

01048
2

Juan Pablo Flores del Villar

REVOLUCIÓN Y CAMBIO CONCEPTUAL

UNA PERSPECTIVA COMPUTACIONAL DEL MODELO DE LOS QUARKS

... a la Dirección General de Bibliotecas de la
... a difundir en formato electrónico e impreso el
... do de mi trabajo recepcional.
NOMBRE: Juan Pablo Flores del Villar
29 Septiembre 2002
[Signature]

FAC. DE FILOSOFIA Y LETRAS



DIVISION DE
ESTUDIOS DE POSGRADO

Maestría en Filosofía de la Ciencia
Facultad de Filosofía y Letras
Instituto de Investigaciones Filosóficas
Directora de Tesis: Dra. Atocha Aliseda Llera

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1	
INFLUENCIA DE LA COMPUTACIÓN EN LA FILOSOFÍA	6
1. ¿Pueden las máquinas pensar?	7
2. Descubrimiento Científico Computacional	17
3. Filosofía Computacional de la Ciencia	19
2	
HISTORIA Y MARCO CONCEPTUAL	21
1. El Modelo de los Quarks de la Física de Partículas Elementales	21
2. Las Revoluciones Científicas	40
3. Los Conceptos y el Cambio Conceptual	43
3	
ANÁLISIS Y CONSTRUCCIÓN DE MODELOS	54
1. Cambio Conceptual y Coherencia Explicativa	54
2. Generación de Modelos	59
4	
ALCANCES Y LIMITACIONES	71
1. Los Proyectos Computacionales	71
2. Conclusiones	75
BIBLIOGRAFÍA	79

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

INTRODUCCIÓN

Es en los años 60 cuando surge la *revuelta historicista* en contra de la filosofía de la ciencia establecida, esta es, la Concepción Heredada (*Received View*). La rebelión consiste en rechazar los métodos metacientíficos de la ciencia, esto es, de la reflexión de segundo orden que se hace acerca de la ciencia. Estos métodos son heredados de los grupos germinales de la filosofía de la ciencia, a saber, el Círculo de Viena, con Moritz Schlick, Rudolf Carnap y Otto Neurath como figuras señeras, y el Grupo de Berlín, con Hans Reichenbach en la cabeza.

Los herederos comparten con sus antecesores la idea general de que la ciencia se distingue del resto de las actividades culturales por haber adquirido un método especial, el método científico —el cual constituye un modo privilegiado de conocer el mundo— que analizaban (en este carácter de segundo orden) con métodos formales. La alternativa presentada por Thomas Kuhn, Paul Feyerabend, Imre Lakatos, y otros, donde destaca de modo particular *La Estructura de las revoluciones científicas* de Kuhn, reprocha a la filosofía clásica de la ciencia que ésta no se tomara la historia de la ciencia en serio y que, en consecuencia, presentaran una imagen muy pobre, totalmente inadecuada, de la dinámica del conocimiento científico.

Es también en los años 60 cuando la preocupación ancestral de la filosofía, la de conocer la naturaleza del pensamiento humano, adquiere nuevas perspectivas con el desarrollo de las ciencias de la computación y en particular con la inteligencia artificial. El desarrollo de la computadora, concebida formalmente por Alan Turing en los años 30, sentó las bases para el estudio de la mente desde un punto de vista novedoso que en las últimas décadas ha producido interesantes resultados en dirección de la construcción de modelos computacionales del razonamiento.

La filosofía se ve obviamente afectada a raíz del desarrollo de las computadoras, especialmente la filosofía de la mente. Más aún, en las últimas décadas, se desarrolla la *filosofía computacional de la ciencia*, que basándose en la analogía entre la mente y la computadora como sistemas procesadores simbólicos, asegura que la computadora provee la oportunidad de que las teorías del pensamiento puedan ser expresadas formalmente usando el mismo tipo de representaciones simbólicas que usa la computadora. Algunas de las figuras principales de ésta nueva disciplina, que se desarrolla valiéndose de una estrecha cooperación

entre la inteligencia artificial, sicología cognitiva, historia de la ciencia y filosofía de la ciencia; son Herbert Simon y Paul Thagard, siendo el primero el pionero.

Es una vez más en los años 60 cuando la física de partículas elementales se ve forzada a desarrollar una nueva propuesta para entender la creciente confusión resultante de la proliferación de partículas en el mundo subatómico. Para poder encontrar un orden en el creciente caos, Murry Gell-Mann y George Zweig propusieron que todas las partículas¹ —que se creían elementales— estaban a su vez constituidas por combinaciones de partículas —verdaderamente elementales—. Por medio de estas partículas, llamadas quarks, se podía explicar a todas las demás; esto es, se podían formar combinaciones de quarks que dieran cuenta de las propiedades de cada partícula y de su organización y relación con las otras. Las partículas con ciertas características se organizaban en familias de propiedades comunes a las que combinaciones específicas de quarks explicaban.

Lo más interesante de las nuevas partículas, además de que constituían un nuevo nivel de entidades, eran sus propiedades, entre las que destaca su carga eléctrica porque era una fracción de la carga considerada como fundamental (la carga del electrón, e). Sin embargo, la principal objeción que se le adjudicaba a esta nueva idea era que no se habían visto experimentalmente, y los físicos relacionaban la idea de composición con la idea de que los constituyentes primitivos deberían ser detectables: los constituyentes del átomo, electrones y núcleo, podían ser exhibidos rutinariamente en el laboratorio, de la misma forma como los constituyentes nucleónicos.

El lector se puede preguntar ¿qué relación puede haber entre estos sucesos de la década de los 60? Para empezar, lo común a todos ellos es su objetivo de estudio, la ciencia. El presente trabajo se basa en un estudio de caso para hacer un análisis de métodos de estudio en filosofía de la ciencia. Como es de esperarse, el caso a estudiar es el descubrimiento de los quarks, que cambió a la física de partículas elementales del siglo XX. El caso será estudiado por medio de las teorías y modelos de la filosofía computacional de la ciencia. Por un lado, analizaremos el desarrollo de la ciencia misma, buscando un cambio revolucionario con la teoría de cambio conceptual de Thagard, y por el otro lado, revisaremos la capacidad del programa 'GELL-MANN' para generar modelos análogos al de los quarks. Nuestro interés en el caso de la física

¹ Exceptuando los leptones.

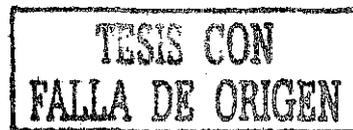


es metacientífico. No estamos preocupados por desarrollar técnicas que le sean de utilidad a la física de partículas elementales, estamos preocupados por esa reflexión de segundo orden que se acerca a la ciencia. Queremos hacer filosofía de la ciencia. De forma sucinta, se va a estudiar el caso histórico del modelo de los quarks bajo los lineamientos de la filosofía de la ciencia, que como perteneciente a una corriente pospositivista, la podemos ubicar entre el formalismo del empirismo lógico y el historicismo.

El objetivo del presente trabajo es mostrar la utilidad de las herramientas computacionales para la filosofía de la ciencia, esto, a través del estudio de un caso en la ciencia, a saber, el modelo de los quarks en la física de partículas elementales. Analizaremos dos perspectivas computacionales, una de descubrimiento —el programa GELL-MANN— y la otra de cambio conceptual —la teoría de Paul Thagard—. En su aplicación al modelo, analizaremos la capacidad de la primera para generar al modelo y la de dar cuenta del cambio en la física de las partículas debido a los quarks, para el segundo. Se presentará la explicación e historia del modelo de los quarks, al que se le aplicarán los métodos de estudio correspondientes para finalmente establecer los alcances y limitaciones de ambas perspectivas computacionales.

El trabajo consta de cuatro capítulos. En el primero hablaremos de la influencia de la computación en la filosofía, y más aún, de cómo de hecho influye en las ideas que tenemos de los procesos de pensamiento. También se revisarán los planteamientos de las dos corrientes principales de la filosofía computacional de la ciencia. Una se concentra en describir y modelar el descubrimiento científico, mientras que la otra está interesada en cuestiones de estructura y procesos de desarrollo científico, esto es, del cambio científico. Esta información será obtenida directamente de los trabajos originales de los autores proponentes de sus respectivos proyectos.

El reto principal del primer capítulo (INFLUENCIA DE LA COMPUTACIÓN EN LA FILOSOFÍA) está dirigido a justificar la idea de que las computadoras nos pueden ayudar a conocer a la mente. Se entra brevemente a la discusión de la filosofía de la mente no con el propósito de hacer una revisión de ésta, sino para entender la relación de las computadoras con la mente. Lo que se quiere establecer, más allá de las discusiones existentes sobre la posibilidad de que las computadoras imiten a los humanos, es que las computadoras son útiles



para entendernos a nosotros mismos. Sin duda, siguiendo a Turing, sirven para investigar la mente.

En el segundo capítulo (HISTORIA Y MARCO CONCEPTUAL) entramos directamente al caso de estudio. Haremos el recuento histórico concerniente al modelo de los quarks. Inmediato a éste, hacemos una breve revisión de la concepción de cambio revolucionario de Kuhn, así como de la postura de Thagard: lo que rescata del anterior, sus críticas y sus innovaciones. Una vez planteada la perspectiva de Thagard, nos daremos a la tarea de presentar su teoría del cambio conceptual revolucionario. Sin embargo, se expondrán solamente los puntos de interés para el análisis del caso histórico concerniente a este trabajo; esto quiere decir que no se presentará la teoría de Thagard en su totalidad ya que se omitirán las implementaciones computacionales que de su teoría hace. Después de todo, lo que queremos es hacer filosofía de la ciencia.

Como toda historia, la que se narra en este trabajo tiene un cometido, por lo que está sujeta a cierta interpretación. La historia en cuestión se presenta bajo los lineamientos de la teoría de cambio conceptual de Thagard, por lo que podemos admitir de antemano que está sesgada hacia ella.

El tercer capítulo (ANÁLISIS Y CONSTRUCCIÓN DE MODELOS) se divide en dos secciones principales. En la primera se hace el análisis correspondiente de la historia de los quarks, esto es, se detalla el cambio conceptual y la coherencia explicativa del modelo de los quarks. Esta parte es crucial ya que es donde se pone a prueba la teoría de Thagard y es, en sí, una de las aportaciones originales más importantes del trabajo. En la segunda sección —y gracias a la previa explicación del modelo de los quarks— se analiza el descubrimiento científico desde la perspectiva computacional. Específicamente, se describe un programa que genera sistemáticamente modelos de constituyentes para familias de partículas elementales. Se detallan los métodos y procedimientos del programa responsable, GELL-MANN, y se revisan los resultados que produce.

Por último, en el cuarto capítulo (ALCANCES Y LIMITACIONES) se establecen los alcances y las limitaciones para la filosofía de la ciencia, de los dos proyectos computacionales presentados en el trabajo, notando que logran y que no pueden hacer. También se comentarán brevemente las aportaciones de la teoría de cambio conceptual que no se revisan en el trabajo;



estas son, sus implementaciones PI (procesos de inducción) y el programa conexionista ECHO, así como, los éxitos que han tenido otros programas de descubrimiento en la ciencia.

Como es de esperarse, hay que comparar a las visiones de cambio revolucionario con base al caso estudiado, y decidir si éste se puede calificar o no como revolucionario, en cuanto a ambas perspectivas, Kuhn y Thagard. La conclusión es que el modelo de los quarks, como episodio dentro de una historia, es parte de una revolución científica. Si bien, dicha revolución es de un tipo diferente a las demás, ya que la nueva teoría no sustituyó a ninguna otra.

Finalmente se revisará si el trabajo cumple con su cometido principal: el de establecer, por medio del caso de estudio, la utilidad del enfoque computacional de Thagard en la filosofía de la ciencia.

La tesis es el resultado de presentaciones, diálogos y discusiones realizados principalmente en los seminarios de tesis tutelados por Atocha Aliseda, directora del trabajo. A ella, le agradezco su paciencia y dedicación sin las cuales no habría sido posible dar término a la tesis en el tiempo requerido. También quiero expresar mi gratitud a: Ana Rosa Pérez Ransanz, Samir Okasha, Silvio Pinto y Eduardo González, los demás miembros de mi jurado, por la pronta revisión de mi trabajo y por sus atinadas indicaciones. Agradezco la ayuda de Ian, Flor, Carmen y, muy en especial a, Maricarmen.

El estudio de la maestría que culmina con este trabajo ha sido posible gracias al apoyo económico del CONACYT y de DGEP UNAM.



1

INFLUENCIA DE LA COMPUTACIÓN EN LA FILOSOFÍA

En este capítulo hablaremos de la influencia de la computación en la filosofía y de cómo de hecho influye en las ideas que tenemos de los procesos mentales. También se revisarán los planteamientos de las dos corrientes principales de la filosofía computacional de la ciencia.

¿Puede el cómputo cambiar a la filosofía? Es decir, ¿puede modificar el saber del hombre significativamente? Sería simple argumentar que no, dado que una máquina no piensa, independientemente de su complejidad. El cómputo es meramente una herramienta. ¿O no?

La computación puede cambiar la forma en la que nos aproximamos al conocimiento de varias disciplinas del hombre: matemáticas, biología, ingeniería, procedimientos administrativos y muchas más. Incluso puede cambiar la forma en la que pensamos de nosotros mismos: dándonos ideas, modelos y otras herramientas para ayudarnos a entender los misterios de la mente humana. Por consiguiente, puede cambiar a la filosofía.

Aaron Sloman² nos recuerda que una computadora no es simplemente un instrumento que realiza cálculos numéricos, y la caracteriza como un mecanismo que interactúa con símbolos. Los puede admitir, almacenar, modificar, examinar, comparar, construir, interpretar, obedecer (si estos expresan instrucciones) o transmitir. Por lo tanto, debe incluir una *memoria* que contenga un gran número de localidades (consignables) donde los símbolos puedan ser almacenados. Los mecanismos pueden asumir que todos los símbolos básicos almacenados usan un formato fijo (como secuencias de ceros y unos), pero no es una restricción, ya que combinaciones complejas de tales símbolos pueden ser usadas para representar cualquier cosa. Del mismo modo que secuencias complejas de caracteres simples en una máquina de escribir pueden expresar poemas, obras teatrales o teorías físicas. O también como arreglos de puntos complicados pueden ser vistos como fotografías o caras.

² Sloman (1978) es catedrático en filosofía e inteligencia artificial y se puede considerar como uno de los representantes de las ciencias cognitivas.



La definición anterior no implica nada sobre el material del que está hecha la computadora (el *hardware*). Puede ser de transistores, de bulbos, de componentes físicos todavía no diseñados³, o incluso de alguna sustancia no física, en el caso de que ésta se pudiera concebir. ¡El medio o material usado es indistinto! Lo que importa es que estén disponibles suficientes estructuras para representar la extensión requerida de símbolos y que puedan ocurrir cambios estructurales apropiados.

Ahora bien, lo que queremos saber es como estos instrumentos afectan nuestra concepción sobre el pensamiento. Para ello, convendría plantearnos ciertos asuntos, para llegar de forma natural a la pregunta (título de la siguiente sección) del famoso artículo del matemático Alan Turing⁴.

1 ¿Pueden pensar las máquinas?

1.1 Antecedentes

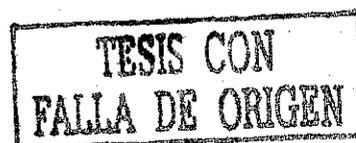
Tan antiguas como la historia misma son las preocupaciones que conciernen a la naturaleza del pensamiento. De entre los varios intentos por descifrar estas cuestiones, enfoquemos nuestra atención en la visión computacional de la mente⁵. Podemos rastrear ideas computacionales en autores tan lejanos (en el tiempo) como G.W. Leibniz y George Boole. Junto con algunos de sus contemporáneos, el filósofo y matemático Leibniz, propuso la idea de un *cálculo universal*: un lenguaje matemático, preciso y sin ambigüedad en el cual se pudieran traducir las ideas, y por medio del cual se pudiera encontrar la solución a disputas intelectuales por medio de *cálculos*.

En 1854, Boole procuró determinar las leyes que gobiernan al pensamiento y describirlas dentro de un sistema lógico, en un álgebra como la que representa relaciones matemáticas entre números. Propuso que los pensamientos son proposiciones o declaraciones sobre el mundo que pueden ser representadas simbólicamente, basado en la notación binaria (0 y 1)

³ Un ejemplo podría ser el de la computación cuántica que usa q-bits en lugar de bits, información cuántica. Intentan hacer puertas lógicas para guardar información en partículas como átomos, moléculas o iones.

⁴ Turing (1950).

⁵ Dellarosa Cummins (1988) nos ofrece una breve historia en torno a la pregunta: ¿Es el pensamiento un proceso material?



representa a los argumentos y valores de funciones expresados por *y*, *o*, etcétera. Siendo así, el pensamiento en el sistema Booleano es entonces intercambio e interpretación de símbolos. Boole afirmaba que construyendo patrones de razonamiento a partir de estas simples formas algebraicas podemos descubrir las leyes fundamentales de las operaciones racionales de la mente. Es interesante notar que el álgebra de Bool llegó a jugar un papel central en el diseño de las computadoras digitales modernas; el comportamiento de las funciones se puede codificar con dispositivos conocidos como *compuertas lógicas*.

Estas ideas junto con las de algunos innovadores dieron lugar a la idea de una computadora digital programable, que se hizo realidad con los descubrimientos teóricos de Turing y Church, y con los avances tecnológicos en la electrónica.

Los casos anteriores de ideas detrás de la computadora, aunque vagas, iban de la mano con el proyecto general de entender el pensamiento humano, sistematizándolo y codificándolo. Se sigue, naturalmente, que al conocerse las computadoras, éstas se vieran como cerebros electrónicos.

A finales de los años 60, nuevas actividades de investigación en psicología difunden la visión de que varios procesos mentales son procesos computacionales. Como consecuencia, mucho del comportamiento cognitivo más elevado debe ser gobernado por reglas. En 1967, Hilary Putnam publica un artículo titulado "Predicados Sicológicos"⁶ que da origen al funcionalismo, que desde entonces ha sido muy influyente y probablemente la posición preeminente entre las teorías de la naturaleza de la mente. En éste, propone la hipótesis de que el dolor, o el estado de estar en dolor, es un estado funcional de un organismo completo, y no un estado mental. El rasgo esencial de cualquier estado mental es su papel causal.

Tiempo después, Paul Churchland⁷ caracteriza al estado mental como un conjunto de relaciones causales que tienen que ver con efectos del ambiente en el cuerpo, otros tipos de estados mentales, y comportamiento corporal. De esta forma, el dolor resulta de un daño corporal o trauma; tal daño causa dolor, disgusto y el razonamiento práctico de búsqueda de alivio; y causa respingo y protección del área afectada. Cualquier estado que juegue este papel funcional es un dolor. De manera similar, otros tipos de estados mentales (sensaciones,

⁶ Putnam (1967) "Psychological Predicates", *Art, Mind, and Religion*. Reimpreso como "The Nature of Mental States".



miedos, creencias, etcétera) son también definidos por sus roles causales únicos en un complejo de estados internos que median entre *entradas sensoriales* y *salidas motoras*.

Putnam dice que investigar esta hipótesis es simplemente hacer modelos *mecánicos* de organismos, y en su opinión esto es lo que hace la psicología. Las ventajas que encuentra al identificar estados funcionales en lugar de estados mentales son las siguientes:

Primero, la identificación de estados psicológicos con estados funcionales. El que cada organismo sea capaz de percibir (por ejemplo, de sentir dolor) significa que posee una organización funcional que se lo permite. Es decir, distintos estados relacionados unos con otros, y con las entradas sensoriales y salidas motoras. De aquí se desprende que las leyes de la psicología pueden ser derivadas de declaraciones del tipo "tal organismo tiene tal descripción".

Segundo, la presencia de estados funcionales (de entradas que juegan el papel causal en la Organización Funcional del organismo) no son simples *correlaciones* sino de hecho explican la existencia de dolor por parte del organismo.

Tercero, la identificación debe ser aceptada tentativamente como una teoría que nos lleva a predicciones fructíferas, así como a preguntas fructíferas.

Para 1975, Jerry Fodor⁸ sostiene que los únicos modelos psicológicos de procesos cognitivos que parecen ser remotamente plausibles, representan tales procesos como los computacionales. Su tesis principal es que los procesos cognitivos son procesos computacionales, y por ende presuponen un sistema representacional. De acuerdo con la teoría representacional de la mente, aunque los estados mentales difieren unos de otros, los estados mentales son estados representacionales, y la actividad mental consiste en la adquisición, transformación y uso de la información. El problema con las teorías representacionales de la mente es que corren el riesgo de caer en un regreso infinito. Al pensar sobre procesos mentales, es muy fácil caer en ideas circulares sobre cómo pensamos, y terminar definiendo procesos mentales donde presuponemos las capacidades mismas que queremos explicar.

⁷ Churchland (1984).

⁸ Fodor (1975)



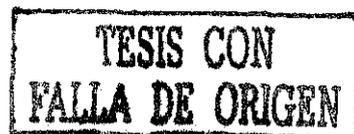
Revisemos un ejemplo muy claro de como es que las teorías pueden caer en circularidad⁹. Consideremos a la visión. Nuestras experiencias introspectivas sugieren que la visión trabaja formando imágenes mentales del mundo exterior. Una pequeña reflexión muestra que la idea de apelar a imágenes para explicar a la visión no puede ser correcta. ¿Quién ve a la imagen mental? y ¿Con qué la ve? Si existe un ojo interno que produce una nueva imagen, nos encontramos en el principio de un regreso al infinito. Por otro lado, si el ojo interno puede extraer información de la imagen mental sin necesidad de un segundo ojo, podemos decir que el primero no es necesario. Si explicamos a la visión como el registro de una imagen interna por un ojo interior, este presupone las capacidades mismas que pretendemos explicar.

Una razón para interesarnos en el paralelo entre mente y computadora, es que nos ayuda a evitar un problema central en la explicación de la cognición. Se pueden identificar tres formas en las que este paralelo ayuda a evitar la circularidad.

i) La cognición consiste de operaciones entre estados de nuestro sistema nervioso central, estados que tienen significado y contenido. En parte, estos estados son significativos en virtud de sus propiedades relacionales, esto es, en virtud de conexiones causales con el medio ambiente. Pero hay un sentido en el que pensar es un proceso no semántico, en el que no importa a que refiere o si significa algo. Los procesos que acceden y transforman a los estados anteriores no están relacionados con las propiedades relacionales de estos, sino con procesos internos de la mente. En terminología actual, los procesos que operan sobre las representaciones mentales son sensibles a las propiedades sintácticas de esas representaciones. Por ejemplo, cuando vemos a un sujeto conocido, éste es causalmente responsable de un estado *A* en la corteza visual. *A* interactúa causalmente con la memoria y produce un pensamiento *B*, es decir, identificamos a la persona. *B* es la respuesta causal de *A* sin importar el pasado causal de *A*. Si *A* fue producida por la persona, por su gemelo o por un holograma, es irrelevante. *B* es el resultado de características de *A* internas a la mente. En este sentido, una teoría de reconocimiento o categorización debe ser individualista.

