deducibilidad plantea un problema más serio desde el punto de vista heurístico. De acuerdo con la posición de Zahar, una vez que un programa de investigación ha elegido los principios heurísticos generales y especiales necesarios, los ha refinado y formulado precisamente y los ha hecho consistentes entre sí, será posible descubrir hipótesis científicas novedosas por simple deducción a partir de este conjunto de principios heurísticos. Hay varias razones para dudar de que esto sea realmente posible. La primera es la extrema generalidad de los principios, incluso de los específicos. Tomados por sí mismos los principios generales parecen carecer de contenido empírico, y por ello no implican ninguna hipótesis fáctica. Los principios específicos poseen contenido empírico, pero son de extrema generalidad, por lo que más bien implican toda una familia de hipótesis (incluso infinita). Para deducir de este conjunto heurístico una hipótesis determinada, excluyendo a todas las otras, sería necesario complementarlo con una gran cantidad de informa-

<sup>3</sup> “Hay otra máxima (...) que afirma que ‘causas similares producen efectos similares’. Esto sólo es verdadero cuando pequeñas variaciones en las circunstancias iniciales producen sólo pequeñas variaciones en el estado final del sistema. En una gran mayoría de los fenómenos físicos se satisface esta condición; pero hay otros casos en los cuales una pequeña variación inicial puede producir un cambio muy grande en el estado final del sistema” (Maxwell [1877], § 19, pp. 13-14).

<sup>4</sup> Sobre esta teoría cf. Fritzsche (1983), pp. 126 y ss.; Coughlan y Dodd (1991), caps. 31-34.

<sup>5</sup> Cf. por ejemplo, la exposición de Shimony (1989), p. 374. Los sucesos objetivamente indeterminados son los resultados de procesos de medición efectuados sobre un sistema físico cuyo estado es indefinido. Es bien sabido que el problema de la medición en física cuántica no admite una única solución, por lo que no hay consenso unánime acerca de la necesidad de postular el azar objetivo. No obstante, ésta es la interpretación que prevalece entre la mayor parte de los físicos.

ción empírica sobre leyes y condiciones iniciales. Aun así, no implicarían una hipótesis particular, sino probablemente un conjunto más restringido de hipótesis. No se advierte de qué manera se podría seleccionar una y excluir a las demás. Incluso si éste fuera el caso, la gran complejidad del conjunto de premisas haría verdaderamente difícil exponer de manera deductiva la cadena de inferencias que llevaron al descubrimiento de cada hipótesis. La deducción de hipótesis novedosas plantea un problema adicional que parece insuperable para la posición deductivista. Es el caso de las hipótesis teóricas que postulan la existencia de una nueva clase de entidades desconocida hasta ese momento, entidades que generalmente están dotadas de nuevos tipos de propiedades. Puesto que el conjunto de principios heurísticos, por amplio que fuere, no contiene ningún enunciado acerca de estas entidades y propiedades, ni tampoco términos para nombrarlas, no puede implicar lógicamente a ningún enunciado específico sobre ellas. Tenemos un claro ejemplo de todo esto en la invención de la teoría de los quarks, en la cual se postula que todos los hadrones están compuestos de partículas elementales (los quarks) dotadas de carga eléctrica fraccionaria y de carga de color. Hasta que se propuso esta hipótesis no se conocían partículas de este tipo, ni cargas fraccionarias o de color. A menos que toda esta información se introduzca entre las premisas, no podrá obtenerse deductivamente. Por tanto, a lo sumo se podrá lograr una reconstrucción *a posteriori* de este descubrimiento, en la cual la nueva información se introduce una vez que ya ha sido descubierta.