Los procesos computacionales son individualistas, pues éstos son especificados independientemente de los significados de las fórmulas en las que operan. El cálculo

⁹ El ejemplo se debe a Sterelny (1990).



proposicional provee un ejemplo simple y directo de esto. La regla del silogismo disyuntivo, por ejemplo, especifica una transición que hacemos de cualquier fórmula con una configuración apropiada. Podemos ir de una fórmula del tipo “no P y (P ó Q)” a “Q”. La transformación es especificada independientemente del significado de los símbolos P y Q.

ii) Otra forma en que la teoría computacional de la mente puede ayudar a la psicología a evitar el regreso infinito, tiene que ver con la idea de que podemos descomponer habilidades en sub-habilidades. Si podemos exhibir una habilidad cognitiva compleja y sofisticada como una colección de habilidades mucho más primitivas, aún tendríamos que explicar como son coordinadas estas capacidades simples, y como pueden ser realizables en el cerebro. Aunque la mente no es una máquina de Turing¹⁰ —ya que la máquina sólo puede estar en un estado en cada momento y hacer sólo una operación en cada momento, mientras que la mente humana puede estar en muchos estados psicológicos en un momento y tener varios procesos cognitivos en un momento— cualquier procedimiento computacional¹¹, por muy complicado que sea, puede ser computado por una máquina de Turing. Esto explica cómo capacidades complejas pueden ser desglosadas en conjuntos de capacidades mecánicas simples y realizables físicamente.

iii) Hay una tercera forma en la que las teorías representacionales de la mente pueden caer en circularidad. ¿Cómo puede nuestra mente entender sus propias reglas de operación? El aparato de razonamiento, ya sea de carne o de silicón, debe poder entender la regla ‘de “P ó Q” y “no P”, y responder con “Q”’. ¿Cómo puede hacer esto? Las capacidades no pueden ser explicadas por el almacenamiento de instrucciones a seguir. Más bien, la máquina está configurada para seguir ciertos procedimientos. Sigue estos procedimientos como resultado de su configuración física permanente. El ejemplo más simple de esta configuración física es el de las compuertas lógicas de una computadora; una conexión dada realiza una conjunción lógica porque su salida está ‘encendida: (1)’¹² sólo si tiene dos entradas que están encendidas. Si la teoría computacional de la mente está en lo correcto entonces lo que sucede en las

¹⁰ Máquina ideal que funciona en base a estados iniciales y finales entre los cuales puede haber transiciones, de modo que, efectuados todos los cálculos se llegue a un resultado final.

¹¹ Cualquiera que sea una función recursiva, como lo dicta la tesis de Church-Turing.

computadoras, también debe ser verdadero para las mentes. De esta forma, debe haber un conjunto de operaciones básicas que el cerebro realiza, no en virtud de representarse a sí mismo, sino en virtud de su constitución física.

La estrategia es primero articular una teoría computacional de la cognición y después investigar como los procesos computacionales implicados pueden ser llevados a cabo en el cerebro.

Exploremos ahora la pregunta que nos atañe. ¿Pueden pensar las máquinas?

1.2 Preguntas relevantes a la analogía entre mente y máquina.

En 1950, Turing¹³ nos propone considerar la siguiente pregunta. ¿Pueden pensar las máquinas? Al encontrar dificultades en definir los términos *máquina* y *pensar*, reemplaza la pregunta valiéndose de una prueba en donde una máquina podría engañar a un sujeto haciéndolo pensar que es a su vez, un hombre. La prueba consiste en lo siguiente. Colocamos en dos cuartos separados a una persona y a una máquina, en el exterior se encuentra otra persona que tiene por objetivo adivinar en cual de los cuartos está la computadora. Como es de suponerse, el fin de la computadora es engañar al sujeto que le pregunta, haciéndolo pensar que es un hombre. La única forma de comunicación entre el entrevistador y los habitantes de los cuartos es a través de preguntas y respuestas por medio de correo electrónico.¹⁴ La naturaleza de las preguntas no tiene restricciones en cuanto a su carácter, pueden ser de cualquier tipo: de poesía, de cálculos matemáticos, de ajedrez; en general, de cualquier empresa humana. La pregunta original es pues reemplazada por: ¿Después de una serie de preguntas puede una máquina engañar a un humano? O lo que realmente estamos buscando saber: ¿Puede una computadora imitar a una persona? La máquina que tiene Turing en mente es una computadora digital. No una computadora a la que tengamos acceso en este momento, si no a una que podamos imaginar que pueda pasar la prueba.¹⁵

¹² La convención es 1 para encendido (on) y 0 para apagado (off).

¹³ Turing (1950).

¹⁴ Versión moderna del original: teleimpresor.

¹⁵ Originalmente Turing puso como fecha de prueba el año 2000, pero olvidemos este hecho para evitar perder generalidad.

La idea de Turing nos hace considerar la pregunta original desde otra perspectiva. Supongamos que se logra construir una computadora que pase la prueba, es decir, que logre imitar tan bien a una persona, al grado de que el sujeto que pregunta no la pueda distinguir de un humano. Parece natural que si una máquina realiza tareas intelectuales tan bien como lo hace una persona, no la podemos tachar de menos inteligente que los humanos. De lo que se sigue la pregunta: ¿Si una máquina pasa la prueba de Turing es porque piensa? La propuesta de Turing busca pasar de cuestiones teóricas a una prueba operacional.

La principal objeción a una respuesta afirmativa a la nueva pregunta, sostiene que una equivalencia de preguntas y respuestas entre máquinas y humanos no es igual a pensar. John Searle¹⁶ ideó un experimento pensado para mostrar que aunque una computadora pueda pasar la prueba de Turing, aquella no entiende lo que hace.

En el cuarto Chino, como es conocido, Searle se pone en el lugar de la computadora, esto es, se encierra en un cuarto quedando en las mismas condiciones en las que estaría la máquina en la prueba de Turing. Se le da un paquete de escritos en chino, él no sabe nada de chino, ni escrito ni hablado, y es más, ni siquiera puede reconocer a los Canjis (ideogramas chinos) como tales, para él son símbolos sin sentido. Después se le da un segundo paquete, que además de escritos chinos trae una serie de instrucciones para correlacionar los escritos de ambos paquetes. Estas instrucciones están en inglés y Searle las entiende como cualquier otro hablante del inglés. Éstas le permiten correlacionar un conjunto de símbolos formales con otro, *formales* porque se puede identificar enteramente a los símbolos por sus formas. Finalmente se le da un tercer paquete, esta vez con Canjis y reglas —otra vez en inglés— que le permiten correlacionar a los elementos del tercer paquete con los primeros dos, pero que también le enseñan a dar respuestas a ciertos símbolos chinos del tercer paquete con ciertos símbolos chinos específicos. Las personas en el exterior consideran que los símbolos dados en respuesta son respuestas en chino a preguntas en chino. Después de un tiempo Searle se vuelve tan bueno dando respuestas, que los hablantes de chino no pueden distinguir éstas respuestas de las de una persona que sí hable el idioma. Desde un punto de vista exterior (esto es, exterior al cuarto donde solamente tenemos preguntas-entradas y respuestas-salidas) no podríamos distinguir entre una persona que hable chino y otra que no. Searle alega que él se comporta

¹⁶ Searle, J.(1980).

como una computadora realizando operaciones computacionales en elementos formalmente especificados que no están interpretados, aunque tenga entradas y salidas indistinguibles de un Chino, él no entiende ni una palabra de chino. De esta forma Searle pretende demostrar que la computadora no entiende lo que está haciendo, e.g., a pesar de que exista una equivalencia de preguntas y respuestas, la computadora no piensa.

Mucho debate se ha derivado del experimento pensado de Searle, pero nos bastará con rescatar lo más importante. Los programas computacionales son puramente formales o *sintácticos*, en palabras llanas, sólo son sensibles a las *formas* de los símbolos que procesan, su significado es irrelevante. Mientras que a las computadoras se les den hileras de ceros y unos, van a generar más hileras de ceros y unos sin importar lo que éstas representen. Sin embargo, el entendimiento auténtico (y por extensión todo el pensamiento) es sensible al significado o a la *semántica* de los símbolos. Por ejemplo, nuestras creencias y deseos son lo que son porque significan o representan algo. En pocas palabras, la mente es una máquina semántica, y en contraste, la computadora, es sólo una máquina sintáctica.

El comentario de Tim Crane es particularmente interesante “[I]t could be true that nothing can think *simply* by being a computer, and also true that the way we think is *partly* by computing.”¹⁷ Puede ser que el cuarto Chino de Searle pruebe que una computadora como tal no piense, sin embargo, los procesos mentales (al menos algunos) pueden seguir siendo computacionales.

Otra observación interesante es la de Jaegwon Kim¹⁸, que atinadamente apunta, que este es un problema para cualquier concepción materialista de la mente. Si el pensamiento sólo puede surgir de sistemas biológicos complejos como el cerebro humano, como el propio Searle considera, podemos pensar que lo mismo puede pasar con los procesos neurobiológicos causales. Los estados neuronales involucrados en estos procesos se darán sin importar si representan, o no, algo del mundo. Los procesos neuronales no parecen ser más sensibles al significado y al contenido representacional que los procesos computacionales. Cómo puede surgir entendimiento y significado de moléculas y células, es tan misterioso como que surja de hileras de ceros y unos.

¹⁷ Crane (1995), p. 129. Todas las citas en este capítulo se presentarán en su idioma original.

¹⁸ Kim (1996).

1.3 De regreso a la pregunta: posturas y comentarios al respecto.

Lo que me interesa rescatar de esta discusión es el carácter de utilidad de las computadoras. Independientemente de que las computadoras piensen o no, nos sirven como modelos del pensamiento. Al propio Turing no le interesaba si las computadoras pueden pensar, él propone asumir que así lo hacen y usar esta idea para investigar:

The original question, 'Can machines think?' I believe to be meaningless to deserve discussion... I believe further that no useful purpose is served by concealing these beliefs [machines thinking]. The popular view that scientists proceed inexorably from well-established fact to well-established fact, never being influenced by any unproved conjecture, is quite mistaken. Provided it is made clear which are proved facts and which are conjectures, no harm can result. Conjectures are of great importance since they suggest useful lines of research.¹⁹

Los mismos que se oponen a la idea de computadoras pensantes, aceptan este hecho. Por ejemplo, el propio Searle hace una distinción entre una idea de inteligencia artificial débil y una fuerte, que corresponden a no creer y creer que las computadoras piensan.

According to weak AI, the principal value of the computer in the study of the mind is that it gives us a very powerful tool. For example, it enables us to formulate and test hypotheses in a more rigorous and precise fashion. But according to strong AI, the computer is not merely a tool in the study of the mind; rather, the appropriately programmed computer really is a mind, in the sense that computers given the right programs can be literally said to *understand* and have other cognitive states.²⁰

Otra distinción relevante a la inteligencia artificial, es la que hace Paul Thagard basándose en las actitudes que tienen los investigadores con respecto a la lógica formal como herramienta para entender la inteligencia. Los divide entre *pulcros* y *sucios*.

The neats... view logic as central to AI, which then consists primarily on constructing formal systems in which logical deduction is the central process. In contrast, scruffy AI...

¹⁹Turing, A. (1950), p. 158.

²⁰Searle, J. (1980), p. 140.

takes a much more psychological approach to AI, claiming that AI is more likely to be successful if it eschews the rigor of formal logic and investigates instead the more varied structures and processes found in human thought.²¹

El hecho de que las computadoras nos sirven para entender a la mente no es debatible, independientemente de que las computadoras entiendan o no. Dejando a un lado si las computadoras pueden pensar o no, pregunta que muchos pensarían que tendrá respuesta en un futuro, las máquinas definitivamente nos ayudan a entender e investigar a la mente. Como Sloman dice “What is important is to get on with the job of specifying what sorts of things are possible for human minds, and trying to construct, test, and improve explanation of those possibilities”²².

En este espíritu de investigación, surge la *filosofía computacional de la ciencia*. Sus proponentes argumentan que si por un lado, tenemos que la mente humana es un sistema procesador de símbolos, el cual, nunca ha sido fácil ver cómo puede ser descrito en términos de números reales, y si por el otro lado, aceptamos a la computadora como un sistema procesador de símbolos y además que la simulación del comportamiento por computadora no está limitada a sistemas expresados en números, encontramos una oportunidad conveniente para expresar formalmente modelos del pensamiento usando el mismo tipo de representaciones simbólicas que las utilizadas por el pensamiento. Se pueden escribir programas computacionales —en lenguaje simbólico en lugar de numérico— que describan procesos inteligentes de los que se tiene la hipótesis que los adultos usarían para resolver esta clase de problemas. Entonces podemos presentar al programa y a algunos sujetos humanos con problemas idénticos, y comparar su comportamiento. De la computadora obtendremos un registro; de los humanos un protocolo verbal y escrito de su comportamiento mientras están resolviendo los problemas. Entonces, podemos poner a prueba el programa —nuestra teoría del comportamiento— comparando el registro con el protocolo, justo como cualquier teoría es puesta a prueba comparando la predicción del curso del sistema con los datos que muestran el curso efectivo.

El precursor de la filosofía computacional de la ciencia es Herbert Simon, junto con Newell y Shaw. El nombre “Filosofía Computacional de la Ciencia” se debe a Paul Thagard. Esta

²¹ Thagard (1988), p. 3.

²² Sloman (1978), p. 110-111.

disciplina resulta de la colaboración entre la filosofía de la ciencia, la historia de la ciencia y las ciencias cognitivas. Las ciencias cognitivas a su vez, son una disciplina donde se involucran la psicología cognitiva, la investigación en inteligencia artificial, las neurociencias, la lingüística, la antropología y la filosofía, en conjunción.²³ Dentro de la filosofía computacional de la ciencia podemos identificar dos corrientes principales: la preocupada por los aspectos de descubrimiento en la ciencia, expuesta en la siguiente sección, y la involucrada con cuestiones de la estructura y el avance de la ciencia, expuesta en la sección tres y el siguiente capítulo.

2 Descubrimiento Científico Computacional

El descubrimiento ha sido puesto en el foco de atención por la historia de la ciencia. La narración del progreso científico alcanza su clímax periódico en momentos de descubrimiento. Contrastando, la filosofía de la ciencia contemporánea ha tomado un camino muy diferente poniendo el énfasis en la verificación. Los autores²⁴ de la perspectiva computacional de descubrimiento creen que los procesos de descubrimiento y verificación están íntimamente conectados. Más aún, por muy romántico y heroico que parezca el momento de descubrimiento, no pueden creer que los eventos que llevan a ese momento son completamente azarosos y caóticos, o que requieren de una genialidad que sólo puede ser entendida por mentes igualmente brillantes. Ellos creen que el proceso de descubrimiento puede ser descrito y modelado, y que hay rutas mejores y peores para el descubrimiento.

Sostienen que podemos diseñar programas computacionales capaces de simular descubrimientos científicos cuyo método de operación está basado en nuestro conocimiento de los métodos humanos de resolución de problemas, en particular, el método de *heurísticas selectivas*. La hipótesis central es que los mecanismos de descubrimiento científico pueden ser subsumidos como casos especiales del mecanismo general de solución de problemas, campo donde se ha acumulado un gran cuerpo de conocimiento del cual podemos hacer uso. En la filosofía de la ciencia ya se ha propuesto que el progreso científico se puede caracterizar como

²³ Kuipers (2001, capítulo 11) ofrece una reseña de la filosofía computacional de la ciencia.

²⁴ Esta sección es sustraída de la teoría de descubrimiento científico ofrecida por Pat Langley, Herbert Simon, Gary Bradshaw y Jan Zytkow. Langley et al (1987).

resolución de problemas, sin embargo, ni siquiera Larry Laudan²⁵ dijo gran cosa acerca de la naturaleza de la actividad en sí de resolución de problemas.

La psicología cognitiva describe el proceso de resolución de problemas de la siguiente manera:

- El cerebro humano es un sistema que procesa información cuyas memorias retienen estructuras simbólicas interrelacionadas y cuyas conexiones sensoriales y motoras reciben símbolos codificados del exterior por vía de órganos sensoriales y mandan símbolos codificados a órganos motores. Pensar se logra copiando y reorganizando símbolos en la memoria, recibiendo y produciendo símbolos, y comparando estructuras simbólicas para identificar o diferenciar.
- El cerebro resuelve problemas creando representaciones simbólicas del problema (llamado *espacio de búsqueda*). Es capaz de expresar situaciones de problemas iniciales, intermedias y finales así como toda la gama de conceptos empleada en procesos de solución, y usando los *operadores*. Estos se encuentran contenidos en la definición del espacio de búsqueda para modificar las estructuras simbólicas que describen la situación del problema (de ese modo llevamos a cabo una búsqueda mental a través del *espacio de búsqueda* para obtener una solución).
- La búsqueda para la solución de un problema no se lleva a cabo por prueba y error azarosa, sino selectiva. Es guiada en dirección de una situación *final* por reglas de dedo, llamadas heurísticas. Las heurísticas hacen uso de información extraída de la definición de los problemas y de las situaciones ya exploradas en el espacio de búsqueda para identificar caminos de búsqueda prometedores.

De esta manera, para la resolución de problemas postulamos un sistema procesador de información que crea representaciones de problemas y busca selectivamente a través de árboles de situaciones intermedias, procurando la situación final y usando heurísticas para guiar la búsqueda.

Hay distintos métodos de búsqueda, uno de ellos es *breadth-first*²⁶ que considera cada secuencia de operador posible antes de pasar a un nivel superior de búsqueda. En la estructura

²⁵ Laudan (1977) y (1996).

de árbol, busca todas las rutas posibles de un nodo, antes de pasar al siguiente nivel. Por tal, aunque la búsqueda sea extremadamente larga, está garantizada a encontrar eventualmente la secuencia de solución más corta posible, si alguna solución existe.

Como último comentario a este respecto, podemos añadir que si el descubrimiento científico es resolución de problemas, como afirmamos, entonces lo es de manera especial. Nos interesa empezar con un cuerpo de datos o unas leyes científicas, o ambos, que son conocidos. Lo que queremos es una nueva ley o patrón que describa a los datos (y posiblemente los explique) que aún no tenemos por sabidos. En el caso extremo en donde el conjunto de leyes previamente conocidas es vacío, llamamos al proceso de descubrimiento *guiado por los datos* (data-driven). En el otro extremo, el conjunto de datos puede estar vacío, en dado caso llamaremos al descubrimiento *guiado por la teoría* (theory driven).

3 Filosofía Computacional de la Ciencia²⁷

La filosofía computacional de la ciencia pretende ofrecer un nuevo recuento de la naturaleza de las teorías y explicaciones, y de los procesos que subyacen en su desarrollo. Más específicamente, aspira a entender la estructura y crecimiento del conocimiento científico, y lo quiere hacer en términos del desarrollo de estructuras computacionales y psicológicas.

Thagard se vale de una visión de la mente, la más desarrollada y plausible, que postula estructuras mentales internas o representaciones acompañadas por procesos para usar esas representaciones. El análisis computacional de la mente depende de la siguiente correspondencia entre pensamiento y programa: las estructuras mentales —del pensamiento— corresponden a estructuras de datos —de los programas—; así mismo, los procesos de pensamiento corresponden a los algoritmos de programación. Si añadimos que, un programa puede ser entendido como un conjunto de estructuras de datos acompañados de un conjunto de algoritmos que operan mecánicamente con las estructuras de datos, entonces podemos hacer modelos detallados de la mente escribiendo programas que cumplan con la correspondencia.

²⁶ Podemos encontrar una descripción de todos los métodos de búsqueda en Barr y Feigenbaum (eds) (1981).

²⁷ Thagard (1988) y (1992)

En cuanto a la representación de la estructura, Thagard asegura que la inteligencia artificial provee un conjunto de nuevas técnicas más poderosas que las del cálculo de predicados, que no tiene la misma capacidad de procedimiento.²⁸ Con estas herramientas se ubica a la filosofía computacional de la ciencia entre el rigor de una lógica formal y la falta de rigor de un recuento historicista. Buscando así, ofrecer análisis computacionales detallados de la estructura y el crecimiento del conocimiento científico. En palabras de Thagard, en acuerdo con su clasificación entre “pulcros” y “sucios” en la inteligencia artificial vista más arriba: “I hope to show that postpositivist philosophy of science can have some rigor in its scruffiness.”²⁹

Con el entendimiento —a través de técnicas de inteligencia artificial, de cuestiones centrales a la psicología cognitiva y de disputas dentro de la filosofía de la ciencia— de la estructura y el crecimiento del conocimiento científico, Thagard desarrolla una teoría para el cambio conceptual revolucionario.

Si bien la cuestión de si el cómputo puede modificar, conducir o incluso cambiar a la filosofía tiene más ángulos y caminos que los presentados aquí, es innegable que investigadores en ciencias cognitivas e inteligencia artificial han abierto puertas con este cuestionamiento que de otro modo no estaríamos cruzando.

²⁸ Posibles gracias a técnicas tradicionales en la lógica y la teoría de conjuntos.

²⁹ Thagard (1988), p. 4.

HISTORIA Y MARCO CONCEPTUAL

En este capítulo abordaremos al caso de estudio. Haremos el recuento histórico concerniente al modelo de los quarks. También se revisarán las concepciones de cambio revolucionario de Kuhn y Thagard. Por último se presentará la teoría de cambio conceptual de Thagard.

1 El Modelo de los Quarks en la Física de Partículas Elementales

El desarrollo de este trabajo tiene como objetivo analizar la estructura conceptual de las visiones o posturas en evolución, sin pretender proveer una narrativa histórica detallada. En sus recuentos históricos, Thagard, se concentra en las etapas más importantes del desarrollo de las ideas, intentando proveer “fotos instantáneas”³⁰ de las estructuras conceptuales en tiempos particulares. Estos momentos (capturados) sólo describirán parte de la organización conceptual enfocándose en los fragmentos más importantes. El análisis es un antecedente a un recuento computacional de cómo puede evolucionar la teoría. Nos limitaremos a revisar una sola etapa de la historia del desarrollo de la física de partículas elementales, para evitar una revisión que, al buscar abarcar un amplio período de la historia, se torne fútil.

El episodio a presentar será el modelo de los quarks propuesto por George Zweig³¹ enfocándonos en los fragmentos que reflejan el surgimiento de nuevas ideas dentro de la organización del sistema conceptual. Se intentarán incluir los antecedentes necesarios para su ubicación contextual y para facilitar su comprensión. La historia a continuación está intencionalmente sesgada para satisfacer los lineamientos de la teoría de cambio conceptual de Thagard que es desarrollada en la sección 3.

³⁰ De la palabra en inglés ‘snapshots’.

³¹ Otros modelos propuestos influyeron de manera decisiva en el desarrollo de la física de partículas elementales, el de Gell-Mann, dentro de la tradición del álgebra de corrientes y años después el modelo partón de Feynman, que inmediatamente se identificó con los quarks. Para una historia completa del desarrollo de la física de partículas elementales ver Pickering (1984).

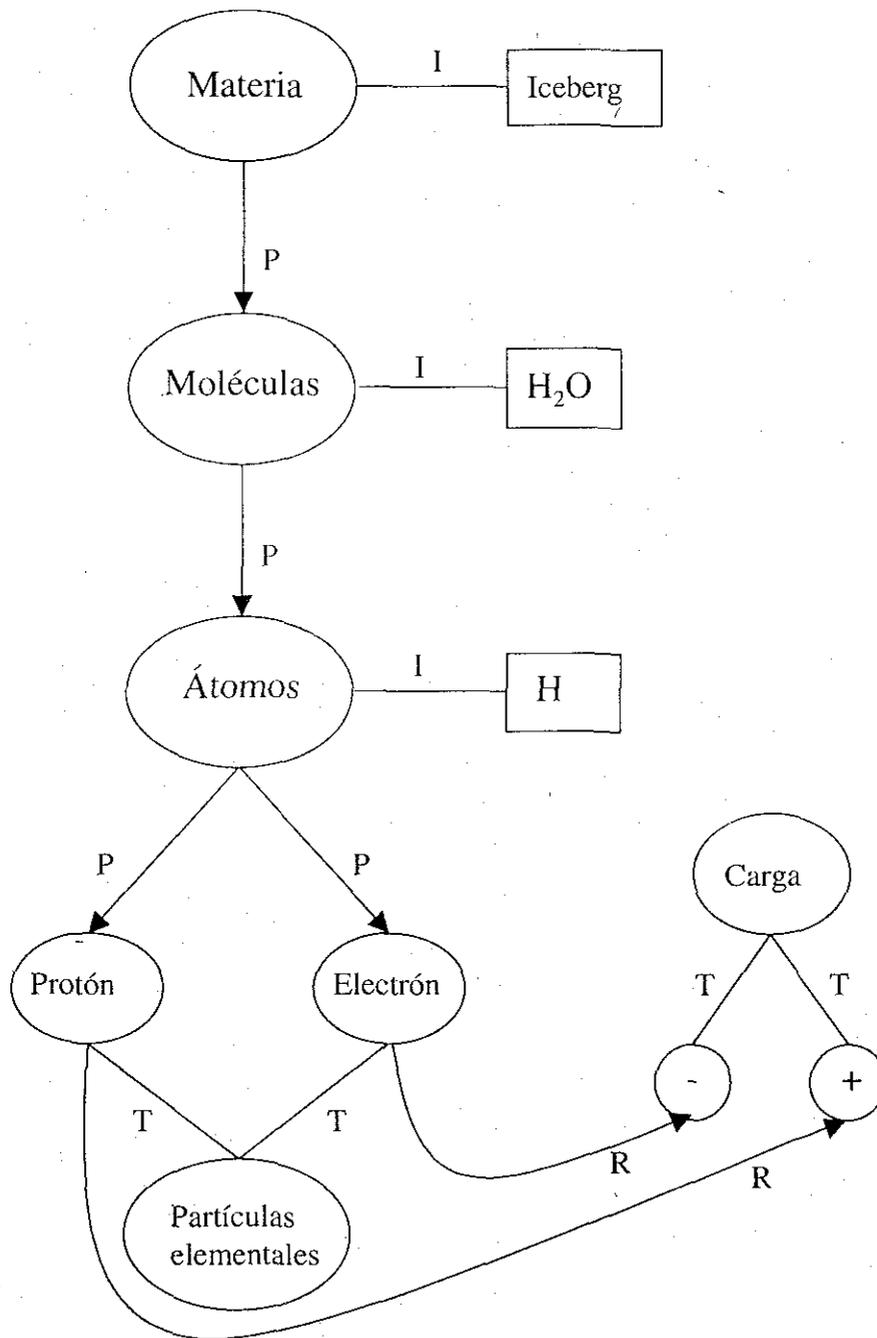


Ilustración 2. 1 Constituyentes de la materia (1920). La ilustración provee un tipo de *foto instantánea* de la organización conceptual de acuerdo con la teoría de Thagard, sección 3. Ejemplo de una jerarquía conceptual. Los enlaces de *tipo* se denotan con líneas rectas marcadas con "T". Los enlaces de *instancia* se denotan con líneas rectas marcadas con "I". Los enlaces de *regla* se denotan con líneas curvas terminadas en flecha marcadas con "R". Los enlaces de *parte* se denotan con líneas rectas terminadas en flecha marcadas con "P".

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.1 Antecedentes

Durante la década de los 20 se pensaba que toda la materia estaba compuesta por sólo dos partículas elementales, el electrón y el protón (ilustración 2.1). Asimismo se creía que las mismas estaban gobernadas por sólo dos fuerzas fundamentales, la gravitacional y electromagnética (ilustración 3.1 (a), p. 56). Esta sencillez hacía pensar que se alcanzaría una teoría completa, es decir, terminada. En los años 30's y 40's los físicos revisaron significativamente su visión de los constituyentes elementales de la materia y el campo moderno de la física de partículas elementales es el resultado de los problemas planteados en esta revisión.

La física de partículas surgió de la confluencia de líneas de investigación originalmente distintas: la física nuclear, los estudios de rayos cósmicos y la teoría de campo cuántica³².

- *La física nuclear* se encontraba en tales dificultades que el modelo mismo que la describía presentaba incongruencias. Para 1930 el consenso entre los científicos era que la materia estaba hecha de dos partículas elementales, electrones y protones, con electricidad negativa y positiva. Para el átomo neutro de número de masa A y número de carga Z se creía que contenía A protones y $A-Z$ electrones en su núcleo y Z electrones en su capa exterior. Se creía que todas las fuerzas relevantes a escala atómica eran electromagnéticas. Había problemas en considerar al núcleo como un sistema de protones y electrones. (i) Al suponer que el núcleo contenía $A-Z$ electrones, hay problemas cuando este número es impar, como en el ${}^6\text{Li}$ o ${}^{14}\text{N}$, la estadística (ya sea del tipo Bose o Fermi) es incorrecta. (ii) También, los valores de espín impares de los electrones en el núcleo implicaban una división hiperfina de las líneas espectrales atómicas a una escala de una milésima mayor de lo observado. (iii) Por otro lado, en la teoría cuántica del electrón era imposible confinar al ligero electrón dentro del pequeño núcleo. (iv) Por último, estaba el espectro continuo de energías del decaimiento β del electrón que cuestionaba la conservación de energía. Los físicos consideraron sugerencias radicales para modificar la mecánica, la electrodinámica e incluso las leyes

³² La hipótesis de que la física de partículas surgió de la confluencia turbulenta de la física nuclear, los estudios de rayos cósmicos y la teoría de campos cuántica fue usada como guía para elegir a los ponentes del simposio internacional de historia de la física de partículas, llevada a cabo en mayo de 1980 en el 'Fermilab'. Ver Brown y Hoddeson (1983).



de conservación, pero no fue sino hasta la introducción de nuevas partículas donde se encontró la solución. Con el descubrimiento del neutrón y la propuesta del neutrino se logró desplazar a los electrones fuera del núcleo.

- *Los rayos cósmicos* fueron propuestos en 1911 por V.E. Hess para explicar la presencia de ionización en la atmósfera, esto es, de ionización en la ausencia de tormenta eléctrica. Este fenómeno implicaba la existencia de radiación penetrante de origen desconocido, al parecer de una fuente extraterrestre. Con el uso de electrómetros, cámaras de nubes, telescopios de rayos γ , contadores Geiger y otros aparatos, para el año 1930 se contaba con la estructura necesaria para los descubrimientos de nuevas partículas a realizarse durante las siguientes dos décadas.
- Tanto *la teoría de campo cuántica* como la teoría relativista de los electrones, que condujo a la predicción del positrón, surgieron de la fértil mente de Paul A.M. Dirac en un trabajo de electrodinámica cuántica que hizo en Febrero de 1927, donde propuso una solución al problema de la dualidad onda-partícula, que preocupaba a los físicos desde la hipótesis del cuanto de luz de Einstein en 1905, justo después de que Heisenberg y Schrödinger habían inventado la mecánica cuántica. Dos años más tarde se encontró que la masa del electrón puntual era infinita, lo cual complicaba hacer cálculos, y no fue sino hasta después de la guerra³³ que se logró una electrodinámica cuántica más consistente. Sin embargo, aunque en ese momento la teoría de Dirac era claramente imperfecta, se podía ajustar como una herramienta efectiva para analizar a los rayos cósmicos de alta energía.

Para 1932, ya se había aceptado la teoría corpuscular de Einstein (los fotones como partículas) y se había descubierto al neutrón. Con las nuevas partículas ahora se contaba con cuatro partículas elementales (fotones, electrones, protones y neutrones) con las cuales la imagen del mundo atómico parecía —por fin— estar completa. El núcleo se componía de neutrones y protones, y el comportamiento de los electrones que rodeaban al núcleo era bien descrito por la mecánica cuántica. La realidad era que no había nada completo; había problemas en la descripción de la desintegración β y no se conocía la naturaleza de la fuerza que mantiene

unidos entre sí a los componentes nucleares. Las teorías que apuntaban a resolver estos problemas predecían la existencia de más partículas que las que los experimentadores buscaron y encontraron, pero encontraron otras más que no habían pronosticado. En estas dos décadas (20 y 30) de revisión no sólo se encontraron más partículas, también el número de interacciones fundamentales pasó de dos a cuatro. En 1934, Fermi formuló una teoría para el decaimiento β de donde se derivó la fuerza *débil*. En 1935, Hideki Yukawa propuso una fuerza *fuerte* como la responsable de sujetar a los nucleones en el núcleo.

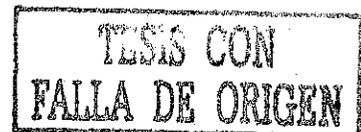
A finales de los 40's, los experimentadores de rayos cósmicos decidieron que estaban observando la producción de dos diferentes tipos de partículas donde hasta entonces sólo sospechaban de la existencia de una. Reconocieron al muón $-\mu-$ como un *leptón* —una partícula como el electrón, inmune a las interacciones fuertes— con masa³⁴ de 105MeV —o sea, 200 veces más pesado que el electrón— pero por demás idéntico a él. La segunda partícula, el pión $-\pi-$, mostraba una sección transversal de interacción grande con la materia nuclear, característica de una partícula que interactúa fuertemente, por lo que se clasifica con los *hadrones*.³⁵ Éste tenía una masa de 140MeV, considerablemente menor que otros hadrones (i.e., protón: 938MeV) y fue identificada como portadora de interacciones fuertes predichas en 1935 por Yukawa.

Otro leptón fue descubierto en 1953, el neutrino $-\nu-$ eléctricamente neutro. En los siguientes años, la lista de leptones se mantuvo fija, pero la de hadrones continuó creciendo; entre 1947 y 1954 se fueron identificando varios hadrones tanto en rayos cósmicos como en experimentos de aceleradores. El mesón-k o kaón (K: 500MeV), lambda (Λ : 1115MeV), sigma (Σ : 1190MeV) y xi (Ξ : 1320MeV): inestables todas y que decaían a partículas de menor masa con vidas medias entre 10^{-8} a 10^{-10} segundos. En 1955, en un acelerador de baja energía se observó una partícula conocida como delta (Δ : 1230MeV). Única por su vida tan corta, 10^{-23} segundos, por lo que su existencia tuvo que ser inferida de un efecto resonante en una sección transversal de colisión pión-nucleón.

³³ Los desarrollos de la 2° Guerra Mundial, dieron pie a nuevas tecnologías para la física de partículas.

³⁴ Equivalente a la energía de reposo.

³⁵ Del griego 'αδρος' que significa 'fuerte'.



A principios de los 60's se encontraron más resonancias. En 1961: eta (H: 550MeV), rho (Γ : 770MeV), omega (Ω : 780MeV) y k-estrella (k^* : 890MeV). En 1962 fi (Φ :1020MeV), y así cada vez más. Es en esta época cuando la población de partículas elementales sufre una *explosión demográfica*. En distintos laboratorios se siguieron descubriendo más y más resonancias. En un artículo de revisión publicado en 1964,³⁶ año de la propuesta de los quarks, se hacía notar que cinco años atrás era posible hacer una modesta lista de 30 partículas subatómicas, pero que desde entonces se habían descubierto entre 60 y 70 más.

Otro grupo de partículas que se descubrió, las antipartículas, es importante. Estos son estados con la misma masa de la partícula correspondiente pero con carga eléctrica opuesta y otros números cuánticos. La primera antipartícula en ser descubierta, en 1932, fue el antielectrón o positrón $-e^+$ - considerada como la confirmación de la teoría cuántica del electromagnetismo de Paul Dirac. De acuerdo con esta teoría, se esperaba que todas las partículas tuvieran antipartículas correspondientes. Muchos físicos se mantuvieron escépticos de la existencia de las antipartículas hasta 1955 cuando se descubrió en el laboratorio Bevatron de Berkeley el antiprotón $-\bar{p}$ -. Desde entonces se esperaba que todas las partículas tendrían su antipartícula correspondiente, muchas de las cuales fueron observadas experimentalmente logrando así engrosar la lista de hadrones aun más.

³⁶ Chew et al (1964).



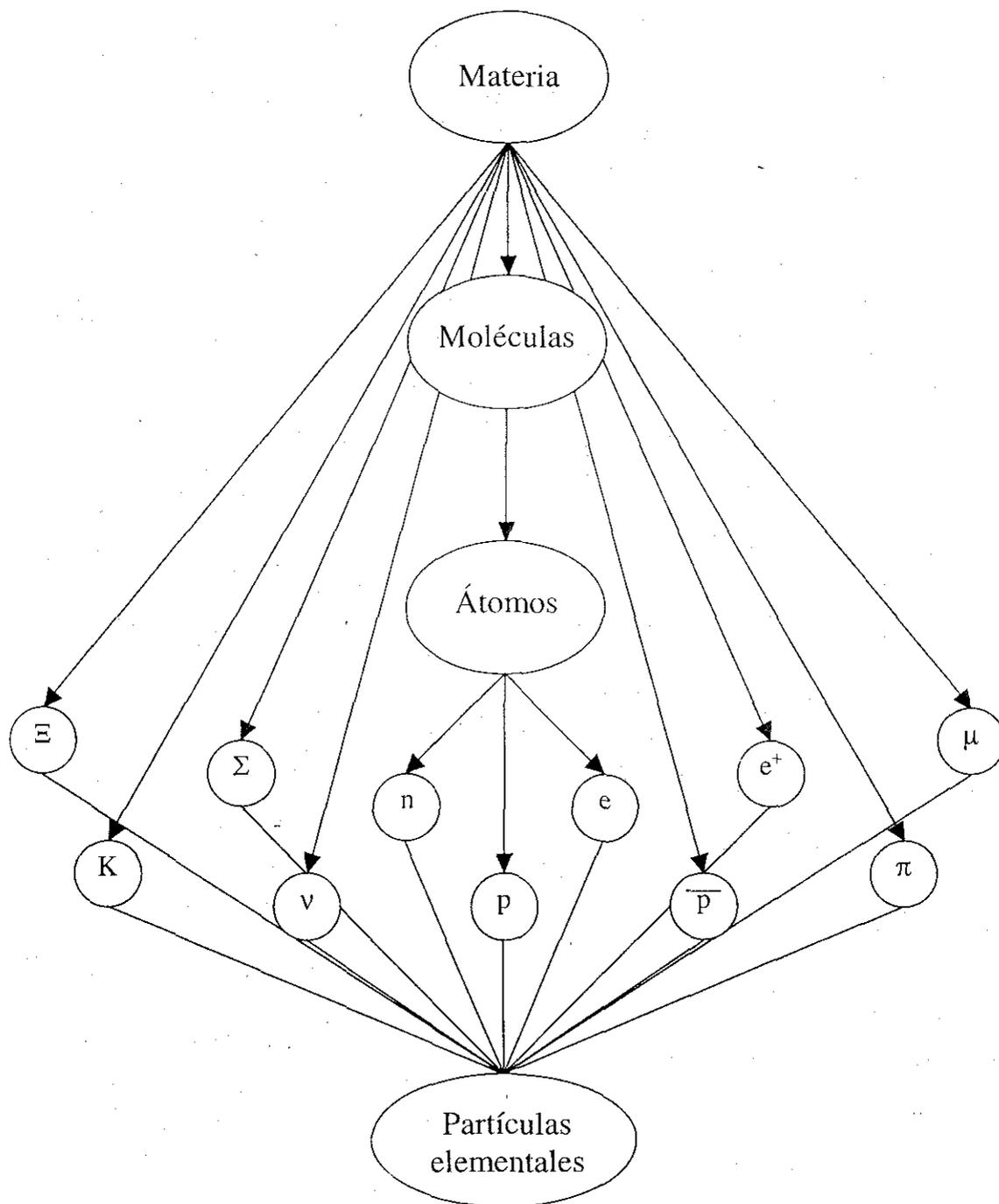


Ilustración 2. 2 Proliferación de partículas elementales. Las flechas indican relaciones de parte, mientras que las líneas indican relaciones de tipo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Como ya vimos, la clasificación de las partículas se asociaba con la clasificación de las fuerzas. Se llamaban hadrones, a las partículas que experimentaban la interacción *fuerte*, como los constituyentes del núcleo atómico: protón y neutrón. Se llamaron leptones, a las partículas que eran inmunes a la *fuerte*, como el electrón. En la década de los 60's, los físicos de partículas reconocían cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza³⁷, las interacciones: fuerte, electromagnética, débil y gravitacional (ilustración 3.1 (b), p. 56). Responsable del enlace de los protones y neutrones en el núcleo, la fuerza "fuerte", se consideraba de corto alcance y era la fuerza dominante en interacciones de partículas elementales. Alrededor de un siglo después de formulada la ley de gravitación, Charles A. Coulomb midió la fuerza que actúa entre dos cargas eléctricas, después James Clerck Maxwell publicó en el siglo XIX la teoría que logró unificar la electricidad y el magnetismo. Cerca de 1000 veces más débil que la fuerte, la fuerza electromagnética actuaba a larga distancia, era responsable del enlace de los electrones y el núcleo en los átomos, y también de los fenómenos electromagnéticos macroscópicos: la luz, ondas de radio, etcétera. De corto alcance y alrededor de 100,000 veces más débil que la fuerte, la fuerza débil tenía efectos negligibles excepto en circunstancias especiales: decaimiento espontáneo del núcleo y de partículas elementales, y procesos de generación de energía en estrellas. A finales de los 30's, el análisis de todos los procesos considerados como interacciones débiles puso de relieve las similitudes que existen entre ellos y demostró que responden decididamente a un origen común, la misma fuerza. Por último; de largo alcance, 10^{38} veces más débil que la fuerte y con efectos completamente negligibles en el mundo de las partículas elementales; la fuerza gravitacional. La primera fuerza identificada por los físicos, formulada por Newton poco después de 1680, es responsable por la atracción entre todos los cuerpos masivos que hay en el universo. Ella es responsable de fenómenos gravitatorios macroscópicos: órbitas planetarias, caída de cuerpos cerca de la superficie terrestre, etcétera.

³⁷ Ne'eman y Kirsh (1968) ofrecen una revisión completa de las fuerzas fundamentales.



1.2 Leyes de conservación y números cuánticos

Además de las fuerzas, la física de partículas ha usado las leyes de conservación³⁸ para darle sentido a su campo de estudio.

La conservación de la energía-momentum implicaba que las partículas podían decaer sólo en otras partículas cuya masa combinada era menor o igual a la masa de la partícula antecesora³⁹. Más aun, en virtud de su estatus definicional, la conservación de la energía-momentum podía ser usada para extraer información sobre la interacción de partículas eléctricamente neutras. Cualquier desequilibrio aparente en el balance de energía-momento tenía que ser debido a partículas neutras, por lo que se infirió rutinariamente la existencia de partículas neutrales que no son registradas por los detectores.

Las siguientes leyes de conservación asocian un número cuántico con valores posibles bien definidos; de acuerdo con ellas, la mecánica cuántica nos dice que las cantidades asociadas a las partículas subatómicas no pueden tomar cualquier valor, sino que por el contrario los valores que pueden tomar son múltiplos de una unidad fundamental denominada η .⁴⁰

- Momento angular orbital: 1, 2, 3,...
- Espín: 0, 1/2, 1, 3/2, 2,...

Partículas con espín medio-entero (e.g., electrón y protón) se conocieron como *fermiones*. Las partículas con espín entero (e.g., pión y rho), como *bosones*.

Todos los leptones conocidos eran fermiones, pero los fermiones y bosones se encontraban igualmente representados entre los hadrones. Los fermiones hadrónicos eran conocidos como *bariones*, mientras que los bosones hadrónicos eran llamados *mesones*.

³⁸ Las leyes simplemente sostienen que algunas cantidades son fijas pase lo que pase. Se deben conservar propiedades y cantidades en ambos lados de las reacciones. Por ejemplo, la carga nunca cambia en ninguna reacción o decaimiento: $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$, esto es, la carga negativa del pión (-1) y la positiva del protón (+1) suman cero y se conservan después de la reacción ya que las cargas del nuevo pión y del neutrón son ambas 0.

³⁹ De acuerdo a la teoría de la relatividad la masa y la energía son interconvertibles, de esta manera si la masa combinada de los productos de decaimiento es menor que la de la antecesora, la energía-masa de exceso de la partícula antecesora aparece como energía cinética de los productos.

⁴⁰ $\eta = h/2\pi$, donde h es la constante de Planck.



A los siguientes números cuánticos (asociados a leyes conservacionales) se les concedía un estatus definicional, ya que siempre se conservarían.

- Carga eléctrica: +1 (positiva), -1 (negativa) y 0 (sin carga).
- Número bariónico: +1 a bariones, -1 a anti-bariones y 0 a todas las demás partículas.
- Número leptónico: +1 a leptones, -1 a anti-leptones y 0 a todas las demás partículas.

Los números cuánticos bariónico y leptónico ayudaron a entender las interacciones en la física de partículas. Por ejemplo, la conservación de la carga no prohíbe el decaimiento $p \rightarrow e^+ + \pi^0$, pero este no se ha visto. Sin embargo, podemos notar que el número bariónico no se conserva, el protón tiene 1 y las partículas derivadas están ambas asociadas al 0. La ley de conservación del número bariónico prohíbe este decaimiento.

Los números cuánticos siguientes se asocian a leyes que sólo se conservan en ciertas reacciones, o sea que están restringidas:

- Paridad: +1 (paridad positiva) y -1 (paridad negativa), este es un número cuántico multiplicativo.⁴¹ (Se conserva en interacciones electromagnéticas y fuertes.)

Los números cuánticos paridad y espín juntos forman la base para más jerga. Las cantidades físicas con espín 0 y paridad positiva (denotado 0^+) son conocidas como cantidades escalares; 0^- , pseudo escalares; 1^+ , vectores axiales; y 1^- , vectores.

- Extrañeza; -2, -1, 0, +1. (Se conserva en interacciones fuertes.)
- Isospín. (Se conserva en interacciones fuertes.)

Estos dos últimos números cuánticos conformaron nuevas herramientas empíricas y analíticas que daban sentido a muchas de las propiedades de las muchas partículas descubiertas en los 50. De entre estas, los kaones y las lambdas (vistas más arriba) eran conocidas como partículas *extrañas*, porque aunque eran producidas de manera abundante en interacciones fuertes, decaían de manera relativamente lenta, con vidas medias típicas de procesos de decaimiento débil. El número cuántico que portaban estas partículas, apropiadamente llamado extrañeza, fue propuesto de manera independiente por Murray Gell-Mann y Kasuhiko Nishijima. Los

⁴¹ $-1 \times -1 = +1$.



kaones tendrían extrañeza +1, las lambdas -1 y otras partículas como el pión y el protón, extrañeza 0.