### 3. Restricciones a la invención de hipótesis

Las críticas que hemos indicado muestran que el requisito de deducibilidad estricta es demasiado fuerte y debe abandonarse. Ello no implica afirmar que ninguna hipótesis pueda descubrirse de manera puramente deductiva. Hay muchos ejemplos de predicciones teóricas obtenidas de esta manera. En cambio, lo que resulta insostenible es la tesis de que todo descubrimiento se hace por deducción. Creo, sin embargo, que los principios heurísticos de Zahar pueden mantenerse independientemente de su concepción deductivista. Son admisibles como principios que limitan y constriñen el número de hipótesis que se proponen como potenciales explicaciones de un fenómeno que se presenta como anómalo. Ningún conjunto de hipótesis heurísticas implica lógicamente a una hipótesis novedosa, a menos que ésta ya esté contenida en el conjunto. Sin embargo, las hipótesis heurísticas generales pueden desempeñar la función de restringir el ámbito en el cual han de buscarse las nuevas hipótesis explicativas de un fenómeno, además de sugerir las características generales de la hipótesis buscada.

Un problema persistente de la lógica del descubrimiento es el de limitar el número de hipótesis que se pueden proponer frente a un problema empírico. En principio, existe una variedad indefinidamente grande (aunque no necesariamente infinita si se eliminan las hipótesis triviales) de hipótesis lógicamente posibles que podrían dar cuenta de un mismo fenómeno, haciéndolo explicable o comprensible. Evidentemente, ningún científico puede considerar o revisar todas estas hipótesis. El método de la retroducción de Hanson es particularmente sensible a esta dificultad.

Hanson, basándose en ideas de Peirce, propuso en 1958 el más conocido de los esquemas no deductivos ni algorítmicos de descubrimiento, al que denominó retroducción (Hanson [1958] y [1958a], cap. 4).<sup>6</sup> El modelo retroductivo en su versión más simple tiene la siguiente forma:

- 1) Se observan ciertos hechos sorprendentes E.
- 2) Si la hipótesis H fuera verdadera, E no sería sorprendente (pues H explica a E).
- 3) Por tanto, hay buenas razones para proponer a H como verdadera.

Aclaremos brevemente cada enunciado. 1) Los hechos E son sorprendentes en relación con las teorías científicas vigentes en un momento dado, y no se los puede explicar porque son incompatibles con algunas de ellas. 2) H puede ser tanto una hipótesis nueva como la modificación o corrección de una hipótesis ya conocida con la cual E resulta incompatible. 3) La conclusión no se sigue lógicamente de las premisas. La retroducción es un razonamiento plausible, semejante en algunos aspectos lógicos a la inducción. Permite concluir únicamente que es razonable suponer que H es verdadera, y por consiguiente, que es valioso considerarla y trabajar con ella para comprobar si se obtiene una teoría consistente que explique E.

Esta es una versión demasiado simplista del método retroductivo. Frecuentemente no habrá una única hipótesis H que permita explicar el hecho E, sino varias hipótesis alternativas  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ , etc. Una versión más compleja y realista de la retroducción deberá tener en cuenta la existencia de múltiples hipótesis potencialmente explicativas. En ese caso, es necesario considerar a cada H como un candidato a hipótesis explicativa de E. Cada hipótesis candidata se debe analizar separadamente, de modo que se vayan eliminando como explicaciones potenciales de E todas las que sean insatisfactorias. En este proceso de eliminación intervienen diversos criterios no factuales, como

<sup>6</sup> Achinstein (1983), p. 5, señala que el modelo de Hanson también puede emplearse para caracterizar un concepto de evidencia, de acuerdo con el cual un hecho E constituye evidencia para una hipótesis H cuando la verdad de H permite explicar correctamente a E. Esta no fue la intención de Hanson, y sin duda tal concepto de evidencia es muy discutible.

la consistencia de la teoría como un todo y la simplicidad de las hipótesis propuestas. En principio, se descartan las hipótesis manifiestamente incompatibles con la teoría T que sirve de base a la explicación. Luego, se elige la más simple de las hipótesis compatibles con T que explique E. Sólo cuando la búsqueda de estas últimas ha fracasado se procede a considerar a las hipótesis que implican modificar T para mantener la consistencia. Es obvio que puede haber conflicto en la aplicación de los criterios no factuales y, por consiguiente, no hay garantías de que este proceso culmine en la postulación de una única hipótesis explicativa. Podría haber varias igualmente plausibles, en cuyo caso la retroducción debe concluir afirmando que hay buenas razones para desarrollar todas esas hipótesis como posibles explicaciones alternativas del mismo fenómeno.