En interacciones fuertes el protón y el neutrón parecían ser indistinguibles, así como los tres estados de carga del pión, π^+ , π^0 y π^- (los superíndices indican la carga eléctrica). Para distinguirlos se les asignó el número cuántico isospín **-I-**. El isospín trajo consigo mayor economía así como un ordenamiento, agrupando a diferentes partículas en multipletes⁴². De esta manera los teóricos que trabajaban con interacciones fuertes sólo tenían que considerar las propiedades que incluían a todos los miembros del multiplete en lugar de las de cada una. Para la segunda mitad de los años 50 muchos teóricos intentaron usar este útil hecho para lograr una economía explicativa mayor e intentar agrupar a las partículas en familias aun más grandes.

En 1961 los esfuerzos culminaron con “el óctuple camino”⁴³ o la clasificación de hadrones SU(3), los primeros en proponerlo fueron Gell-Mann y Yuval Ne’eman.

1.3 El óctuple camino⁴⁴

En la física teórica hay una conexión directa entre cantidades conservadas y ‘simetrías’ de la interacción subyacente. De tal suerte, se dice que las interacciones fuertes, que conservan el isospín, poseen una simetría isospín. La simetría, que es descrita por una rama de las matemáticas llamada teoría de grupos⁴⁵, nos dice que podemos mover un sistema de alguna forma y seguir viéndolo igual, o sea que, la elección de ejes con respecto a la que medimos la tercer componente del isospín es arbitraria. Diferentes simetrías corresponden a grupos de simetría diferentes y el grupo asociado con la arbitrariedad de la orientación de los ejes del isospín se denota convencionalmente como ‘SU(2)’⁴⁶. Asociado con cada grupo matemático hay un conjunto de ‘representaciones’ que describen a las familias de objetos que se

⁴² Como se suponía al isospín como una cantidad vectorial, su tercer componente (I_3) también era supuesto cuantizado y se tomaban diferentes valores de I_3 para distinguir entre diferentes miembros de cada familia de isospín o *multiplete*. Para el pión de isospín 1, el valor I_3 : +1 correspondía a π^+ , 0 para el π^0 y -1 para π^- . Las partículas sin compañeros, como la Λ neutral, eran asignadas a grupos de un solo miembro o ‘singuletes’.

⁴³ Gell-Mann lo llamó así en alusión a los principios Budistas para vivir correctamente.

⁴⁴ También conocido como la vía del octete o la manera óctuple.

⁴⁵ Un grupo es un conjunto de elementos con cierta estructura algebraica que pueden ser convertidos unos en los otros por reglas definidas. La teoría de grupo fue inventada en 1832 por Evariste Galois. Gregory (1988).

⁴⁶ El 2 se refiere al neutrón y al protón.

transforman —unos con otros— bajo la operación simétrica relevante. Las representaciones de $SU(2)$ pueden acomodar cualquier número entero de objetos y cada multiplete de isospín puede ser identificado con un grupo de representación del tamaño apropiado. Cabe mencionar, que para trabajar con grupos de $SU(n)$ sólo se necesita álgebra de matrices.

Haciendo la conexión con la teoría de grupos, los físicos trasladaron la búsqueda para una clasificación más amplia que la del isospín, una simetría mayor de las interacciones fuertes con representaciones adecuadas para acomodar partículas de diferentes valores, tanto de isospín como de extrañeza.

De acuerdo con $SU(3)$ ⁴⁷ las partículas con el mismo espín y paridad, pero isospín y extrañeza diferentes pueden ser agrupadas en familias grandes o multipletes. Estas familias contienen números fijos de partículas —1, 3, 6, 8, 10, 27, etc.— que son determinadas por la estructura representacional de $SU(3)$, y que caen en patrones característicos cuando son puestos en una gráfica contra la extrañeza y el tercer componente del isospín.

⁴⁷ Las siglas $SU(3)$ significan (grupo) unitario especial de matrices de 3×3 dimensiones.

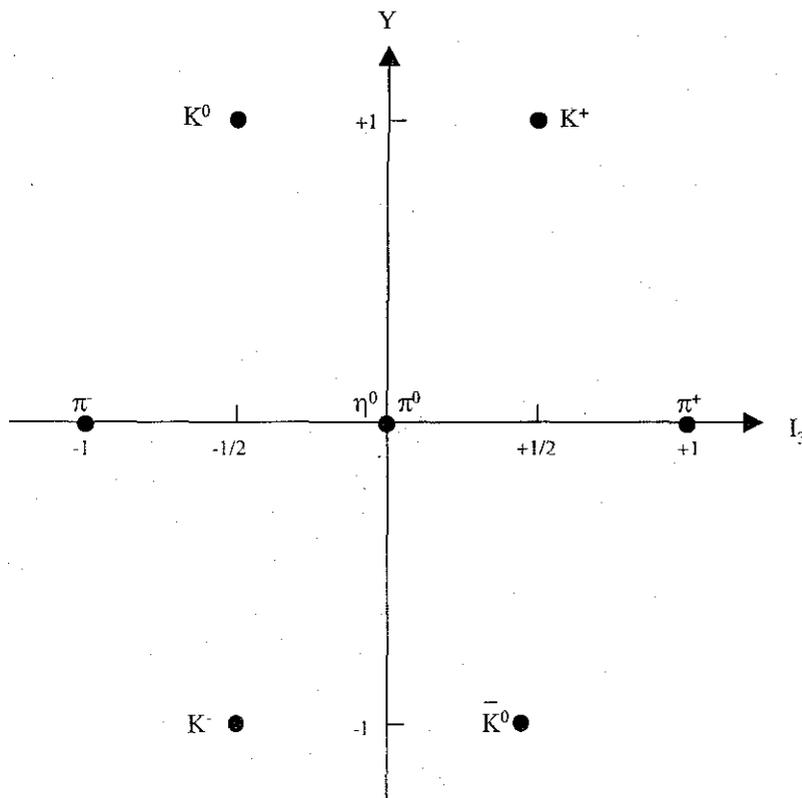


Ilustración 2.3 Clasificación SU(3) del octete de mesones de espín 0. El número cuántico de hipercarga (Y) es dado por la suma de los números cuánticos bariónico y extrañeza, y es la variable relevante de teoría de grupos.

La ilustración 2.3 muestra las asignaciones SU(3) del multiplete para los mesones $K^0, K^+, K^-, \bar{K}^0, \pi^0, \pi^+, \pi^-$ y η^0 que son bajos en masa, y la ilustración 2.4 muestra la familia de bariones $n, p, \Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+, \Xi^-, \Xi^0$ y Λ también bajos en masa.

Esta agrupación de los hadrones sugería que podían existir partículas subyacentes recordando la forma en la que lo hizo la tabla periódica de los elementos. La tabla no fue entendida en su totalidad hasta que se conoció que los átomos estaban hechos de electrones y núcleos. Los constituyentes del átomo explicaban la organización y propiedades de los elementos como más tarde lo harían los quarks con las partículas hasta entonces elementales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

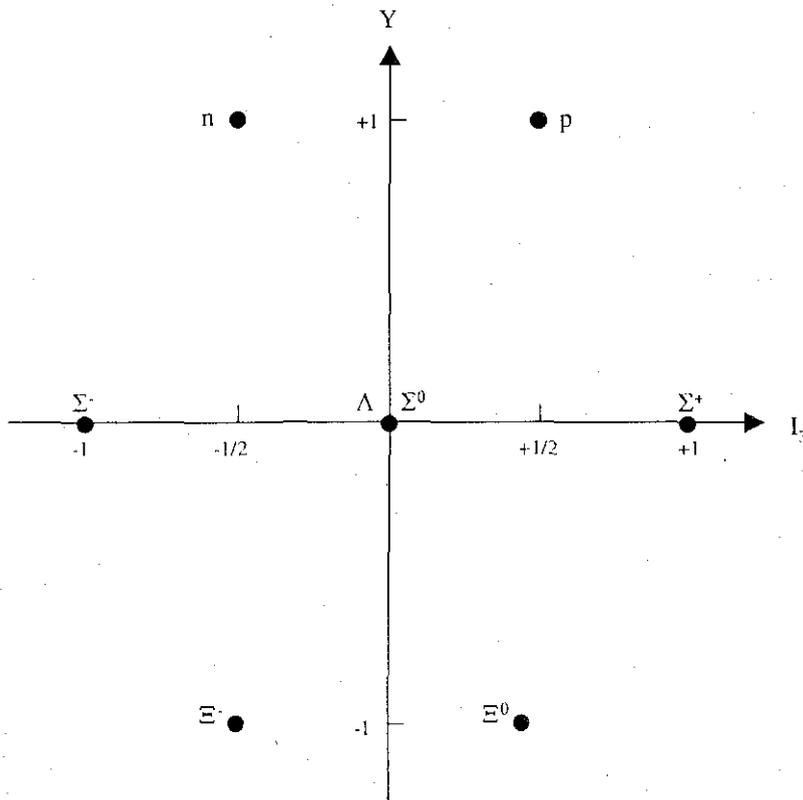


Ilustración 2. 4 Clasificación SU(3) del octete de bariones de espín $\frac{1}{2}$.

1.4 Los quarks.⁴⁸

A principios del año 1964, el mismo teórico de Caltech⁴⁹ Murray Gell-Mann publicó un artículo⁵⁰ donde propone que los hadrones deben ser vistos como partículas compuestas, hechas de partículas más fundamentales que se manifestaran en una simetría SU(3). El modelo de los quarks fue propuesto de manera independiente y casi al mismo tiempo por George Zweig,⁵¹ un graduado de Caltech que se encontraba en una visita post-doctoral en CERN. Ambas propuestas concordaban no sólo en que los hadrones deberían tener constituyentes, sino incluso, en los atributos básicos que estos deberían tener. Los quarks deberían tener espín $\frac{1}{2}$ y número bariónico $\frac{1}{3}$. En lo que se refiere al isospín y a la extrañeza se supone que

⁴⁸ Gell-Mann tomó el nombre de 'quark' de la novela *Finnegan's Wake* de James Joyce (que no tiene significado en inglés, pero en alemán significa 'cuajada' y también significa 'absurdo' en el slang alemán); Zweig llamó a sus constituyentes 'aces'.

⁴⁹ Instituto Tecnológico de California.

⁵⁰ Reimpreso en Gell-Mann y Ne'eman (1964).

⁵¹ El artículo de Zweig nunca fue publicado y años más tarde se convirtió en el artículo sin publicar más famoso de la física moderna.

debería haber tres especies distintas de quarks: 'up' $-u-$ y 'down' $-d-$, hechos de isospín 1/2 doblete de extrañeza cero y el quark 'strange' $-s-$ con isospín 0 singulete de extrañeza unitaria. Aparte del número bariónico: $1/3$, lo más raro de los quarks es su carga eléctrica: $+2/3$ para el quark u y $-1/3$ para los quarks d y s . Los mesones se construyen con pares quark-antiquark ($q\bar{q}$) y los bariones con tres quarks (qqq).

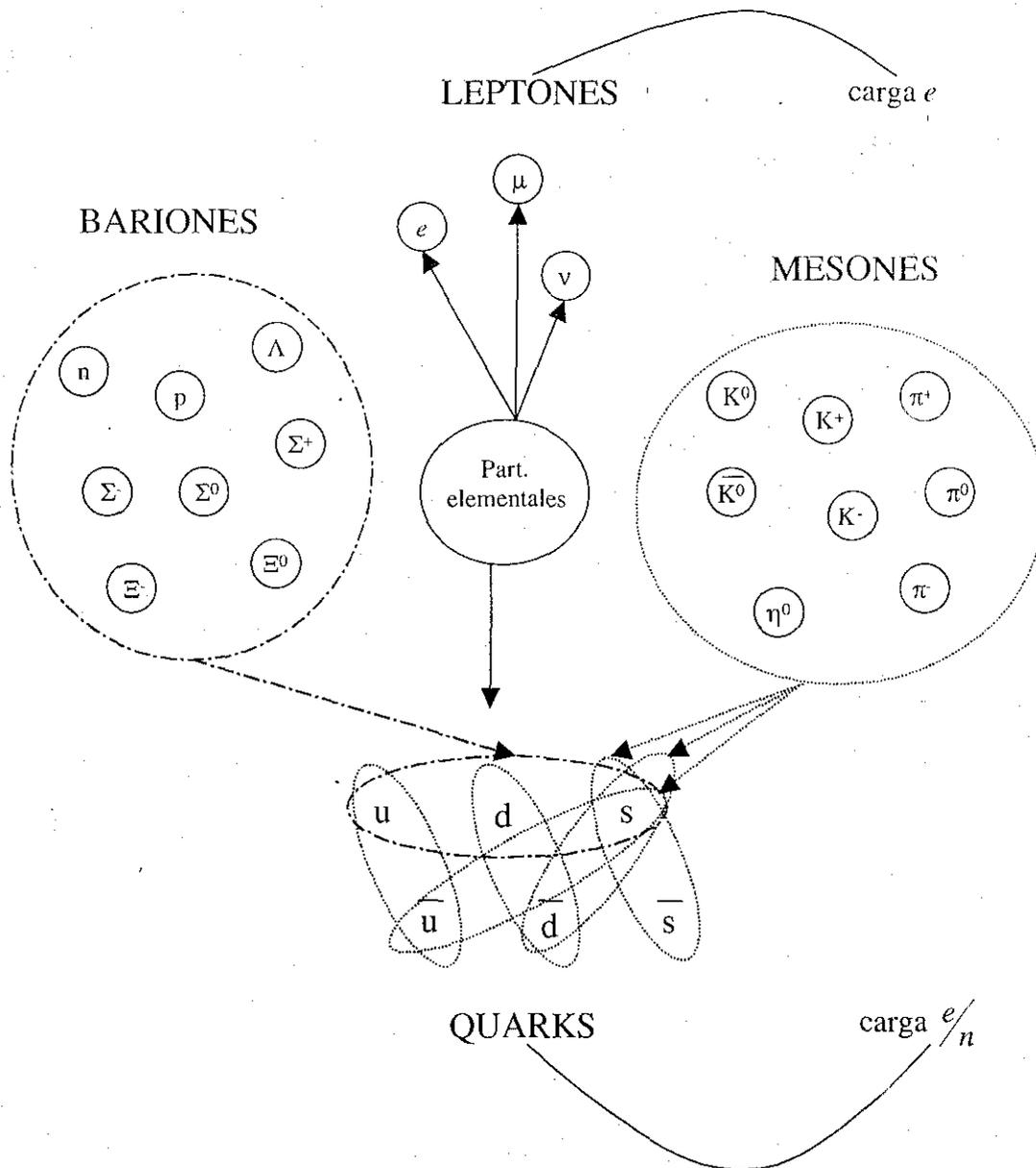
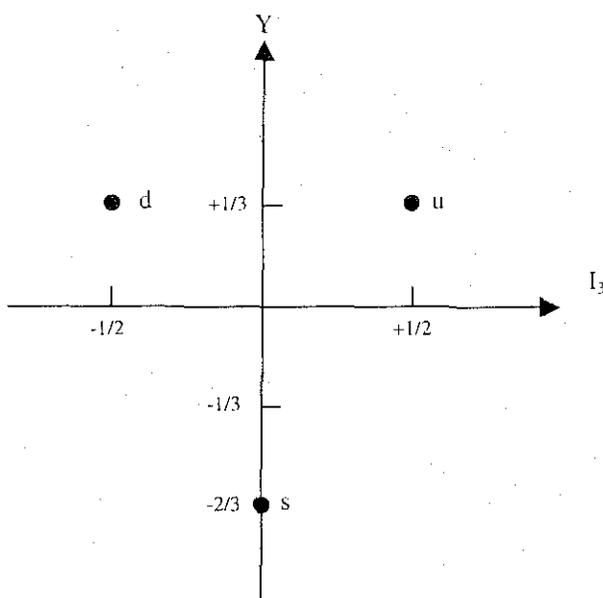


Ilustración 2. 5 Organización jerárquica del modelo de los quarks. Las flechas sólidas indican relaciones de tipo. Las flechas punteadas indican relaciones de parte exclusivas a los mesones. Las flechas con punto y raya indican relaciones de parte exclusivamente para los bariones. Las líneas curvas indican enlaces de regla.

De entre las representaciones características de $SU(3)$ (recordemos: multipletes con 1, 3, 8, 10, 27, etc) el triplete con tres miembros era conocido como la representación fundamental de $SU(3)$ (ilustración 2.6) porque todas las otras representaciones podían ser derivadas de ella por manipulaciones matemáticas apropiadas. De aquí que se siguiera identificar a la representación del triplete fundamental con un triplete de entidades fundamentales: los quarks.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Ilustración 2.6 Los quarks como representación fundamental de $SU(3)$.

1.5 Los aces de Zweig

El modelo de aces⁵² resultaba inaceptable para las teorías del momento: la teoría de campo y la matriz-S. Para mediados de los 60 la teoría de campo tradicional estaba en decadencia, la postura favorecida en la época era la matriz-S. Para explicar porque no se veían los quarks libres se necesitaba que estos fueran muy masivos pero al combinarse en hadrones los cuales se hacen más ligeros; esto es posible ya que la diferencia de masa se puede considerar como la 'energía de enlace'. El problema para la teoría de campo es que no podía calcular este enlace tan fuerte, sólo enlaces débiles como los de los átomos. Para el programa de la matriz-S, especialmente la formulación 'bootstrap', se creía que no había entidades fundamentales. La

⁵² De aquí en adelante quarks.

mera sugerencia de que todos los hadrones estaban contruidos con tres quarks era un anatema a tal pensamiento.⁵³

El modelo estaba rodeado por ambos lados, experimentalmente, no había señal de un quark libre; teóricamente, era desacreditado. En su libro sobre el modelo quark,⁵⁴ el teórico holandés J. Kokkedee defendía el modelo argumentando que el hecho de que no se habían detectado los quarks se podía deber a que estos no podían existir como partículas individuales sino, como los fonones dentro de un cristal, que pueden existir sólo dentro de los hadrones.⁵⁵ Sugiere que se tome al modelo, por lo menos por ese momento, como una expresión simplista y tentativa de una dinámica hasta entonces oscura del mundo hadrónico subyacente. Como tal, de cualquier modo, el modelo es de gran valor heurístico.

1.6 Éxito del modelo: interacción entre teoría y experimento

El éxito del modelo de Zweig radica en las aplicaciones fenomenológicas. En lugar de manipular estructuras abstractas de la teorías de grupos, ahora los físicos podían trabajar con constituyentes físicos (a los que les encontraban sentido), y todos los físicos habían sido instruidos con un buen entrenamiento en sistemas compuestos. Para mayor claridad, revisemos tres casos extraídos del trabajo de Zweig,⁵⁶ donde propuso su modelo en 1964. El primero atañe a la clasificación de hadrones del óctuple camino. En la representación $S(U)3$ se podía acomodar una variedad de multipletes hadrónicos 1, 3, 6, 8, 10, 27, etcétera, pero en los experimentos parecía que todos los hadrones eran miembros de singuletes, octetes y decupletes (no había para 3, 6, 27,...). Para la teoría de grupos este hecho empírico no tenía significado, pero para el modelo de Zweig prometía, al menos, el comienzo de una explicación. Si los mesones estaban hechos de un par ($q\bar{q}$) quark-antiquark y los bariones de tres (qqq), entonces de acuerdo con reglas aceptadas de combinaciones de números cuánticos se llegaba sólo a singuletes y octetes de mesones y singuletes, octetes y decupletes de

⁵³ La idea de la teoría en su formulación 'bootstrap' es que ninguno de los hadrones o partículas de interacción fuerte es fundamental; cada una es meramente un estado ligado dinámico de varias combinaciones de hadrones incluyéndose a si mismo. Gell-Mann y Ne'eman (1964).

⁵⁴ Kokkedee (1969).

⁵⁵ Este comentario es un buen antecedente de lo que sucedió después. En el modelo estándar los quarks no pueden ser aislados debido a que se encuentran *constrañidos* dentro de los hadrones.

⁵⁶ 'An $SU(3)$ Model for Strong Interaction Symmetry and Its Breaking'. (no publicado)

bariones. De este modo, la ausencia de posibles multipletes hadrónicos, que se podía atribuir a los quarks, justifican el no haber familias con otro número de miembros.

El segundo hecho fenomenológico que explicaba el modelo de Zweig era la división de masa en los espectros dentro de los multipletes SU(3). Asumir que el quark s era más pesado que los u y d —como lo hacía el modelo— daba como resultado un fácil manejo de las divisiones de masa vistas en los espectros.

El tercer hecho fenomenológico tiene que ver con el análisis que hace Zweig de acoplamiento y decaimiento hadrónico. El mesón phi decaía, de forma dominante, en un par kaón- antikaón y no en un mesón rho más un pión como era esperado. La teoría de grupos daba una explicación *ad hoc* a esto. En contraste, Zweig argumentaba que el mesón phi tenía 'extrañeza oculta': que estaba compuesto por un quark s y un anti- s —un par $s\bar{s}$ — cuya extrañeza neta se cancelaba. Argumentaba aun más, que estos quarks constitutivos perduraban a través del proceso de decaimiento que ocasionaban la materialización de ya sea un par $u\bar{u}$ o $d\bar{d}$ y por ende llevaban automáticamente a mesones que contenían quarks extraños: kaones, en lugar de rhos o piones no extraños. El argumento de que había extrañeza escondida en el decaimiento del mesón phi fue más tarde conocido como la 'regla de Zweig'.

Desde un punto de vista teórico, las ventajas en reformular las propiedades de los hadrones dentro de la teoría de grupos⁵⁷ en términos de quarks se hacían evidentes al atribuirles propiedades físicas, como el espín 1/2 (compuestos $q\bar{q}$ tendrían espín 0 o 1 y qqq 1/2 o 3/2). Las dos posibilidades de orientación del espín de los compuestos hadrónicos en combinación con la simetría SU(3) resultaban en una simetría S(U)6 aproximada. Esta representación estructural ofrecía un sistema de clasificación mayor para los hadrones (i.e., multipletes con 56 partículas) y lograba predicciones de propiedades hadrónicas en buen acuerdo con los experimentos. Estos eran avances claros sobre la postura del óctuple camino, que no explicaba porque los bariones deberían tener masas similares y espín 1/2 o 3/2, pero es importante notar que para esta etapa, el modelo de Zweig no había superado a la teoría de grupos (abstracta) ya que había un camino alternativo, por medio de una extensión analógica a la física nuclear, para llegar a S(U)6.

⁵⁷ Todavía no superada, como se verá más adelante.

Áreas donde el modelo de los quarks no tenía competencia significativa de teorías rivales eran la espectroscopia y acoplamiento hadrónico. Para el modelo de los quarks, los hadrones mismos constituían el espectro de niveles de energía de sistemas de quarks compuestos, no había alternativa capaz de ofrecer esquemas de niveles de resonancia en los espectros de mesones y bariones, y además de clasificar a los hadrones y explicar su espectro de masas. Con el nuevo modelo se analizaban mecanismos para la producción y decaimiento hadrónico, rindiendo cálculos de acoplamiento que se contaban como éxitos del modelo al encontrar acuerdo entre datos y experimento.

Por medio del modelo de los quarks, teóricos y experimentadores mantenían una relación simbiótica de apoyo mutuo. Así como la práctica de los teóricos fue estructurada con los productos de la investigación experimental, de la misma forma, la práctica experimental fue estructurada con los productos de la investigación teórica. Ya desde 1962 (con la predicción de Gell-Mann de Ω)⁵⁸ los teóricos habían empezado a dar a los experimentadores, y no sólo a recibir de ellos como lo habían hecho hasta entonces. La tradición creciente del modelo de los quarks desembocaba en programas determinados de mediciones precisas y en el desarrollo de técnicas sofisticadas de análisis de datos. La actividad de los modeladores de los quarks servía para sostener y motivar al creciente programa experimental de física de resonancias. Este programa generaba más y más información en resonancias y sus propiedades, que, a su vez, servían para sostener y motivar más trabajo en el modelo de los quarks.

El modelo de los quarks es tan sólo el gatillo que desencadenó la transformación que sufrió la física de partículas elementales. En el camino, se fueron descubriendo más quarks, a los que se les asignaron nuevas propiedades como sabores y colores, e incluso con el desarrollo de nuevas teorías de norma⁵⁹ se unificaron las fuerzas electromagnética y débil en una electrodébil (ilustración 3.1 (b) y (c), p. 56), lo que nos sugiere la posibilidad de una gran unificación de todas las fuerzas. La historia de esta nueva rama de la física culmina con el desarrollo de la cromodinámica cuántica y el establecimiento del modelo estándar, que asevera que toda la materia está hecha de doce fermiones subdivididos en seis sabores de quarks y seis

⁵⁸ En 1962 Gell-Mann sugirió la existencia de un nuevo barión necesario para completar un decuplete en acuerdo con la simetría SU(3). Su observación en 1964 confirmó la utilidad del óctuple camino.

⁵⁹ El método básico de las teorías de norma es asegurarse de que el Lagrangiano que describe la interacción de las funciones de onda de las partículas permanezca invariante bajo ciertas transformaciones cinéticas; reflejando a las leyes conservacionales observadas en la naturaleza.

sabores de leptones. Ambos son aparentemente puntuales y la diferencia básica entre ellos reside en que los quarks son influidos por la fuerza fuerte (descrita por la electrodinámica cuántica), la cual no influye sobre los leptones.

2 Las Revoluciones Científicas

En la filosofía e historia de la ciencia, la cuestión del cambio revolucionario se hizo importante en 1962 con la publicación de *La Estructura de las Revoluciones Científicas* de Thomas S. Kuhn. El empirismo lógico, que ponía énfasis en la estructura lógica de la ciencia dejando a un lado su desarrollo psicológico e histórico, había dominado a la filosofía de la ciencia por varias décadas. Kuhn, junto con otros, hizo notar la importancia de la historia para explicar como, de hecho, la ciencia cambia y se desarrolla. Empieza su libro diciendo: “Si se considera a la historia como algo más que un depósito de anécdotas o cronología, puede producir una transformación decisiva de la imagen que tenemos actualmente de la ciencia.”⁶⁰ Hagamos una breve revisión de los planteamientos de Kuhn.

2.1 Las revoluciones científicas de Kuhn⁶¹

Los planteamientos de Kuhn sobre las revoluciones científicas constituyen, a su vez, una revolución metacientífica, es decir, una revolución en el nivel del análisis de la ciencia.

Kuhn intenta describir la estructura de la continua evolución de la ciencia, la cual se refleja en una serie de etapas por las que atraviesa toda disciplina científica a través de su desarrollo. En la primera, la etapa *preparadigmática*, coexisten diversas *escuelas* que compiten entre sí por el dominio en un cierto campo de investigación. Entre estas escuelas existe muy poco acuerdo con respecto a la caracterización de los objetos de estudio, los problemas que hay que resolver, las técnicas y procedimientos a utilizar para la resolución de los problemas, etcétera. Este

⁶⁰ Kuhn (1962).

⁶¹ Las observaciones con respecto a Kuhn son extraídas de Pérez Ransanz (1999).

período termina cuando el campo de investigación se unifica bajo la dirección de un mismo marco de supuestos básicos, llamado *paradigma*.

La etapa que se sigue de este consenso acerca de un paradigma es la de la *ciencia normal*, que consiste básicamente en una actividad de resolución de enigmas. A través de esta actividad el paradigma se va haciendo cada vez más preciso y mejor articulado, la investigación que se lleva a cabo acepta sin discusión los supuestos básicos del marco establecido, que no se considera problemático ni está sujeto a revisión. Los resultados producidos son guiados por el paradigma, por lo que el desarrollo de la especialidad es claramente acumulativo.

Contrariamente a sus propósitos, la investigación normal, conduce tarde o temprano al planteamiento de *anomalías*.⁶² Debido a éstas se presentan dudas acerca de los supuestos básicos y de la eficacia y corrección del paradigma vigente, lo que se traduce en una *crisis*, nombre de la siguiente etapa.

Con la crisis comienza la *ciencia extraordinaria*, esto es, la actividad de proponer estructuras teóricas alternativas que implican un rechazo o una modificación de los supuestos aceptados hasta entonces. Pero el paradigma no es abandonado a menos que exista un paradigma alternativo. La situación de crisis termina si el paradigma se ve capaz de resolver los problemas que llevaron a la presente situación; si no se puede dar cuenta de las anomalías de ninguna manera por muy radical o novedosa que sea, se guardan para un futuro cuando se cuente con mejores herramientas conceptuales e instrumentales para su solución; o cuando surja un paradigma alternativo que logre dar una solución a las anomalías, y comienza la lucha por ganar el consenso.

Kuhn describe al cambio de paradigma como una *revolución*, al calificarlo de esta forma está cuestionando que la elección entre teorías rivales sea una cuestión que pueda resolverse mediante un proceso efectivo de decisión, como lo sería un proceso algorítmico. Los cuerpos de conocimiento separados por una revolución son inconmensurables, esto es, no son completamente traducibles entre sí, y por tanto no se pueden comparar de manera directa mediante un procedimiento algorítmico.

⁶² Las anomalías son problemas que se resisten a ser resueltos con las herramientas conceptuales e instrumentales del paradigma establecido.



Un cambio de paradigma, dice Kuhn, es análogo a un cambio gestáltico: los mismos objetos se ven desde una perspectiva diferente. Como las diferencias entre paradigmas sucesivos implican ciertos cambios de significado en los términos básicos de las teorías rivales y como además no existe un conjunto de reglas metodológicas universales, no se puede partir de una base común que permita probar que una teoría es mejor que otra. Por lo tanto, no se puede tachar de ilógico o de irracional a quien se niegue a aceptar un nuevo paradigma ya que no puede haber argumentos concluyentes que dicten una y la misma conclusión a todos los científicos que participan en una controversia.

Finalmente, después de un proceso de debate y deliberación, se conforma un nuevo consenso alrededor de un paradigma; comienza una nueva etapa de ciencia normal. De esta manera, toda disciplina científica pasa repetidamente a través de la secuencia: ciencia normal – crisis – revolución – nueva ciencia normal.

Para Thagard, la afirmación de que el desarrollo del conocimiento científico involucra cambios revolucionarios es sustentable, pero, la visión general de Kuhn, del cambio revolucionario y sus recuentos de episodios científicos particulares deben ser cuestionados.

A continuación expondremos el enfoque de Thagard.

2.2 Revolución conceptual desde la perspectiva de Thagard⁶³

Para formular una teoría de cambio revolucionario que no sucumba a la irracionalidad de elección de teorías, Thagard dice que son necesarias herramientas diferentes tanto a las formales de los empiristas lógicos como a las historias vagas de Kuhn. Aunque el énfasis en el cambio revolucionario fue un remedio a los modelos simplistas de los empiristas lógicos, necesitamos una teoría de cambio revolucionario más refinada. Según él, la inteligencia artificial es lo que ofrece esa posibilidad de desarrollo de herramientas para describir la estructura del cambio científico y de su proceso de avance. Podemos empezar a caracterizar la estructura de los sistemas conceptuales antes, durante y después de la revolución; y podemos investigar los mecanismos cognitivos a través de los cuales ocurren los cambios.

⁶³ Thagard (1992), capítulo 1.



Para Thagard, el cambio conceptual cuenta como revolucionario si involucra el reemplazo de un sistema completo de conceptos y reglas por un nuevo sistema. Como el conocimiento en la ciencia no es acumulativo, necesitamos una teoría de cambio conceptual revolucionario. Hay episodios en la historia de la ciencia que indican claramente la importancia de las revoluciones conceptuales. Esta importancia es tan grande, coincide Thagard con Kuhn, en parte, porque tales revoluciones son muy raras. La ciencia no hace saltos revolucionarios muy frecuentemente, pero cuando los hace, las consecuencias epistémicas son enormes.

En las revoluciones sociales y políticas hay transformaciones primarias en sus estructuras; como resultado el poder es transferido de ciertos grupos a otros. Para entender a las revoluciones científicas, así como a las políticas y sociales, necesitamos poseer un conocimiento del tipo de estructuras que sufren la transformación. Thagard avanza seis tesis en esta dirección.

1. Las revoluciones científicas involucran transformaciones mayores en sistemas conceptuales y proposicionales.
2. Los sistemas conceptuales están estructurados principalmente por medio de jerarquías de tipo y jerarquías de parte.
3. Los conceptos teóricos nuevos surgen generalmente por mecanismos de combinación conceptual.
4. Los sistemas proposicionales están estructurados principalmente por medio de relaciones de coherencia explicativa.
5. Las hipótesis teóricas nuevas surgen generalmente por abducción.
6. La transición a sistemas conceptuales y proposicionales nuevos ocurre debido a la mayor coherencia explicativa de las proposiciones que usan los nuevos conceptos.

¿Cómo se organizan los conceptos? ¿Cuál es la naturaleza de su organización? ¿Cómo surgen los nuevos conceptos y leyes? ¿De donde surgen las nuevas hipótesis? y ¿Cómo suceden las revoluciones científicas? Son preguntas que surgen naturalmente, a las que la teoría de Thagard, a continuación, pretende responder.

3 Los Conceptos y el Cambio Conceptual

El objetivo frecuente detrás del recuento de lo que son los conceptos para los filósofos ha sido metafísico y epistemológico: describir la naturaleza fundamental de la realidad y mostrar cómo el conocimiento de ésta puede ser posible. Los psicólogos han propuesto teorías de conceptos en servicio del objetivo empírico de dar cuenta de los aspectos observados del pensamiento humano. Los investigadores en inteligencia artificial desarrollan recuentos de la estructura conceptual para habilitar computadoras a realizar tareas que requieren inteligencia cuando son hechas por humanos.

El proyecto de Thagard comparte los objetivos generales de filósofos, psicólogos e investigadores en inteligencia artificial, pero subordinados al problema particular de dar sentido al cambio conceptual revolucionario. La naturaleza y organización de conceptos que propone Thagard⁶⁴ conforman la base de su teoría de cambio conceptual revolucionario.

3.1 La naturaleza de los conceptos

De acuerdo a Thagard, la filosofía analítica contemporánea se caracteriza por el apogeo de las oraciones. A diferencia del siglo XVII cuando los pensadores hablaban de *ideas*, en la filosofía contemporánea, los filósofos toman a las oraciones como los objetos de investigación. El conocimiento es algo cómo creencia justificada y verdadera. De este modo, la epistemología consiste básicamente en evaluar estrategias para mejorar nuestro acervo de conocimiento, construido como oraciones o como actitudes hacia proposiciones entendidas como el significado de las oraciones. Sin embargo, en la psicología cognitiva las cuestiones sobre cambio conceptual reciben más atención que las de revisión de creencias. Los investigadores en inteligencia artificial también ponen atención en cómo el conocimiento puede ser organizado en estructuras llamadas *marcos*.

⁶⁴ Thagard (1992), capítulo 2.



Parafraseando a Minsky,⁶⁵ un *marco* es una estructura de datos, que uno puede elegir de la memoria, para representar una situación estereotípica. Ligado a cada marco hay diversos tipos de información: alguna es acerca de cómo usar el marco, otra es acerca de lo que uno puede esperar que pase después, y otra más es acerca de lo que hay que hacer en caso de que nuestras expectativas no se cumplan. Podemos pensar a un marco como una red de nodos y relaciones. Los niveles más altos del marco son fijos y representan cosas acerca de la situación supuesta que siempre son verdaderas. Los niveles más bajos tienen muchas entradas que deben ser llenadas por casos o datos específicos. Cada terminal puede especificar las condiciones que sus asignaciones deben cumplir. (Las asignaciones mismas son usualmente sub-marcos.) Las condiciones simples son especificadas por registros que pueden requerir que una asignación a una entrada sea una persona, un objeto de suficiente valor o un indicador a un sub-marco de cierto tipo. Las relaciones más complejas pueden especificar relaciones entre las cosas asignadas a varias entradas.

Si queremos dar cuenta de por qué unas revisiones son más difíciles de hacer que otras y por qué algunas tienen efectos más globales, es conveniente tomar una perspectiva más realista y psicológica de la revisión de creencias. Tal vez estas facetas de la revisión de creencias sólo puedan ser entendidas notando como son organizadas por vía de los conceptos. Thagard propone que la epistemología se debería de preguntar lo siguiente: ¿Para qué son los conceptos y cómo cambian? Y no sólo: ¿Cuándo estamos justificados en añadir o eliminar creencias de un conjunto de creencias juzgadas como conocidas?

Los psicólogos tienen muchas razones para estar interesados en la naturaleza de los conceptos, ellos tienen que dar cuenta de diferentes tipos de comportamiento. Parece que los conceptos nos han ayudado a la categorización, aprendizaje, memoria, inferencia deductiva, explicación, resolución de problemas, generalización e inferencia analógica; entre otros. Podríamos pensar que estos comportamientos no introducen problemas relacionados con la revisión de creencias, pero, parece no ser así. Revisemos algunos ejemplos.⁶⁶ Aprender parecería una simple cuestión de añadir nuevas creencias, pero, ¿cómo se forman los conceptos? Una forma es por

⁶⁵ En los años 70, Marvin Minsky (1975) pensaba que los ingredientes de la mayoría de las teorías en inteligencia artificial y psicología eran demasiado pequeños, locales y faltos de estructura para dar cuenta de la efectividad del sentido común. Él pensaba que estos "pedazos" de razonamiento, lenguaje, memoria y percepción deberían ser más grandes y más estructurados; su contenido factual y de procedimiento debería estar más íntimamente relacionado para poder explicar el poder aparente y la rapidez con la que razona el sentido común.

combinación de conceptos anteriores. Para hacer esto se requiere que los conceptos tengan mucha estructura ya que los nuevos conceptos no son simples sumas de los anteriores. La adquisición de creencias presupone organización conceptual. En cuanto a la memoria, necesitamos recordar creencias para poder usarlas en la revisión de otras, lo que hace relevante una organización conceptual.

Thagard aclara que estas observaciones no son concluyentes, pero que hay suficientes experimentos en psicología e inteligencia artificial para sugerir que la postulación de una estructura conceptual puede ser importante para entender muchos fenómenos cognitivos relevantes a la revisión de creencias.

3.2 Organización de los conceptos

La propuesta de Thagard se da en el área de la inteligencia artificial simbólica tradicional; esta nos pide pensar que los conceptos son estructuras complejas semejantes a los marcos de Minsky (más arriba), pero dando prioridad especial a relaciones de *tipo y parte* que establecen jerarquías, y que además, expresan información de hechos en reglas que pueden ser más complejas que simples entradas. Esquemáticamente, un concepto puede ser pensado como una estructura —semejante a un marco— del siguiente tipo:

CONCEPTO: ÁTOMO
Un tipo de: Partícula.
Subclases: Partículas elementales.
Una parte de: Molécula.
Partes: Protón y electrón.
Sinónimos: Parte más pequeña de un elemento.
Antónimos: Grupo.
Reglas: Formados por un núcleo y electrones orbitando alrededor de éste.
Instancias: Hidrógeno, Helio, Litio, etcétera.

Si los conceptos son estructuras complejas de la clase de las descritas entonces tiene sentido decir que las reglas forman parte de los conceptos, así como los conceptos forman parte de reglas. Para entender el cambio revolucionario necesitamos más que una visión de la naturaleza de los conceptos aislados, necesitamos ver como se ajustan unos con otros en

⁶⁶ Para una revisión de la lista completa ver: Thagard (1992), pp. 22-24.



sistemas conceptuales y qué involucra el reemplazo de dichos sistemas. Desde esta perspectiva, los sistemas conceptuales consisten de conceptos organizados en jerarquías de *tipo y parte* enlazadas por reglas. Un sistema conceptual puede ser analizado como un sistema reticular de nodos, en donde cada nodo corresponde a un concepto y cada línea de la red corresponde a un enlace entre conceptos.

Por ejemplo, la ilustración 2.1, p. 22, provee un fragmento del sistema conceptual de los constituyentes de la materia (1920), en donde se ubica al concepto ÁTOMO. Los nodos (conceptos) se denotan con nombres dentro de elipses. Este sistema usa cuatro tipos de enlaces.

1.- Enlaces de *tipo T*

Estos enlaces indican que un concepto es del tipo de otro; e.g., los protones son un tipo de partícula elemental.

2.- Enlaces de *instancia I*

Estos indican que un objeto en particular, denotado en una caja en lugar de una elipse, es una instancia de un concepto; e.g., la cadena de enlaces en la red muestra que el hidrógeno es un componente de la materia.

3.- Enlaces de *regla R*

Estos expresan relaciones generales (pero no siempre universales) entre conceptos; e.g., que los electrones tienen carga negativa.

4.- Enlaces de *parte P*

Estos indican que un todo tiene una parte dada; e.g., el átomo es una parte de una molécula que a su vez es parte de la materia de un cuerpo.

Los sistemas conceptuales se pueden complicar expresando relaciones de propiedad, relaciones explicativas, proposiciones contradictorias e incluso pueden expresar relaciones y predicados de mayor orden, ya que se pueden dibujar líneas indicando, por ejemplo, que un átomo es más masivo que otro.

Las relaciones de *parte* y de *tipo* son fundamentales para nuestros sistemas conceptuales porque especifican a los constituyentes del mundo. Las jerarquías que forman estos tipos de

relaciones reflejan aspectos ontológicos fundamentales. A las preguntas ontológicas generalmente les concierne que *tipos* de cosas existen, y dado un recuento de los tipos de cosas que hay en una organización jerárquica, nos preguntamos naturalmente: ¿de qué están hechas estos tipos de cosas? La respuesta a esta pregunta requiere considerar sus partes, generando una jerarquía de *parte* que también organiza a nuestros conceptos.

Aunque la información que contiene la ilustración puede ser representada en el cálculo de predicados de primer orden, los enlaces tienen una importancia que trasciende la información que éstos expresan: pueden llevar a cabo procedimientos en forma diferente a los asociados con el cálculo. Por ende, aunque los sistemas de representación de conocimiento en inteligencia artificial pueden ser *expresivamente* equivalentes a sistemas lógicos, no necesariamente son *de procedimiento* equivalentes.⁶⁷

Si un sistema conceptual consiste de una red de nodos con enlaces como los descritos, entonces el cambio conceptual consiste en añadir o quitar nodos y enlaces. Usando la organización recién desarrollada podemos clasificar de los diferentes tipos de cambio epistémico.

3.3 Cambio conceptual

Para Thagard, una teoría de cambio conceptual adecuada para dar cuenta de las revoluciones tiene que poder describir los mecanismos por medio de los cuales los descubridores de nuevos sistemas conceptuales pueden construir sus nuevos sistemas generando nuevos nodos y enlaces. También, debe poder explicar cómo los nuevos sistemas conceptuales reemplazan a los anteriores. Por último, nos debe proveer de un recuento de cómo los miembros adicionales de la comunidad científica adquirieron y aceptaron el recién construido sistema conceptual.

⁶⁷ En su libro de Filosofía Computacional de la Ciencia, Thagard ((1988) pp. 30-31) pone el ejemplo de los numerales arábigos y romanos para distinguir entre expresividad y procedimiento. Si comparamos el sistema arábigo 1, 2, 3,... con el romano I, II, III,... aumentado con el 0, hay una traducción obvia entre las dos, por lo que uno podría pensar que no hay diferencia interesante entre los dos. Pero si consideramos el algoritmo de división que aprendemos en la escuela, digamos la división $46 \overline{)598}$: sabemos que 59 entre 46 es 1 y sobran 13, y 138 entre 46 es 3, por lo que la respuesta es 13. Ahora intentemos dividir $XLVI \overline{)DXCVIII}$. La representación romana no se presta a un simple algoritmo para la división. Por lo tanto, aunque podamos decir que los numerales romanos y arábigos son equivalentes en expresión, sería un error decir que son equivalentes en procedimiento.

Los mecanismos mencionados deben hacer posibles toda la serie de tipos de cambio conceptual que se describirán a continuación.

Es inútil intentar ofrecer criterios para la identidad de los conceptos que intenten especificar cuando un concepto deja de ser el concepto que era. Recordemos el barco de Theseus⁶⁸ que fue preservado por los Atenenses en tiempos de Demetrius Phalerus; fue tan bien preservado y reforzado con fuertes tablones, que proveía un ejemplo para los filósofos en sus disputas concernientes a la identidad de las cosas que son cambiadas por añadidura, algunos sosteniendo que era el mismo y otros que no. No obstante, sin dar una definición de la identidad del concepto podemos caracterizar diferentes tipos de cambio y darnos cuenta de que unos son más serios que otros. Consideremos nueve tipos de cambio conceptual ordenados incrementando el grado de severidad. Las adiciones a la estructura conceptual consideradas pueden ser fácilmente expandidas para incluir eliminación:

Tabla 2.1: Grados de cambio conceptual.

-
- 1.- Añadir una nueva instancia.
 - 2.- Añadir una nueva regla débil.
 - 3.- Añadir una nueva regla fuerte.
 - 4.- Añadir una nueva relación de parte; a este se le puede llamar descomposición.
 - 5.- Añadir una nueva relación de tipo.
 - 6.- Añadir un nuevo concepto.
 - 7.- Colapsar parte de una jerarquía de tipo, abandonando una distinción previa.
 - 8.- Reorganizar jerarquías por saltos de ramas, esto es, trasladar un concepto de una rama de un árbol jerárquico a otro.
 - 9.- Cambio de árbol, esto es, cambiar el principio de organización de un árbol jerárquico.
-

A continuación ilustraremos con ejemplos cada uno de estos tipos de cambio conceptual.

La introducción del séptimo elemento transuránico descubierto a la tabla periódica, el elemento químico sintético einstenio (Es, con número atómico 99), es un ejemplo del primer tipo de cambio. Este tipo de cambio involucra un cambio de la estructura del concepto *elementos*, pero de forma trivial ya que simplemente añade uno más. Igualmente trivial es eliminar un elemento; se puede encontrar que hubo una equivocación al identificar un nuevo elemento y se decide que después de todo no es un nuevo elemento. Los tipos de cambio 2 y 3 involucran

añadir reglas con diferente peso; los términos “débil” y “fuerte” indican la importancia de la regla para la resolución de problemas. Un ejemplo de regla débil es como se sintetiza el einstenio, mientras que de regla fuerte el ejemplo sería el que los electrones no pueden estar dentro del núcleo. La adición de regla fuerte juega un papel frecuente en la explicación y resolución de problemas.