La lógica de este modelo de retroducción exige la consideración y análisis de todas las hipótesis potencialmente explicativas de un fenómeno. Pero es evidente que éste es un procedimiento poco práctico o directamente irrealizable. De hecho los científicos sólo toman en cuenta un número reducido de hipótesis plausibles en el momento de buscar la explicación de un fenómeno sorprendente o anómalo. Muchas veces encuentran la hipótesis adecuada sin emplear el proceso de eliminación de todos los restantes explicadores potenciales. La mayor parte de estas hipótesis nunca llegan a formularse y mucho menos a eliminarse después de pasar por algún tipo de examen. El dominio de las hipótesis posibles se encuentra restringido de manera tal que en cada situación el científico debe buscar la candidata a explicación dentro de un ámbito finito y bastante bien acotado.

Evidentemente, en el momento de inventar una hipótesis operan principios que restringen las posibilidades de una manera más o menos eficaz. Aquí es donde intervienen los principios heurísticos generales, que desempeñan una función tanto negativa como positiva. Tales principios, dicho de manera rápida, desalientan la formulación de hipótesis que son incompatibles con ellos y promueven la búsqueda de hipótesis que los satisfacen. Por consiguiente, el científico nunca necesita examinar todas las hipótesis posibles que podrían explicar un hecho anómalo, sino que en primera instancia sólo busca aquellas que satisfagan los principios heurísticos generales, en especial los que son propios de su disciplina. Por cierto que estos principios son falibles y revisables, de modo que después de reiterados fracasos en la búsqueda, es posible proponer hipótesis que violen algunos principios generales. Por otra parte, la satisfacción de estos principios no garantiza el descubrimiento de una hipótesis en particular, puesto que el ámbito de posibilidades nunca se restringe tanto como para hacer unívoca la elección.

Uno de los mejores ejemplos de principios heurísticos generales lo proporcionan las leyes o principios de conservación en la física. Estos son

leyes muy generales, pero con contenido empírico, que no pertenecen a una teoría determinada, sino que valen para todos los fenómenos físicos y, por tanto, para toda teoría física. Establecen que una cierta magnitud permanece idéntica a lo largo de cualquier interacción que experimente un sistema físico. Las leyes de conservación de la energía, de la carga eléctrica y del momento lineal y angular son los principios clásicos mejor conocidos. Existen muchos otros, algunos de los cuales, como la conservación del número bariónico y leptónico, sólo se aplican en el nivel microfísico.<sup>7</sup> Las leyes de conservación se consideran como principios de imposibilidad física, es decir, cualquier teoría que viole alguno de estos principios describe un proceso que es físicamente imposible. De esta manera, confieren un significado preciso al concepto de posibilidad física.

La conservación de la carga eléctrica permite ofrecer una ilustración simple. En cualquier interacción entre partículas elementales la suma de las cargas eléctricas de las partículas incidentes debe ser igual a la de las partículas emergentes. Ninguna carga neta negativa o positiva puede crearse o aniquilarse. Por esta razón toda partícula nueva sólo puede crearse junto con su correspondiente antipartícula. Por consiguiente, si se detecta la aparición de una partícula cargada, el principio de conservación de la carga nos indica que debemos buscar la antipartícula poseedora de la carga opuesta.

Los científicos son particularmente resistentes a proponer hipótesis que violen las leyes de conservación. Una de las razones de ello es que casi todas estas leyes están asociadas con simetrías fundamentales del espacio y el tiempo. Así, la homogeneidad del espacio (la invariancia respecto de cualquier traslación) implica la conservación del momento lineal; la isotropía del espacio (la invariancia respecto de cualquier rotación) implica la conservación del momento angular; y la homogeneidad del tiempo (invariancia respecto de cualquier traslación temporal) implica la conservación de la energía. Las leyes de conservación se deducen, entonces, de propiedades fundamentales del espacio y el tiempo, cuya modificación entraña revisiones drásticas de toda la física. Sin embargo, estas leyes no son inmunes a la refutación empírica. El caso más conocido es el de la demostración experimental de que la paridad (la simetría respecto de la inversión o reflexión) no se conserva en las interacciones débiles entre partículas.<sup>8</sup>

Los principios heurísticos específicos son casi siempre de carácter empírico y dependen del estado de la ciencia en cada momento. Entre estos

<sup>7</sup> Sobre los principios de conservación en general cf. Feynman (1965), caps. 3 y 4. Una exposición más completa y detallada se encuentra en Ne'eman y Kirsh (1988), cap. 7.

<sup>8</sup> Cf. Ne'eman y Kirsh (1988), § 7.10. Posteriormente se descubrió que otras simetrías tampoco se conservan en la interacción débil, como es el caso de la reversión temporal y la conjugación de carga.

principios, además de los de conservación, podemos mencionar la ley del incremento de la entropía en los sistemas cerrados; los principios variacionales o extremos, como el de acción mínima; el carácter límite de la velocidad de la luz en el vacío ( $c$ ) para la propagación de señales; y el carácter discreto de los intercambios de energía limitado por la constante de Planck ( $h$ ). Todas las constantes fundamentales de la ciencia pueden incluirse también en esta categoría. En razón de su generalidad todas estas leyes presentan una relativa estabilidad, pero todas son susceptibles de revisión.

La naturaleza de los principios generales es más difícil de precisar y no intentaré hacerlo ahora. Zahar sugiere que podrían ser innatos e incluso poseer una base genética (Zahar [1989], p. 33), lo cual garantizaría su estabilidad a lo largo de la historia del pensamiento humano. Esta es una conjetura interesante, pero en la situación actual no tenemos evidencias importantes que la confirmen. Por otra parte, un examen epistemológico de la historia de la ciencia parece mostrar que ha habido cambios en los valores cognitivos y en los criterios de evaluación de creencias.<sup>9</sup> Si ello es así, sería razonable pensar que los principios heurísticos generales también son históricamente cambiantes. Los ejemplos de teorías actuales, como la física cuántica y la teoría del caos, que violan algunos de tales principios podrían tomarse como pruebas de que éstos son inestables. Sin embargo, el hecho de que la física cuántica y de partículas sea persistentemente criticada por su carácter indeterminista y conspirativo podría usarse como contrargumento a favor de la vigencia de principios como el de razón suficiente.<sup>10</sup>

Para los fines de este trabajo no es indispensable resolver el problema del origen de los principios heurísticos generales. En cambio, resulta importante señalar que dichos principios, en tanto poseen un carácter normativo, presuponen la aceptación de determinados valores cognitivos, como la simplicidad, la confirmabilidad, y muchos otros. Además, no pueden eludir ciertos compromisos metafísicos, como la creencia en la ordenación legal e incluso causal del universo.

#### 4. La desintegración Beta y el neutrino

Analícemos ahora un caso histórico de descubrimiento científico que muestra claramente la función heurística de las leyes de conservación y el

<sup>9</sup> Laudan (1984) y (1990) ha examinado con detalle este punto, argumentando que los valores cognitivos son cambiantes.