Añadir una nueva relación de parte, cambio 4, puede ser llamado descomposición. Típicamente ocurre cambio conceptual en la jerarquía de partes cuando nuevas partes son descubiertas, como ha ocurrido a menudo en la física con el descubrimiento de moléculas, átomos y partículas subatómicas. Es particularmente dramático cuando se le encuentran componentes a lo que previamente se pensaba como indivisible, como en el caso del átomo antes de que Thomson descubriera que tiene electrones y las partículas elementales antes del descubrimiento de sus quarks constitutivos. El cambio 5 implica añadir relaciones de tipo, por ejemplo que un átomo puede tener distintos *isótopos*⁶⁹. Ulteriormente tenemos, por un lado, a la *coalescencia*, que añade un nuevo tipo que enlaza dos cosas que previamente se tomaban como diferentes: La interconvertibilidad de la masa y la energía $e=mc^2$ nos dice que la masa y la energía son dos manifestaciones de masa-energía. Por otro lado tenemos a la *diferenciación*, que hace una distinción que produce dos tipos de cosas: al mismo tiempo que la masa fue unida con la energía también sufrió una diferenciación, se dividió en masa en reposo, cuando un cuerpo no se mueve relativo a un observador; y masa relativista, cuando se mueve con cierta velocidad relativa al observador. La masa de un cuerpo es prácticamente la misma hasta que se empieza a mover con una velocidad cercana a la de la luz.

Las adiciones delineadas en los cambios 1-5 (El einstenio, la forma de sintetizarlo, la imposibilidad de la permanencia de los electrones en el núcleo, la estructura del átomo y los isótopos) son sólo posibles cuando uno forma un concepto ÁTOMO como una entidad distinta, cambio 6. Hay muchas razones por las que se pueden añadir conceptos, incluyendo la coalescencia. En el siglo XIX los científicos se dieron cuenta que la electricidad y el magnetismo eran fenómenos comunes y produjeron el concepto coligado

⁶⁸ Nota 15 del capítulo 3 en Wiggins (1980), p. 92; a su vez tomado de *Phaedo* de Platón. Agradezco a León Olivé esta referencia.

⁶⁹ Los isótopos son variedades del átomo en cuanto a que el núcleo tiene diferente número de neutrones por lo que su masa es distinta. El ejemplo más sencillo es el Deuterio que tiene un protón y un neutrón en el núcleo, o

ELECTROMAGNETISMO. Nuevos conceptos también pueden ser introducidos por razones explicativas, por ejemplo cuando el concepto ONDA SONORA se formó como parte de la explicación de por qué los sonidos se comportan como lo hacen. Conceptos como OXÍGENO, ELECTRÓN, QUARK y GENE fueron introducidos como parte de teorías explicativas. Añadir conceptos es una parte importante del desarrollo del conocimiento científico.

Aunque a menudo el desarrollo de la ciencia involucra introducir nuevas distinciones en forma de relaciones de tipo, como en el cambio 5, el cambio conceptual también se puede dar por la atenuación o abandono de distinciones previas, produciendo un *colapso* de parte de una jerarquía de tipo. Este es el cambio 7, contrario a la diferenciación. Por ejemplo, Newton abandonó por completo las distinciones aristotélicas entre movimiento natural y no-natural.

Dado que las relaciones de tipo organizan a los conceptos en jerarquías representadas como árboles, un tipo muy importante de cambio conceptual, el cambio 8, es mover un concepto de una rama a otra. En las revoluciones es común que el cambio conceptual implique cambiar un concepto de una rama a otra. Por ejemplo, adoptar la teoría copernicana requería la reclasificación de la tierra como un tipo de planeta, cuando previamente se tomaba como si fuera de su propio tipo, de tipo único. Similarmente, Darwin recategorizó a los humanos como un tipo de animal, cuando previamente se tomaba como a una criatura de diferente tipo.

El cambio 9, que afecta el principio de organización de un árbol jerárquico, es el tipo de cambio conceptual más dramático. Darwin no sólo reclasificó a los humanos como animales, sino que cambió el significado de la clasificación. Antes de Darwin la noción de tipo era una noción básicamente de similitud, su teoría la hizo una noción histórica: ser de descendencia común se vuelve tan importante como ser del mismo tipo en alguna similitud de fenotipo. La teoría de la relatividad de Einstein cambió la naturaleza de las relaciones de parte, sustituyendo nociones cotidianas de espacio y de tiempo por ideas de espacio-tiempo.

Los cambios 1-3 pueden ser interpretados como tipos simples de revisión de creencias, pero los 4-9 no lo pueden, ya que están involucrados en jerarquías conceptuales. Directamente, la revisión de creencias involucra añadir y eliminar creencias. El cambio conceptual va más allá

sea, un átomo de hidrógeno con un neutrón. Su masa es aproximadamente el doble que la del átomo de hidrógeno.

de la revisión de creencias cuando involucra adición, eliminación y reorganización de conceptos, o la redefinición de la naturaleza de una jerarquía.

De acuerdo a Thagard, una teoría completa⁷⁰ de cambio conceptual debe poder dar cuenta de cuatro fenómenos:

- 1.- Desarrollo por descubrimiento, donde alguien establece un nuevo sistema conceptual.
- 2.- Reemplazo por descubrimiento, cuando un nuevo sistema conceptual suplanta al anterior por completo.
- 3.- Desarrollo por instrucción, cuando alguien más que el descubridor se familiariza con el nuevo sistema conceptual por que se lo presentaron.
- 4.- Reemplazo por instrucción, cuando alguien más que el descubridor adopta al nuevo sistema conceptual y abandona al viejo.

3.4 La Teoría de la Coherencia Explicativa

Thagard desarrolla la Teoría de Coherencia Explicativa para proveer un mecanismo global que puede dar cuenta de la transición de un viejo sistema conceptual a un nuevo, esto es, cuando un nuevo conjunto de hipótesis explicativas entrelazadas unas con otras reemplaza al viejo.

Según la Teoría de Coherencia Explicativa una teoría nueva reemplaza a una vieja si sus hipótesis poseen mayor coherencia explicativa, o sea, se sostienen juntas por relaciones de explicación. A continuación se detalla la definición de Thagard para las relaciones de coherencia.

Las proposiciones⁷¹ P y Q son coherentes explicativamente si hay una relación explicativa entre ellas.

⁷⁰ La teoría completa a la que se refiere Thagard incluye implementaciones computacionales que van más allá de los intereses y de los alcances de la presente exposición. Listamos los fenómenos simplemente para mostrar las pretensiones de Thagard. Para una exposición completa ver: Thagard (1992), capítulo 3.

⁷¹ Para nuestro caso del modelo de los quarks consideraremos a las teorías completas y no sólo a sus proposiciones aisladas. Apelar a proposiciones busca realizar un análisis más fino para el que Thagard desarrolla

Hay cuatro posibilidades para esta relación:

- 1.- P es parte de la explicación de Q.
- 2.- Q es parte de la explicación de P.
- 3.- P y Q juntas son parte de la explicación de una R.
- 4.- P y Q son análogas en las explicaciones que dan respectivamente de R y S, en donde R y S también son proposiciones.

La explicación es suficiente pero no necesaria para la coherencia. La teoría de coherencia explicativa afirma que se sostiene una relación de coherencia explicativa entre P y Q si y solo si una o más de las proposiciones (1)-(4) son verdaderas. Ocurre incoherencia entre dos proposiciones si se contradicen entre ellas o si son explicaciones en competencia.

En esta línea, Thagard propone siete principios que establecen las relaciones de coherencia explicativa y hacen posible la fijación de la aceptabilidad de proposiciones en un sistema explicativo: Simetría, Explicación, Analogía, Prioridad de datos, Contradicción, Competición y Aceptabilidad.

la implementación de un programa, que como en el caso anterior, va más allá de los intereses actuales. En el último capítulo se mencionaran estas aplicaciones. Para una exposición completa ver: Thagard (1992), capítulo 4.

ANÁLISIS Y CONSTRUCCIÓN DE MODELOS

En este capítulo se presentan dos análisis. Uno, corresponde al modelo de los quarks, del que se detalla el cambio conceptual asociado a el y la coherencia explicativa. El otro, corresponde a la generación sistemática de modelos de constituyentes para familias de partículas elementales, a través del programa de descubrimiento GELL-MANN.

1 Cambio Conceptual y Coherencia Explicativa

El modelo de los quarks surgió de la necesidad de ordenar el creciente número de partículas elementales que se estaban descubriendo en la época. La fuerza del modelo yace en la simplicidad que logra de este desorden recién descubierto. Una vez que se ha revisado la historia del surgimiento del modelo de los quarks y que se ha establecido la teoría para dar cuenta del cambio asociado a el, estamos listos para hacer el análisis correspondiente. Para el lector interesado en los cambios conceptuales más importantes en la física durante el siglo XX, la teoría de la relatividad y la teoría cuántica, Thagard⁷² hace un análisis de varias revoluciones de la física incluyendo estas dos.

1.1 El cambio conceptual del modelo de los quarks

La aceptación de los quarks involucra mucho más que simplemente añadir un nivel más en la jerarquía de partes. Los quarks no son sólo una parte de lo que antes se consideraba como fundamental; ellos organizan y explican a toda una nueva variedad de partículas (ilustración 2.5, p. 35) y más aún modifican la noción misma de lo que se considera elemental. De los tipos de cambios listados en la tabla 2.1 (p.49), podemos identificar del 1-7.

⁷² Thagard (1992), capítulo 8.

El primer tipo de cambio conceptual que podemos identificar es el de *añadir instancias*, ya que el descubrimiento de nuevas partículas elementales, antes que cualquier otra cosa, incorpora nuevos elementos a nuestro sistema conceptual; de hecho una gran cantidad de ellos, lo que desencadena la revisión de teorías, leyes, reglas, etcétera (ilustración 2.2, p. 27).

Así mismo, para clasificar a las nuevas instancias se necesitan nuevas reglas. Los quarks tienen nuevas propiedades. Por un lado, tienen nuevos números cuánticos como el isospín; y por otro, deben tener carga eléctrica fraccionaria: $2/3e$ o $-1/3e$; esto es, una fracción de la carga que hasta entonces se consideraba como fundamental (e , carga del electrón). Estas son las reglas *débiles* del nuevo sistema conceptual.

Más aún, se encuentra que las nuevas instancias se encuentran regidas por nuevas fuerzas, la débil y la fuerte (ilustración 3.1 (b)). Las partículas se clasifican con respecto a la interacción que las afecta: hadrones si son influenciadas por la fuerza fuerte y leptones si no lo son. Las nuevas fuerzas *añaden reglas fuertes*.

La principal motivación para proponer el modelo de los quarks fue dar cuenta de familias enteras de partículas de una forma simplificada. Con el nuevo modelo, usando sólo tres nuevas partículas se podían explicar las propiedades de todas las partículas. El modelo *añade nuevas partes* al sistema conceptual, a saber: los quarks. Esto es lo que propone el modelo, y las nuevas entidades conforman un nuevo nivel en la jerarquía de partes.

Al adjudicarle partes a las hasta entonces partículas elementales, la relación de tipo de las partículas se ve afectada. Los quarks son ahora las partículas elementales, quitando el carácter de elemental a los hadrones. Los bariones están conformados por tres quarks (qqq), mientras que los mesones por un par quark-antiquark ($q\bar{q}$). Los quarks claramente añaden una relación de tipo:

Un cambio conceptual muy importante que no se percibe *prima facie* es el de *añadir un nuevo concepto*. Los quarks no sólo son una nueva capa en la jerarquía de partes los quarks son diferentes; cambian la concepción de cualquier partícula elemental pensada con anterioridad. Los físicos estaban acostumbrados a poder observar experimentalmente a las hasta entonces partículas elementales, rutinariamente se detectaban electrones y protones aislados de cualquier otra entidad. El concepto de partícula elemental involucraba una entidad mínima indivisible pero aislable del resto del mundo. Al contrario, los quarks se encuentran

confinados dentro de los hadrones, no pueden ser separados de él o de los otros quarks junto con los que conforma al hadrón. La noción de lo que se considera elemental cambió.

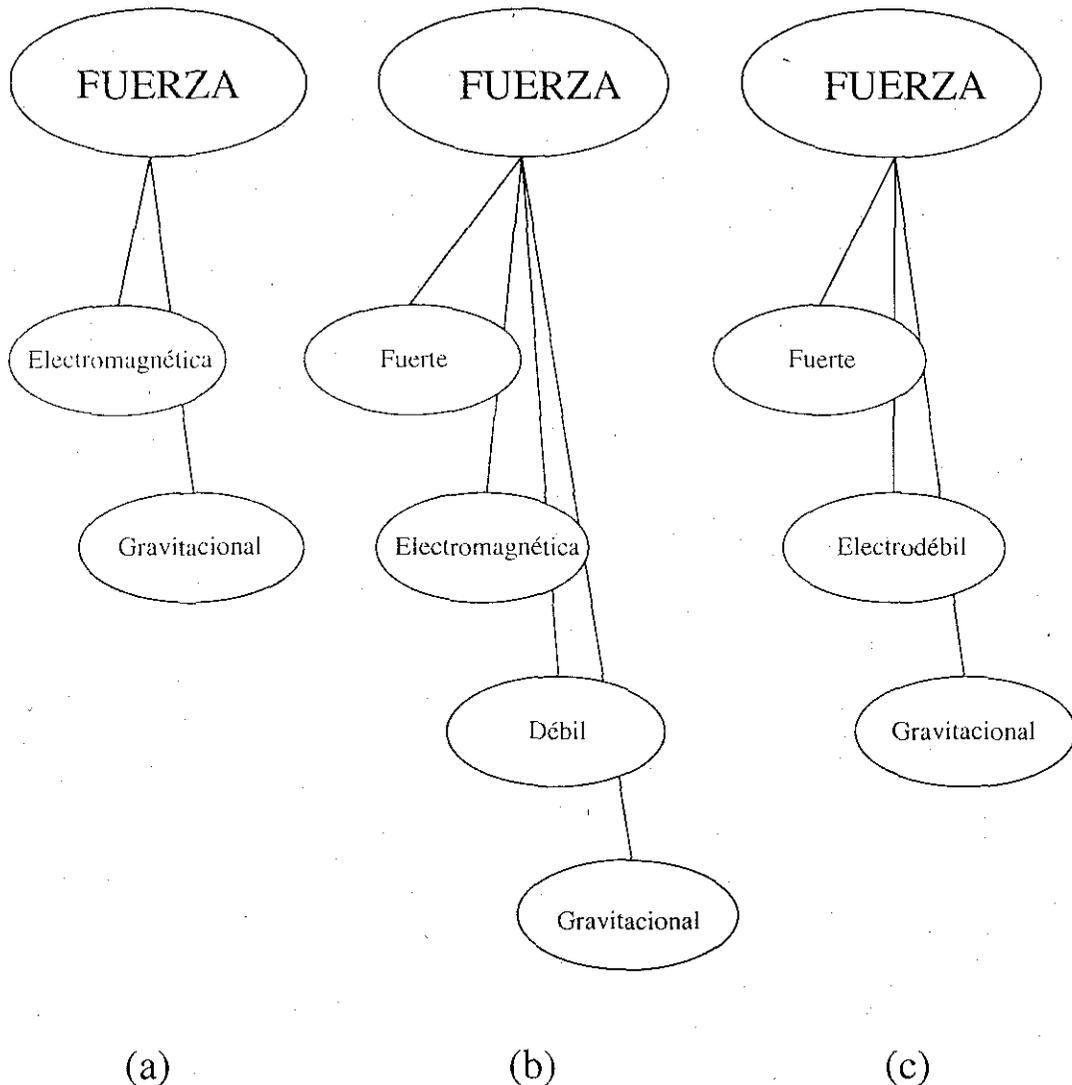


Ilustración 3.1 Esquema de los tipos de fuerzas existentes en diferentes momentos de la historia de la física de partículas elementales. (a) años 20, (b) años 40 y (c) años 70. Las líneas denotan relaciones de tipo.

Por último, podemos identificar un *colapso en parcial de una jerarquía de tipo*. La teoría electrodébil nos dice que tanto la fuerza débil como la electromagnética son manifestaciones particulares de una sola fuerza. Esto quiere decir que abandonamos una distinción que previamente considerábamos en nuestro esquema conceptual. En la ilustración 3.1, vemos

representadas las fuerzas de la naturaleza consideradas antes (b) y después (c) del establecimiento del modelo de los quarks. Éstos tipos de fuerza están ordenadas de mayor a menor. Se puede observar claramente como se colapsan las fuerzas electromagnética y débil en una sola, la electrodébil.⁷³

1.2 La coherencia explicativa del modelo de los quarks

La historia del modelo de Zweig muestra varios de los principios que establecen relaciones de coherencia explicativa entre los distintos modelos y teorías que pretendían explicar al gran número de partículas existentes. Estos principios intentan explicar y predecir las propiedades y fenómenos de las partículas.

Para empezar podemos notar el claro contraste con las teorías establecidas en el momento: la teoría de campo y de la matriz-S. De estas teorías, una contradecía directamente al modelo de los quarks, mientras que la otra competía con ella. Como ya vimos, en la teoría de la matriz-S se creía que no había entidades fundamentales, contradiciendo al modelo de los quarks: la postulación de entidades elementales, a saber, los quarks *u*, *d* y *s*. La teoría de campos competía con el modelo de los quarks porque intentaba explicar la misma evidencia. En este caso, la evidencia a explicar era cómo la diferencia de masa se podía considerar como la energía de enlace. A lo que podemos agregar que el modelo de los quarks superó a la teoría de campo. Adicionalmente —aquí mismo— encontramos el principio de explicación, tan importante para establecer la coherencia explicativa de una teoría, ya que el modelo de los quarks sí lograba explicar el mecanismo de energía de enlace.

La teoría que le ofrecía una verdadera competencia era la teoría de grupos, ya que con ella se podían formar las familias de partículas (que de hecho dio el origen al modelo de los quarks) y se podía llegar a la representación de la clasificación mayor SU(6). El modelo de los quarks superaba a la teoría de grupos en la predicción de que sólo existían familias de 1, 8 y 10 miembros, y en el decaimiento del mesón phi, que la teoría de grupos no podía explicar.

El último principio de la coherencia explicativa que podemos identificar en el modelo de los quarks, es donde se encuentra sin competencia. Los quarks encontraban un buen acuerdo con

⁷³ Este tipo de cambio no se desprende directamente del modelo de los quarks, más bien viene de otro episodio en

los datos de la espectroscopia y el acoplamiento hadrónico al grado de lograr una relación simbiótica entre teoría y experimento. El principio de prioridad de datos le añade coherencia explicativa al modelo de los quarks.

La ilustración 3.2 muestra la coherencia explicativa del modelo de los quarks con respecto a otras teorías, y de una vez, la coherencia interna de la teoría ya que no tiene competencia. Notemos que había evidencia en contra del modelo de los quarks, la ausencia de observación de un quark libre.

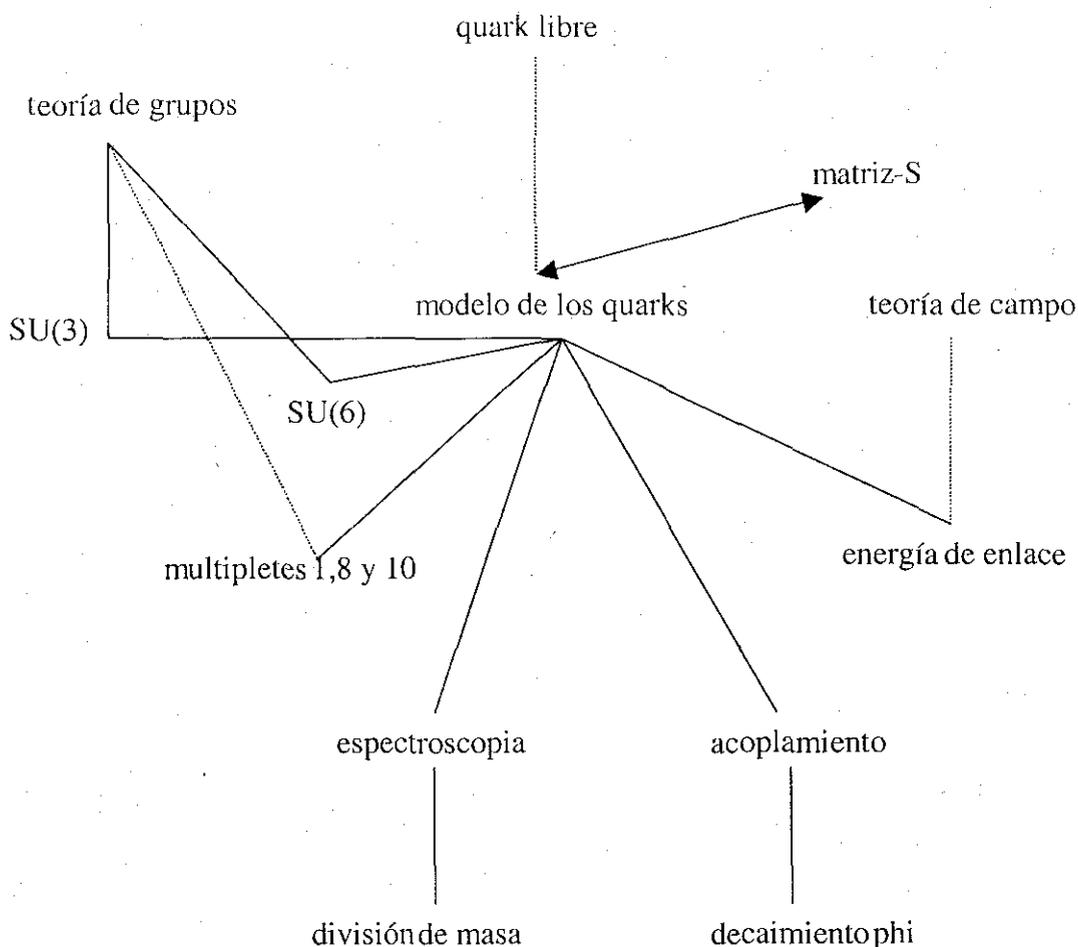


Ilustración 3.2 La coherencia explicativa del modelo de los quarks. Las líneas sólidas indican relaciones de explicación. Las líneas punteadas indican que la teoría no explica al fenómeno. La flecha con doble punta indica contradicción.

la historia de la física de partículas elementales que fue consecuencia del desarrollo del modelo de los quarks.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2 Generación de Modelos

2.1 Descubrimiento

Una típica búsqueda de programas de descubrimiento es un proceso de construcción gradual y de evaluación de hipótesis y modelos alternativos que son generados explorando decisiones alternativas en varios puntos de elección,⁷⁴ la gran mayoría de los problemas de descubrimiento no pueden ser resueltos por algoritmos que llevan directamente al resultado.

Como en la búsqueda material, donde el cerebro humano hace una representación simbólica del problema (sección 2 del capítulo 1), hay un espacio de situaciones posibles llamado *espacio de búsqueda*. Este espacio está compuesto de un conjunto de *estados*, análogos a situaciones en la búsqueda llevada a cabo por el cerebro, que pueden ser ocupados en cualquier momento dado. Dentro de este conjunto existe un estado especial, el *estado inicial*, con el que uno empieza el proceso de búsqueda. También, puede haber un *estado final* que uno quiera alcanzar, que puede ser muy específico o muy abstracto. Finalmente, hay *operadores* que permiten a uno generar nuevos estados (*estados intermedios*) a partir del estado presente; aplicar estos operadores corresponde a dar pasos en el proceso de búsqueda física.