<sup>10</sup> Cf. por ejemplo, Selleri (1989), cap. 10, respecto de la física de partículas; y Bell (1987), respecto de la mecánica cuántica.

empleo de diversos principios generales. Es el fenómeno de la desintegración Beta, que a comienzos de la década de 1930 se presentaba como desconcertante para los físicos de partículas.<sup>11</sup> La desintegración Beta es el proceso por el cual un neutrón ( $n$ ) se descompone espontáneamente en un protón ( $p$ ), un electrón ( $e^-$ ), y un antineutrino electrónico ( $-\nu_e$ ) (se representa habitualmente como  $n \rightarrow p + e^- + -\nu_e$ ). Actualmente este fenómeno radiactivo, gobernado por la fuerza nuclear débil, es bien conocido y no tiene nada de sorprendente.

Pero la situación era muy diferente en 1930. En ese momento las partículas elementales de materia que se conocían eran únicamente el electrón y el protón. Aún no se habían descubierto el neutrón, el neutrino ni las antipartículas en general (ya postuladas teóricamente por P. Dirac). La desintegración Beta se presentaba como un fenómeno anómalo que violaba las leyes de la física. Los científicos observaban que determinados elementos radiactivos (como el Bismuto 210, el Actinio 227 y muchos otros) se desintegraban de una manera tal que ni la energía ni el momento angular parecían conservarse. Las sustancias radiactivas que experimentaban la desintegración Beta emitían radiación muy penetrante bajo la forma de partículas de alta energía, que fueron llamadas partículas Beta (posteriormente se descubriría que eran en realidad electrones). El análisis de los productos de la desintegración mostraba que había una pérdida neta de energía y una aparición o desaparición de momento angular ( $\pm 1/2$  de *spin*) en el curso del proceso. La energía de las partículas Beta, además de no ser fija sino variable, era en todos los casos menor que la energía perdida por los núcleos radiactivos que las habían emitido.

Para explicar este fenómeno chocante, W. Pauli propuso en 1931 la hipótesis de que en la desintegración Beta debía emitirse una nueva partícula que fuera la portadora de la energía faltante y del momento angular necesario. Pauli predijo de manera teórica que esta partícula (a la que llamó neutrón) debía tener las propiedades exactas para permitir que se cumplieran las leyes de conservación, es decir, poseería masa y carga eléctrica nulas y *spin*  $\pm 1/2$ . Además, debía interactuar muy poco con la materia, por lo que no podía ser detectada con los medios disponibles. La teoría de Pauli tuvo una acogida más bien escéptica entre la comunidad científica, pues no había en ese momento ninguna prueba de la existencia de una partícula de esa clase. Por otra parte, las propiedades que se le atribuían parecieron, con razón, completamente *ad hoc*, postuladas exclusivamente para salvar a las leyes de conservación.

En 1934 E. Fermi retomó la teoría de Pauli y ofreció una explicación completa de la desintegración Beta. Postuló la existencia de una nueva fuer-

<sup>11</sup> Segré (1980); Trefil (1980); Weinberg (1983); Crozon (1987); y Ne'eman y Kirsh (1988) proporcionan abundante información sobre este episodio y su contexto histórico.

za que actuaba entre las partículas subatómicas, la interacción débil, la cual era la responsable de las desintegraciones radiactivas. La radiación Beta no consistía solamente en electrones sino en partículas como las anticipadas por Pauli, a las que Fermi llamó neutrinos. Dos años antes J. Chadwick había descubierto el neutrón, una partícula de carga nula y masa semejante al protón. El neutrino no podía confundirse con ésta, porque su masa debía ser extremadamente pequeña o incluso nula. Fermi calculó la probabilidad que tenían los neutrinos de interactuar con la materia y descubrió que era tan baja que un neutrino aislado podría atravesar una barrera material densa de años luz de grosor sin perturbarla. Esta era la razón que explicaba por qué los experimentos de desintegración Beta eran incapaces de detectar la presencia de los neutrinos producidos.