Un estado inicial en compañía de un conjunto de operadores (con sus respectivas condiciones de aplicación) define un espacio de problemas. Todos los estados contenidos en este espacio pueden ser generados aplicando los operadores al estado inicial, aplicándolos entonces a los estados resultantes, y así sucesivamente. En este proceso de búsqueda los estados intermedios son probados con los datos disponibles, la teoría subyacente y constreñimientos; los estados que fallan son abandonados. Esta es precisamente la tarea de las heurísticas, ya que es ineficiente y a veces imposible generar estados en esta forma exhaustiva.

Regularmente se hace un esfuerzo en aplicar pruebas lo más pronto posible conforme se vuelvan relevantes, aunque algunas pruebas serán aplicables sólo a una hipótesis completamente especificada. La temprana aplicación de estas pruebas puede descartar a los modelos parciales que no son prometedores. De esta forma la búsqueda entera es reducida de

forma sustancial; esto puede llegar a ser crucial en la práctica. Las heurísticas proveen las sugerencias para decidir qué operadores aplicar y qué estados desarrollar para acercarnos al estado final y evitar estados indeseables. Los modelos parciales que pasan las pruebas son cada vez más elaborados y probados hasta que eventualmente se puedan generar algunas soluciones completas.

El conocimiento de heurísticas a veces toma la forma de condiciones que aseguran la aplicación de los operadores sólo en los casos en donde es probable que guíen en una dirección útil. En otros casos, la información heurística esta contenida en la evaluación numérica de funciones que indican cuales son los estados que están más cercanos a la meta o que son deseables en otro sentido.

2.2 El programa GELL-MANN

El programa que se presenta a continuación tiene la capacidad de generar sistemáticamente modelos constitutivos para familias de partículas, esto es, modelos como el de los quarks y no sólo para octetes, decupletes y familias conocidas, sino para multipletes sin importar el número de sus miembros.

El trabajo que presentan Valdés-Pérez y Zytow,⁷⁵ ayuda a extender los sistemas computacionales al dominio de construcción de modelos y descubrimiento. Sus programas ilustran el potencial de los principios de las búsquedas heurísticas y de representación de conocimiento en la inteligencia artificial. Con ellos, producen al modelo estándar⁷⁶ así como otras alternativas no descubiertas anteriormente: nuevos modelos para bariones y mesones, y modelos para quarks y leptones en términos de rishons.

La tabla siguiente es un bosquejo de GELL-MANN visto en términos de conceptos de búsqueda.

(No se incluyen los operadores y heurísticas más complejos. Éstos se describirán más adelante).

⁷⁴ Durante el proceso de descubrimiento los estados alcanzados son puestos a prueba con los datos disponibles,

Tabla 3.1: GELL-MANN visto en términos de conceptos de búsqueda.

Estado inicial: la matriz de los valores de las propiedades de una familia de partículas, e.g., carga, I_3 y extrañeza.

Estado final: modelos de constituyentes (quarks) ocultos con las propiedades y combinaciones necesarias para poder representar a la familia.

Estados intermedios: modelos parciales de partículas individuales.

Operadores:

Especificar el número N de constituyentes (quarks).

Especificar el número M de constituyentes por partícula (quarks por partícula).

Heurísticas:

Empezar con $N=2$, y aumentar 1 si no se encuentra solución de acuerdo con el principio de adición.

Empezar con $M=2$ y aumentar 1 si no se encuentra un modelo con ese valor dado.

Constreñir a un conjunto de valores posibles para cada propiedad (fracciones y enteros, según los números cuánticos).

Control de búsqueda: breadth-first constreñido por condiciones heurísticas en los operadores.

El programa GELL-MANN empieza con los valores de las propiedades de una familia de partículas (ilustraciones 2.3 y 2.4, pp. 32 y 33 respectivamente) y tiene como objetivo formular modelos de constituyentes que expliquen el agrupamiento de la familia. Es así como el modelo de los quarks explica a los multipletes de $SU(3)$. La búsqueda de estructura oculta (en las partículas) es conducida en el espacio de modelos parciales, que es representado por una ecuación matricial. La representación matricial del espacio se da de forma natural ya que el principio de adición es el constreñimiento invariable en los modelos constitutivos, esto es, la suma de las propiedades de los constituyentes subyacentes iguala a las propiedades de cada partícula. La estrategia de búsqueda que lleva a cabo el programa, llamada 'breadth-first search'⁷⁷, empezará con el modelo más simple y sólo seguirá con un nivel más complejo después de que una búsqueda exhaustiva en la clase más simple no tenga éxito.

El siguiente ejemplo nos ayudará a ilustrar con claridad el funcionamiento de GELL-MANN. Los datos de entrada de GELL-MANN son las propiedades de una familia específica de partículas, como la de los bariones de la ilustración 2.4, p. 33.

los constreñimientos y la teoría subyacente; los estados que reprobaban son abandonados.

⁷⁵ En Valdéz-Pérez y Zytow (1996) se presentan dos programas GELL-MANN y YUVAL, pero aquí sólo revisaremos al primero.

⁷⁶ Para casos específicos con sólo tres quarks.

⁷⁷ Capítulo 1, sección 2.



Bariones	Q	I_3	S
n	0	-1/2	0
p	+1	+1/2	0
Σ^-	-1	-1	-1
Σ^0	0	0	-1
Σ^+	+1	+1	-1
Ξ^-	-1	-1/2	-2
Ξ^0	0	+1/2	-2

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Matriz de entrada expresando las propiedades correspondientes al octete bariónico (exceptuando uno) de la ilustración 2.4.

En este caso las propiedades a considerar serán: la carga (Q), la tercera componente del isoespín (I_3) y la extrañeza (S). El programa busca encontrar un modelo de constituyentes ocultos que por medio de las propiedades de su estructura pueda representar a todas las partículas de la familia. Como ya mencionamos, las propiedades de los constituyentes deben satisfacer una a una el principio de adición que es expresado por la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{array}{c|ccc} S & a & b & c \rightarrow \\ \hline P & & & \\ Q & & & \\ M & & & \\ W & & & \end{array}
 \quad X \quad
 \begin{array}{c|ccc} P & P_1 & \Lambda & P_k \\ \hline a & & & \\ b & & & \\ c & & & \\ \downarrow & & & \end{array}
 =
 \begin{array}{c|ccc} Z & P_1 & \Lambda & P_k \\ \hline P & & & \\ Q & & & \\ M & & & \\ W & & & \end{array}$$

Espacio de búsqueda para modelos constitutivos de partículas.

Los contenidos de las matrices S y P son rellenos por la búsqueda combinatoria, mientras que la igualdad matricial refuerza el principio de adición.

La matriz Z que es la que se da como entrada, contiene los valores de las propiedades de una familia de partículas que son los valores iniciales (familia de bariones). Las propiedades (e.g., carga, isospín, etcétera, descritas como P_1, \dots, P_k) son representadas por las columnas de Z (en el ejemplo: carga, tercera componente del isoespín y extrañeza); las filas representan las partículas, descritas como P, Q, \dots, W (n, p, Σ, \dots etcétera).

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

La matriz S describe como las partículas están hechas de constituyentes, los últimos representados por a, b, c, \dots

La matriz P expresa los valores de las propiedades para los constituyentes de forma similar a como lo hace la matriz Z para las partículas.

Esto se ve más claro si ponemos nuestra atención en una sola partícula; las propiedades del neutrón tienen que verse satisfechas por la suma de las propiedades de sus quarks:

$$\begin{array}{c|ccc} S & u & d & s \\ \hline M & & & \\ n & 1 & 2 & 0 \\ M & & & \end{array} X = \begin{array}{c|ccc} P & Q & I_3 & S \\ \hline u & 2/3 & 1/2 & 0 \\ d & -1/3 & -1/2 & 0 \\ s & -1/3 & 0 & -1 \end{array} = \begin{array}{c|ccc} Z & Q & I_3 & S \\ \hline M & & & \\ n & 0 & -1/2 & 0 \\ M & & & \end{array}$$

Ejemplo de producto matricial indicando sólo una partícula: el neutrón.



La matriz Z introduce los valores de las propiedades del neutrón.

La matriz S establece que un neutrón está constituido por un quark u y dos d , mientras que la matriz P contiene los valores de las propiedades (de los quarks) necesarios para satisfacer la ecuación.

Usualmente, la búsqueda de modelos constitutivos involucra encontrar el modelo más simple o el conjunto de todos los modelos más simples. El número de constituyentes normalmente empieza con el valor más pequeño posible y es incrementado conforme se van rechazando a los modelos más simples que no tuvieron éxito. Conforme crece el número de constituyentes las matrices S y P son agrandadas sucesivamente a lo largo de una dimensión, que es el número de constituyentes postulados (como lo indican las flechas). El número de constituyentes por partícula, e.g., el número de quarks que conforman a las partículas elementales, que se asume igual para todas las partículas en una familia, se expresa como un constreñimiento de las filas en la matriz S : la suma de las entradas de las filas deben producir un número entero mayor a 1. Adicionalmente, los números cuánticos de las partículas elementales son frecuentemente limitados a un pequeño conjunto de fracciones y enteros, y de forma similar podemos limitar los valores de propiedad admisibles para los constituyentes. El

constreñimiento a los valores posibles para cada propiedad en P , reduce el número de matrices posibles P . Estas estrategias heurísticas (tabla 3.1) eliminan caminos posibles asegurando la búsqueda de los modelos más simples. Por lo tanto, tener el menor número de constituyentes, partículas constituidas por el menor número de estos constituyentes y limitar el número de los valores posibles de las propiedades de los constituyentes puede ser considerado como de acuerdo con criterios de simplicidad.

Los modelos parciales se van construyendo para satisfacer al modelo constitutivo de una familia de partículas especificado de la siguiente manera:

1.- Un conjunto $T=\{t_1, \dots, t_n\}$ de constituyentes postulados, representando N tipos constitutivos diferentes.

[En nuestro ejemplo: u, d y s]

2.- Un conjunto C de macro-objetos permitidos, cada uno definido como un grupo (paquete múltiple) de constituyentes de T . $C=\{c \mid c=[n_1*t_1, \dots, n_N*t_N] \ \& \ \varphi(n_1, \dots, n_N)\}$, t_i de T ; n_i entero no negativo; y $\varphi(c)$ es un constreñimiento en los grupos posibles.

$[1 \times u, 2 \times d, 0 \times s]$; y $[\sum_{i=1}^N n_i = 3, \text{ cada paquete tiene 3 constituyentes postulados}]$

3.- Un conjunto de propiedades $P=\{P_1, \dots, P_k\}$ para constituyentes en T y macro-objetos en C .

$[Q, I_3 \text{ y } S]$

4.- (Opcional) Un conjunto V_i de valores permitidos que constituyentes en T pueden tener, para cada propiedad P_i en P .

[por ejemplo: la carga sólo puede ser $2/3$ o $-1/3$]

5.- Valores específicos de propiedad para cada constituyente y propiedad postulados. $P_i: T \rightarrow V_i, i=1, \dots, K$. Esto es, cada constituyente postulado en T tiene un valor posible de propiedad. Cada par de constituyentes en T deben diferir en por lo menos una propiedad.

6.- Para cada propiedad P_i en P , la relación entre el valor de P_i para cada macro-objeto c en C y los valores de P_i para los constituyentes de c en T , usamos el principio de adición: $P_i(c) = \sum_{j=1}^M P_i(c_j)$.

[carga del neutrón = $0 = 2/3 - 1/3 - 1/3$ = carga de los constituyentes]

7.- Un mapeo de la familia de partículas de entrada sobre un conjunto C de macro estructuras admisibles. A cada partícula se le asigna un paquete de constituyentes de T .

GELL-MANN construye cada modelo gradualmente, con operadores correspondiendo a los pasos 1-7 de la definición anterior. Los modelos son evaluados lo antes posible, con los datos y constreñimientos disponibles, para prevenir la elaboración más allá (exponencial) de modelos fallidos. También, se deben evitar las soluciones equivalentes. Detallaremos la construcción paso a paso a continuación:

- 1) El programa propone el número N de constituyentes a considerar. Empieza en $N=2$ y aumenta 1 si no hay solución. Termina cuando N alcanza $k-1$, donde k es el número de partículas de la familia de entrada. De esta forma se evita la enorme cantidad de modelos que pueden existir, incluyendo el trivial: la misma familia. Si hay un "patrón" en la familia de entrada, entonces se espera encontrar un modelo con menos constituyentes que el modelo trivial.
- 2) Para la creación de estructuras permitidas usamos el constreñimiento *ad hoc* que requiere el mismo número de constituyentes M para cada partícula en la familia de entrada. Se empieza con $M=2$, y como en el caso de N , se incrementa en 1 si no se encuentra un modelo para un M dado.

Para una clase de simplicidad con N y M dados, el programa buscará modelos aceptables. Si ninguno es encontrado entonces se incrementará preferentemente M , no N , ya que es más importante minimizar el número de constituyentes que el número de constituyentes por partícula.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- 3) La lista de las propiedades de los constituyentes es tomada directamente de la matriz de entrada Z y forma la dimensión de la columna de la matriz P , las propiedades de los constituyentes igualan exactamente a las propiedades de la familia de partículas.

Para los siguientes tres puntos de la lista (4, 5 y 6), el programa usa la estrategia de "dividir y conquistar" para manejar el enorme espacio combinatorio que se expande de las entradas desconocidas en las matrices S y P . La búsqueda se descompone en partes que pueden ser resueltas por separado, entonces las soluciones parciales son unidas en un modelo constitutivo global. Más aun, GELL-MANN usa la estrategia de 'prueba y error' para encontrar los valores de propiedad correctos en P .

- 4) (Opcional) La lista de valores admisibles para cada propiedad esta determinada por los números cuánticos de las partículas de entrada en Z . Para cada propiedad P_i , sea v_i el valor absoluto más alto para la columna P_i en Z , y sea D_i el conjunto de todos los denominadores entre valores fraccionales de la misma columna. La lista V_i de valores admisibles consiste entonces de todos los enteros y fracciones propias basados en los denominadores en D_i , entre v_i y $-v_i$. Cuando el programa no puede encontrar una solución para estos valores, considera las fracciones basadas en $1/M$. Siendo así, si $M=3$ y GELL-MANN no puede encontrar un modelo para los valores de carga 1, 0, -1, el programa considera eventualmente los valores 1, $2/3$, $1/3$, 0, $-1/3$, $-2/3$, -1. Como es el caso para el modelo de los quarks.
- 5) GELL-MANN postula valores para las propiedades de cada quark, que pueden ser constreñidos (4) por conjuntos de valores posibles.
- 6) GELL-MANN descompone la búsqueda de valores de propiedad de los constituyentes considerando primero cada propiedad por separado y encontrando todas las soluciones parciales para sólo esa propiedad, bajo el principio de adición.

Como es evidente, no toda solución parcial se convertirá en parte de una solución global. GELL-MANN intentó unificar las soluciones parciales por combinaciones sucesivas.

- 7) Potencialmente, para k partículas mapeadas a s combinaciones de constituyentes el número total de posibles combinaciones es: $s \times s - 1 \times \Lambda \times s - (k + 1)$. Para ilustrar este punto, en el decuplete de bariones modelado por 3 quarks en grupos de 3 el número es

3.6×10^6 . Para reducir esta elevada combinatoria, el programa construye los mapeos de forma incremental, al mismo tiempo que asigna valores a las propiedades de los constituyentes. Los modelos constitutivos que se generan evitan soluciones equivalentes de acuerdo a tres principios que gobiernan la asignación de etiquetas: (i) los constituyentes son listados en orden alfabético; (ii) no se salta ningún constituyente; y (iii) el siguiente constituyente (en orden alfabético) no puede ser listado más veces que el anterior.

Finalmente, el programa reporta todos los modelos satisfactorios haciendo una búsqueda exhaustiva, esto es, no se detiene con el primer modelo encontrado dentro de una clase de simplicidad.

3.3 Tareas inferenciales

El programa, además de lo visto hasta ahora, tiene otras formas para generar modelos de partículas constituyentes. Estas se usan dependiendo del objetivo de búsqueda y de la información de modelos constituyentes con la que se cuenta. Son de gran importancia ya que como se verá en los modelos generados, logran encontrar modelos cuando la forma directa no tiene éxito.

El programa realiza la construcción de los modelos de forma acumulativa; podemos entenderlo a partir de la capacidad que tiene de realizar tres tareas inferenciales. En la primera tarea, la hasta ahora expuesta, el número de filas en P no es conocido ya que hay que proponer a los constituyentes; la notación con flechas (\rightarrow y \downarrow ; en la matriz de espacio de búsqueda) señala las dimensiones a lo largo de las cuales crecen las matrices al postular nuevos constituyentes. Esta tarea inferencial es la más difícil de manera combinatoria, porque el espacio de posibilidades abiertas es, por mucho, el mayor.

Supongamos que se ha encontrado un modelo constitutivo aceptable para una familia de partículas y se presenta una nueva familia. Se puede usar el modelo ya admitido para encontrar un modelo para la nueva familia, justamente como la historia nos enseña que se ha hecho en la práctica de la física. Esta es la segunda tarea que involucra la búsqueda de modelos



constitutivos alternativos hechos de constituyentes conocidos para partículas que ya se les conoce por lo menos un modelo. En este caso la matriz P se da de entrada (ya no es necesario rellenarla) con las propiedades de los constituyentes conocidos, y la tarea se reduce a buscar la matriz S , lo que hace más fácil la tarea combinatoria.

Si no puede ser encontrado un modelo, entonces el programa postula nuevos constituyentes, de la misma forma que la descrita anteriormente. Esta tercera tarea inferencial busca un modelo constitutivo para una familia de partículas, mientras hace uso de un conjunto dado de constituyentes que pueden no ser suficientes. Este modo de búsqueda acumulativa se presenta típicamente cuando quarks encontrados para una familia previa son el punto de partida para explicar una nueva familia. La matriz P tiene sus entradas ocupadas sólo en forma parcial al principio, pero se añaden nuevas filas durante la búsqueda. Esta tercer tarea es de dificultad combinatoria intermedia.

Presentando sus aplicaciones, los autores muestran que GELL-MANN puede ser visto como una herramienta conveniente para proponer modelos de constituyentes subyacentes para varios grupos de partículas, incluyendo a las familias de partículas.

La primera familia presentada es la del octete bariónico de espín $\frac{1}{2}$ (ilustración 2.4, p. 33). La entrada⁷⁸ y los resultados se resumen en la tabla 3.2 (se consideran sólo siete partículas ya que la octava tiene números cuánticos repetidos). La primera hipótesis para N y M que lleva a por lo menos siete combinaciones de quarks en grupos de tres quarks ($N=M=3$). GELL-MANN llega a las dos soluciones de la tabla 3.2. La primera corresponde exactamente al modelo de los quarks desarrollado por Gell-Mann y Zweig. El segundo modelo usa valores de extrañeza que son múltiplos de $1/3$, como los valores de las cargas en el primer modelo. En cada modelo, sobran tres posibles combinaciones de quarks; esto es, no son asignadas a ninguna de las siete partículas. Cada una de estas combinaciones consiste de tres quarks idénticos, por ejemplo aaa . Las combinaciones excedentes pueden ser vistas como predicciones del modelo. Las tres partículas extras de la primera solución de GELL-MANN tienen propiedades equivalentes a los bariones Δ^- , Δ^{++} y Ω^- .

⁷⁸ Los datos pueden ser extraídos directamente de la ilustración 2.4, p. 32. Recordemos que el número cuántico de hipercarga (Y) está dado por la suma de la extrañeza y el número bariónico, para introducir la extrañeza a la tabla 3.2, simplemente restamos el número bariónico (subsección 1.2 del capítulo 2) que es 1 para todos los bariones.



Tabla 3.2 Octeto barionico (omitiendo una partícula): dos modelos generados por GELL-MANN

Familia (ENTRADA)				Quarks (SALIDA)			
Partícula	Carga	I_3	Extrañeza	Modelo 1 ⁷⁹	Modelo 2		
n	0	-1/2	0	udd	bcc		
p	+1	+1/2	0	uud	acc		
Σ^-	-1	-1	-1	dds	bbc		
Σ^0	0	0	-1	uds	abc		
Σ^+	+1	+1	-1	uus	aac		
Ξ^-	-1	-1/2	-2	dss	abb		
Ξ^0	0	1/2	-2	uss	aab		
Modelos de SALIDA							
Modelo 1				Modelo 2			
quark	carga	I_3	Extrañeza	Quark	carga	I_3	Extrañeza
a(u)	+2/3	+1/2	0	a	+1/3	+1/2	-2/3
b(d)	-1/3	-1/2	0	b	-1/2	-1/2	-2/3
c(s)	-1/3	0	-1	c	0	0	+1/3

La siguiente familia es la del octete de mesones de espín 0 (ilustración 2.3, p. 32). De acuerdo con el modelo estándar, cada mesón está hecho de un par quark anti-quark ($q\bar{q}$) (tabla 3.3). Sorprendentemente, GELL-MANN encontró una solución única para sólo cuatro quarks en grupos de dos, presentados como el primer modelo de la tabla 3.3. El resultado puede ser interpretado como dos quarks (a y b) y sus dos antiquarks (\bar{a} y \bar{b}). En la física no se reconoce ninguno de estos quarks. El modelo predice las partículas bb (Carga = 1, $I_3 = 0$ y Ext. = 2) y $\bar{b}\bar{b}$ (Carga = -1, $I_3 = 0$ y Ext. = -2).

⁷⁹ Modelo estándar.



Tabla 3.3 Octete mesónico: un modelo generado por GELL-MANN.

Familia (ENTRADA)				Modelo (SALIDA)	
Partícula	Carga	I_3	Ext.	Modelo Estándar	Modelo1
π^+	+1	+1	0	$u\bar{d}$	aa
π^-	-1	-1	0	$\bar{u}d$	$\bar{a}\bar{a}$
π^0	0	0	0	$\bar{u}u, \bar{s}s, \bar{d}d$	$a\bar{a}$
K^+	+1	+1/2	+1	$u\bar{s}$	ab
K^0	0	-1/2	+1	$\bar{d}s$	$b\bar{a}$
K^{*0}	0	+1/2	-1	$\bar{u}s$	$\bar{a}b$
K^-	-1	-1/2	-1	$\bar{d}s$	$\bar{a}\bar{b}$
η	0	0	0	$\bar{u}u, \bar{s}s, \bar{d}d$	$b\bar{b}$
Modelo 1					
quark	Carga	I_3	Ext.		
a	+1/2	+1/2	0		
b	+1/2	0	1		
\bar{a}	-1/2	+1/2	0		
\bar{b}	-1/2	0	-1		

Como ya se dijo, el programa puede considerar familias de partículas acumulativamente, tal que los constituyentes desarrollados para una familia se vuelvan el punto de partida para una segunda familia (segunda tarea inferencial). Cuando GELL-MANN es ejecutado para la familia de bariones, encuentra dos modelos que involucran a tres quarks, presentados en la tabla 3.2. GELL-MANN entonces tiene como entrada el octete de mesones, pero falla. Como resultado, GELL-MANN postula un nuevo (cuarto) quark, pero aún falla en encontrar un modelo aceptable, por lo que introduce un quinto, y después un sexto. Con estos seis quarks, tres viejos y tres nuevos, GELL-MANN encuentra dos modelos, incluyendo el modelo estándar de tres quarks y tres anti-quarks.