El resultado de este cálculo de Fermi provocó, por lo desmesurado, cierto escepticismo inicial. Sin embargo, implicaba todo un programa de observación experimental, que de hecho se puso en práctica. Puesto que la probabilidad de que un neutrino interactúe con un detector material es tan baja, resulta necesario para compensarla enviar una lluvia de millones de ellos hacia un blanco muy masivo. De esta manera existe una probabilidad razonable de detectar alguno. La historia de la búsqueda experimental del neutrino es larga y compleja, pero no es relevante ahora. Sólo en 1956, 25 años después de la predicción de Pauli, C. Cowan y F. Reines lograron detectarlo empleando un reactor nuclear como fuente de neutrinos y analizando una interacción inversa a la desintegración Beta, es decir, el proceso en el cual un anti-neutrino electrónico choca con un protón produciendo un neutrón y un electrón ( $-\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ ). La observación del neutrino confirmó exitosamente la predicción teórica de Pauli y Fermi y dejó a salvo los principios de conservación.<sup>12</sup>

Tanto Pauli como Fermi emplearon la retroducción para proponer la hipótesis de la existencia del neutrino. Partieron del fenómeno sorprendente de la desintegración Beta y buscaron una hipótesis que lo hiciera comprensible. La pregunta inevitable es ¿por qué eligieron la hipótesis del neutrino y no

<sup>12</sup> La desintegración Beta es también un excelente ejemplo del carácter indeterminista de la física cuántica. Los neutrones libres poseen una vida media de 15 minutos, al cabo de los cuales se desintegran espontáneamente. Esto significa que una colección de neutrones en el mismo estado se reducirá a la mitad por desintegración espontánea en este lapso. Pero ello nada nos dice acerca del tiempo de vida de cada neutrón individual. Algunos comenzarán a desintegrarse a los pocos segundos y otros mucho después de los 15 minutos. Si preguntamos por qué razón un determinado neutrón se desintegró en un momento dado y otro neutrón lo hizo en un momento posterior, la teoría cuántica responde que no hay razón alguna. Dado que todos los neutrones poseen la misma estructura interna, no hay diferencias individuales que expliquen cada suceso de desintegración. El momento preciso en que se desintegra cada neutrón es simplemente una cuestión de azar objetivo.

otra? La clave de la respuesta está en las leyes de conservación. La invención de la hipótesis del neutrino estuvo guiada de manera directa por estos principios generales. Las propiedades del neutrino se infirieron de las leyes de conservación de la energía y del momento angular; eran simplemente las propiedades requeridas para que estas leyes no fueran violadas en la desintegración Beta. La función heurística de los principios de conservación es aquí especialmente clara.

En la postulación de la hipótesis del neutrino intervinieron sin duda otros principios heurísticos generales, entre ellos varios de los invocados por Zahar. Ante todo, el principio de razón suficiente, pues se admite que hay un proceso físico subyacente que explica la aparente anomalía de la desintegración Beta. En segundo lugar, un principio de simplicidad por el cual se postula una sola partícula, y no dos o más, como explicación del fenómeno. Además, se emplea una suerte de principio de analogía, suponiéndose que la explicación la proporciona una entidad de naturaleza más o menos semejante a las restantes que intervienen en el proceso a explicar. En este caso, se da por sentado que la entidad portadora de energía y *spin* es una partícula elemental, caracterizada por propiedades bien conocidas como la masa, la carga eléctrica y el momento angular. Finalmente, la hipótesis se adecua a los principios generales que prohíben el carácter conspirativo y *ad hoc* de las teorías porque, en la versión de Fermi al menos, se acepta que no hay procesos compensatorios que impiden que el neutrino se manifieste empíricamente, y se establecen las condiciones bajo las cuales sería detectable.

## 5. Conclusiones: ensayo y error restringido y orientado

Cuando se combinan el razonamiento retroductivo y los principios heurísticos generales se obtiene un modelo razonable de la lógica del descubrimiento científico. La retroducción nos lleva de los hechos aparentemente anómalos a las hipótesis potencialmente explicativas de éstos. Puesto que no toda investigación científica comienza con la observación de un fenómeno, los hechos a los que se hace referencia deben entenderse en un sentido amplio que no se limita al ámbito de lo observable. El hecho que inicia un proceso retroductivo puede ser un problema teórico tal como la inconsistencia o falta de simplicidad de una teoría. Tampoco necesita ser único, ya que pueden ser varios hechos que en principio parecen no estar relacionados. Como hemos visto, el camino de los hechos a la hipótesis explicativa nunca es unívoco porque existen numerosas posibilidades. Esto constituye una limitación importante del modelo retroductivo, el cual no puede por sí mismo seleccionar una hipótesis entre todas las posibles candidatas a explicación de los hechos.

Los principios heurísticos generales restringen el espacio de las posibilidades entre las cuales se ha de buscar la explicación de los hechos. A la vez, guían la búsqueda y la elección de las hipótesis novedosas que se han de considerar como explicativas. Con todo, tales principios dejan un número amplio, pero siempre finito, de posibilidades que se deben explorar. Dentro de este espacio limitado de posibilidades el método de ensayo y error resulta susceptible de aplicación. De esta manera se pueden examinar diferentes hipótesis potencialmente explicativas y desechar las inadecuadas. El método de ensayo y error, entendido corrientemente como variación ciega y retención selectiva,<sup>13</sup> es inaplicable a un dominio irrestricto de posibilidades. El intento de ensayar al azar cualquier hipótesis explicativa es irrazonable y se halla muy lejos de la práctica científica real. Puede ser imposible de realizar si las posibilidades son ilimitadas. Aunque así no fuera, implica un uso irracional de recursos y esfuerzos intelectuales y económicos, que se gastarían inútilmente en ensayos no dirigidos.

El proceso de ensayo y error que se emplea en la heurística científica es muy diferente al mecanismo de variación ciega y selección por el cual evolucionan los organismos vivos.<sup>14</sup> Hasta donde sabemos, las variaciones orgánicas no son adaptativas en su origen, se producen de manera aleatoria y no están dirigidas a la satisfacción de las necesidades del organismo. Las variaciones científicas, en cambio, se producen como respuesta a un problema determinado y desde su comienzo tienen una dirección bien definida. Responden a la necesidad del científico de resolver un problema. No hay, pues, analogía entre la evolución de los seres vivos y el desarrollo de las hipótesis científicas. En particular, el proceso de ensayo y error propio de la búsqueda científica nunca es una variación ciega.

La búsqueda racional de hipótesis presupone el empleo de recursos heurísticos tanto positivos como negativos (en el sentido de Lakatos y Zahar). El científico que trabaja en un determinado programa de investigación debe construir la heurística que necesite apelando a principios generales y específicos combinándolos con toda la información fáctica y teórica disponible que considere relevante para los problemas que enfrenta. Este conjunto heurístico delimita con más o menos precisión un espacio de posibilidades que debe explorarse. Pero, además, orienta la búsqueda proporcionando un esquema de las características fundamentales que debe poseer la hipótesis buscada. Sólo

<sup>13</sup> Como ocurre en la epistemología evolucionista de D. Campbell (Campbell [1974]). Campbell reconoce, sin embargo, que las variaciones posibles siempre se hallan restringidas, pero niega que estén orientadas y por ello las considera azarosas o ciegas.

<sup>14</sup> Cf. Ruse (1986), cap. 2, que contiene una crítica general a la epistemología evolucionista. En el cap. 5 de su libro, Ruse toma partido en favor de una epistemología naturalista de tipo neodarwinista, pero reconoce las diferencias entre el cambio orgánico y el cambio científico.

en este ámbito restringido y orientado se procede al examen de las posibilidades mediante ensayo y error. Esto explica por qué las hipótesis adecuadas frecuentemente se descubren al cabo de unos pocos intentos. Sólo por azar o por fortuna se podría arribar a este resultado mediante un ensayo ciego abierto a todas las posibilidades.

La lógica del descubrimiento científico implica en suma el uso de la retroducción, los principios heurísticos y el método de ensayo y error restringido y orientado. Todos estos elementos se complementan entre sí formando un proceso complejo pero claro en sus líneas generales. Dicho proceso lleva a la búsqueda de hipótesis explicativas examinando un ámbito restringido de posibilidades por medio de un procedimiento de ensayo y error orientado por un conjunto de principios heurísticos generales y específicos. Estos principios desempeñan tanto la función de acotar el espacio de las posibilidades como la de orientar positivamente la búsqueda de nuevas hipótesis. Este modelo de descubrimiento satisface los requisitos mínimos de generalidad y capacidad de producir novedades genuinas. Por supuesto, no pretendemos que sea un método heurístico universal, ni único o excluyente.

## BIBLIOGRAFIA

Achinstein, P. [1983] (comp.), *The Concept of Evidence*, Oxford, Oxford University Press.

Bell, J. S. [1987], *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge, Cambridge University Press.

Campbell, D. T. [1974], "Unjustified Variation and Selective Retention in Scientific Discovery", en Ayala, F. J. y T. Dobzhansky (comps.), *Studies in the Philosophy of Biology*, Londres, Macmillan, 1974, pp. 139-161.

Coughlan, G. D. y J. E. Dodd [1991], *The Ideas of Particle Physics. An Introduction for Scientists*, Cambridge, Cambridge University Press.

Crozon, M. [1987], *La matière première*, París, Ed. du Seuil.

Feynman, R. P. [1965], *The Character of Physical Law*, Londres, BBC.

Fritzsche, H. [1983], *Quarks. The Stuff of Matter*, Nueva York, Simon & Schuster.

Hanson, N. R. [1958], *Patterns of Discovery*, Cambridge, Cambridge University Press.

——— [1958a], "The Logic of Discovery", *Journal of Philosophy*, 55, pp. 1073-1089.

Lamb, D. [1991], *Discovery, Creativity and Problem-Solving*, Aldershot, Avebury.

Laudan, L. [1984], *Science and Values*, Berkeley, University of California Press.

—— [1990], *Science and Relativism. Some Key Controversies in the Philosophy of Science*, Chicago, University of Chicago Press.

Maxwell, J. C. [1877], *Matter and Motion*, reed. Nueva York, Dover, 1991.

Ne'eman Y. e Y. Kirsh [1988], *The Particle Hunters*, Cambridge, Cambridge University Press.

Nickles, T. [1990], "Discovery Logics", *Philosophica*, 45, pp. 7-32.

Roberts, R. M. [1989], *Serendipity. Accidental Discoveries in Science*, Nueva York, John Wiley & Sons.

Ruelle, D. [1991], *Chance and Chaos*, Princeton, Princeton University Press.

Ruse, M. [1986], *Taking Darwin Seriously*, Oxford, Basil Blackwell.

Segré, E. [1980], *From X-rays to Quarks*, San Francisco, Freeman & Co.

Selleri, F. [1989], *Fisica senza dogma. La conoscenza scientifica tra sviluppo e regressione*, Bari, Edizioni Dedalo.

Shimony, A. [1989], "Conceptual Foundations of Quantum Mechanics", en Davis, P. (comp.), *The New Physics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1989, pp. 373-395.

Trefil, J. [1980], *From Atoms to Quarks*, Nueva York, Charles Scribner's Sons.

Weinberg, S. [1983], *The Discovery of Subatomic Particles*, Nueva York, Scientific American Books.

Zahar, E. [1989], *Einstein's Revolution. A Study in Heuristics*, La Salle, Open Court.

CONICET - UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

## ABSTRACT

This paper outlines a logic of scientific discovery. First, it argues that discovery rules must be general and able to guide the search for novel hypotheses. Then, it criticizes Zahar's deductivist logic of discovery, but accepts his idea of general heuristics principles. It shows that these principles are compatible with a complex version of retroduction. An historical case —the discovery of neutrino— is examined applying this approach. Finally, it concludes that this logic of discovery culminates in a restricted and directed method of trial and error.