Para el decuplete de bariones de espín 3/2, el programa encuentra sólo el modelo estándar de tres quarks en combinaciones de tres.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ALCANCES Y LIMITACIONES

A partir de nuestra discusión en el primer capítulo del paralelismo entre mente y computadora y de considerar la pregunta ¿pueden las máquinas pensar?, llegamos a la conclusión, en acuerdo con Turing, de que no es relevante si éstas pueden o no hacerlo, lo que nos interesa es que nos ayuden a investigar el proceder de la empresa más elevada del conocimiento humano: la ciencia. A continuación presentamos la evaluación de dichas aportaciones computacionales para nuestro estudio de caso.

1 Los Proyectos Computacionales

El desarrollo de la ciencia se ha considerado como la actividad humana con mayor éxito. Por tal razón, la filosofía se ha preocupado por entender la dinámica del conocimiento científico. La organización jerárquica de los sistemas conceptuales que propone Thagard es muy conveniente para representar los cambios de tipo y parte que suceden en el acontecer científico. Las *fotos instantáneas* que propone muestran pictóricamente el cambio de las ideas en torno al desarrollo.

1.1 La teoría de cambio conceptual de Paul Thagard

Si comparamos las ilustraciones 2.1 y 2.5, pp. 22 y 35 respectivamente notamos claramente dos visiones distintas de la composición de la materia. Además de la distinta composición podemos notar, aún mejor representada, la distinta organización de la materia antes y después de los quarks. Dichas *fotos* revelan manifiestamente los cambios que identificamos: añadiduras de nuevas instancias, reglas débiles y fuertes, relaciones de parte y tipo, un nuevo concepto; y finalmente, el colapso de una jerarquía de parte (ilustración 3.1 (b) y (c), p. 56).

La teoría de la coherencia explicativa muestra, a grandes rasgos, lo que pretende: la mayor coherencia explicativa del modelo de los quarks frente a sus teorías rivales (ilustración 3.2, p.58). Y más aún, su coherencia interna. En este caso, la coherencia interna es de vital importancia para su aceptación, porque —como podemos notar— el modelo de los quarks estaba aislado en gran medida, esto es, no tenía teorías rivales significativas. Esto es de esperarse ya que lo que pretendía explicar el modelo de los quarks eran fenómenos nuevos de los cuales no se tenía ningún precedente. En este caso, se necesitó de un nuevo aparato teórico para explicar un conjunto de fenómenos nuevos.

Ahora hablemos de las limitaciones de la teoría de cambio conceptual de Thagard. La teoría no puede dar cuenta del grado de relevancia de las reglas que subyacen a los modelos, simplemente las connota (en fuertes y débiles). No estamos hablando del grado de fuerza de las reglas en comparación relativa a unas con otras, nos referimos a la trascendencia global que tienen dentro de la teoría física. Por ejemplo, para la teoría de Thagard las propiedades son simplemente valores que caracterizan a las partículas, no importa si estamos hablando de carga, espín o extrañeza.

Para ser más claros en esta apreciación, destaquemos un ejemplo que la teoría de cambio conceptual no captura y no obstante es de mucha trascendencia para la ciencia física. Una peculiaridad de los quarks, como se mencionó al narrar la historia, es que poseen carga fraccionaria en múltiplos de tercios de la carga del electrón $\frac{n}{3}e$. Este hecho es de suma trascendencia para la física moderna, ya que desde que se midió la carga del electrón esta fue considerada como la carga elemental y todo lo relacionado a la carga en el mundo subatómico era reportado en múltiplos enteros. De hecho, consideramos que esta situación sigue siendo un enigma para la física ya que se sigue considerando al electrón como partícula elemental aunque su carga es claramente compuesta.⁸⁰ La teoría de Thagard no es capaz de dar cuenta de esta situación.

Como ya comentamos más arriba, la teoría de cambio conceptual de Thagard va más allá con su implementación computacional: PI y ECHO.

⁸⁰ En la física no se inquiera por la estructura del electrón, ¡cómo se va a poner en duda a la partícula puntual por excelencia!

Con el programa PI (procesos de inducción), similar a los programas de descubrimiento de Langley y los demás, Thagard pretendía poder dar cuenta de cómo se desarrollan los sistemas conceptuales. Por ejemplo, PI podría simular la propuesta de partículas subyacentes con una regla heurística de INFERIR-COMPONENTES. Entre otras, tiene la capacidad de realizar generalizaciones, inferir reglas por abducción y combinar conceptos. Con el programa conexionista ECHO, pretendía comparar a las teorías por medio de sus hipótesis, relacionando a estas según los principios de la teoría de la coherencia explicativa y asignándoles un peso característico a cada hipótesis que al ejecutar el programa les permitiría competir entre sí.

Por último, distingue niveles de relación entre las teorías sucesivas. Aunque todas las revoluciones científicas son acumulativas hasta cierto punto, difieren en que tan acumulativas son. La relación entre teorías sucesivas es relevante en forma crucial para entender la racionalidad de las revoluciones. Los niveles que distingue en orden decreciente por su cantidad acumulativa son:

Incorporación; si una nueva teoría T_2 absorbe completamente a la teoría previa T_1 , entonces T_2 incorpora a T_1 .

*Sublimación*⁸¹; si T_2 incorpora parcialmente a T_1 , entonces T_2 *anula y preserva* al mismo tiempo a T_1 .

Suplantación; si T_2 involucra un rechazo casi total de T_1 , entonces T_2 *suplanta* a T_1 .

Omisión; si la adopción de T_2 se hace simplemente ignorando a T_1 , entonces T_2 *omite* a T_1 .

A la mayoría de la gente, incluyendo a los mismos científicos, el descubrimiento científico les parece un candidato poco probable para la automatización por computadora. Sin embargo, en las últimas dos décadas, investigadores en inteligencia artificial han cuestionado esta actitud intentado desarrollar artefactos inteligentes que simulan el proceso de descubrimiento. Aunque la mayoría de los investigadores concentran sus esfuerzos en reproducir los descubrimientos

⁸¹ Traducción del verbo Alemán *aufheben*, que significa tanto anular como preservar.

históricos, otros apuntan sus objetivos hacia el descubrimiento computacional de nuevo conocimiento científico.

1.2 El Programa de Generación de Modelos GELL-MANN

De entre los éxitos del programa GELL-MANN el más sobresaliente es el Modelo 1 de la tabla 3.2, p. 69, que es precisamente el modelo de los quarks para la familia del octete de bariones de espín $\frac{1}{2}$ (ilustración 2.4, p. 33). Los autores lo llaman modelo estándar ya que los quarks del modelo de Zweig son parte de los quarks del modelo establecido en el presente día, *el modelo estándar*. El modelo de los constituyentes del octete de bariones es generado directamente por la ejecución de GELL-MANN sin tener más información que la de las propiedades de la familia en cuestión. El programa propone a los constituyentes subyacentes para generar el modelo; esto es, procede con la que llamamos tarea inferencial 1.

El Modelo 2 generado para la misma familia de bariones se puede contar como un éxito del programa ya que es una alternativa al modelo de los quarks; el modelo explica de igual forma a la familia de bariones. Sin embargo, no puede ser considerado un éxito para la física de partículas elementales ya que los valores de extrañeza de los constituyentes propuestos son fraccionarios, múltiplos de $\frac{1}{3}$, que no son permitidos.

Para la ejecución del programa, con la familia de mesones (ilustración 2.3, p. 32) como entrada se obtiene el Modelo 1 (tabla 3.3, p 70), que solamente hace uso de dos constituyentes, junto con sus dos anti-constituyentes.⁸² Sin embargo, haciendo uso de la segunda tarea inferencial, esto es, haciendo uso de un modelo ya obtenido para otra familia (en este caso, el Modelo 1 tabla 3.2, p. 69), GELL-MANN encuentra dos modelos incluyendo al de Zweig. Al ya tener los valores de las propiedades de las partículas constituyentes, GELL-MANN simplemente postula dos quarks más para llegar a generar al modelo. Esto refleja la práctica de la física a través de la historia, que consiste en usar los modelos establecidos para desarrollar nuevos.

⁸² Notemos que las cargas de los componentes son múltiplos de $\frac{1}{2}$ y por tal razón no tienen reconocimiento en la física. Esto ejemplifica la capacidad del programa de usar distintos valores para las propiedades, por lo que abarca una cantidad mucho mayor de modelos posibles.

La principal limitación intrínseca al programa es que las propiedades de las partículas son determinadas sólo por la suma de sus propiedades; no toma en cuenta a los números cuánticos que se suman vectorialmente, como serían el momento angular y el isospín. Este hecho implica que el programa simplifica en gran medida al modelo original.

Desde la perspectiva de la física, el resultado más significativo es que la búsqueda exhaustiva en el espacio de modelos de quarks para los bariones, seguido por los mesones, revela que el modelo estándar de los quarks (el de Zweig y Gell-Mann) sobresale —casi únicamente— como el más simple. Sin la ayuda de una computadora sería difícil llegar a esta conclusión.

Hay que aclarar que el programa GELL-MANN⁸³ no fue escogido por ser un ejemplo exitoso entre los programas de descubrimiento; más bien, fue seleccionado debido al caso histórico que se analizó en este trabajo. La revisión de este programa nos permitió conocer el tipo de técnicas y métodos que usa el descubrimiento científico computacional, así como su implementación a un descubrimiento específico.

Para ejemplificar casos en que programas de descubrimiento han sido realmente exitosos, Langley⁸⁴ nos presenta una revisión sistemática de siete ejemplos específicos de nuevos descubrimientos asistidos por computadora, que han sido publicados en revistas científicas. Los descubrimientos asistidos por programas computacionales incluyen un descubrimiento taxonómico en la astrofísica, una ley cualitativa en cáncer bioquímico, una ley cualitativa en la metalurgia, una relación cuantitativa en la teoría de grafos, una ley temporal en ecología, una ley estructural en bioquímica, y finalmente, una ley de proceso en la química catalítica.

2 Conclusiones

Como ya dijimos más arriba es difícil hablar de revolución cuando sólo se considera un episodio de la historia, lo ideal sería tomar en cuenta la historia de la física de partículas

⁸³ El programa fue visto con escepticismo por los físicos de partículas elementales; en una entrevista con el Dr. Victor Rodríguez se me aclaró que esto se debió a que los científicos lo consideraban como una simulación que sobresimplificaba el problema.

⁸⁴ Langley (1998). Para una revisión de la historia de los trabajos en descubrimiento científico computacional ver Darden (1997).

completa. Pero hagamos un esfuerzo por hablar del modelo de los quarks en términos de revoluciones.

En el tema de cambio revolucionario es inevitable no mencionar a Kuhn. Bajo sus lineamientos el modelo de los quarks viene a responder a las dudas que genera el desorden de la gran cantidad de partículas descubiertas aunado a los fenómenos gobernados por nuevas fuerzas. En este sentido, éstos nuevos fenómenos y fuerzas constituirían las anomalías que llevan a la etapa de crisis a la que responde el modelo de los quarks como una sugerencia innovadora de ciencia extraordinaria. Sin embargo, no podemos llegar al establecimiento de un nuevo paradigma porque ese lo conformaría la teoría establecida hoy en día, el modelo estándar y la cromodinámica cuántica que están más allá de las expectativas y alcances de nuestro trabajo. Por consiguiente, bajo los estatutos de la visión Kuhniana el cambio en la física de partículas sería revolucionario. Los físicos de partículas de la actualidad viven en un mundo subatómico diferente al de los físicos de principios del siglo XX.

Este sería un caso especial en las revoluciones de la ciencia ya que como no existía una teoría rival considerable, no se puede hablar de la aceptación de una teoría sobre otra. De lo que se podría hablar en un análisis más detallado sería de las elecciones entre los pequeños modelos y teorías que poco a poco fueron construyendo a la física de partículas elementales; pero esto quedó fuera de los límites de este trabajo. Para el caso del modelo de los quarks podríamos hablar de su elección en contra del modelo de la matriz-S o de la teoría de grupos. Esto es lo que la teoría del cambio conceptual de Thagard busca: un análisis más detallado de los episodios más relevantes. Aquí es donde éste enfoque hablaría de decisiones racionales entre teorías. Para nuestro caso de estudio, la razón más evidente sería su éxito en la fenomenología, principalmente con la espectroscopia y acoplamiento hadrónico. Claro, un Kuhniano podría argumentar que como no hay una competencia real entonces sí se le podría calificar de irracional a un científico que no escoja al modelo de los quarks mientras no tenga otra opción.

Para Thagard, las revoluciones conceptuales ocurren cuando sistemas enteros de conceptos son reemplazados por otros nuevos. Un vistazo más a las ilustraciones 2.1 y 2.5, pp. 22 y 35 respectivamente, muestran claramente que los sistemas conceptuales jerárquicos para 1920 y para el modelo de los quarks son diferentes. Otro criterio que da Thagard para considerar a un cambio conceptual como revolucionario es que se den varios cambios de la tabla 2.1, p.49,

especificando que los tres últimos son los más importantes (7, 8 y 9). Si tomamos en cuenta los cambios del modelo de los quarks aunado con la teoría electrodébil que colapsa una jerarquía de parte (cambio 7 tabla 2.1 e ilustración 3.1 (b) y (c), p. 56), entonces podríamos calificar al cambio como revolucionario. De nuevo, lo más conveniente sería tomar en cuenta al cambio completo en la física de partículas elementales hasta el establecimiento del modelo estándar bajo la teoría de la cromodinámica cuántica. Para lo que se necesitaría un análisis de los episodios más importantes dentro de toda la historia en cuestión.

En cuanto a la caracterización que hace Thagard de la relación entre teorías sucesivas, aparte de que no había una verdadera teoría en competencia, es difícil hablar de un reemplazo de una teoría por otra ya que sólo estamos revisando un episodio de la historia de la física de partículas elementales. Una vez más, para poder ser más certeros en un comentario de esta índole, sería conveniente hacer una revisión de la historia completa, esto es, desde los inicios de la física de partículas elementales como disciplina autónoma hasta el establecimiento del modelo estándar. A más de esto, habría que revisar a las teorías subyacentes a los modelos en discusión, siendo la última de ellas la cromodinámica cuántica.

En una especulación sobre la revisión completa sugerida, podríamos tomar a la física atómica y a la cromodinámica cuántica como teorías sucesivas (en una perspectiva kuhniana, serían los paradigmas sucesivos). La caracterización de Thagard de la relación entre éstas sería la de omisión, es decir, que la adopción de la cromodinámica cuántica simplemente ignora a la teoría atómica. Entre las revoluciones conceptuales que presenta Thagard⁸⁵, ninguna de ellas presenta una relación de omisión entre teorías sucesivas, lo cual indica que la revolución de la física de partículas elementales (en caso de que lo fuera) sería de un nuevo tipo.⁸⁶

Nuestra postura en cuanto al cambio en la física de partículas es que el modelo de los quarks es tan sólo el gatillo que disparó el cambio culminando en el establecimiento del modelo estándar y la cromodinámica cuántica, lo que en su carácter holista sí conforma un cambio revolucionario. Sin embargo, sería posible argumentar que podría ser parte de una revolución científica que todavía no ha culminado, ya que la unificación de las fuerzas ha sugerido la posibilidad de una gran teoría unificada, junto con la cual se considera la existencia de

⁸⁵ Thagard (1992).

⁸⁶ Debo agradecer al Maestro Eduardo González por esta observación.

partículas aún más fundamentales, denominadas *rishons*,⁸⁷ que podrían terminar siendo los verdaderos constituyentes últimos de la materia.

Regresando a los proyectos de investigación computacionales como tales, podemos agregar una diferencia importante entre ellos. La perspectiva de Thagard está comprometida con una adecuación histórica, y más aún, con una adecuación cognitiva con cómo el hombre de hecho razona en la ciencia. A diferencia, la postura de los realizadores del descubrimiento computacional es utilitaria, ejemplificada por la opinión de Valdés-Pérez⁸⁸, según la cual la importancia de un descubrimiento está separada de los procesos que lo generaron; los procesos más simples, incluso los triviales, son mejores que los complicados si son suficientes para el trabajo de descubrimiento. No importa como se hizo el descubrimiento; lo que importa es llegar a él.

Nuestra postura acerca del proyecto de filosofía computacional de la ciencia de Thagard, acepta que ésta es una herramienta útil para la filosofía de la ciencia, y en que cumple su objetivo de colocarse entre los métodos formales y los métodos historicistas. Pero no compartimos con Thagard⁸⁹ su afirmación de que la inteligencia artificial es indispensable para las investigaciones en la filosofía de la ciencia involucradas con el descubrimiento.

Con respecto al proyecto de descubrimiento científico computacional, compartimos la idea de Langley⁹⁰ de que los programas de descubrimiento pueden funcionar en cooperación con el investigador y que no es posible que los científicos sean sustituidos por computadoras, como alguna gente ha pretendido que pudiera suceder. Creemos, de acuerdo con Valdes-Perez⁹¹, que los científicos con computadoras pueden hacer mejor investigación de frontera.

Lo más importante que podemos rescatar de las perspectivas computacionales se resume en la opinión de Theo Kuipers⁹² sobre la faceta de descubrimiento científico que asegura que el éxito promete en la medida en que una su fuerza con otro tipo de investigación asistida por computadora, a saber, la simulación por computadora.

⁸⁷ Menchaca (1987). La palabra *rishons* viene del hebreo *rishon* que significa primero o primario.

⁸⁸ Valdés-Pérez (1999).

⁸⁹ Thagard (1982).

⁹⁰ Langley (2000).

⁹¹ Valdés-Pérez (2000).

⁹² Kuipers (2001).

BIBLIOGRAFÍA

Barr, A. y E. Feigenbaum (eds) (1981) *The Handbook of Artificial Intelligence*, Addison Wesley, USA.

Brown, L.M. (1983) *The Birth of Particle Physics*, Cambridge University Press, USA.

Churchland, P. (1984) *Matter and Consciousness*, The MIT Press, USA.

Close, F. E. (1979) *An Introduction to Quarks and Partons*, Academic Press, USA.

——— (1983) *The Cosmic Onion: Quarks and the nature of the universe*, American Institute of Physics, USA.

Cummins, D. (1988) "A History of Thinking", Reimpreso en: *Minds, Brains, and Computers: The foundations of Cognitive Science*, R. Cummins y D. Cummins (eds) Blackwell Publishers, 2000.

Crane, T. (1995) *The Mechanical Mind*, Penguin Books Ltd., London England.

Darden, L. (1997) "Recent Work in Computational Scientific Discovery" en *Proceedings of the Nineteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*, M. Shafto y P. Langley (eds), Mahwah, New Jersey 1997, pp. 161-166.

Fodor, J. (1975) *The Language of thought*, The Harvester Press, Hassocks, Sussex, England.

Gell-Mann, M. y Y. Ne'eman (1964) *The Eightfold Way*, Perseus Publishing, Cambridge, Massachusetts.

Gregory, B. (1988) *Inventing Reality: Physics as a language*, John Wiley & Sons, New York.

Han, M. (1999) *Quarks and gluons: a century of particle charges*, World Scientific, River Edge, New Jersey.

Kim, J. (1996) *Philosophy of Mind*, Westview Press, Boulder Colorado, USA.

Kokkedee, J. (1969) *The Quark Model*, W. A. Benjamin, New York.

Kuhn, T.S. (1962) *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago. [versión en castellano: *La Estructura de las Revoluciones Científicas*, Fondo de Cultura Económica, México, 1971].

Kuipers, T. (2001) *Structures in Science: heuristic patterns based on cognitive structures, an advanced textbook in neo-classical philosophy of science*, Kluwer Academic Publishers, Dodrecht.

Langley, P. (1998) "The Computer-Aided Discovery of Scientific Knowledge", en *Discovery science: First International Conference*, S. Arikawa y H. Motoda (eds), Springer, Berlin, 1988 pp. 25-39.

————— (2000) "The Computational Support of Scientific Discovery", *International Journal of Human Computer Studies*, **53**, 393-410.

Langley, P., etal. (1987) *Scientific Discovery: Computational Explorations of the Creative Processes*, MIT Press, USA.

Laudan, L.(1977) *Progress and Its Problems*, University of California Press, Berkeley.

————— (1996) *Beyond Positivism and Relativism: theory, method and evidence*, Westview Press, USA.

Minsky, M. (1975) "A Framework for Representing Knowledge". Reimpreso en: *The psychology of computer vision*, P.H. Winston (ed), McGraw-Hill, New York, pp. 211-277.

Menchaca, A. (1987) *El Discreto Encanto de las Partículas Elementales*, Fondo de Cultura Económica, México.

Diez. J. Y U. Moulines (1999) *Fundamentos de Filosofía de la Ciencia*, Ariel, Barcelona.

Ne'eman, Y. y Y. Kirsh (1986) *Los Cazadores de Partículas* Traducido por Luis Justo "The Particle Hunters" Editorial Gedisa S.A., Barcelona España.

Pickering, A. (1984). *Constructing Quarks: A Sociological History of Particle Physics*, Edinburg University Press, UK.

Pérez Ransanz, A.R. (1999) *Kuhn y el Cambio Científico*, Fondo de Cultura Económica, México D.F.

Putnam, H. (1967) "The Nature of Mental states". Reimpreso en: *Mind and Cognition: An Antology*, W. Lycan, (ed), Blackwell Publishers, second edition 1999.

Searle, J.(1980) "Minds, brains, and programs". Reimpreso en: *Minds, Brains, and Computers: The foundations of Cognitive Science*, R. Cummins y D. Cummins (Eds) Blackwell Publishers, 2000.

Sloman, A. (1978) *The Computer Revolution in Philosophy: Philosophy, Science and Models of Mind*, The Harvester Press, Hassocks, Sussex, England.

Sterelny, K. (1990) *The Representational Theory of Mind: An Introduction*, Basil Blackwell Ltd., USA.

Thagard, P. (1982) "Artificial Intelligence, Psychology, and the Philosophy of Discovery" en *PSA*, Volumen 2, pp. 166-175.

————— (1988) *Computational Philosophy of Science*, Princeton University Press, New Jersey, USA.

————— (1992) *Conceptual Revolutions*, Princeton University, USA.

Turing, A. (1950) "Computing machinery and intelligence", *Mind*, 59. Reimpreso en: *Minds, Brains, and Computers: The foundations of Cognitive Science*, R. Cummins y D. Cummins (eds) Blackwell Publishers, 2000.

Valdés-Pérez (1999) "Principles of Human-Computer Collaboration for Knowledge Discovery in Science", *Artificial Intelligence*, **107**, pp. 335-346.

————— (2000) "Knowledge Discovery in Science"

Valdés-Pérez, R. y J. Zytkow (1996) "Systematic Generation of Constituent Models of Particle Families", *Physical Review E*, **54**, pp. 2102-2110.

Wiggins, D. (1980) *Sameness and Substance*, Basil Blackwell, Great Britain.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN