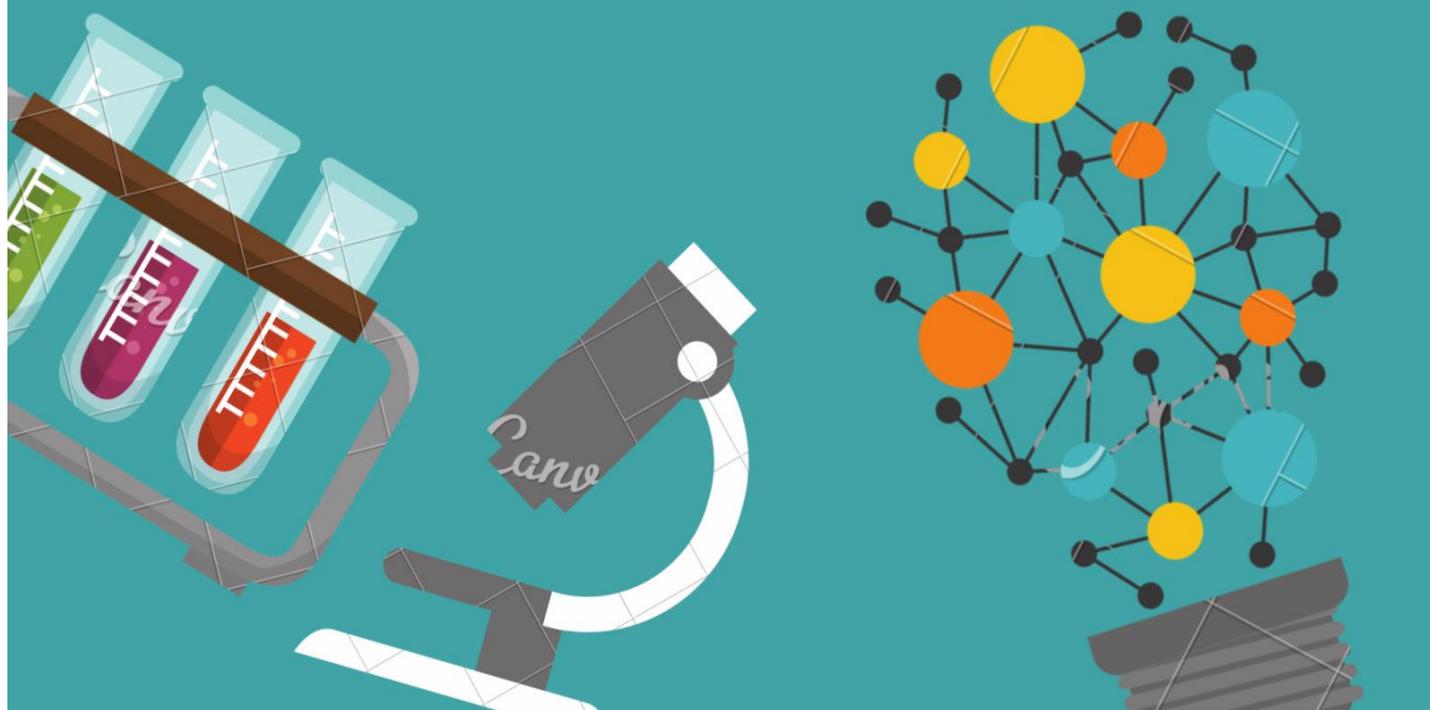
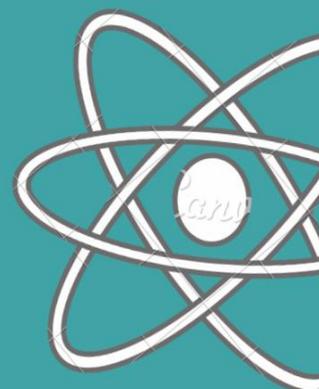


Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria
Universidad Nacional de Cuyo

INTRODUCCIÓN AL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO

para Ingeniería

AUGUSTO ROGGIERO



Roggiero, Angel Augusto

Introducción al conocimiento científico para ingeniería / Angel Augusto Roggiero. - 1a edición para el alumno - San Rafael : Angel Augusto Roggiero, 2018.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-86-1015-3

1. Ingeniería. 2. Epistemología. 3. Conocimiento Científico. I. Título.

CDD 620.007



Introducción al Conocimiento Científico para Ingeniería por Angel Augusto Roggiero se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

1.1 Objeto del curso.....	6
1.2 ¡La ciencia no es solo ecuaciones!	6
¿Pero es eso tan simple? No.	7
1.3 ¿Qué es la epistemología?	7
1.3.1 Presentación general.....	7
1.3.2 Una visión alternativa: la epistemología como ciencia empírica.....	10
1.4.1 Discusión introductoria: ¿qué es una definición?	11
1.4.2 El conocimiento según platón.....	12
1.4.3 El problema de Gettier	12
1.4.4 Respuestas al problema de la justificación: internalismo, externalismo.....	14
1.4.4 Respuestas al problema de la justificación: internalismo, externalismo.....	14
1.4.5 Conocimiento según Nozick y Dretske	16
1.4.6 El desafío del escepticismo.	16
1.4.7 Respuestas al escepticismo	17
2.1 ¿Cómo definir la ciencia?	19
2.1.1 Definición (s) de ciencia y criterios de cientificidad	19
2.1.2 El racionalismo de la oposición / relativismo.....	21
2.2.1 Algunos elementos de clasificación	21
2.2.2 Presentación histórica de clasificaciones.....	22
2.3 La ciencia como fenómeno social 2.3.1 La ciencia y el lenguaje.....	25
2.3.2 ¿Ciencia más allá de los individuos? Objetivismo e individualismo.....	26
3.1 Hechos, leyes, principios, modelos y teorías.	27
3.1.1 Hechos, fenómenos y acontecimientos.....	27
3.1.3 ¿Qué es un modelo?	31
3.1.4 ¿Qué es una teoría científica?.....	34
3.2 Enfoques globales de la ciencia y las teorías.....	34
3.2.1 Paradigma y Matriz Disciplinaria: Kuhn.....	34
3.2.2 Programas de investigación: Lakatos.....	36
3.3 Definir un objeto	37
3.3.1 General: definición extensional y definición analítica / intensional	38
3.3.2 Modo de definición de las ciencias empíricas: la definición operacional	40
3.3.3 Ejemplo 1: ¿Qué es la masa? ¿Qué es una fuerza?	41
3.3.4 Ejemplo 2: ¿Qué es el movimiento? ¿Qué es una deformación?	43
3.4 Definir un objeto (continuación): complejidad y bordes borrosos	45
3.4.1 Conceptos vagos y paradojas soritas.	45

3.4.2 Ejemplo 1: ¿Vivir o ser inerte? Mimivirus y ATTV35	46
3.4.3 Ejemplo 2: definición de muerte y criptobiosis de Tardígrado	48
3.4.4 Ejemplo 3: ¿animal, seta o planta?	49
3.5 Definición de un objeto (final): la crítica de Lakatos	50
4.2 La medida de los fenómenos físicos.....	52
4.2.1 Percepción, medición y testimonio de datos.....	52
4.2.4 Instrumentos de medida	56
4.2.5 Ejemplo 1: La máquina Attwood: medición de masa y fuerzas	57
4.2.6 Ejemplo 2: La cámara de burbujas: "ver" partículas en movimiento.....	59
4.2.7 Ejemplo 3: microscopio de túnel: "ver" los átomos.....	60
4.2.8 Ejemplo 4: Lentes gravitacionales: "ver" objetos distantes.....	61
4.3 La observación no es neutral.	62
4.4 Percepción y fiabilidad de las observaciones.....	63
4.4.1 Recepción y percepción	64
4.4.2 Percepción del espacio y la geometría (s).....	65
5.1 Preliminar 1: ¿Cuál es la verdad?	69
5.2 Preliminar 2: un poco de lógica.....	70
5.2.1 Los 3 axiomas de Aristóteles.....	70
5.2.2 Tarski: correspondencia, verdad, lenguaje y meta-lenguaje	71
5.2.3 Gödel: verdad, demostrabilidad e incompletitud	72
5.3 ¿Es posible ver la ciudad en los hechos?.....	73
5.3.1 Carnap y empirismo lógico.....	73
5.3.2 El relativismo quine y ontológico	75
5.4 ¿Se pueden verificar las afirmaciones científicas?.....	76
5.4.2 Verificación de afirmaciones teóricas	77
5.5 Validar las teorías científicas: métodos.....	79
5.5.1 ¿Qué es un método?	79
5.5.2 El caso de las ciencias formales: demostración	81
5.5.4 Retorno a la teoría de la inducción.	85
5.6 Falsacionismo: Popper	87
5.6.2 El concepto de verosimilitud de Popper	89
5.7 Holismo epistemológico: Duhem, Quine	90
5.8 Eficiencia y producción tecnológica.	91
5.8.1 Relatividad general y ubicación por sistema GPS68	92
5.8.2 Moléculas manipuladoras: clips ópticos y tijeras.....	92
6.1 Describe o explica?.....	94

6.1.1 ¿Qué significa explicar?.....	94
6.1.2 Explicación Nomológico-Deductiva (N-D)	95
6.2 ¿Explica o entiende?	96
6.1 Interpretación, explicación y comprensión.....	97
6.2 Ciencias predictivas y ciencias anticipatorias.....	97
6.2.1 Predicción, anticipación y científicidad.....	97
6.2.2 ¿Predicción = validación? El descubrimiento de Neptuno.....	98
6.2.3 ¿Y cuándo no funciona? Las trayectorias de mercurio y la luna.....	98

1 Introducción

1.1 Objeto del curso.

La formación científica implica aprender una cierta cantidad de conocimientos y conocimientos relacionados con las disciplinas en cuestión. Más allá de la adquisición de este conocimiento, es deseable que el científico, durante su entrenamiento, reciba los medios para desarrollar un análisis crítico de la naturaleza de lo que aprende. No se trata de decidir la veracidad o el interés del contenido de los cursos que se imparten, sino de comprender qué es la ciencia y de ver cómo es peculiar esta forma de conocimiento del mundo que nos rodea.

El objetivo principal de este curso es presentar los conceptos básicos de la epistemología, entendida como la teoría del conocimiento científico, y más particularmente la epistemología de las llamadas ciencias empíricas (es decir, aquellas que describen el mundo en basado en datos sensibles proporcionados por el experimento: mecánica, física, química, ...). Se hará hincapié en las bases ya adquiridas, es decir, en la mecánica de Newton. La teoría de la relatividad, la mecánica cuántica y la mecánica de continuidad no se discutirán en profundidad porque solo se analizarán más adelante en el currículo universitario. Solo se abordarán sus principales consecuencias en la forma en que los científicos perciben el mundo y conciben la ciencia. Para ilustrar ciertos puntos, se tomarán ejemplos de otras disciplinas: matemáticas, biología, ciencias de la computación.

Además de los conceptos básicos de reflexión sobre la epistemología de la física y la mecánica, este curso pretende presentar, a través de algunos ejemplos, la historia de los resultados fundamentales de la mecánica, como el principio fundamental de la dinámica. (El producto de la aceleración por la masa es igual a la resultante de las fuerzas ejercidas sobre un cuerpo sólido rígido), la conservación de la energía cinética y el impulso durante el choque elástico de dos sólidos, o la naturaleza. Del movimiento de los planetas dentro del sistema solar. Estos resultados son parte del bachillerato de cualquier licenciado destinado a una capacitación científica superior, y parecen ser "verdaderos" y "obvios", es decir, no estar abiertos a la discusión. Sin embargo, incluso un breve vistazo a la historia del desarrollo de estos resultados muestra que, lejos de ser simples e intuitivos, estos resultados son extremadamente complejos y solo se han obtenido. 'Después de siglos, incluso milenios, de reflexión, obra y controversia de gran intensidad. Esta es una ilustración perfecta de la necesidad de que cualquier científico, investigador o ingeniero domine los conceptos básicos del pensamiento sobre la naturaleza de la ciencia y, por lo tanto, comprenda el alcance y el alcance de su conocimiento, más allá de la mera erudición y la erudición. Su campo de especialización

1.2 ¡La ciencia no es solo ecuaciones!

Para ilustrar nuestro punto, tomemos un ejemplo: la mecánica de Newton. Se aprende en la escuela secundaria y, al principio, parece muy simple: es "viejo" (por lo que, intuitivamente, uno estaría tentado de creer que se trata solo de cosas elementales en comparación con teorías más recientes como la teoría de la relatividad). y mecánica cuántica), se ilustra con ejemplos prácticos que requieren tecnologías elementales durante el trabajo práctico, y utiliza conceptos

que parecen entenderse fácilmente: fuerza, aceleración, masa, movimiento, descanso. Además, se expresa por medio de tres leyes de expresión matemática simple, conocidas con el nombre de leyes de Newton (válidas en una referencia galileana):

Primera ley de Newton (también llamada ley o principio de inercia)

Segunda ley de Newton (también llamada ley o principio fundamental de la dinámica)

La tercera ley de Newton (también llamada ley o principio de acción y reacción)

¿Pero es eso tan simple? No.

Primero, ¿podemos definir exactamente cuáles son las entidades (masa, fuerza, ...) que aparecen en estas ecuaciones? ¿Cómo, por qué método teórico o práctico, podemos definir y luego evaluar estas cantidades?

Entonces, las relaciones recordadas anteriormente se llaman leyes. Pero ¿qué es una ley? ¿Cómo se obtienen, y cuál es su lugar, rol y estatus dentro de las ciencias?

Aún más problemático: ¿son estas leyes verdaderas? ¿Cómo comprobarlos? ¿Y qué significa que una ley científica sea verdadera o falsa?

Generalicemos el campo de reflexión. Hablamos de mecánica newtoniana. El adjetivo "newtoniano" indica que hay varios mecanismos posibles: de hecho, existe una mecánica hamiltoniana, una mecánica relativista asociada con el nombre de Einstein, una mecánica cuántica, ... Dado que son diferentes de la mecánica de Newton, ¿Es la pregunta intuitiva e ingenua de si la mecánica de Newton es falsa? ¿Habría mecánicas más verdaderas (o falsos) que otros? Y primero, ¿esta pregunta tiene sentido?

La mecánica es la primera ciencia de la naturaleza que se constituyó históricamente en Grecia, hace unos 2500 años. ¿Cómo, por qué, bajo qué impulsos ha evolucionado para formar la ciencia que conocemos hoy? ¿Ha sido esta evolución continua o hay "revoluciones científicas" que marcan puntos de inflexión decisivos? ¿Podemos decir que ha habido avances en la mecánica?

El ejemplo de la mecánica permite plantear, de manera más general, la cuestión de la génesis y evolución de las ciencias. Pero, por supuesto, hay una pregunta fundamental: ¿qué es una ciencia?

Todas estas preguntas están relacionadas con la epistemología, que es el tema de este curso. Para cada una de las principales preguntas que se acaban de plantear, nos esforzaremos por elaborar un panorama sintético de las diferentes respuestas y presentar los puntos de vista específicos de las grandes corrientes modernas de la epistemología.

1.3 ¿Qué es la epistemología?

1.3.1 Presentación general

El término epistemología (o, más precisamente, el término inglés epistemología) fue acuñado por el metafísico James Frederick Ferrier (1808-1864) para designar una teoría del conocimiento. Este neologismo se construye a partir de los términos griegos episteme (conocimiento teórico, conocimiento) y logos (discurso racional, lenguaje, juicio). Apareció por primera vez en un libro en francés en 1901, en la traducción de un libro de Bertrand Russell¹. Luego se populariza y ahora está muy extendida.

El término epistemología se usa para referirse a dos cosas diferentes: 1. Una teoría general del conocimiento humano, científico y no científico. En esta aceptación, que es la más común para el término epistemología en inglés, la epistemología puede considerarse como una rama de la filosofía que trata la naturaleza, el valor y los límites del conocimiento humano. 2. Una teoría del conocimiento científico, o como la filosofía de la ciencia. Esta es la segunda definición, más restringida y generalmente utilizada por autores de habla francesa, que es el tema de este curso. La teoría general del conocimiento es designada por el término (rara) gnoseology².

La definición correspondiente dada por Lena Soler³ es: "La epistemología básicamente apunta a caracterizar las ciencias existentes, con vistas a juzgar su valor y, en particular, a decidir si pueden pretender acercarse al ideal de un conocimiento cierto y auténticamente justificado. . Trabaja para lograr este objetivo, para describir la manera en que esta o la llamada disciplina científica procede para desarrollar y probar sus teorías, para especificar la fisonomía de estas teorías, para finalmente estimar el valor lógico y cognitivo de tales teorías. "

Las tres preguntas fundadoras de la epistemología son:

Preguntas fundamentales en epistemología

1. ¿Qué es la ciencia (o ciencia)? ¿Qué distingue este tipo de conocimiento de los demás? ¿Cómo definirlo?

2. ¿Cómo surgió la ciencia (o ciencia)? ¿Cuáles fueron los factores (tecnológicos, matemáticos, sociológicos, filosóficos, religiosos, ...) que influyeron en su evolución? ¿Qué métodos de trabajo y pensamiento se han utilizado para construirlo?

3. ¿Cómo juzgar su validez o valor? ¿Qué significa que una teoría científica es verdadera? ¿Cómo comprobar la validez de una teoría científica?

Esta definición destaca dos puntos importantes. En primer lugar, la epistemología es un discurso sobre la ciencia y, por lo tanto, presupone la ciencia. En este sentido, ella viene después de este último. En segundo lugar, la epistemología es un discurso crítico sobre el conocimiento científico, su desarrollo y evolución. Por lo tanto, debe definir su objeto (lo que es ciencia, ver Capítulo 2) y sus métodos.

La identificación de conocimiento genuinamente científico y conocimiento no científico, a menudo llamado conocimiento común o sentido común, presupone la existencia de una

demarcación clara entre estos dos tipos de conocimiento. Este problema se discute en el Capítulo 2. La restricción del campo de análisis de la epistemología al conocimiento científico solo permite distinguirlo de la filosofía del conocimiento. También se puede (como lo hacen muchos epistemólogos contemporáneos) distinguirlo de la filosofía de la ciencia propiamente dicha, y este último subordina la reflexión sobre la ciencia a las preocupaciones de la filosofía general. Si el término epistemología es de creación reciente, la filosofía de la ciencia se remonta a la antigüedad, ya que la ciencia (incluso si el contenido exacto de esta palabra ha evolucionado considerablemente desde entonces) es tomada como un objeto de reflexión por Platón (428-346 aC). -C.) Y Aristóteles (384-322 aC), y que esta reflexión está presente en muchos filósofos y científicos durante los últimos veinticinco siglos. La filosofía de la ciencia propiamente dicha está fundada por el filósofo alemán Emmanuel Kant (1724-1804), quien primero distingue a la ciencia como un objeto autónomo sujeto al análisis filosófico. Sin embargo, por su naturaleza, la epistemología pertenece al campo de la filosofía y no puede considerarse completamente ajena a la filosofía de la ciencia. Ella es incluso una parte de ello. La cuestión de una clara distinción entre filosofía de la ciencia y epistemología sigue siendo una pregunta abierta hoy. Es particularmente útil señalar que, como todas las obras filosóficas, los textos que tratan de la epistemología están profundamente marcados por las opiniones filosóficas de sus autores, mientras que la ciencia tiene el ideal de reducir tanto como sea posible cualquier parte de la subjetividad en su contenido. La epistemología no es una "ciencia de la ciencia".

Es importante recordar que la epistemología tiene dos aspectos: un aspecto normativo que apunta a definir qué es la ciencia y, por lo tanto, a delimitar el campo de la ciencia (¿qué es la ciencia? ¿científico?) y un aspecto descriptivo (¿cuál es la estructura y la dinámica interna de una disciplina científica?).

Para analizar su objeto, el conocimiento científico, el epistemólogo puede proceder de acuerdo con dos métodos:

- El método sincrónico, que consiste en considerar las disciplinas científicas en un momento dado, independientemente de su desarrollo histórico. Luego procedemos a un análisis directo de estas disciplinas, sus contenidos, sus métodos.
- El método diacrónico, que consiste en analizar las disciplinas científicas desde la perspectiva de su génesis, su desarrollo y su maduración. A esto le sigue el análisis genético (a diferencia del análisis directo). Este método permite plantear la cuestión del progreso científico.

La epistemología recurre a la historia de la ciencia (por construcción cuando se usa el método diacrónico) para dibujar los "hechos básicos" necesarios para su análisis. El estudio de la historia de las disciplinas científicas, los modelos y las teorías que utilizan, por una parte, para comprender las disciplinas científicas en su estado actual de desarrollo y para analizar la naturaleza de la evolución científica (¿cuál es el proceso de evolución de las ciencias?) Pero también para hacer la parte entre lo que imponen los hechos experimentales (por lo tanto a priori) y lo que agregan los científicos (por lo tanto, a posteriori). Existe una larga tradición de estudiar la historia de la ciencia y la historia filosófica de la ciencia. Como veremos más adelante, el método diacrónico ocupa un lugar central en el desarrollo de las teorías epistemológicas modernas, como la falsificación de Popper, la teoría de las revoluciones científicas de Kuhn o la teoría de los programas de investigación de Lakatos.

La epistemología también recurre a la sociología de la ciencia para obtener información sobre las interacciones entre la ciencia (o ciencias) y la sociedad, para responder las siguientes dos preguntas:

1. ¿Cómo ha influido la ciencia (o las ciencias) en la organización política, económica y social de una sociedad (o un subgrupo identificado), o la evolución del pensamiento? filosóficos y religiosos, de la literatura, ...
2. ¿Cuáles fueron o son las restricciones sociológicas ejercidas por la sociedad (o un subgrupo) en el desarrollo de una ciencia o una teoría científica? ¿Influyen los puntos de vista filosóficos, religiosos y políticos de los investigadores en el desarrollo y contenido de las teorías científicas? En caso afirmativo, ¿cómo?

1.3.2 Una visión alternativa: la epistemología como ciencia empírica.

Se ha dicho anteriormente que la epistemología, tal como fue concebida por la mayoría de los epistemólogos contemporáneos, pertenece al ámbito de la filosofía y no es una ciencia de la ciencia. Sin embargo, algunos filósofos han propuesto ver la epistemología como una ciencia empírica (de la misma manera que la física, la mecánica, la química, ...) cuyo objeto de estudio serían las teorías científicas. Este punto de vista se ilustra con el enfoque del filósofo y lógico estadounidense Willard Van Orman Quine (1908-2000), quien defendió esta tesis en un artículo de 1951 e introdujo el término epistemología naturalizada (traducida al francés por epistemología naturalizada o natural) en 1969. En esta nueva perspectiva, el propósito de la epistemología es describir la estructura interna de las ciencias y su evolución (que corresponde al aspecto descriptivo mencionado anteriormente) y profundizar el significado de sus afirmaciones, y este no es el caso. Puede pretender basar el conocimiento científico. Una consecuencia es que debemos renunciar a cualquier carácter normativo absoluto. De hecho, si la epistemología fuera concebida como una ciencia entre las demás, habría un círculo vicioso si definiera qué es la ciencia. Este abandono de la búsqueda de una justificación absoluta del conocimiento coloca a la filosofía de Quine en oposición al enfoque fundacionalista, cuyo objetivo es desarrollar una teoría general de la verdad y los medios para lograrla. Siendo una ciencia empírica, la epistemología debe, según Quine, utilizar tanto los resultados como los métodos de otras ciencias. Al ser una ciencia empírica, debe usar el método experimental para confrontar sus teorías con los hechos. Además, es importante recordar que, según Quine, no hay oposición entre la ciencia y la filosofía, y que la epistemología naturalizada también pertenece al dominio de esta última: "la filosofía, como [...] un esfuerzo a la vista para tener una idea más clara de las cosas, no debe, por lo esencial de sus objetivos y método, distinguirse de la ciencia. "

Esta visión naturalizada de la epistemología se basa en la idea de que la ciencia es un objeto que puede someterse al análisis científico. Los defensores de un tipo particular de epistemología naturalizada conocida como epistemología evolutiva dan un paso más y basan su análisis del progreso científico en la teoría biológica de la evolución iniciada por el naturalista inglés Charles Darwin (1809-1882).) en su libro *El origen de las especies* publicado y agotado el 24 de noviembre de 1859.

En su llamada versión literal, esta escuela de pensamiento interpreta las habilidades intelectuales del hombre y sus productos (incluida la ciencia) como elementos involucrados en la selección natural de especies vivas. La ciencia, posibilitada por el desarrollo de las facultades

intelectuales del homo sapiens, se analiza como consecuencia de la competencia entre especies que garantiza la dominación y la supervivencia de la raza humana, así como el bipedalismo o la existencia de Manos con los pulgares en oposición. En su versión analógica, la epistemología evolutiva utiliza el paradigma de la selección natural (basada en la noción de competencia, de mutación aleatoria transmitida a los descendientes y la supervivencia del más apto) para explicar la evolución de las teorías científicas: teorías más Los adaptados se seleccionan después de un proceso de variación de los contenidos de las teorías y la competencia. Es importante señalar que este uso analógico de la teoría de la selección natural no implica la aceptación de que esta teoría sea cierta en el caso de la biología: es solo un esquema explicativo. 1.4 ¿Bajo qué condiciones sabemos algo?

Antes de discutir las diversas preguntas que forman parte de la epistemología y, por lo tanto, del conocimiento científico, primero debemos analizar el problema de la definición de conocimiento: ¿cuándo podemos decir que sabemos? cualquier cosa ? Aquí, saber se opone a creer, el conocimiento es solo un tipo de creencia y el conocimiento científico (por lo tanto, la ciencia) un caso particular de conocimiento.

1.4.1 Discusión introductoria: ¿qué es una definición?

Para discutir adecuadamente la definición de conocimiento, es necesario especificar lo que se llama una definición. De este modo, podemos garantizar la validez de las definiciones de conocimiento propuestas por diferentes autores y, en su caso, detectar sus debilidades.

Una definición o análisis sustancial es una proposición que relaciona una expresión que se define (el definiendum) con una expresión que define (llamada definiens) y que satisface las siguientes tres condiciones:

Criterios de validez de una definición sustancial

1. propiedad de la adecuación extensional: la definición debe aplicarse a todo lo que designa el definiendum. Esto se traduce mediante el uso de la frase "si y solo si", familiar en matemáticas.
2. propiedad de adecuación conceptual o intensiva: los definiens deben proporcionar información sobre la naturaleza de lo definido.
3. propiedad de no circularidad: los definiens no deben apelarse a sí mismos, directa o indirectamente.

Vamos a dar algunos ejemplos

La proposición "n es un número primo si y solo si es un entero natural que tiene exactamente dos divisores, 1 y en sí mismo" satisface la propiedad de adecuación extensional. Por otro lado, "X es un hombre si y solo si X pertenece a la raza humana" no nos enseña nada sobre lo que es un hombre: esta proposición no es conceptualmente adecuada y, por lo tanto, es una pseudo-definición y no una definición. Finalmente, "X es un hombre si y solo si X es un hombre" es circular.

1.4.2 El conocimiento según Platón.

Platón proporciona una primera definición de conocimiento:

Definición de conocimiento en Platón El conocimiento es una creencia verdadera y justificada.

Esta definición implica dos condiciones: para alcanzar el estado de conocimiento, una creencia no solo debe ser verdadera (es decir, corresponder a una realidad), sino que el sujeto también debe poder creer (es decir, decir que uno no puede saber "por casualidad" o por error).

Antes de continuar, tenga en cuenta que esta definición de conocimiento plantea muchas otras preguntas, algunas de las cuales se repetirán en los siguientes capítulos (considerando la mayoría de las veces el marco limitado del conocimiento científico):

- ¿Qué es el verdadero conocimiento? ¿Cómo podemos estar seguros de la verdad de algo?
- ¿Qué acceso podemos tener a la realidad? ¿Existe esto y cómo se relacionan verdad y realidad?
- ¿Qué es el conocimiento justificado? ¿Qué se puede decir de la teoría de la justificación?

La cuestión de la definición de conocimiento ha recibido poca atención entre Platón y el siglo XX. A lo largo de los 2500 años entre estos dos períodos, varios filósofos y teólogos han dado definiciones de conocimiento, pero es solo recientemente (desde 1950) que un esfuerzo de análisis sistemático y Debido a la definición platónica se realizó. El siguiente capítulo presenta algunas contribuciones sorprendentes en esta área.

1.4.3 El problema de Gettier

Antes de presentar las objeciones formuladas por Edmund Gettier⁸ en 1963, primero reformulemos la definición dada por Platón de una manera más formal de la siguiente manera:

La escritura formal de la definición de Platón X sabe que P si y solo si:

1. X cree que P
2. P es verdadera
3. X está justificada en creer que P

En su artículo fundador, Gettier muestra que la definición dada por Platón no es satisfactoria porque existen creencias verdaderas y justificadas que no son conocimiento.

Tomemos el siguiente ejemplo, que trata con una creencia verdadera injustificada. X pone sus llaves en el bolsillo de su abrigo. Cuando se le pregunta dónde están, X sabe que están en su bolsillo. Esta proposición es verdadera, y X está justificada en creerla, ya que él mismo la puso. Pero imaginemos ahora que, sin darse cuenta, X los perdió y que un amigo los volvió a poner en el bolsillo del abrigo de X, siempre sin que X se diera cuenta. Entonces, X ya no tiene justificación para creer que están en su bolsillo, ya que están allí solo por casualidad: los perdió, las llaves se

entregaron por casualidad y sin que X lo supiera. Según la definición de Platón, ¡ya no podemos decir que X sabe dónde están sus llaves!

Pasemos ahora a un caso de creencia verdadera y justificada que no es un conocido. Gettier da este ejemplo: "Supongamos que Smith y Jones son candidatos para un determinado trabajo. Y supongamos que Smith tiene buenas razones para la siguiente proposición conjuntiva:

(d) Jones es el que será contratado, y Jones tiene diez piezas en su bolsillo.

Las razones de Smith para creer en (d) pueden ser que el director de la compañía le aseguró que eventualmente se contrataría a Jones, y que hace diez minutos Smith contó las monedas que tenía Jones en su bolsillo. La propuesta (d) implica que:

(e) la persona a contratar tiene diez monedas en el bolsillo.

Supongamos que Smith ve esta participación antes de (d) y acepta (d) por lo que tiene muy buenas razones. En este caso, está claro que Smith está justificado al creer que (e) es verdadero. Pero imaginemos que, sin el conocimiento de Smith, él, y no Jones, obtendrá el trabajo. Y eso, también sin que Smith lo sepa, él mismo tiene diez monedas en el bolsillo. La proposición (e) es por lo tanto verdadera, aunque la proposición (d), que Smith dedujo, es falsa. En nuestro ejemplo, todo esto es cierto:

1. que (e) es cierto
2. que Smith cree que (e) es cierto
3. que Smith está justificado en creer que (e) es verdadero Pero es tan claro como Smith No sabemos que (e) es cierto; porque (e) es verdadero en virtud del número de monedas en el bolsillo de Smith, mientras que Smith no sabe cuántas monedas hay en el bolsillo de Smith, y basa su creencia en (e) en El recuento de las monedas en el bolsillo de Jones, que él cree erróneamente que es el que va a ser contratado. "

La definición de Platón no es extensamente exacta. De hecho, es de la forma "A si y solo si B", y por lo tanto entiende dos afirmaciones

1. A si B: B es una condición suficiente de A
2. Sólo si B: B es una condición necesaria de A

Para mostrar que tal proposición es falsa, basta con encontrar un caso donde uno tiene B sin tener A (violación de 1) o un caso donde uno tiene A sin B (violación de 2). El contraejemplo dado anteriormente viola la relación "condición suficiente". Esto demuestra que los definians dados por Platón no son adecuados.

Desde 1963, una gran cantidad de trabajo ha estado orientado a dar una definición "perfecta" de conocimiento que no sufra de contra-ejemplo, y que respete los tres criterios de adecuación dados anteriormente. Dos puntos particularmente difíciles son evitar la circularidad y llegar a una noción satisfactoria de justificación. Se han producido muchos contraejemplos cada vez más sofisticados con definiciones cada vez más complejas, dando lugar a lo que a veces se llama "gettierology" (con una connotación peyorativa). Una discusión en profundidad de estos

ejemplos está más allá del alcance de este curso. El objetivo de la siguiente sección es proporcionar una breve descripción de las diferentes respuestas al problema de la justificación.

1.4.4 Respuestas al problema de la justificación: internalismo, externalismo.

El problema de Gettier destaca un problema fundamental de la teoría platónica del conocimiento: el de la justificación. De hecho, según esta teoría, el sujeto solo puede saber si su creencia está justificada. ¿En qué casos se puede justificar la creencia? Aquí distinguimos dos familias de teorías filosóficas.

La primera familia es la del internalismo, para la cual el sujeto tiene, al menos en teoría, acceso a las justificaciones de sus creencias. Luego viene la pregunta de qué justifica la justificación: ¿cuál es la justificación de la justificación? ¿Y la justificación de la justificación de la justificación? Esta pregunta puede repetirse indefinidamente, dando lugar a un problema de cerrar esta jerarquía infinita de preguntas anidadas. Aquí encontramos un problema conocido como el problema de la regresión epistémica en la teoría de la justificación que conduce al trilema de Agrippa 9. Entre los cinco "modos de juicio de suspensión" formulados por Agrippa¹⁰, los tres primeros forman el siguiente trilemma :

La definición de platón es extensamente exacta. De hecho, es de la forma "A si hay solo si B", por lo tanto entiende dos afirmaciones

1. A si B: B es una condición adecuada de A
2. Sólo si B: B es una condición necesaria de A

Para mostrar que la proposición es falsa, basta con encontrar un caso donde uno tiene B sin tener A (violación de 1) o un caso donde uno tiene A sin B (violación de 2). El contraejemplo dado anteriormente violó la relación "condición suficiente". Esto demuestra que los definidores dados por Platón no son sus adecuados.

A partir de 1963, una gran cantidad de trabajo ha estado orientado a dar una definición "perfecta" de conocimiento que no es sufra de contra-ejemplo, y que respeta los criterios de adecuación dados anteriormente. Dos puntos para evitar su circularidad y llegar tiene una respuesta satisfactoria de justificación. ¿Cómo se producen muchos contraojos? Cada vez más sofisticados con. Se da más veces, se da lugar a lo que a veces se llama "gettierology" (con una connotación peyorativa). Una discusión en profundidad de estos ejemplos es más allá del alcance de este curso. El objetivo de la secularización es proporcional a una breve descripción de las diferentes respuestas al problema de la justificación.

1.4.4 Respuestas al problema de la justificación: internalismo, externalismo.

El problema de Gettier destaca un problema fundamental de la teoría platónica del conocimiento: la justificación. De hecho, según esta teoría, el sujeto en solitario puede saber si su creencia está justificada. ¿En qué casos es posible justificar la creencia? Aquí se distinguen dos familias de teorías filosóficas.

La primera familia es el internalismo, para la cual el sujeto tiene, al menos en teoría, acceso a justificaciones de sus creencias. Luego viene la pregunta de que justificó la justificación: ¿cuál es la justificación de la justificación? ¿Justificando la justificación de la justificación? Es una buena idea repetir indefinidamente, para resolver un problema de cerrar esta jerarquía infinita de preguntas anidadas. Aquí encontramos un problema conocido como el problema de la regresión epistémica en la teoría de la justificación que conduce al trilema de Agrippa 9. Entre los cinco "modos de juicio de suspensión" formulados por Agrippa¹⁰, los primeros forman el siguiente trilema:

Trilema de Agrippa 1. El juicio dogmático: decidimos detener la continuación en un nivel dado (por una razón que nos pertenece). 2. Regresión al infinito: continuamos la secuencia de proposiciones sin parar. 3. El círculo autorreferencial: una proposición usa otra ya dada. Aquí encontramos el problema de la circularidad.

Las otras dos soluciones propuestas por Agrippa son el desacuerdo (la opinión inversa es discutible) y la relatividad (algo puede parecer diferente a otra persona).

Hay dos tipos de opciones, que encontraron diferentes escuelas internalistas:

- La consistencia (basada en la tercera respuesta de Agrippa) es asumir que el conocimiento se fusiona mutuamente y que el cuerpo de conocimiento forma un bloque coherente y auto justificable. La definición coherente de conocimiento tiene, por lo tanto, un cierto grado de circularidad.
- Para los partidarios del fundacionalismo (basado en la primera respuesta de Agrippa), el conocimiento es un edificio cuya base se compone de conocimiento basado en principios o juicios que no se basan en otra cosa. El problema es, por supuesto, saber cuáles son estos conocimientos fundamentales que no necesitan ser justificados.

La segunda familia es la del externalismo. De acuerdo con esta teoría, no es necesario que el sujeto mismo tenga acceso a la justificación de su creencia para que la conozca: es suficiente para que un observador externo posea esta justificación. Las teorías externalistas a menudo se formulan como teorías causales del conocimiento que se expresan de la siguiente manera:

Definición causal externalista de conocimiento X sabe que P si X es relativa a P en una relación causal adecuada.

Sin entrar en detalles (esto se hará más en el contexto del análisis del conocimiento científico), digamos que una relación causal apropiada para un ser humano es, por ejemplo, una percepción sensorial directa (vista, oído, tacto, ...). El problema que surge entonces es el de la confiabilidad de esta relación causal.

1.4.5 Conocimiento según Nozick y Dretske

Aquí nos interesa la definición de conocimiento encontrada de manera independiente por F. Dretske en 1970 y por Robert Nozick¹² en 1981. Esta definición se basa nuevamente en la idea de que

Definición del conocimiento de Dretske y Nozick. Saber es seguir la verdad en la traza.

Que se traduce formalmente de la siguiente manera:

Definición del conocimiento de Dretske y Nozick.

X sabe que P si y solo si:

1. P es verdadero
2. X cree que P
3. si P era falso, X no creería que P
4. Si P era verdadero, X creería que P

Esta definición pertenece a la familia de los llamados análisis alternativos relevantes: contiene proposiciones de la forma "si ... entonces ..." (proposiciones contrafactuales) que hacen posible prever situaciones diferentes de la realidad (esto es traducido por el presencia de la palabra si). Según estas teorías, saber equivale a eliminar alternativas relevantes para la creencia de X. Un punto importante, que es la fortaleza pero también la debilidad de esta definición de conocimiento, es que no requiere eliminar todas las alternativas: es suficiente para retener todas las situaciones que son al menos tan similares a la situación presente "real" como la situación más similar en la que P es falsa. Por ejemplo, si X ve que se detiene un automóvil, sabrá que es un automóvil (incluso si no conoce el modelo, o incluso si es un modelo que tiene todas las apariencias externas). de un coche real). La debilidad de este enfoque reside en el hecho de que debemos poder distinguir las alternativas relevantes de las que no lo son.

1.4.6 El desafío del escepticismo.

¿Existe el conocimiento? Como acabamos de ver, ninguna teoría es totalmente satisfactoria y no implica una adhesión completa de los filósofos del conocimiento. Además, esta imposibilidad de llegar a una definición de conocimiento abre la puerta al escepticismo. Para el escéptico, es imposible llegar a una creencia verdadera y genuinamente justificada, porque nada probará nunca de manera irrefutable que nuestras percepciones son justas. Aquí encontramos los dos ejemplos.

El famoso "genio del mal" y el "cerebro en el tanque", ambos cuestionan la posibilidad de percibir la realidad. ¿Qué me demuestra que todas nuestras percepciones no son el resultado de las manipulaciones de un "genio malvado" que se complacería en ocultar la realidad? La variante del "cerebro en el tanque" es: ¿Qué me demuestra que mi cuerpo y el mundo existen y que en realidad no soy un cerebro que flota en un tanque soñando?

Las teorías basadas en la noción de creencia justificada no permiten contrarrestar la objeción escéptica, ya que prohíbe cualquier justificación (al menos cualquier justificación basada en una relación con la realidad). La forma lógica de la objeción escéptica es:

Forma lógica del argumento escéptico.

1. X no sabe que no -P
2. si X no sabe que no es P, entonces X no sabe que Q
3. entonces X no sabe que Q

Ilustrémoslo con el ejemplo de "cerebro en el tanque". La formulación escéptica es de la forma:

1. No sé que no soy un cerebro en un tanque
2. Si no sé que no soy un cerebro en un tanque, entonces no sé que tengo dos manos
3. Entonces, no lo sé. no se que tengo dos manos

En contraste, la redacción contraria al escepticismo es:

1. Sé que tengo dos manos
2. Si sé que tengo dos manos, entonces sé que no soy un cerebro en un tanque
3. Así que sé que no soy un cerebro en un tanque

1.4.7 Respuestas al escepticismo

Se han fomentado varios intentos de redefinir el conocimiento y contrarrestar el argumento de la ignorancia escéptica. Ahora veremos algunos de ellos.

En primer lugar, aquí aparece otro interés en la definición del conocimiento de Nozick. Las dos formas mencionadas anteriormente del problema del cerebro en la tina (el escéptico y su opuesto) se basan en el principio de cierre epistémico, que dice lo siguiente:

Principio del cierre epistémico

Si X sabe que P, y si X sabe que P implica Q, entonces X sabe que Q.

Según Nozick, este principio no es válido porque hay casos en los que se puede rastrear la verdad de P y la de "P implica Q" sin seguir la verdad de Q. En el ejemplo anterior, esto se traduce en el hecho de que si hubiera sido un cerebro en un tanque, siempre habría creído que tenía dos manos (por la construcción del ejemplo: el cerebro en el tanque está convencido de tener dos manos). Esto contradice el punto 3 de la definición de conocimiento de Nozick, que por lo tanto proporciona alguna forma de respuesta a la objeción escéptica.

Otra respuesta es la del externalismo de la mente. Según esta teoría, el conocimiento resulta de un estado mental y, como todos los estados mentales, resulta (en parte al menos) de nuestra interacción con el mundo que nos rodea. Esta acción necesaria del mundo exterior en la definición de conocimiento (que ya no se concibe como una creencia verdadera y justificada) prohíbe la existencia del "genio malo" o la experiencia del cerebro en la tina. En lugar de una definición, este enfoque conduce a un esquema de conocimiento que puede establecerse de la siguiente manera:

Esquema de conocimiento según el externalismo de la mente Si X sabe que P, entonces X no podría estar fácilmente equivocado acerca de P.

La última respuesta al desafío de escepticismo discutido aquí es la del contextualismo, defendida por ejemplo por Ludwig Wittgenstein (1889-1951). Para los contextualistas, es el intento de encontrar una definición universal de conocimiento que está condenada al fracaso. Pero es posible acordar definiciones "caso por caso" de lo que es el conocimiento en diferentes campos: matemáticas, física, historia, etc. Por lo tanto, el conocimiento se define en un contexto particular, y su definición puede variar con él.

2 ¿Qué es la ciencia?

2.1 ¿Cómo definir la ciencia?

2.1.1 Definición (s) de ciencia y criterios de cientificidad

Dos enfoques son posibles para definir lo que es una ciencia. El primero es un enfoque normativo, que consiste en prescribir, a priori, un estándar de cientificidad, es decir, dar los criterios que permiten decidir sobre la naturaleza científica de una disciplina. Este enfoque tiende a concebir las diferentes disciplinas científicas como casos particulares de una ciencia ideal, que nunca se materializa en su totalidad. El segundo enfoque es descriptivo: consiste en analizar las diferentes disciplinas reconocidas como científicas y en recuperar a posteriori los puntos comunes, que luego se tomarán como criterios de cientificidad.

La palabra ciencia aparece en 1080 en el primero de los chansons de chanson franceses, la canción de Roland. Se deriva de la clásica ciencia latina (conocimiento, y más particularmente conocimiento científico, racional), que toma muy pronto el mismo significado que el término griego episteme. Scientia proviene de los científicos, scientis que significa "quién sabe", "instruye", "inteligente". Cabe señalar que el uso del término "científico" para referirse a quienes practican la ciencia es mucho más reciente. El término "científico" fue introducido en el idioma inglés por William Whewell a mediados del siglo XIX. En francés, los "científicos" serán ampliamente utilizados solo a partir del siglo veinte, en reemplazo de los "eruditos". Como señaló Ken Adler¹⁵, fue el revolucionario Jean-Paul Marat quien, en 1792, fue el primero en aplicar la etiqueta "científicos" a los científicos de la época, cuando se burló del proyecto de la Academia de ciencia para medir la longitud del meridiano terrestre para definir un medidor estándar como parte de un programa de unificación universal de pesos y medidas (ver Capítulo 4.2.3).

Veamos las definiciones actuales de la palabra "ciencia" que se encuentran en algunos diccionarios de uso común:

- Definición 1 (Petit Robert): "Un conjunto de conocimientos, estudios de valor universal, caracterizados por un objeto y un método específicos, y basados en relaciones objetivas comprobables.
- Definición 2 (Larousse): "un conjunto coherente de conocimiento relacionado con una determinada categoría de hechos, objetos o fenómenos. "

a lo que podemos agregar otras definiciones, por ejemplo para las ciencias empíricas (o ciencias de la naturaleza)

- Definición 3: "La ciencia es un conocimiento objetivo que establece entre los fenómenos universales y las relaciones necesarias que autorizan el pronóstico de los resultados (efectos) de los cuales se puede controlar experimentalmente o liberar la causa por observación. "

Estas definiciones ilustran el contenido atribuido por el sentido común al término ciencia. En el término de la ciencia, generalmente la mayoría de las personas con caracteres positivos y gratificantes lo asocian, y el adjetivo "científico" se usa a menudo en el sentido de "verdadero", "riguroso", "seguro". Pero se necesita un análisis más profundo para identificar qué es la ciencia

(o una ciencia), para identificar los criterios de la cientificidad que permitirán dictaminar sobre la naturaleza científica de una teoría o conjunto de conocimientos.

Las definiciones presentadas anteriormente resaltan varios puntos clave.

Primero, el tema de una ciencia debe ser claramente identificado. Aquí surge el problema de definir los límites del campo cubierto por una disciplina científica, y de su posible superposición con otras disciplinas. Esto es cada vez más cierto, con la aparición de las llamadas ciencias multidisciplinares. Por ejemplo, la química en algunas de sus ramas, como la química cuántica, se ha superpuesto con la física. De la misma manera, la mecánica admite muchas recuperaciones con la química física, pero también con la psicología (psicoacústica, por ejemplo) y la biología (biomecánica). Finalmente, hay más ciencias "exóticas" como la bioinformática, que se encuentra en la frontera entre la biología y la informática y la computación cuántica, que combina la informática y la mecánica cuántica, y la econofísica, que se encuentra en el frontera de la física y la economía. Si el objeto principal de una ciencia suele ser relativamente simple de explicar, una definición exacta y exhaustiva a menudo está fuera de alcance y los límites de una disciplina siguen sin estar claros.

Entonces, una ciencia debe traer conocimiento sobre su objeto, es decir, tener un contenido. Para acceder al estado del conocimiento y no a la mera creencia, su contenido debe ser justificable, es decir, verificable o validable. Este paso de validación, fundamental para la definición de ciencia en la aceptación moderna del término, implica que la verificación debe realizarla cualquier persona que lo desee (si tiene los antecedentes teóricos y técnicos necesarios para llevar a cabo esta operación) . Es en esto que se dice que el conocimiento científico es objetivo: es (idealmente) independiente de la persona que realiza la operación de verificación. Por ejemplo, se supone que la masa de un objeto es independiente de la persona que lo coloca en una escala. Además, para que la auditoría sea aceptable, uno debe poder decir cómo el proceso de verificación implementado justifica la afirmación científica que se busca justificar.

Otro personaje central de la ciencia es el carácter universal de su contenido: se supone que la ley de la gravedad se aplica en todo el universo, así como ayer, hoy y mañana. El espacio y el tiempo científico son homogéneos e isótropo (esto se llama el principio cosmológico): todos los lugares del espacio y todos los tiempos son equivalentes desde el punto de vista de la aplicabilidad de las afirmaciones científicas. Esta es una ruptura profunda con las concepciones mágicas o místicas que confieren propiedades particulares en ciertos lugares o períodos.

Finalmente, y este no es el punto menos importante, una disciplina científica debe poder explicar sus medios de investigación y su método de construcción de conocimiento.

Como hemos visto anteriormente, un problema central de la epistemología es el de la definición de los criterios de cientificidad, que son los criterios que deben permitir separar la ciencia de la no ciencia. Estos criterios, e incluso su existencia, son objeto de debate entre varias escuelas de pensamiento. En lo que sigue de este curso, veremos cómo la ciencia se define por muchas de las principales corrientes de pensamiento en la epistemología.

2.1.2 El racionalismo de la oposición / relativismo.

¿Existen criterios científicos que sean universales y válidos en todos los tiempos del desarrollo de la ciencia? Este punto es objeto de un debate.

Para los partidarios de la escuela racionalista, la respuesta es positiva. Aquí encontramos un enfoque estrictamente normativo. Para un epistemólogo racionalista "radical", una definición de ciencia debe formularse en la forma de un criterio universal radical. Este criterio de científicidad es aplicable a todas las disciplinas en todas las etapas de su desarrollo histórico. La tesis racionalista fue defendida, por ejemplo, por Imre Lakatos, quien escribe que "el problema central en la filosofía de la ciencia es el de establecer condiciones universales que determinan que una teoría es científica. "

Por otro lado, los defensores del relativismo sostienen que no existe un criterio científico universal. Los criterios de definición varían de una disciplina a otra, y pueden cambiar con el tiempo y variar de una comunidad humana a otra. En esta perspectiva, los factores psicológicos, sociales, filosóficos o religiosos adquieren una gran importancia, que no tienen en la perspectiva racionalista. En su versión más radical, el relativismo no reconoce la existencia de un cuerpo global de conocimiento que puede llamarse "ciencia", sino la existencia de varios dominios separados que pueden caracterizarse individualmente como ciencia. . 2.2 Clasificación (es) de la ciencia

La multiplicidad y diversidad de disciplinas científicas hace que sea muy difícil presentar el campo del conocimiento y los métodos cubiertos por ellas de una manera holística. Además, para facilitar esta tarea, y para resaltar la Interconexiones, intercambios entre diferentes disciplinas, siempre se ha tratado de operar una clasificación de las ciencias.

Dicha clasificación es de naturaleza subjetiva, ya que se realiza sobre la base de criterios cuya elección no es obvia ni automática, como lo demuestra el hecho de que se han propuesto muchas clasificaciones para Durante los últimos veinticinco siglos. Por ejemplo, el filósofo francés Auguste Comte (1798-1857), fundador del positivismo y autor de una famosa clasificación presentada en la siguiente sección, indicó que había seleccionado su clasificación entre ... ¡720 otras opciones posibles! Los criterios clásicos son agrupaciones por tipo de problema estudiado o por tipo de métodos utilizados.

Otro punto que reduce el alcance de tales clasificaciones es la naturaleza "vaga" ya mencionada del perímetro de cada disciplina científica, lo que a veces hace que sea muy difícil clasificar una disciplina entre tal o cual categoría. Este problema también se ve reforzado por el hecho de que la ciencia evoluciona con el tiempo y que una clasificación propuesta en un momento dado puede volverse obsoleta en un futuro más o menos lejano.

Finalmente, debe notarse que ninguna de las clasificaciones principales propuestas es realmente satisfactoria, ya que encontramos casos especiales que no encajan (o muy difícilmente) en el marco de análisis propuesto.

2.2.1 Algunos elementos de clasificación

Aquí hay algunos criterios de clasificación comunes:

- Ciencias formales y ciencias empíricas. Esta distinción es central en este curso, ya que se dedica principalmente a la presentación de la epistemología de las ciencias empíricas. Las ciencias empíricas son las ciencias que apelan a la experiencia sensible (es decir, a las percepciones que tenemos del mundo a través de nuestros cinco sentidos) para construir sus teorías. Por lo tanto, se supone que el objeto de las ciencias empíricas no es una creación pura de la mente humana y, de un modo u otro, estar vinculado a una realidad externa. Las ciencias empíricas incluyen: mecánica, física, química, biología, sociología, economía ... Las ciencias formales se distinguen de las ciencias empíricas en que no se refieren a nuestra percepción del mundo exterior. Estas ciencias, por lo tanto, resumen contenido para enfocarse en la forma. Por ejemplo, cuando un matemático define la adición en el contexto de la aritmética, no especifica qué se agrega (coles, zanahorias, ...): define un marco formal para esta operación, que luego puede ser utilizado para cada caso particular. El principal ejemplo de la ciencia formal está dado por las matemáticas.

La primera diferencia entre estos dos tipos de ciencia es una diferencia en la naturaleza del objeto: un objeto material para las ciencias empíricas, un objeto conceptual para las ciencias formales. La segunda diferencia es una diferencia en el método de construcción del conocimiento: las ciencias formales se basan únicamente en el llamado método hipotético-deductivo, mientras que las ciencias empíricas también han recurrido al método experimental para verificar sus afirmaciones. Estos métodos se discuten en el capítulo 5.5.

- Ciencia de la Naturaleza y Humanidades y Ciencias Sociales. Estas ciencias son todas ciencias empíricas. Las ciencias naturales (mecánica, física, química, biología, etc.) se ocupan del funcionamiento interno de la naturaleza. Las ciencias humanas y sociales (economía, sociología, psicología, ...) estudian el comportamiento humano y las estructuras sociales, es decir, lo que es específicamente humano (aunque la noción de específicamente humano está cada vez más debilitada por Resultados recientes del estudio de ciertos animales como los grandes simios¹⁷).
- Ciencias duras y ciencias blandas. Este criterio, a menudo utilizado por el público en general, es un criterio muy vago asociado a menudo con un juicio de valor: las ciencias más difíciles serían las más "científicas", las más serias, las más rigurosas. Las así llamadas ciencias duras son las ciencias formales y las ciencias naturales, las ciencias blandas son las ciencias humanas y sociales.

2.2.2 Presentación histórica de clasificaciones.

La lista de clasificaciones presentada aquí no pretende, de ninguna manera, ser exhaustiva. Su propósito es solo dar ejemplos de tales clasificaciones y, a través de estas clasificaciones, mostrar la evolución a través de las edades de la forma en que se ha concebido la ciencia.

Una de las primeras clasificaciones conocidas es la propuesta por Aristóteles (384-322 aC), que distingue:

1. Las ciencias teóricas o del conocimiento puro: matemáticas, física, metafísica.

2. Las ciencias prácticas o la acción: la moral, la economía, la política.
3. Las ciencias poéticas o creativas: retórica, dialéctica, poética.

Como se puede ver, la concepción de las ciencias de Aristóteles va más allá de la definición aceptada hoy. Cubre todas las áreas de la actividad intelectual del mundo en su tiempo, y sería considerada hoy más cerca de una teoría general del conocimiento.

Dos mil años después, el filósofo inglés Francis Bacon (1561-1626) propuso la siguiente clasificación:

1. Las ciencias de la memoria: historia natural, historia civil.
2. Las ciencias de la imaginación: la poesía.
3. Las ciencias de la razón: la filosofía, concebida como el estudio de Dios, la naturaleza y el hombre.

Esta clasificación se basa en las "facultades del alma" (memoria, imaginación, razón) tal como las imaginó Bacon. Cabe señalar que, en este caso también, el campo de las disciplinas científicas es más amplio que el reconocido en la actualidad. Cabe señalar que la clasificación propuesta por el filósofo y matemático Jean Rond d'Alembert (1717-1783), en el discurso preliminar de la Enciclopedia (1751), está inspirada en la de Bacon.

Gustave Ampere (1775-1836) estableció una clasificación jerárquica basada en el principio de dicotomía: cada clase se divide en dos, cada una de las nuevas clases se divide en dos, y así sucesivamente. En total, la clasificación de Ampère tiene 128 ciencias. El primer nivel de división es

1. Las ciencias cosmológicas o la materia.
2. Las ciencias noológicas o la mente.

El deseo de simetría hace que esta clasificación sea obsoleta en la actualidad, porque conduce a la definición artificial de disciplinas científicas.

El filósofo y sociólogo inglés Herbert Spencer (1820-1903) desarrolló una clasificación más cercana a la concepción moderna de la ciencia:

1. Las ciencias abstractas, cuyo objeto son las formas generales de los fenómenos: la lógica, las matemáticas.
2. Las ciencias abstractas-concretas, que estudian los fenómenos en sus elementos fundamentales: mecánica, física, química.
3. Las ciencias concretas, que abordan los fenómenos en su conjunto: astronomía, geología, biología, psicología, sociología.

Como puede verse, todas las ciencias retenidas por Spencer verifican los criterios de cientificidad retenidos hoy.

La última clasificación evocada aquí es la propuesta (independientemente) por los filósofos y científicos franceses Auguste Comte (1798-1857) y Agustín Cournot (1801-1877).

Para establecer su clasificación, Comte hace una distinción entre las ciencias teóricas y las técnicas en que se basan (por ejemplo, la aerodinámica se basa en la mecánica), luego separa

las ciencias abstractas y las ciencias generales (aquellas cuyo objeto es el descubrimiento de Leyes generales: física, química, mecánica) de las ciencias concretas, particulares y descriptivas (aquellas que analizan cómo se cumplen las leyes generales en casos concretos: zoología, botánica, mineralogía). La primera clasificación propuesta por Auguste Comte para las ciencias teóricas / abstractas y generales es:

1. Matemáticas
2. Astronomía.
3. La física.
4. Química.
5. Biología.
6. Sociología.

Esta clasificación sigue un doble criterio lógico y cronológico.

El criterio lógico es un orden de generalidad decreciente (en la mente de Comte, cada ciencia es tributaria de lo precedente en la clasificación, pero no se deduce de ella) y de la complejidad creciente de los fenómenos estudiados. Aquí aparece el problema relacionado con la naturaleza evolutiva de las disciplinas científicas: la astronomía conocida de la época del Conde no tiene en cuenta la astrofísica moderna. De manera similar, la física de este período no incluye los grandes avances que fueron la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. Por lo tanto, el orden de complejidad creciente de los objetos estudiados se puede juzgar como en gran parte revisable hoy. Este es también el caso del criterio de la generalidad decreciente: la física moderna es sin duda alguna. No menos "general" que la astronomía o la astrofísica.

El criterio cronológico es el del nacimiento de cada disciplina científica. Este criterio es obviamente extremadamente difícil de manejar, porque uno debe ser capaz de identificar y fechar el nacimiento de una ciencia. Además del problema de la disponibilidad de los documentos históricos necesarios, existe el problema de establecer una fecha de nacimiento para una ciencia. Este último punto es particularmente complejo porque las ideas y los métodos maduran lentamente, a menudo se extienden a lo largo de varias generaciones, y la determinación de una fecha suele ser arbitraria. La "fecha de nacimiento" a menudo se determina al identificar, en la historia de las ideas, el momento en que aparecen los resultados fundamentales o los métodos de trabajo que se consideran fundamentales para futuros desarrollos. Dicho trabajo es obviamente eminentemente subjetivo, y el establecimiento de una fecha no significa que los objetos y problemas considerados por una ciencia no se estudiaron antes de esa fecha. Las referencias cronológicas que se dan a continuación son las que corresponden al establecimiento de la lista del Conde. Por lo tanto, se considera que las matemáticas con Euclides (~ 325- ~ 270 aC) y la mecánica con Arquímedes (~ 287- ~ 212 aC) se constituyeron como ciencias autónomas en Grecia en el siglo III a. El nacimiento de la astronomía en el siglo XVI está asociado con las obras de Nicolás Copérnico (1473-1543) y la de la física con las de Galileo (1564-1642) en el siglo XVII. La química "nace" en su forma moderna con Antoine Lavoisier (1743-1794) en el siglo XVIII. El siglo XIX ve nacer la biología con Claude Bernard (1813-1878), la sociología con Auguste Comte (1798-1857) y la psicología con Wundt y Ribot.

Se puede producir una lista rectificada insertando la psicología, conocida en el siglo XIX, y reemplazando la astronomía por la mecánica:

1. Matemáticas
2. Mecánica.
3. La física.
4. Química.
5. Biología.
6. Psicología.
7. Sociología.

Augustin Cournot (1801-1877) propuso una lista similar casi al mismo tiempo, pero emitiendo diferentes criterios, ya que dividió cada ciencia en teórica, práctica e histórica. Mientras que las ciencias teóricas tienen como objeto las leyes naturales y sus aplicaciones, las ciencias históricas tienen como objeto los datos de hechos irreductibles a las leyes y la teoría.

2.3 La ciencia como fenómeno social 2.3.1 La ciencia y el lenguaje

La ciencia es un hecho humano colectivo que requiere comunicación y, por lo tanto, la traducción de estos objetos (conceptos, leyes, declaraciones) por medio de un lenguaje. Es el uso de un lenguaje que permite a la ciencia cortar objetos, identificado. En este sentido, podemos decir que sin lenguaje no habría ciencia, si nos referimos al significado comúnmente aceptado de esta palabra. Esta configuración de las teorías científicas nos alienta a analizar las diferencias que se pueden hacer entre los diferentes tipos de afirmaciones que las expresan.

Primero distinguimos enunciados de observación y enunciados teóricos. Las declaraciones de observación describen directamente objetos y hechos observables (ejemplo: hay un objeto en la tabla). Las declaraciones teóricas se refieren a cosas que no se perciben directamente (ejemplo: este objeto es radioactivo). Pero una declaración teórica puede estar conectada indirectamente a las percepciones, en el sentido de que a veces se puede deducir de ellas declaraciones de observación (ejemplo: un contador Geiger, puesto en presencia de este objeto, indica la presencia de una fuente radiactiva) . El conjunto de declaraciones de observación que se pueden adjuntar a una declaración teórica forma su contenido empírico, también llamado su contenido fáctico. Finalmente, llamamos a la expresión metafísica cualquier declaración teórica sin contenido fáctico. Entre las declaraciones de observación, se hace la diferencia entre las declaraciones singulares que se refieren a un solo hecho observable en un lugar y momento dado (ejemplo: hay una manzana en esta tabla) y las declaraciones universales, que se relacionan con la totalidad de los eventos de un tipo particular (ejemplo: los objetos pesados tienden a caer hacia el suelo).

Una segunda distinción se refiere a las afirmaciones analíticas y sintéticas. Las expresiones sintéticas son verdaderas o falsas en virtud de su relación con la experiencia (ejemplo: un objeto se coloca en la tabla). Las declaraciones analíticas son verdaderas o falsas debido a su coherencia interna (ejemplo de declaración falsa: hay y no hay ningún objeto en la tabla).

2.3.2 ¿Ciencia más allá de los individuos? Objetivismo e individualismo.

¿Existe una teoría científica independientemente de las creencias individuales de los científicos que la desarrollan? ¿Supera el conocimiento inmediato de los científicos, adquiriendo por una cierta "autonomía", fuera de los campos individuales y sociales? Esta cuestión se debate y, como se analizará en el Capítulo 9, tiene cierta importancia en el análisis del progreso científico.

Para los defensores del individualismo, una teoría científica no es más que la suma del conocimiento (en el sentido que se analiza en el capítulo anterior: creencias verdaderas y justificadas) de los científicos que lo desarrollan. La cuestión del conocimiento científico está entonces subordinada a la del conocimiento por un individuo, como se menciona en el Capítulo 1.

Para los defensores del objetivismo (Popper, Lakatos, Chalmers, ...), una teoría científica no se limita a la suma de las creencias individuales. Para citar a Popper, la ciencia es un conocimiento objetivo y, como tal, es "independiente de la creencia de cualquier persona, o de su voluntad de admitir, de afirmar o de actuar. El conocimiento en el sentido objetivo es conocimiento sin concedor; Ella es conocimiento sin un sujeto que conoce. Los argumentos a favor de esta posición son múltiples. En primer lugar, cabe señalar que la campo cubierto por una disciplina científica moderna, ya que la física es tan vasta que ningún individuo puede dominarla por completo. Los investigadores hoy están agrupados en comunidades especializadas, y ninguno de ellos es capaz de identificar todos los vínculos o contradicciones contenidas en la física. Este es el argumento de la ramificación: ya que es tan complejo, existe más allá del conocimiento individual. Luego, una teoría científica con consecuencias, llamada oportunidades objetivas, que no son explícitamente conocidas y formuladas por los investigadores que la desarrollan. Por ejemplo, James Clerk Maxwell nunca imaginó la existencia de ondas de radio, descubiertas después de su muerte, aunque su existencia estaba contenida en su teoría del electromagnetismo. Este es el argumento de la existencia de oportunidades objetivas.

3 Elementos de una ciencia empírica.

3.1 Hechos, leyes, principios, modelos y teorías.

Ahora nos enfocaremos en definir, en orden creciente de generalidad y profundidad representativa y explicativa, los diferentes niveles de abstracción encontrados en las ciencias empíricas.

3.1.1 Hechos, fenómenos y acontecimientos.

Los hechos son los datos inmediatamente accesibles por observación. A veces hay dos tipos de hechos: el hecho en bruto y el hecho científico. El hecho bruto es la observación no analizada: la caída de una manzana, el movimiento de la luna son hechos crudos. El hecho científico es que todos los cuerpos caen bajo el efecto de la atracción terrenal (esto se demuestra por todos los hechos crudos relacionados con este tema). Luego identificamos, entre los hechos, fenómenos y sucesos. Un fenómeno es un hecho asociado con un cambio, y eso es repetible: la caída de la manzana es un fenómeno. Cualquier hecho no es un fenómeno, ya sea porque no implica un cambio (ejemplo: la (casi) redondez de la tierra es un hecho, que no está asociado con un cambio o una evolución), tampoco porque sea repetible (estamos hablando de un evento). Un ejemplo de un evento es la desintegración de un núcleo atómico, que ocurre solo una vez. 3.1.2 ¿Qué es una ley científica? ¿Y un principio?

El término ley debe tomarse con diferentes significados en su uso común y uso científico.

En el sentido común, tiene una connotación legal y designa una regla vigente en un grupo humano, cuya violación será sancionada. Es una convención social arbitraria, válida por un cierto tiempo en un área definida del espacio. La ley, en esta aceptación, es vinculante: tiende a gobernar o gobernar el comportamiento de las personas que están sujetas a ella. El respeto o la violación de la ley es por parte de estos un acto intencional. El punto importante a recordar aquí es que el respeto a la ley no es necesario ni obligatorio.

El significado del término ley, tal como se usa en el contexto de las ciencias empíricas, es muy diferente; El término ley natural o ley de la naturaleza se usa a veces. Una ley científica es la expresión matemática de una correlación repetible, un comportamiento constante o una frecuencia estadística observada entre un conjunto de hechos. Se deduce de un cierto número de observaciones y las generaliza, manteniendo el carácter estable. Por lo tanto, es incorrecto decir que los hechos se rigen por las leyes: debe decirse que los hechos incluyen leyes. A diferencia del significado legal habitual, la ley científica es constativa y no normativa.

Todas las leyes científicas comparten la misma estructura lógica, y se pueden establecer en la forma:

Forma general de una ley Cualquiera que sea x , si x es A , entonces x es B

Las leyes cualitativas se pueden distinguir de las leyes cuantitativas. Los primeros tratan con variables cualitativas (todavía denominadas variables ordinales) que pueden ordenarse por orden de intensidad, pero no se prestan a operaciones aritméticas. Un ejemplo de una ley cualitativa es

Ley cualitativa: el cobre es eléctricamente conductor.

Esta ley puede ser reescrita en la forma lógica general dada anteriormente:

Ley cualitativa (forma lógica general): lo que sea un material, si este es cobre, entonces conduce la electricidad.

Por otro lado, las leyes cuantitativas se basan en variables cuantitativas (también llamadas variables cardinales) sujetas a operaciones aritméticas y que pueden medirse en experimentos. Algunas leyes muestran constantes, que mantienen valores fijos. Dado que la ley indica que existe una relación constante entre dos o más variables, en un sentido, permite la predicción del valor de una de estas variables si se dan todas las demás. La estructura de tal predicción se expresa en la forma de lo que se llama un contra-factual o irreal condicional: si ... entonces ... La naturaleza condicional se realiza por la palabra si e irreal es que la de evento no se realiza cuando se emite la predicción.

Ilustremos ahora las leyes cuantitativas por medio de la ley de los gases perfectos (ley de Mariotte o Boyle-Mariotte). La expresión más simple, en el caso de transformaciones de temperatura constante (caso isotérmico) es:

Ley cuantitativa de Mariotte: $P \cdot V = \text{constante}$

donde P y V denotan respectivamente la presión y el volumen. Esta ley puede ser reescrita en la forma general:

Ley cuantitativa (forma general) de Mariotte: Cualquiera que sea x, si x es un gas perfecto, entonces el producto de su presión por el volumen ocupado es constante durante una transformación isotérmica.

El valor predictivo es inmediato. Conocer el valor del producto. para un gas perfecto x para una presión P_0 y un volumen V_0 , el valor de la presión P_1 se predice usando la ley si el volumen se cambia a V_1 (la temperatura se mantiene constante):

Volvamos a lo que se ha dicho anteriormente con respecto a la validez de las leyes, que está condicionada a las observaciones. La ley de Mariotte, como se expresó anteriormente, se basa en la suposición de que la temperatura es constante, y se puede proponer a partir de una serie de observaciones que verifican esta hipótesis. ¿Qué pasa ahora si la temperatura no se puede mantener constante? La ley ya no permite que los hechos sean representados. Debe hacerse más general para tener en cuenta las relaciones que pueden existir entre la temperatura, la presión y el volumen:

donde T es la temperatura, n es el número de moléculas y R es la constante de gas perfecta (1,985 calorías / grado Celsius). Esta nueva ley, que muestra una R constante válida para todos los gases perfectos, contiene la anterior y extiende el dominio de validez. Esta ley puede generalizarse aún más teniendo en cuenta interacciones físicas más complejas. Por ejemplo, la ley de Van der Waals¹⁸ explica la atracción mutua de las moléculas y su tamaño:

donde a y b son constantes que dependen del gas.

Ahora veremos que la noción de ley es más complicada de lo que parece y plantea problemas que permanecen abiertos.

¿Es una ley universal y definitiva? No, porque, deducido del experimento, está condicionado por las hipótesis implícitas que guiaron la recopilación y el análisis de los hechos: la precisión de las mediciones, la elección de objetos (masa, velocidad, energía, ...) para preservar para para expresar la ley, ... Una ley es, por lo tanto, una suposición considerada muy probable porque está corroborada por muchas observaciones. Pero puede mejorarse, generalizarse si las nuevas observaciones indican que no se observa la correlación esperada. En este sentido, no podemos decir que una ley científica sea violada por los hechos (los hechos son lo que son y no tienen intención), sino que la ley está obsoleta en tal o cual situación. Pero tiene un carácter universal, ya que se supone que es válido para todos los casos que satisfacen sus hipótesis de derivación.

Un segundo problema es distinguir entre leyes y generalizaciones accidentales. Las generalizaciones accidentales son expresiones que tienen la misma forma lógica universal que las leyes (cualquiera sea x , ...) pero que, obviamente, no se pueden retener como leyes científicas. El siguiente ejemplo famoso fue propuesto por Nelson Goodman en 1955: "Todas las monedas que tengo en mi bolsillo en este momento están en plata. Como puede verse, la estructura lógica de esta proposición corresponde a la de una ley, ya que verifica los criterios de verdad y universalidad. ¿Cómo hacer una diferencia? No podemos para utilizar el hecho de que la generalización accidental se refiere a entidades individuales específicas (momento particular, bolsillo determinado, ...) porque es posible reformular las afirmaciones de generalizaciones accidentales sin referirse a tales entidades, y algunas leyes recurren a tales entités¹⁹. Otra objeción podría ser que las generalizaciones accidentales no son realmente universales, y se relacionan con un número finito de casos singulares. Este criterio funciona bien en el caso del ejemplo de Goodman, pero no es completamente satisfactorio. La razón es que todas las leyes se construyen a partir de un número finito de declaraciones de observación, y por lo tanto, nada permite distinguirlas a priori de generalizaciones accidentales con este criterio. Esto se ilustra con un ejemplo sugerido por Reichenbach en 1954:

1. Todos los cuerpos de uranio enriquecido puro tienen un volumen inferior a 1 km^3 .

2. Todos los cuerpos de oro puro tienen un volumen inferior a 1 km^3 .

Ninguna de estas dos proposiciones hace referencia explícita a entidades individuales específicas, pero sí se relacionan con un número finito de objetos reales (el número de átomos de uranio y oro presentes en el universo es finito). Pero tienen un estatus diferente: el primero es una ley, porque un cuerpo con un volumen de 1 km^3 de uranio enriquecido tendría una masa mucho mayor que la masa crítica a partir de la cual se desencadena espontáneamente una reacción nuclear²⁰ (aproximadamente 50 kg para una esfera desnuda de uranio enriquecido); El segundo es una generalización accidental, tal cuerpo de oro puro que puede existir.

Esta dificultad para definir lo que una ley ha llevado al desarrollo de varias escuelas de pensamiento. Para los filósofos empiristas, no existe un criterio perfectamente objetivo, y considerar una declaración como una ley es el resultado de un consenso entre una comunidad científica. Por lo tanto, es un juicio, arrastrado por la convicción de los científicos, y como tal, reconocer que una declaración es una ley es un hecho subjetivo. Un criterio considerado psicológicamente importante es el de la optimalidad (el más simple, el más efectivo, ...) del sistema de leyes retenidas, diferenciándose el problema en la definición de estos criterios y la posibilidad de medirlos en la práctica. Para los filósofos de tendencia realista (es decir, aquellos que consideran que las declaraciones científicas se relacionan con entidades que realmente existen en el mundo, independientemente de la actividad científica y humana), la distinción entre leyes y generalizaciones accidentales se produce. que los primeros se relacionan con propiedades objetivas, consideradas como universales, mientras que los últimos solo se refieren a realizaciones contingentes particulares. El problema de los enfoques realistas (hay muchas variantes de ellos) radica en la definición de la naturaleza de estos universales (por ejemplo, algunos filósofos admiten que pueden existir universales sin fundamento, es decir, sin no hay concretización en el universo, mientras que otros no lo hacen) y las relaciones que pueden existir entre ellos (una pregunta importante es si las relaciones que existen entre universales y que están descritas por las leyes son necesarias o no).

Las leyes discutidas en lo que antecede son las llamadas leyes deterministas, ya que para un sistema definido y bien conocido, sin duda asocian un estado o una propiedad. Desde el advenimiento de la física estadística en el siglo XIX con el nacimiento de la teoría cinética de los gases y la termodinámica estadística, existe otro tipo de ley, las leyes estadísticas. Se pueden enunciar de la siguiente manera:

Forma general de una ley estadística Cualquiera que sea x , si x es A , entonces x es B con probabilidad $P(B | A)$

donde la probabilidad $P(B | A)$ se conoce en otra parte. Estas leyes se utilizan para describir la evolución de grandes conjuntos de entidades individuales, cuyo seguimiento individual es imposible o no interesante. Un ejemplo común es el de la descripción de la radiactividad, que proviene de la desintegración espontánea del núcleo atómico. No estamos interesados en el comportamiento de cada átomo, sino en el número promedio de átomos que se desintegran por unidad de tiempo. Entonces, no sabemos en qué se convierte cada átomo, pero podemos deducir, en cada momento, cuál es la probabilidad de que se haya desintegrado. Tal descripción

probabilística de la naturaleza es la base de la física cuántica, como se analiza en el Capítulo 11. Tenga en cuenta que el problema de la generalización accidental también existe para las leyes estadísticas: fenómenos que a priori no están relacionados entre sí. Pueden comportarse de manera similar, sugiriendo que están correlacionados. Esto se ilustra en la siguiente figura, que, estadísticamente, sugiere que existe una fuerte correlación entre la cantidad de tareas solares y la cantidad de republicanos electos en el Senado de los Estados Unidos.

Figura 9 Ejemplo de correlación accidental. Arriba: el número de senadores republicanos en los Estados Unidos; Abajo: el número de manchas solares observadas.

Los textos científicos a veces también mencionan principios. En las ciencias experimentales, los principios son tipos de leyes de un alto grado de generalidad, que van mucho más allá de los hechos que las han sugerido. En algunos autores, los principios adquieren un estado similar al de los postulados matemáticos, ya que su nivel de generalidad no permite una validación directa y completo. Por lo tanto, la segunda ley de Newton a veces se llama el principio fundamental de la dinámica, y la hipótesis de igualdad entre la masa inercial y la masa gravitatoria se conoce como el principio de equivalencia. Otro principio importante es el principio copernicano, que establece que el espacio y el tiempo son homogéneos en el sentido de que las leyes de la física son las mismas en todo momento y en todos los puntos del universo.

3.1.3 ¿Qué es un modelo?

Los hechos hacen posible la liberación de leyes. Para obtener un marco de reflexión que permita sintetizar estas leyes, reagruparlas y encontrar una cierta unidad entre ellas, se utilizan modelos. Un modelo puede definirse²¹ como "un marco representativo, idealizado y abierto, reconocido como aproximado y esquemático, pero considerado como fértil en relación con un objetivo dado: planificar, actuar sobre la naturaleza, conocerlo mejor, etc." "

Ejemplo 1: El sólido rígido. En la discusión de la definición de movimiento (ver Sección 3.3.4), introducimos la noción de sólido rígido, es decir, la de un cuerpo sólido ideal que no sufre deformación durante su movimiento. Considere un cuerpo real, por ejemplo una bola de billar, que se sigue mientras se mueve y golpea con las otras bolas o bandas de la mesa de billar. La pelota es "dura" (según el sentido común), y durante el juego, parece a simple vista mantener su esfericidad. Además, su movimiento en la mesa puede representarse fácilmente, para un espectador, por una composición de traslaciones y rotaciones. Para las necesidades de los jugadores y espectadores, la asimilación de bolas a sólidos rígidos es, por lo tanto, un buen modelo, ya que, junto con las tres leyes de Newton, permite describir y predecir el movimiento de las bolas. Es efectivo y útil en esto, y permite, por ejemplo, a los jugadores predecir sus disparos. ¿Significa esto que las bolas no sufren deformación alguna? No, en la escala microscópica, un observador con medios de observación adecuados vería deformaciones de la superficie de la bola durante los impactos y la creación de ondas dentro del sólido, que se describen en un marco teórico más complejo: el de la mecánica de medios continuos. El modelo de sólido rígido es, por lo tanto, una idealización, una visión de la mente que, conservando

ciertas propiedades de los objetos, hace posible, gracias a las leyes adecuadas, obtener un cierto control de los hechos.

Ejemplo 2: El medio continuo. En el ejemplo anterior (el sólido rígido), consideramos la materia como continua, ya que la definición del sólido rígido se basa en la invariancia de la distancia entre los puntos situados en el sólido. Ahora, como sabemos, la materia no es continua, sino que está hecha de átomos separados por vacío. Para caracterizar los materiales en una escala macroscópica y para estudiar objetos cuyo tamaño es "grande" en comparación con los átomos o las moléculas que lo componen, no parece útil usar una descripción a escala atómica. e introducimos un modelo muy potente en mecánica: el modelo del medio continuo. Las propiedades macroscópicas de este medio (la rigidez de un sólido, la viscosidad de un fluido, ...)

Representa el efecto a gran escala de las interacciones entre átomos o moléculas.

Ejemplo 3: modelo de cinética de gases de Maxwell.

Examinemos ahora un modelo famoso: el que introdujo en 1866 el físico inglés James Clerk Maxwell (1831-1879) para describir los gases. El trabajo sobre el mismo tema también fue realizado de forma independiente por el físico alemán Ludwig Boltzmann (1844-1906).

Fue en 1730 cuando Daniel Bernoulli (1700-1782) informó sobre un "recorrido aleatorio" de moléculas de un gas con descargas entre las moléculas y las paredes del contenedor que las contiene. Esta idea será seguida, entre otros, por James Prescott Joule (1818-1889) y Rudolf Clausius (1822-1888). En 1827, la prueba experimental de esta agitación es presentada por el botánico escocés Robert Brown (1773-1858), no sobre gases sino sobre líquidos; observa en este momento bajo el microscopio que las partículas de polen se mueven de forma desordenada en el agua (¡pero lo atribuye a una actividad vital de los granos de polen, y uno tiene la acción de las moléculas de agua!). Se destaca el movimiento browniano de las moléculas. Es un desplazamiento desordenado de las moléculas, que depende de la temperatura, llamado movimiento de agitación térmica. En cuanto a los gases, la agitación térmica solo se demostró experimentalmente en 1908 por Maurice de Broglie (1875-1960), y fue confirmada por Louis Dunoyer (1880-1963) en 1911.

La idea de Maxwell que se encuentra en la base del modelo teórico que lleva su nombre consiste en asimilar los átomos o moléculas que forman el gas en pequeñas esferas rígidas, que actúan como bolas de billar: chocan, chocan rebotar en las paredes (sólidas) del contenedor que contiene el gas, y su movimiento se puede describir por medio de las leyes de Newton. Esto es, por supuesto, un modelo: las moléculas no son esféricas y no son rígidas. Pero la aproximación de Maxwell, su modelo, hace posible dar cuenta de ciertas propiedades esenciales de su evolución, y en particular hace posible, al promediar un gran número de moléculas, recuperar las características macroscópicas de un gas. También permite vincular las cantidades asociadas con el gas con las características de las moléculas idealizadas.

Por lo tanto, la presión ejercida por un gas en la pared de un recipiente está asociada con la energía cinética transmitida a la pared por las moléculas cuando estas llegan a rebotar en ella. La temperatura del gas está relacionada con la energía cinética de las moléculas: cuanto más rápido van, más alta es la temperatura. Además de vincular las magnitudes macroscópicas con los fenómenos microscópicos, el modelo de Maxwell también tiene virtudes explicativas:

permite, por ejemplo, vincular la ley de Mariotte con el comportamiento a escala microscópica. Consideremos la forma más simple de la ley de Mariotte: $PV = \text{constante}$, para una transformación a temperatura constante, y veamos qué sucede cuando se comprime un gas en un recipiente cerrado al reducir su volumen (con un pistón, por ejemplo). La constancia de la temperatura indica que la velocidad de las moléculas permanece constante (en la norma, no en la dirección). Si reducimos el volumen del contenedor, acercamos las paredes. El tiempo promedio que tarda una molécula en rebotar de una pared a otra es, por lo tanto, más corto y, por unidad de tiempo y por unidad de área, hay más moléculas que golpean la pared, lo que se corresponde bien. A un aumento de la presión.

Cabe señalar que existe una jerarquía de modelos en la teoría del gas cinético, que da acceso a descripciones físicas cada vez más ricas:

- En su versión inicial (más simple), se descuida el tamaño de las moléculas y sus interacciones. A escala macroscópica, encontramos la ley de los gases perfectos.
- Si tenemos en cuenta el tamaño de las moléculas y sus colisiones, podemos describir los fenómenos del transporte macroscópico: difusión, conductividad térmica. Estas propiedades están asociadas, a escala macroscópica, con nuevas propiedades de los fluidos, como la viscosidad y la difusividad (que se agregan a la presión y la temperatura).
- Teniendo en cuenta las interacciones entre las moléculas (esto se debe a Para el físico Van der Waals (1837-1923, Premio Nobel de física en 1910), en 1873, también se puede tener en cuenta la transición líquido-gas (fenómenos de evaporación, condensación y ebullición).

Estos ejemplos revelan las características generales de los modelos construidos por científicos:

- Los modelos se basan en simplificaciones de los hechos. Este paso de simplificación requiere identificar los aspectos que son importantes para el propósito en cuestión (que representan una u otra característica observada). Es el punto clave del modelado. Por ejemplo, el modelo de Maxwell considera solo interacciones mecánicas simples (colisiones) y descuida las posibles interacciones químicas o electromagnéticas. Esta simplificación implica que el modelo tiene un dominio de validez doblemente limitada: solo está diseñado para dar cuenta de ciertos fenómenos (ejemplo: el modelo de Maxwell no sirve para estudiar la química de los gases) y es válido solo para un determinado campo de estudio (ejemplo: el modelo de Maxwell ya no es efectivo a temperaturas muy altas, donde la ionización de las moléculas se vuelve importante).
- Un punto importante es que no hay necesariamente una coincidencia exacta entre los elementos constitutivos del modelo y los hechos observados: las moléculas ideales de Maxwell son muy diferentes de las moléculas reales de un gas.

Un modelo, cuando se analiza a través de las matemáticas y la lógica, puede predecir hechos virtuales (lo que Popper llama falsificadores virtuales). El uso de las matemáticas permite realizar predicciones cuantitativas, que pueden compararse con los resultados de las observaciones disponibles. Por ejemplo, el modelo de Maxwell se puede usar para predecir la evolución de la presión y la temperatura de un gas cuando se comprime. Estas predicciones pueden compararse con datos experimentales.

3.1.4 ¿Qué es una teoría científica?

El último nivel, el más general, es el de las teorías científicas. Una teoría es un sistema coherente que coordina, conecta y unifica leyes, suposiciones, principios y modelos, algunos de los cuales parecen complementarios entre sí. Ella es más general que los modelos que usa. Una teoría puede usar uno o más modelos y colocarlos en un contexto conceptual más general. Cabe señalar que un modelo puede ser utilizado por diferentes teorías.

Más precisamente, se distinguen cuatro funciones de una teoría científica:

4 funciones de la teoría

- La función explicativa-predictiva: al usar la teoría, el cálculo y las hipótesis, se pueden deducir leyes y hechos (que, por supuesto, deben confrontarse con el experimento), mientras que estos No se han observado todavía.
- La función unificadora: la teoría permite reunir, unificar una gran cantidad de hechos dentro del mismo marco conceptual, e incluirlos en un número reducido de modelos y leyes.
- La función heurística: las teorías guían la investigación al sugerir nuevas formas o, por el contrario, al abandono de ciertos desarrollos que se consideran menos fructíferos.
- La función de representación: los modelos y el marco proporcionado por una teoría ofrecen una representación del universo sensible, que permite a todos ordenar su visión del mundo.

Ejemplo 1: La teoría cinética de los gases La teoría cinética de los gases se basa en el modelo de Maxwell, que se ocupa de la dinámica de los gases. Mediante el análisis matemático, permite deducir, entre otras cosas, la ley del gas ideal y la ley de difusión de Graham.

Ejemplo 2: La onda y las teorías corpusculares de la luz Otros dos ejemplos son la onda y las teorías corpusculares de la luz. Como parte de la teoría corpuscular de Newton, la luz está compuesta de partículas (fotones) cuya masa varía con los colores del espectro. De acuerdo con la teoría de la onda derivada del electromagnetismo de Maxwell, la luz se propaga.

En forma de onda transversal. Estas dos teorías explican diferentes fenómenos: difracción, refracción, reflexión. Cabe señalar que el efecto fotoeléctrico no se tiene en cuenta en la teoría de la onda. Estas dos teorías no son ni más verdaderas ni más equivocadas que las otras: son más o menos efectivas para tratar este o aquel problema.

3.2 Enfoques globales de la ciencia y las teorías

3.2.1 Paradigma y Matriz Disciplinaria: Kuhn

Ahora veremos el concepto de paradigma (también llamado matriz disciplinaria) introducido por el epistemólogo Thomas Kuhn (1922-1996).

Para Kuhn, un paradigma es el tema de un consenso dentro de una comunidad científica (la mecánica de Newton, la teoría corpuscular de la luz, etc.). El paradigma es un conjunto de varias cosas diferentes:

Contenido del paradigma de Kuhn • Contenido teórico, que nadie piensa cuestionar • Estándares de investigación científica, que representan un conjunto de valores de la comunidad científica y se derivan de sus criterios de científicidad. • Un saber hacer teórico y práctico.

Esta estructura múltiple hace posible que las ciencias empíricas duras identifiquen en un paradigma generalizaciones simbólicas (ecuaciones que traducen ideas, como las leyes de Newton o la ley de los gases perfectos) y un contenido metafísico asociado con modelos y procesos. Imágenes utilizadas por científicos (ejemplo: las moléculas esféricas y elásticas de Maxwell en su modelo de teoría cinética de los gases). Este contenido metafísico es ontológico, si se defiende la idea de la teoría-reflexión, o heurístico dentro del marco de la teoría-herramienta²². Finalmente, según Kuhn, también debemos incluir los ejemplos comunes utilizados por la comunidad para capacitar a sus miembros y hacer que las leyes se entiendan. Además de su función pedagógica, estos ejemplos también tienen un papel en la investigación, ya que permiten razonar por analogía.

Así, el paradigma de la mecánica newtoniana está compuesto por los siguientes elementos: las tres leyes de la dinámica y la ley de la gravitación de Newton, métodos para aplicar las leyes de Newton a varios problemas (movimiento de los cuerpos celestes, choques elásticos de los cuerpos rígidos, movimiento de péndulo). El paradigma contiene también los instrumentos de medición y las técnicas experimentales adecuadas, como el uso del telescopio para la observación del movimiento de los planetas, en el marco de la aplicación de la mecánica newtoniana a la astronomía.

Los paradigmas de Kuhn no se limitan a leyes formuladas explícitamente y prescripciones metodológicas: la mayoría del conocimiento asociado con un paradigma es tácito, es decir, nunca se formula explícitamente. Este conocimiento tácito es muy amplio, y se adquiere durante la formación científica. Otro punto importante es que un paradigma nunca es perfecto, en el sentido de que cada paradigma tiene problemas no resueltos (o enigmas) llamados anomalías. Un ejemplo de una anomalía en el paradigma de la mecánica newtoniana es la trayectoria de Mercurio (que es explicable por medio de la teoría de la relatividad de Einstein).

Estas características hacen que los paradigmas de Kuhn sean estructuras bastante difusas que no se pueden definir con precisión. Para explicar esto, Kuhn hace una analogía con el problema de definir un "juego" estudiado por Ludwig Wittgenstein (1889-1951). En su teoría del juego, Wittgenstein ha demostrado que es imposible definir qué es un juego, en el sentido de que tan pronto como se da una definición exacta, conduce a la definición de cosas que no son juegos. Si bien ella no reconoce como tales las cosas que son. Pero para Kuhn y sus seguidores, esto no significa que no podamos usar el concepto de paradigma.

¿Cuándo puede un paradigma ser calificado como un científico? O, para reformular la pregunta, ¿cuáles son los criterios científicos asociados con la teoría de Kuhn? Para Kuhn, el criterio de la científica de Kuhn, un paradigma es científico si conduce al desarrollo de una tradición de la ciencia normal.

El concepto de ciencia normal se desarrollará en el Capítulo 9. Por el momento, recordemos que una ciencia normal es una ciencia madura guiada por un paradigma único. En la ciencia normal, la cantidad y la gravedad de las anomalías son tan pequeñas que los científicos pueden trabajar de manera fructífera y serena sin desafiar los fundamentos del paradigma. Vemos que el criterio de Kuhn se basa en un análisis histórico del desarrollo de una ciencia. Es por tanto un análisis a posteriori. Como resultado, Kuhn y sus seguidores hacen un gran uso del método diacrónico. ¿Es la posición de Kuhn sobre la universalidad de su criterio de científicidad racionalista o relativista? Kuhn se consideraba un racionalista muy apegado al progreso científico. Defendió la tesis de que las teorías recientes son mejores que las que reemplazaron, pero negó que este progreso esté asociado con el progreso hacia la verdad. Su teoría también es analizada como teoría relativista por algunos comentaristas, debido a la gran importancia que otorga a los factores sociales y psicológicos en el proceso de evolución de las teorías científicas y su teoría de la inconmensurabilidad de los paradigmas²³. Tenga en cuenta que la definición de ciencia de Kuhn ha sido criticada por otros pensadores contemporáneos, como Popper y Lakatos.

3.2.2 Programas de investigación: Lakatos.

La reflexión del epistemólogo Imre Lakatos se basa en el concepto de programa de investigación. Al igual que la teoría de Kuhn de que representa una evolución, la de Lakatos está construida de tal manera que explica el carácter evolutivo de las teorías científicas en función del tiempo. Un programa de investigación lakatosiano es una estructura que permite (al menos según Lakatos) dar cuenta del desarrollo de las teorías científicas y explicar su evolución. Un programa de investigación se compone de cuatro elementos:

Estructura de un programa de investigación según Lakatos

- Un núcleo duro, que consiste en hipótesis teóricas muy generales. Es este núcleo el que mejor caracteriza la agenda de investigación. El núcleo duro se considera arbitrariamente como infalsificable (en el sentido de Popper) por la "decisión metodológica de sus protagonistas" ²⁴, es decir, que no se puede cuestionar.
- Un cinturón protector, que se compone de supuestos auxiliares explícitos que completan el núcleo duro, otros supuestos subyacentes a la descripción de las condiciones iniciales y declaraciones de observación.
- Una heurística negativa, que es que el núcleo duro se considera a prueba de manipulaciones.
- Una heurística positiva, que según Lakatos²⁵ "consiste en una serie de proposiciones o indicaciones parcialmente formuladas sobre cómo efectuar transformaciones, para desarrollar la correa protectora refutable".

Un punto importante aquí es la naturaleza irrefutable del núcleo duro del programa. Cualquier discrepancia entre una declaración de observación y la teoría debe, por lo tanto, conducir a una modificación del cinturón de protección, es decir, agregando nuevas hipótesis o reemplazando las antiguas.

Tomemos el ejemplo del programa de desarrollo mecánico de Newton: su núcleo duro está formado por las tres leyes de Newton y su ley de la gravitación. El propósito de este programa era explicar todos los fenómenos conocidos (cuerpos que caen, cuerpos sólidos que sobresalen, movimiento de los planetas, ...). El cinturón protector (en un momento dado, ya que evoluciona constantemente) es el conjunto de hipótesis auxiliares y las observaciones disponibles relacionadas con él (por ejemplo, observaciones astronómicas sobre el movimiento de los planetas).

También debe tenerse en cuenta el carácter arbitrario de la definición de este núcleo para un programa dado, ya que resulta de una decisión. Tiene un carácter subjetivo. Cambiar o modificar el núcleo duro es abandonar el programa de búsqueda y definir uno nuevo. Ejemplos de cambios en el programa de investigación son la transición de la mecánica medieval a la mecánica newtoniana, luego de la mecánica newtoniana a la mecánica relativista de Einstein, y finalmente la transición a la mecánica cuántica. Otro ejemplo tomado de la historia de la astronomía es el pasaje del modelo ptolemaico (modelo geocéntrico, cuyo núcleo duro es "el Sol y los planetas giran alrededor de la Tierra") al modelo de Copérnico (modelo heliocéntrico, que tiene para el núcleo duro "todos los planetas giran alrededor del Sol").

¿Cuándo podemos llamar científico a un programa de investigación? O, para reformular la pregunta, ¿cuáles son los criterios científicos asociados con la teoría de Lakatos? De acuerdo con Lakatos, un programa debe verificar que las siguientes dos condiciones sean científicas: Criterios de Lakatos para la Ciencia Científica

- El programa de investigación debe tener un grado de coherencia suficiente para permitirle incluir un programa para futuras investigaciones
- El programa de investigación debe ser fructífero, es decir, llevar de vez en cuando al descubrimiento de nuevos fenómenos

Cualquier programa de investigación no es científico en el sentido dado anteriormente. Lakatos cita el marxismo y la psicología freudiana como ejemplos de programas de investigación que prueban la primera condición pero no la segunda, y la sociología moderna como ejemplo de un programa que verifica la segunda condición pero no la primera. La posición de Lakatos con respecto a la universalidad de los criterios de científicidad está claramente cerca del racionalismo (como se define en el Capítulo 2). Lakatos rechaza vigorosamente el enfoque relativista de la ciencia. Para él, el problema central de la filosofía de la ciencia es el del establecimiento de criterios universales de científicidad. De lo contrario, no habría "ninguna manera de juzgar una teoría que no sea evaluando el número, la fe y el poder vocal de sus seguidores". La consecuencia sería que entonces "la verdad estaría en el poder" y la evolución de la ciencia se reduciría a un fenómeno de la psicología de la multitud. Sin embargo, cabe señalar, y el propio Lakatos reconoció, que este criterio de científicidad es un criterio a posteriori, en el sentido de que solo nos permite decir si un programa de investigación ya maduro es científico o no. No proporciona una guía para que los participantes aseguren la naturaleza científica de su trabajo al inicio del programa.

3.3 Definir un objeto

Las ciencias manipulan objetos teóricos que forman la base de sus afirmaciones. Así, la mecánica newtoniana utiliza objetos como masa, fuerza, energía, momento. La física moderna involucra ondas, átomos, mientras que la química introduce otros objetos como el pH. Estas nociones son familiares para cualquier persona con antecedentes científicos básicos en estas disciplinas científicas. Pero, ¿qué representan? ¿Y cómo definen sus objetos las ciencias empíricas? Veremos a continuación que la respuesta a estas preguntas está lejos de ser trivial.

La palabra definir aparece a finales del siglo XII. Se deriva del latín *definire* que significa "determinar", "delimitar", "arreglar". Se utiliza originalmente en el sentido de

"Especificar, dar a conocer". No tiene el sentido de "determinar exactamente" hasta el final del siglo XV.

Por lo tanto, la acción de definir consiste en expresar lo más claramente posible lo que significa la palabra definida en relación con lo que no significa. Veremos que la naturaleza de la definición varía según el tipo de objeto que uno busca identificar. Nos centraremos aquí en la definición de grupos y familias de objetos, y en los objetos utilizados para construir teorías físicas a partir de observaciones experimentales.

3.3.1 General: definición extensional y definición analítica / intensional

Al tratar de definir una familia o grupo de objetos, esto se puede hacer usando dos tipos de definiciones:

1. La definición extensional, que consiste en enumerar todos los objetos con los que se relaciona la definición. Por ejemplo, la familia de planetas en el sistema solar se define como

planetas = {Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno}

Como podemos ver, este tipo de definición es perfectamente inequívoca: podemos verificar de manera simple si un cuerpo celeste es o no parte de los planetas del sistema solar. Simplemente escanee la lista completa y vea si el elemento está contenido en esta lista o no. Pero esta definición no es muy interesante, porque no nos dice nada acerca de lo que los elementos de esta lista tienen en común: conocemos los planetas, pero no conocemos su punto común, lo que hizo que se considerara útil. Para agruparlos dentro de la misma familia. No nos dice por qué Plutón, descubierto en 1930 por el astrónomo estadounidense Clyde Tombaugh, fue excluido de la lista de planetas del sistema solar por la Unión Astronómica Internacional el 24 de agosto de 2006. Otro inconveniente de este enfoque es que es muy inconveniente para familias con un gran número o incluso una infinidad de objetos. Este es, por ejemplo, el caso de muchos conjuntos encontrados en matemáticas. Considere el caso del conjunto de enteros naturales denotado, que contiene una infinidad de elementos contables. Un intento de definición extensional sería de la forma

$\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots\}$

Los tres puntos indican aquí que existen otros elementos que, por razones prácticas, no se pueden escribir en esta lista: dado que existe una infinidad de números naturales, no podemos elaborar una lista necesariamente finita. Esta imposibilidad, además de su aspecto teórico, se ilustra fácilmente por el siguiente hecho: el número total de partículas elementales (protones, neutrones, electrones) en el universo observable se estima entre 10^{80} y 10^{87} , y alrededor de 10^{79} el número de átomos²⁶. Al asociar una partícula con cada número, vemos que el límite alcanzable es el número de partículas. Es imposible, por ejemplo, continuar la lista hasta que Googol, que es el nombre inventado a su solicitud en 1938 por el sobrino de entonces nueve años del matemático estadounidense Edward Kasner (1878-1955) para el número 10^{100} . Esto sin hablar. Googolplex, definido como 10^{Googol} ! Para superar este problema, las matemáticas (no hay equivalente para los objetos de las ciencias empíricas) ofrecen la posibilidad de definir tales conjuntos a partir de su regla de construcción. El matemático Guiseppe Peano (1858-1932) dio la definición del conjunto de números naturales utilizando una serie de axiomas:

Axiomas de Peano

Axioma 1: 0 es un entero natural. Axioma 2: Cualquier entero natural tiene un sucesor que también es un entero natural. Axioma 3: 0 es el sucesor de cualquier entero natural Axioma 4 (el llamado axioma de recurrencia): Cualquier subdivisión conjunto de \mathbb{N} que contiene 0 y es tal que el sucesor de cada elemento de este subconjunto también pertenece a este subconjunto es idéntico a \mathbb{N} .

Como podemos ver, esta nueva forma de definición extensiva es diferente de la anterior en que no ofrece una lista exhaustiva explícita (en el sentido de que todos los elementos están escritos individualmente en la página) sino una lista implícita, ya que da el modo de construcción del conjunto. 2. La definición intensiva²⁷, también llamada definición analítica o definición sustancial, que consiste en proporcionar la lista de criterios (llamados criterios de definición) que un objeto debe verificar para que coincida con la definición. Este tipo de definición tiene la doble ventaja de dar información sobre los puntos en común entre los diferentes miembros de la misma familia, pero también hace posible definir familias con miembros infinitos. Además, permite expandir las listas incorporando nuevos objetos que eran desconocidos cuando se definió la familia. Dicha definición relaciona una expresión que se define (definiendum) con una expresión que define (definiens). Para ser válido, debe cumplir las siguientes tres condiciones:

Recordatorio: criterios de validez de una definición intensional

1. Adecuación extensional: las definiciones deben aplicarse a todo lo que el definiendum designa, y nada más. Esto da como resultado relaciones del tipo "si y solo": A es B si ...
2. Adecuación intencional o conceptual: los definidores deben dar la naturaleza de la cosa definida
3. No circularidad: una definición no puede apelar a ella misma Vamos a ilustrar estos criterios. La definición "A es hombre si, y solo si A es capaz de reír", ¿es válida? No, porque no es conceptualmente adecuado, ya que no nos dice qué es un hombre. Además, el trabajo sobre los grandes simios ha demostrado que la risa existe, por ejemplo, en el chimpancé, pero tampoco

comprueba el criterio de la adecuación extensional. Continuemos con la proposición "A es un hombre si y solo si A es un hombre". Esta definición verifica los dos primeros criterios, pero no el tercero: es circular, y por lo tanto no nos enseña nada.

Tomemos el ejemplo de la definición de planetas. La definición analítica de estos adoptada el 24 de agosto de 2006 por la Unión Astronómica Internacional es:

planeta = "un cuerpo celeste, que está en órbita alrededor del Sol, tiene una masa suficiente para que su gravedad prevalezca sobre las fuerzas cohesivas del cuerpo sólido y lo mantenga en equilibrio hidrostático, en una forma casi esférica, ha eliminado todo. Es probable que el cuerpo se mueva en una órbita cercana. "

Esta definición ilustra perfectamente las ventajas de la definición analítica. También muestra que, en algunos casos, es difícil encontrar una definición perfectamente estricta de los miembros de la familia: algunos criterios son a veces vagos (forma "casi esférica"). Ciertas definiciones analíticas admiten, por lo tanto, un margen de incertidumbre, y se basan en una "apariencia familiar". Esto es tanto más cierto como los objetos considerados son complejos. Por ejemplo, es muy difícil definir exactamente qué es un "ser vivo". Pero esto explica la desaparición de Plutón de la lista de extensión elaborada desde 1930, ya que no verifica el último criterio. Plutón ahora está clasificado entre los planetas enanos²⁸. La diferencia con la construcción axiomática del conjunto de números naturales es sutil: en el caso de la proposición de Peano, los números naturales no se describen mediante un conjunto de características, sino que su conjunto se construye, lo que equivale a una lista. Se define de forma iterativa exhaustiva desde el elemento cero y la regla que pasa de un entero a su sucesor. Los criterios para una buena definición analítica son los siguientes: la definición y el objeto que define deben ser sustituibles en las declaraciones sin cambiar el contenido o la calidad de las declaraciones y la definición no debe ser circular. es decir, use otro término cuya definición se refiera al primero.

3.3.2 Modo de definición de las ciencias empíricas: la definición operacional

Las ciencias empíricas no encuentran sus objetos "hechos por todos" en la naturaleza: la definición es una operación de construcción intelectual. Sobre la base de esta observación, y del hecho de que es en la medida en que las ciencias empíricas alcanzan el mundo, el físico y filósofo Percy Williams Bridgman (1882-1961, Premio Nobel de Física 1946) propuso, en sus obras *La lógica de lo moderno. Física* (1927) y *Naturaleza de la teoría física* (1936), el concepto de definición operacional (que traduce el término inglés definición operacional). Según Bridgman, en las ciencias empíricas, es la medición, es decir, el conjunto de operaciones que deben realizarse para obtener el valor de la cantidad medida, lo que define el objeto de la medición: "La verdadera definición de un concepto no está en términos de propiedades, sino en términos de operaciones reales. Como resultado, Bridgman propuso que las ciencias empíricas deberían usar solo objetos definidos de manera operativa. Esta visión es similar a la defendida por el filósofo francés Gaston Bachelard (1884-1962), quien en su libro *The New Scientific Mind* (1934) dijo que "la experiencia es, por lo tanto, parte de la definición de Ser. Cada definición es una experiencia "y resume esta concepción con la frase" Dime cómo te buscamos, te diré quién eres. "

Retomando los términos de Jean Ullmo en su libro *Modern Scientific Thought* (1969), podemos decir que "una definición operativa es una definición que incluye la descripción de un proceso

regular para identificar, medir, alcanzar de manera más general e identificar el concepto. definida. Esta definición resalta una característica importante del proceso de medición: debe ser regular, es decir, puede ser repetida por cualquier persona que lo desee y puede conducir al mismo resultado. Anticipándose al capítulo dedicado a la medición, se puede decir que el proceso en el que se basa una definición operacional debe basarse en correlaciones repetibles. Esta regularidad es necesaria para poder definir objetos estables, utilizables para teorías científicas. Esta necesidad de repetición, de estabilidad, conduce a una selección de los objetos de las ciencias empíricas. Cualquier secuencia de operaciones de medición no lleva a la definición de un objeto aceptable para el científico. El físico y filósofo alemán Ernst Mach (1838-1916) expresó esto al escribir que no se trata de "clasificar y reunir hechos que se dan individualmente; El científico primero debe encontrar los personajes a tener en cuenta. "

El programa de Bridgman (construyendo las ciencias empíricas en las únicas definiciones operativas), sin embargo, enfrenta las limitaciones intrínsecas de este enfoque. En particular, podemos observar que

- Dado que el objeto se define mediante un método de medición, se plantea la cuestión de su persistencia si se modifica el proceso de medición (por ejemplo, utilizando diferentes instrumentos).
- La repetibilidad estricta es una abstracción de la mente: una experiencia siempre es única y no se puede reproducir exactamente porque todos Las interacciones de los componentes del sistema de medición con el resto del universo siempre están cambiando. Por ejemplo, un pesaje realizado con una escala Roberval no dará exactamente el mismo valor si se repite con dos días de diferencia, porque las fuerzas de atracción de la luna y el sol habrán cambiado (pero permítanos tranquilizarnos). las diferencias serán mínimas y las variaciones de la medida serán bastante insignificantes para la vida práctica y la mayoría de las necesidades de los científicos). Un cierto margen de incertidumbre debe ser incorporado en la definición operativa.
- ¿Cuál es el grado de identidad de dos objetos definidos por dos procesos diferentes? Por ejemplo, podemos definir la masa de varias maneras diferentes, mientras esperamos hablar de lo mismo. ¿Cuánto es posible usar definiciones operacionales?
- La definición operativa indica cómo definir los objetos y proporciona algunos criterios de admisibilidad, pero no dice qué objetos se deben definir. Es sobre otras consideraciones que el científico debe basarse para encontrar sus objetos.

3.3.3 Ejemplo 1: ¿Qué es la masa? ¿Qué es una fuerza?

Para ilustrar lo anterior, considere primero el problema de la definición de la masa inercial (es la masa que aparece en la mecánica de Newton). ¿Cómo definir este concepto, por más familiar que sea para cualquier científico? Veremos que esto está lejos de ser obvio, porque la masa no se puede definir de forma aislada.

Este problema es abordado por el gran matemático y epistemólogo francés Henri Poincaré (1854-1912) en su libro *La ciencia y la hipótesis* (1902). Sobre la posibilidad de validar experimentalmente la segunda ley de Newton:

donde m denota la masa inercial, escribe: "¿Puede esta ley ser verificada por la experiencia? Para eso, sería necesario medir las tres cantidades que aparecen en la declaración: aceleración, fuerza y masa. Admito que podemos medir la aceleración, porque paso la dificultad que viene de la medición del tiempo. ¿Pero cómo medir la fuerza, o la masa? Ni siquiera sabemos qué es. Que es la masa Es decir, responde Newton, el producto del volumen por densidad. Sería mejor decir, dicen Thomson y Tait, que la densidad es el cociente de masa por volumen. - ¿Qué es la fuerza? Es, dice Lagrange, una causa que produce el movimiento de un cuerpo o que tiende a producirlo. "Es", dice Kirchoff, "el producto de la masa por aceleración. Pero entonces, ¿por qué no decir que la masa es el cociente de la fuerza por aceleración? Estas dificultades son inextricables. Y para concluir que "las masas son coeficientes que conviene introducir en los cálculos" y que "es por definición que la fuerza es igual al producto de la masa por la aceleración". Además de las profundas implicaciones para la posibilidad de Para probar la segunda ley de Newton por experiencia (Poincaré concluye negativamente, ya que aquí se trata de una definición de fuerza, o masa, que escapa a la verificación), este texto aclara la El problema de la circularidad mencionado anteriormente con respecto a la definición de masa y fuerza: no podemos definir estos dos conceptos de forma aislada.

A esta conclusión, Poincaré agrega que lo importante no es proponer definiciones de masa o fuerza per se, sino dar definiciones que permitan medirlas, acercándose así al concepto (formalizado más más tarde por Bridgman) de definición operativa. La definición operativa de masa utilizando la máquina Atwood²⁹ está descrita por J. Ullmo (*Modern Scientific Thought*, 1969). La máquina de Atwood es un dispositivo simple que mide la masa de un sólido. Está compuesto (ver figura) de un alambre y una polea. En un extremo del cable está unido el sólido cuya masa se va a determinar, y al otro un sólido de referencia que asegura que el cable permanezca tenso. El método de medición es el siguiente. Contamos con un gran número (en teoría, un número infinito) de sólidos (del mismo tamaño, misma composición, misma forma que el sólido cuya masa queremos conocer). El sólido se une al cable y se mantiene en la posición hacia abajo. En el momento inicial, el sólido se libera y se mide el tiempo necesario para alcanzar la posición alta de referencia. Suponiendo que el sólido está sujeto a una aceleración constante, esto se deduce del tiempo de viaje. Luego se repite el experimento agregando uno, luego dos, luego tres sólidos idénticos al primero considerado, y se miden las aceleraciones para estos sólidos compuestos. Luego vemos que hay una relación repetible: el producto de la aceleración por el número de sólidos mantiene un valor constante, si la diferencia de peso entre el sólido de referencia y el que queremos pesar es muy pequeña (Se llama hipótesis de linealización). La constancia de este producto indica la existencia de una propiedad permanente de nuestro sistema, que se denominará (¡es una definición de trabajo!) La tensión del cable o la fuerza que ejerce sobre los sólidos y cuyo valor se mide por el valor de la constante. Este valor es un parámetro, ya que depende del sólido elegido inicialmente: si cambiamos su composición o su volumen, veremos nuevamente la existencia de un valor constante, pero diferente del anterior.

Para alcanzar la masa del sólido, es necesario proceder a un segundo conjunto de experimentos. Ahora consideramos una sola copia del sólido cuya masa queremos conocer, y variamos el número de sólidos de referencia utilizados para contrapesar (aquí, nuevamente, consideramos una colección de sólidos idénticos). La aceleración del sólido se mide para cada caso (uno, dos, ... sólidos de referencia). Observamos la existencia de una nueva relación repetible: la aceleración del sólido es directamente proporcional al número de sólidos de referencia utilizados (siempre utilizando la hipótesis de linealización). Esta repetibilidad indica la existencia de una propiedad permanente de lo que se ha mantenido sin cambios, a saber, el sólido presentado para su análisis. Esta propiedad se definirá como la masa del sólido y su valor estará dado por la relación de proporcionalidad entre la aceleración y el número de sólidos de referencia.

Como podemos ver, esta definición (operativa) se basa completamente en el proceso experimental (y sufre los problemas asociados con cualquier experiencia concreta), y no dice nada acerca de una posible naturaleza intrínseca de masa o tensión. Estas definiciones evitan la naturaleza circulatoria de las definiciones no operativas basadas en la fórmula de Newton, pero implican, de manera subyacente, un cierto número de hipótesis, que se detallarán en el capítulo dedicado a la medición. Al usar este método, es posible medir la masa de cualquier cuerpo sólido, si el experimento es practicable en la práctica. Para medir la masa de un planeta, o una estrella, obviamente es necesario usar otras definiciones.

3.3.4 Ejemplo 2: ¿Qué es el movimiento? ¿Qué es una deformación?

Ahora consideremos el problema de definir el movimiento. ¿Cómo definir el movimiento o, de manera equivalente, cuándo podemos decir que un cuerpo sólido se desplaza? Lo veremos para un sólido de dimensiones finitas (entonces, no una En el punto material del cual se mencionará el caso al final del párrafo, el concepto de desplazamiento es inseparable del de la deformación.

Uno de los primeros escollos es que el movimiento (al menos como se acepta hoy) solo puede concebirse como un referente: es el relativismo galileo. No hay movimiento absoluto, como tampoco lo hay para el mecánico de referencia absoluto. En lo que sigue, elegimos una referencia, tomada como referencia. En esta referencia, ¿cuándo se puede decir que un sólido identificado, tomado para simplificar el volumen constante, se ha movido?

Considere el caso de un sólido esférico, de densidad uniforme (el centro de gravedad del sólido se confunde así con el centro geométrico de la esfera), inicialmente en reposo en la referencia considerada, y aplíquese una fuerza no cero a el momento inicial Qué esta pasando ? En el caso de un sólido indeformable (también llamado sólido rígido), la deformación es cero por definición, y el sólido se pondrá en movimiento, de acuerdo con la segunda ley de Newton, que indica que la aceleración inicial será distinta de cero. Es decir, habrá al menos una vez después del tiempo inicial durante el cual al menos un punto del sólido no ocupará su posición inicial. Es necesario cuidar el hecho de que el movimiento del sólido no es igual al desplazamiento de su centro de gravedad: en el caso de una rotación alrededor de su centro de gravedad, hay un buen movimiento de la esfera mientras que su centro de gravedad la gravedad es fija Aquí hay una definición que parece satisfactoria, válida para sólidos no deformables y puntos de material (este último es de dimensión cero, ¡no se puede deformar!).

Pero, ¿qué pasa con la definición de deformación, que se utiliza implícitamente en la del movimiento dado anteriormente? Considere ahora un sólido deformable y aplíquese una fuerza: se deformará, es decir, existe al menos un tiempo situado después del tiempo inicial en el que la distancia entre al menos dos puntos del sólido habrá variado en comparación con el tiempo inicial. Para que la distancia varíe, es necesario que al menos uno de los puntos se haya movido en relación con los demás: uno llama así a la noción de desplazamiento y aparece el problema de la circularidad. Además, puede verse que la definición "ingenua" dada anteriormente para el desplazamiento de sólidos rígidos ya no permite diferenciar entre desplazamiento y deformación para un sólido deformable.

Las definiciones pueden hacerse más rigurosas al proceder de la siguiente manera. Primero, es importante distinguir los sólidos rígidos y sus movimientos.

Se dirá que un cuerpo evoluciona como un sólido rígido si, en cualquier momento, la distancia entre cada uno de sus puntos permanece sin cambios. Matemáticamente, esto se traduce en el hecho de que las posiciones de cada uno de sus puntos en un momento dado pueden deducirse de las ocupadas en otro instante mediante la combinación de una rotación y una traducción. Se dirá que este sólido rígido se ha movido si esta rotación o traslación no es cero.

Se dirá que un sólido es deformable si no es rígido. En este caso, la deformación y el desplazamiento no son dissociables, porque la deformación implica el desplazamiento de al menos algunas partes del sólido. Entonces es posible descomponer arbitrariamente (es decir, esta descomposición no es única) la evolución a una Dado el instante como la suma de un desplazamiento de cuerpo rígido y una deformación. Si hay dos puntos cuya distancia relativa no ha cambiado con respecto al momento inicial, podemos identificar la rotación y la traslación necesarias para establecer la correspondencia con sus posiciones iniciales. La deformación se define entonces como la operación que se debe agregar a esta rotación y esta traslación para obtener la posición del conjunto de puntos del sólido. En el caso de que no haya dos puntos cuya distancia permanezca fija, simplemente podemos elegir un punto de referencia (por ejemplo: el centro de gravedad), encontrar la traducción que permita asociar su posición con su posición de referencia, y definir la deformación como la transformación complementaria a esta traducción.

Este ejemplo muestra que incluso para conceptos que parecen intuitivos y que son comunes en la mecánica y la física, es muy difícil llegar a definiciones objetivas que no sean problemáticas. El movimiento está perfectamente definido para sólidos rígidos estrictos o para la abstracción representada por el punto material. Pero para los cuerpos "reales", la definición retiene una parte de la subjetividad.

Finalmente, notemos que la noción de movimiento es una noción intrínsecamente relativa: un cuerpo se mueve con respecto a algo. Este es el principio de la relatividad, a veces llamado el principio de relatividad de Galileo. Un problema fundamental de la mecánica newtoniana es si existen marcos de referencia privilegiados para definir el movimiento y, de ser así, cómo identificarlos. Esta pregunta, que se discutió ampliamente a fines del siglo XIX para llevar a la teoría de la relatividad de Einstein y sus extensiones, se aborda en el capítulo anterior. La relatividad del movimiento se ilustra fácilmente con el siguiente ejemplo. Considere un lector de este párrafo, sentado en una silla. Al final de su lectura (que dura aproximadamente un minuto), ¿cuánto se habrá movido? A cero distancia de la silla. Pero la Tierra gira alrededor de su eje a una velocidad de 0.5 km / s (1800 km / h) en el ecuador³⁰. En 1 minuto, nuestro lector habrá recorrido 30 km. Además, la Tierra gira alrededor del Sol a una velocidad promedio de 29.7 km / s ($106\,920 \text{ km / h}$). ¡En 1 minuto, nuestro lector ha movido 1782 km! Podemos

continuar el razonamiento, teniendo en cuenta que nuestro sistema solar gira como el resto de nuestra galaxia (la Vía Láctea) a una velocidad de 217 km / s (781.200 km / h). Entonces, en un minuto, la distancia recorrida en el hito galáctico por nuestro lector es igual a 13020 km. Se podría agregar a esto el movimiento propio del sistema solar con respecto a la galaxia: 19,5 km / s (70 200 km / h) hacia la constelación de Hércules. ¿Es nuestro lector todavía?

3.4 Definir un objeto (continuación): complejidad y bordes borrosos

Los ejemplos anteriores trataron conceptos que podrían aparecer como "simples" y se usan comúnmente en mecánica y física, es decir, por Dos ciencias empíricas entre las más antiguas y las más matematizadas. Sin embargo, como hemos visto, es muy difícil llegar a definiciones perfectamente satisfactorias y objetivas.

La ciencia moderna presenta conceptos y objetos complejos, que a veces hacen imposible producir definiciones exactas y satisfactorias. Este tipo de problema está particularmente presente en la biología, que, por definición, trata con objetos extremadamente complejos: los seres vivos³³. Como veremos más adelante, ya no tenemos una definición exacta para conceptos fundamentales como vivir / inerte, muerto / vivo o animal / planta. El problema es que para cada una de estas distinciones, que son a priori intuitivas y fundamentan el reflejo en la biología, se han encontrado "contraejemplos", que son tales que ya no se pueden colocar en una sola categoría. Antes de analizar estos ejemplos, tenga en cuenta que otras disciplinas, como la física, tienen el mismo problema: hay "estados indecisos" de la materia, que no entran en las categorías clásicas. Por ejemplo, el vidrio obtenido durante una transición líquido-sólido no es un sólido convencional y representa un estado intermedio entre un líquido y un cristal. Esto se debe a que cuando se enfría (rápidamente) un líquido subenfriado viscoso, las moléculas se congelan antes de alcanzar un estado de equilibrio: el material está fuera de equilibrio. Hay otros ejemplos: cristales líquidos o geles. Además, los matemáticos han desarrollado una lógica difusa, en la que una propiedad no es ni verdadera ni falsa, sino que tiene un grado de veracidad entre 0 y 1 (la respuesta booleana verdadera / falsa, transcrita por una respuesta binaria 0 / 1, se sustituye por una función continua que varía entre 0 y 1).

3.4.1 Conceptos vagos y paradojas soritas.

Una dificultad particular está asociada con los llamados conceptos vagos o difusos, que son, como su nombre lo indica, conceptos que escapan a una definición precisa. El lenguaje común incluye una gran cantidad de conceptos de este tipo, que al principio no parecen ser un problema. Sin embargo, un análisis detallado muestra que tales conceptos inducen la existencia de paradojas llamadas paradojas sorites³⁴ cuando se les aplica la inducción de la lógica clásica.

La más conocida es la paradoja del montón de arena. ¿Cómo definir un montón de arena? Para eso, vamos a empezar desde las dos premisas a continuación:

1. Una pila de arena se compone de una gran cantidad de granos de arena 2. Una pila de arena a la que se le quita un grano de arena sigue siendo una pila de arena Ahora consideremos un

montón de arena. Este contiene un número grande pero finito de granos, que notaremos N . Luego, aplicamos $(N-1)$ por la premisa 2: obtenemos la conclusión de que un solo grano de arena forma un montón de arena, que está en contradicción con la premisa 1! La contradicción proviene del hecho de que la noción de "gran número" es incluso vaga, lo que no invalida la aplicación repetida de la premisa 2. ¿Cómo levantar esta paradoja? Se han propuesto varias soluciones durante los últimos dos milenios. Entre estos

- Las soluciones triviales. Lo primero es decir que el concepto "pila de arena" no tiene sentido, ya que no se puede definir y, por lo tanto, no se debe utilizar. Una segunda solución, defendida por Bertrand Russell, es prohibir el uso de la lógica para manipular conceptos vagos.
- Establecer un umbral arbitrario. Por ejemplo, uno puede decidir que se fija una pila de arena cuando se juntan 100,000 granos. Esta solución, que a menudo se usa en la práctica, no es, sin embargo, filosófica satisfactoriamente. De hecho, ¿cuál es la diferencia entre un conjunto de 99,999 granos de arena y una pila de 100,000 granos?
- El uso de la lógica difusa, que permite pasar de "no es una pila de arena" a "es una pila de arena" de manera continua, y así definir una infinidad de respuestas intermedias del tipo "es casi una pila de arena" o "es probablemente una pila de arena". Al elevar el axioma aristotélico del tercero excluido (ver sección 5.2.1), se resuelve el problema de las paradojas sorites.
- El consenso dentro del grupo de personas involucradas en pensar sobre el problema. La probabilidad de que un conjunto de granos de arena forme una pila de arena, por lo tanto, depende de la distribución de opiniones dentro del grupo. Aquí encontramos una noción de verdad-consenso. Es importante tener en cuenta que cada individuo puede tener su propia definición de lo que es una pila de arena: solo cuenta el resultado del "voto". Esto ilustra cómo los grupos humanos pueden ponerse de acuerdo sobre el uso de términos vagos (justicia, democracia, ...).

3.4.2 Ejemplo 1: ¿Vivir o ser inerte? Mimivirus y ATTV35

Estudios de biología, por definición, seres vivos. Una cuestión fundamental es, por tanto, la de la definición de los vivos. ¿Qué es un ser vivo? O, formulado de manera diferente, ¿cuál es la diferencia entre lo vivo y lo inerte? Veremos que esta pregunta es mucho más problemática que las anteriores. Además de ser estrictamente científico, esta pregunta conlleva una carga emocional y emocional muy fuerte. Tiene implicaciones filosóficas, religiosas, éticas, sociales y políticas muy fuertes. La reflexión sobre la definición de vida es, por lo tanto, por construcción, mucho más subjetiva y sujeta a debates extracientíficos que los mencionados anteriormente en el campo de la física. La distinción entre lo vivo y lo inerte parece a priori simple: un elefante o un árbol son seres vivos, una piedra no lo es. Desafortunadamente, el problema es mucho más complejo cuando se trata de dar una definición científica de la vida, que se aplica a todos los seres encontrados. Si el problema no surge para organismos grandes (seres multicelulares) para los cuales la identificación es simple, se cumple en la escala microscópica. En primer lugar, no existe una definición única de lo que es un ser vivo. Sin embargo, las diferentes definiciones tienen puntos comunes, como se recuerda a continuación:

Criterios para la definición de vida.

Una entidad está viva si: • Puede usar o crear energía • Se reproduce • Se intercambia con el entorno externo • Responde a estímulos • Crece • Puede haber variabilidad genética que distinga a un padre de sus descendientes

Esto debe compararse con el primer esbozo de una definición general de vida, que se debe a Aristóteles (384-322) en su Tratado sobre el alma (II, 1): "Queremos decir con vida el hecho de alimentarnos. Crecer y marchitarse".

Desde finales de la década de 1970, siguiendo el trabajo del microbiólogo estadounidense Carl Woese, todos los seres vivos se agrupan según tres reinos (en lugar de dos anteriormente):

Los 3 reinos de los vivos

- Eukaryotes, que tienen una estructura intracelular compleja, que separa el citoplasma del nucleoplasma que baña el ADN.
- Procariotas (bacterias), que no tienen un núcleo.
- Archaeobacteria o archaea (desde el final. 1970s), que no tienen un núcleo, pero tienen diferencias en la estructura de la membrana, por lo que no pueden agruparse con procariotas.

Los virus (del virus latino: veneno) son entidades completamente diferentes. Descubiertos en plantas a fines del siglo XIX, luego en animales y humanos a principios del siglo XX, consisten en un ácido nucleico (ADN o ARN) protegido por una estructura de proteína llamada cápside. Hasta hace muy poco tiempo, los virus conocidos no podían clasificarse como vivos porque:

- Son parásitos obligatorios, que se multiplican solo dentro de una célula viva huésped, a los que imponen una serie de tareas que lo condenan a hacer virus. Algunos de los llamados virus endógenos encajan en la herencia genética del huésped y se transmiten a cada generación de descendientes del huésped. Tenga en cuenta que el parasitismo obligatorio no es un argumento suficiente, ya que algunas bacterias son totalmente dependientes de una célula huésped.
- Son incapaces de la síntesis de proteínas.
- No pueden crecer fuera del contexto celular del huésped.
- Contienen solo un tipo de ácido nucleico (ADN o ARN), mientras que ambos tipos están presentes en todos los seres vivo
- No tienen un metabolismo adecuado, ya que la energía requerida para su multiplicación la proporciona el huésped.
- Pero son susceptibles a la variabilidad genética (por lo que algunos medicamentos se vuelven ineficaces)

Los descubrimientos recientes han colocado virus en una especie de tierra de nadie entre vivos e inertes, lo que desdibuja la definición de los vivos. En 1992, se aisló un virus gigante llamado Mimicking Microbe Virus (Mimivirus). Sus características inusuales hicieron que primero se

considerara una nueva bacteria con características extrañas. Es solo mucho más recientemente, en 2003, que un equipo de investigadores franceses (Didier Raoult y sus colegas en Marsella) finalmente lo identificó como un virus. Mimivirus tiene muchas propiedades que desafían la separación entre virus y seres vivos. Este virus tiene un tamaño de 400 nanómetros más grande que algunas bacterias y tiene un genoma más grande y complejo que docenas de ellos. Varios genes de Mimivirus parecen participar en la síntesis de proteínas y en la reparación de su propia herencia genética. Finalmente, cotarando el ADN del virus, se detectaron los ARN. Más sorprendente aún: si bien se pensaba que los genes virales tenían un origen celular (una especie de "vuelo genético" en los hospedadores durante la evolución), muchos genes de Mimivirus no tienen homólogos en humanos. vida conocida. Este virus gigante sería el primer ejemplo descubierto de una nueva familia que apareció en la Tierra al mismo tiempo que la vida misma, hace unos cuatro mil millones de años. Lo que impulsa a algunos biólogos a proponer la creación de una cuarta rama en el árbol de los vivos: el Girus (para Virus Gigante).

Más recientemente, se ha descubierto un virus capaz de cambiar de forma y desarrollarse mediante un proceso activo fuera de cualquier contexto celular: el virus ATTV (Acidianus Two-Tailed Virus). Este virus infecta a las arqueobacterias que viven cerca de respiraderos hidrotermales calientes. Tiene una forma de limón, que se alarga en cada extremo cuando la temperatura es lo suficientemente alta (alrededor de 80 grados centígrados). Estos dos ejemplos muestran la dificultad de encontrar definiciones precisas que resistan los nuevos descubrimientos. Y debemos tener en cuenta que solo conocemos unos 10 000 virus en la actualidad, mientras que estimamos que la cantidad de diferentes partículas virales es de alrededor de 10³¹ en nuestro planeta (una diversidad infinitamente superior a la acumulada por los tres reinos de los vivos: eucariotas, procariotas y arqueas).

3.4.3 Ejemplo 2: definición de muerte y criptobiosis de Tardígrado

Todos los seres vivos multicelulares están marcados por un proceso de envejecimiento, que termina con un cese de funciones vitales: la muerte. ¿Cuándo se puede decir que un organismo vivo ha dejado de vivir, es decir, que está muerto? Veremos que incluso para los organismos multicelulares, esta pregunta es muy compleja. La noción de vida se asocia generalmente con la del metabolismo (ver más arriba), es decir, una actividad físicoquímica global del sistema vivo, definiéndose la muerte biológica como el cese del metabolismo. El significado psicológico de la definición de muerte se ilustra mediante el desarrollo del concepto, legalmente reconocido para los seres humanos, de muerte cerebral³⁶, que nació en la década de 1960 después de que se superaran los avances médicos sobre el coma.

Echemos un vistazo a la muerte biológica para los animales simples. ¿Podemos decir que cualquier animal cuyo metabolismo es cero (en el sentido de que no se puede detectar actividad física o química en su cuerpo) está muerto? La respuesta 'sí' parece ser obvia. Sin embargo, hay un famoso contraejemplo: el tardígrado (*Echiniscus trisetosus*). Este pequeño animal (mide menos de 2 mm) tiene una propiedad extremadamente rara: la de entrar en un estado de criptobiosis cuando el medio ambiente se vuelve hostil a él. La criptobiosis es un estado de metabolismo reducido, que se observa, por ejemplo, en animales que hibernan. En el caso de tardíos, la criptobiosis alcanza un solo estado, ya que ningún medio de medición actualmente disponible puede detectar ningún rastro de actividad físicoquímica. El tardígrado es completamente "inerte" y ya no se ajusta a la definición de sistemas vivos. Sin embargo, puesto

en un ambiente suficientemente húmedo, el tardígrado deja su estado de criptobiosis y vuelve a la vida en una o dos horas. Este fenómeno, único en su tipo, hace retroceder la definición clásica de muerte.

En el estado de cryptobiosis, el tardígrado toma la forma de un barril que le permite reducir su superficie de evaporación y limitar las pérdidas de agua que podrían ser fatales para los orgánulos muy sensibles a la disección. El animal también produce un azúcar que reemplaza el agua en el cuerpo, lo que limita el daño a las membranas celulares para que puedan repararse durante la rehidratación. También actúa como anticongelante y previene el daño a las células debido a la formación de cristales de hielo a temperaturas muy bajas.

En este estado, el tardígrado posee habilidades únicas de resistencia en el mundo de los vivos y lo hizo famoso. Los experimentos realizados en el laboratorio han demostrado que el retraso tardío podría salir de la criptobiosis y volver a una vida normal después de ser sometido a las siguientes condiciones:

- -272.9 grados Celsius durante 20 horas
- -253 grados Celsius durante 26 horas
- -190 grados Celsius (en aire líquido) durante 25 meses • varios siglos a -20 grados Celsius (descubierto en el hielo en los polos)
- 30 minutos a 360 grados centígrados
- el vacío absoluto
- presiones de 6000 atmósferas (el límite normal de daño celular y de ADN es del orden de 300 atmósferas)
- alcohol puro (alcohol a 100°)
- Sulfuro de hidrógeno (H₂S)
- Dióxido de carbono (CO₂)
- Luz ultravioleta • Rayos X, en dosis normalmente letales

3.4.4 Ejemplo 3: ¿animal, seta o planta?

Vayamos ahora a otra pregunta, simbólicamente menos cargada que las anteriores, y mucho más simple a primera vista: ¿qué es un animal, un hongo y una planta?

Las clasificaciones modernas de los eucariotas se basan en análisis filogenéticos: al analizar la herencia genética de cada organismo vivo, seguimos el proceso de evolución, lo que hace posible distinguir los llamados grupos monofiléticos (hay 8 en total), que reúnen Cada uno es un antepasado común y todos sus descendientes. El ancestro único común a todos los eucariotas permanece desconocido, al igual que el ancestro común a los tres reinos vivientes (eucariotas, procariotas y arqueas). Este último se llama LUCA (por Last Unknown Common Ancestor) por biólogos especializados en evolución. Al observar el árbol filogenético de los eucariotas, podemos ver que la definición de los términos animal, hongo o planta es problemática, ya que estas familias no corresponden a grupos monofiléticos.

- Los animales incluyen metazoos (multicelulares, en azul en la figura) y protozoos (en naranja en la figura). Recuerde que la secuencia de ADN del ser humano es aproximadamente 98% idéntica a la del chimpancé, 80% de la del ratón y 60% de la de la mosca *Drosophila*.
- Las plantas son organismos capaces de la fotosíntesis, que incluye a todos los organismos con plástidos (orgánulos que contienen clorofila y están dotados de fotosíntesis). Esta capacidad se adquiere durante la evolución cuando una célula fotosintética (cianobacterias para la línea verde, alga unicelular (roja o verde) para otras) se incorpora dentro de otra. Este proceso se llama endosimbiosis.
- Los hongos no son animales, pero no son fotosintéticos. Se alimentan de moléculas orgánicas (se dice que son heterótrofas), que absorben a través de su pared rígida que prohíbe la fagocitosis (son absorbotróficas). Están formados por filamentos finos (llamados hifas) que permiten la exploración del entorno circundante y el forrajeo. Algunos hongos secretan enzimas que digieren moléculas complejas fuera de la célula. Para proteger esta digestión externa contra organismos "competidores", los hongos a menudo secretan antibióticos (como la penicilina).

La observación de grupos monofiléticos muestra que:

- ninguna familia (animal, planta, seta) está completamente contenida dentro del mismo grupo. Por lo tanto, hay plantas que no tienen ancestros comunes, aparte del ancestro común a todos los eucariotas. Esto se debe al hecho de que la adquisición de una plaste por endosimbiosis ha ocurrido varias veces durante la evolución dentro de diferentes líneas. También se observa que la pérdida de plástidos da lugar a nuevos hongos no relacionados. Finalmente, los animales están presentes en grupos monofiléticos.
- Un grupo monofilético puede agrupar elementos dentro de tres familias. ¡Podemos ver que los humanos (metazoos) están más cerca de crepes y morillas de los bosques (setas de la familia de los eumicetos) que otros animales!

Estos hallazgos muestran que la definición de animales, plantas y hongos no es trivial e incluye organismos que no están relacionados con la genética (aparte del ancestro único desconocido). Esto se hace aún más complejo por el hecho de que diferentes organizaciones pueden desarrollar estrategias similares. Por lo tanto, algunas bacterias se comportan como hongos: las bacterias actinomicetos son filamentosas, heterótrofas, de pared y producen enzimas y antibióticos (por ejemplo, estreptomycin). También se encuentran plantas parasitarias similares a los hongos, que han perdido su clorofila (por ejemplo, las flores más grandes conocidas son las de *Rafflesia*, una planta tropical parasitaria con pared y absorbotrófica).

3.5 Definición de un objeto (final): la crítica de Lakatos

Los modos de definición que acabamos de discutir no son completamente satisfactorios al describir cómo se definen los conceptos en las teorías científicas. Las críticas que se pueden formular son las siguientes:

- La definición extensional no se puede usar en la práctica, porque conduce al uso de listas infinitas.
- La definición intencional de un concepto generalmente usa otros conceptos, y así sucesivamente. Nos enfrentamos nuevamente a un problema de regresión infinita que no admite una solución satisfactoria (circularidad o cierre arbitrario). Este es, por ejemplo, el análisis de Poincaré de la mecánica newtoniana.
- La definición operacional no es utilizable para todos los conceptos de la física moderna (por ejemplo, en mecánica cuántica), y se ve debilitada por la incertidumbre intrínseca de las declaraciones de observación.

Una observación es que una definición, incluso si se basa en un conjunto de conceptos coherente (un tipo de diccionario, donde cada concepto se define de acuerdo con otros conceptos también definidos) utiliza conceptos que pertenecen a la misma teoría. (Para usar nuestra analogía, una palabra se define en el diccionario de otras palabras en el mismo diccionario). Para acceder a la Para entender un concepto, uno debe conocer la teoría dentro de la cual se define (siempre con el mismo ejemplo, uno ya debe tener cierto dominio del idioma para poder usar un diccionario). Un punto importante es la inconmensurabilidad de las teorías. Este punto de vista, defendido por varios epistemólogos, implica que los conceptos de una teoría no son expresables exactamente por medio de los conceptos de otra teoría (un diccionario de inglés no será útil para nadie). sólo habla francés y que busca utilizar un diccionario de francés). Por ejemplo, el concepto newtoniano de masa no se formula utilizando la mecánica pre-newtoniana, por lo que el concepto de masa en la teoría de la relatividad de Einstein es muy diferente de él. Esto llevó a Lakatos a formular la proposición de que las definiciones deberían rechazarse como procedimientos fundamentales para dar sentido a un concepto. Para él, es en las teorías donde los conceptos derivan su significado. Esta reflexión se apoya en el ejemplo anterior de la masa. La naturaleza histórica y evolutiva de las teorías también lleva a Lakatos a hacer de los programas de investigación una fuente de significado para los conceptos. Esto se debe a que muchos conceptos (masa, energía, átomo, onda, ...) se definieron inicialmente de forma difusa, y vimos que su definición evolucionaba y se hacía más clara a medida que se desarrollaban las teorías.

4 ¿Qué es un experimento?

Los capítulos anteriores han resaltado la importancia de los hechos y su medición de las teorías en las ciencias empíricas. Por lo tanto, es necesario cuestionar la naturaleza y el valor de los datos obtenidos del experimento. 4.1 De la observación a la experimentación.

Primero, comencemos por distinguir la observación de la experimentación. En ambos casos, el científico cuestiona la naturaleza para obtener datos que alimentarán su pensamiento. En el caso de la observación, el científico es idealmente neutral, pasivo en el sentido de que no busca modificar el curso natural de los acontecimientos. Este es, por ejemplo, el caso de la astronomía, la astrofísica y la climatología: es imposible molestar a una estrella para validar un modelo de su funcionamiento. Solo se pueden medir las señales emitidas por las estrellas observables. Es lo mismo para el clima: el climatólogo tiene solo un ejemplo que no puede modificar a voluntad. Esta es la razón por la que los resultados de la paleoclimatología son tan importantes: si no tenemos varios planetas similares a la Tierra para observar, tratamos de recopilar la mayor cantidad de información posible sobre los estados pasados del clima. En el caso de la experimentación, el científico influye en el curso de los acontecimientos en un intento de aislar un fenómeno que quiere analizar. Él está activo en esto. Es la experiencia repetida la que permite recopilar los hechos y, por ejemplo, tener acceso a una definición operativa. Las ciencias que utilizan la experimentación se denominan ciencias experimentales (mecánica, física, química, ...), aquellas basadas únicamente en la observación, ciencias de la observación.

Antes de continuar, es importante tener en cuenta que la neutralidad de la observación es bastante relativa, lo que a veces hace que la distinción entre observación y experimentación sea menos útil. De hecho, la observación comparte con la experimentación la necesidad de realizar mediciones, por lo tanto usar aparatos de medición y recurrir a teorías científicas (antes de la medición para determinar qué magnitudes deben medirse, y luego dibujar). conclusiones), que son el tema de este capítulo y que hacen la observación totalmente neutral, es decir, sin ninguna condición previa, es imposible.

4.2 La medida de los fenómenos físicos.

4.2.1 Percepción, medición y testimonio de datos.

La práctica científica moderna en el campo de las ciencias empíricas hace un uso extensivo de los datos de los experimentos. Cabe señalar que la observación por parte del experimentador por medio de percepciones sensoriales directas (la visión en la gran mayoría de los casos) es solo muy marginal. Lo que importa, por otro lado, es la adquisición de datos, es decir, de valores medidos asociados con campos y cantidades que aparecen en las expresiones matematizadas que son las leyes. La adquisición de estos datos es el resultado de la medición, que se discutirá más adelante. Los datos en bruto, es decir, los valores resultantes de la medición, no son explotables directamente: para adquirir significado y ser utilizados para la producción de conocimiento, primero deben formatearse dentro del marco de Un modelo de datos y luego ser interpretado en un marco teórico. Esto se llama testimonio de los datos.

Finalmente, cabe señalar que en algunos experimentos, por ejemplo en física nuclear, el papel de la percepción directa por parte de los científicos es prácticamente nulo: las mediciones se automatizan y los datos se transmiten a las computadoras que los explotan. Los actores humanos acceden solo a los resultados de los modelos teóricos, y ya no a partir de "hechos brutos". En tales casos, la percepción humana se reduce a la lectura de cuadros, tablas y textos producidos por computadoras y, por lo tanto, es muy diferente de la actividad perceptiva tal como fue concebida en los siglos anteriores.

4.2.2 Medición, precisión y estándares.

El objetivo de la operación de medición es cuantificar, es decir, reducir a una escala de números reales cuyo valor unitario está asociado con una referencia conocida por todos, ciertas cantidades asociadas con los objetos y fenómenos estudiados.

Si la escala de medición se basa en números reales, los valores medidos se aproximarán en el sentido de que se truncarán: el número de dígitos expresables es por naturaleza finito. Sobre esta base, una medición exacta no es factible. Pero, en la práctica, esta fuente de inexactitud no es un problema para la vida cotidiana y muchas de las mediciones realizadas en el contexto de experimentos de laboratorio. Es el límite de resolución o precisión de los instrumentos de medición lo que es problemático.

Para hablar un idioma común, los científicos comparten las mismas unidades de medida³⁸. Para la mecánica y la física, las unidades estándar de hoy son el metro para las longitudes, el kilogramo para las masas y el segundo para los tiempos. El uso de unidades de medida universales también se considera una simplificación de los intercambios económicos, impuestos ... La armonización de pesos y medidas fue, por ejemplo, un reclamo muy fuerte en los Estados Generales convocados en 1788 que precedió a la Revolución francesa. ¡Se estima³⁹ que Francia contabilizó casi 250,000 unidades de medición diferentes! Cada unidad está asociada con un semental, que es un objeto o proceso natural. Las propiedades requeridas para un estándar son la estabilidad (el objeto debe conservar sus características durante un tiempo teóricamente infinito, en la práctica "muy largo") y la disponibilidad: cualquier persona adecuadamente equipada debe poder usar el estándar para garantizar el valor de sus medidas. Las definiciones del metro, el segundo y el kilogramo se recuerdan a continuación. ¿Qué es un metro? La definición del metro ha evolucionado a lo largo del tiempo, en el sentido de que la norma utilizada para definirlo ha variado (por lo tanto, es su definición operativa la que ha evolucionado). Originalmente, el metro se definió como una fracción de la longitud del perímetro de la tierra en el ecuador (ver más abajo para un historial más preciso). Esta definición fue luego reemplazada en 1889 por una barra de platino-iridio de sección en forma de X depositada en el Museo de Pesos y Medidas, Sèvres. El metro estándar se define como la distancia entre dos marcas grabadas en esta barra cuando la barra está a la temperatura del hielo derretido y se coloca en dos rodillos horizontales simétricos perpendiculares a su eje, uno distante del otro 0.571 metros. La sección X garantiza una alta rigidez de la barra y su composición garantiza una baja variabilidad en función de la temperatura. En octubre de 1960, el Comité Internacional de Pesas y Medidas adoptó una nueva definición en la resolución 7 de la 11ª Conferencia General de Pesas y Medidas: el metro se define como 1 650 763.73 longitudes de onda en el vacío de la radiación correspondiente a la transición entre los niveles 2p₁₀ y 5d₅ del isótopo 86/36 de criptón. Para garantizar la repetibilidad, el Panel "recomienda que la radiación de criptón 86 adoptada como un estándar de longitud fundamental se realice utilizando una lámpara de descarga de cátodo caliente que contenga el criptón 86 con una pureza de no menos del 99 por ciento. cantidad suficiente para garantizar la presencia de criptón

sólido a la temperatura de 64°K , esta lámpara está provista de un capilar que tiene las siguientes características: diámetro interno de 2 a 4 milímetros, espesor de pared de aproximadamente 1 milímetro. La definición actual es la adoptada en 1983 en la resolución 1 de la 17a Conferencia General de Pesas y Medidas: "El medidor es la longitud del camino recorrido en el vacío por la luz durante una duración de $1/299\,792\,458$ de segundo" . Esta definición fija la velocidad de la luz en el vacío en $299,792,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

¿Qué es un segundo? La duración del segundo se fijó en octubre de 1960 mediante la Resolución 9 de la misma Conferencia, que fijó la longitud del medidor: "El segundo es la fracción $1/31\,556\,925.9747$ del año tropical para 1900 enero 0 a 12 horas de efemérides del tiempo. Esta definición se cambió como sigue en 1968 a la definición actual: "El segundo es la duración de $9\,192\,631\,770$ períodos de radiación correspondientes a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo. Cesio 133. "Recientemente se confirmó en 1997 que esta definición se refiere a un átomo de cesio en reposo a una temperatura de 0 grados Kelvin.

¿Qué es un kilogramo? La definición del kilogramo no ha cambiado desde 1889: se define como la masa de un prototipo de platino iridio depositado en el museo de Sèvres.

¡Notamos que son definiciones operativas!

Muchas unidades derivadas se deducen de sus unidades base. Los fenómenos físicos encontrados en la naturaleza dan lugar a órdenes de tamaño muy diferente, y es necesario usar unidades adecuadas para la medición, en el sentido de que los números serán más convenientes de manejar. Las convenciones internacionales, que repiten la nomenclatura establecida por los revolucionarios franceses en 1795, se mencionan en la siguiente tabla.

Antes de continuar, veamos la historia del sistema métrico. Este sistema de unidades, como veremos, está estrechamente vinculado a la historia y la política. Es el producto de la Revolución francesa, que quería ofrecer "a todos los tiempos y a todos los pueblos, para su mayor beneficio", un sistema metrológico unificado y estable.

- Antiguo régimen

- o Alrededor de 1660: en aras de la unificación, la Royal Society de Londres propone elegir como unidad de longitud la de un péndulo que supera al segundo. Esta idea fue compartida por el francés Jean Picard en 1671, por el holandés Christian Huygens en 1673, luego por el francés La Condamine, el inglés John Miller y el estadounidense Thomas Jefferson.

- o 1670: el padre Gabriel Moulton propone elegir una milésima parte del minuto sexagesimal del meridiano (es decir, $1/1000$ millas náuticas, aproximadamente 1.85 metros) como una unidad de longitud. Esta unidad es un inconveniente porque es demasiado grande. Ella será abandonada.

- o 1672: Richer descubre que el reloj que golpea al segundo es más corto en Cayenne que en París. Esta falta de estabilidad de la norma conduce a su abandono. o 1758: Louis Dupuy sugiere unificar las medidas de longitud y peso en función del peso de un volumen de agua medido en unidades de longitud

- Revolución francesa y 1er Imperio

o 8 de mayo de 1790: a propuesta de Talleyrand, el Constituyente está a favor de crear un sistema de medición estable y unificado. Se constituye una comisión en la Academia de Ciencias (Lagrange, Laplace, Monge, Borda, Lavoisier). La unidad de medida utilizada es la longitud de un péndulo que supera al segundo.

o 26 de marzo de 1791: el principio del péndulo se abandona y se reemplaza por la elección del medidor 40 (el nombre es propuesto por Jean-Charles de Borda (1733-1799)), definido como la parte diez millonésima parte del cuarto del meridiano terrestre. Entonces será necesario abordar la tarea de medir el meridiano. Las diferentes unidades de medida se estandarizan entonces: la unidad de área (es) se define como la de un cuadrado que tiene en el lado un decímetro; la unidad de masa, el kilogramo, corresponde a la de una unidad de volumen (el litro) de agua pura a la temperatura del hielo en fusión, corregida por los efectos de la latitud y la presión.

o 1792: Inicio de la "expedición meridiana", destinada a medir la longitud del meridiano terrestre. Está dirigida por Jean-Baptiste Joseph Delambre (1749-1822) y Pierre François André Méchain (1744-1804). Se decide conectar Dunkerque a Barcelona mediante una serie de triángulos geodésicos identificados mediante miras angulares. Esta tarea se completará en 1799. La precisión obtenida es de 0.2 milímetros.

o 1 de agosto de 1793: Decreto que establece la decimalización de las valoraciones monetarias, medidas de longitud, área, volumen y peso. Esto obliga al abandono del sistema heredado del antiguo régimen, basado en una división por 12.

o 7 de abril de 1795: (ley de 18 de Germinal, año III) organización del sistema métrico y fijación de la nomenclatura actual de las unidades (decímetro) , milímetro, gramo, decigramo, kilogramo,) 9 de junio de 1795: Lenoir construye el primer estándar métrico legal sobre la base de las mediciones hechas por La Caille de la distancia entre el polo y el ecuador.

o 25 de junio de 1795: creación del Bureau des Longitudes en París. o 1799: Reunión en París de la primera conferencia internacional para analizar los resultados de Delambre y Méchain y debatir la cuestión de la adopción universal del sistema métrico. La propuesta es rechazada porque es demasiado "revolucionaria" y "francesa".

o 22 de junio de 1799: depósito en el Archivo Nacional de los prototipos de platino del metro construido por Lenoir sobre la base de los resultados de la expedición de meridianos y kilogramos o 10 de diciembre de 1799: (ley del 19 de Frimaire, año VIII): fijación de las normas finales, segunda definición del medidor (la de la norma de los Archivos Nacionales), y obligación teórica del uso del sistema métrico.

o 4 de noviembre de 1800: Ley que hace del medidor la única unidad de medida oficial; En el mandato de Napoleón Bonaparte, se abandona la nomenclatura basada en los prefijos griegos.

12 de febrero de 1812: según la voluntad de Napoleón, se introducen nuevas unidades de medida con los nombres de los del antiguo régimen "para operaciones ordinarias". • Después de la Revolución Francesa o 1 de enero de 1840: entrada en vigor de la ley del 4 de abril de 1837, que establece definitivamente la obligación de utilizar el sistema métrico o 1875: creación de la Oficina Internacional de Pesos y Medidas en Sèvres o 22

de abril de 1876. depósito de la norma métrica internacional en el Pavillon de Breteuil, en Sèvres, que Francia cede al Comité Internacional de Pesos y Medidas al otorgarle el privilegio de extraterritorialidad.

4.2.4 Instrumentos de medida

L

a medición se realiza por medio de instrumentos, que tienen la doble ventaja de cuantificar los fenómenos (mientras que nuestros cinco sentidos (vista, oído, tacto, gusto, olfato) solo proporcionan indicaciones cualitativas) y permiten el acceso a Objetos que se encuentran más allá de los límites de la percepción humana: el microscopio le permite ver objetos muy pequeños, el contador Geiger para detectar la radiación, etc. La naturaleza del instrumento de medición es doble: es un instrumento concreto, construido, que es la materialización de un instrumento virtual concebido. Las propiedades de estos dos instrumentos difieren debido a las limitaciones tecnológicas (un espejo del telescopio nunca es perfectamente uniforme, nunca se conoce exactamente la masa de la placa de escala, ...) y las simplificaciones teóricas utilizadas para diseñar el instrumento virtual. Por ejemplo, un equilibrio Roberval usado en la Tierra está sujeto a la atracción de la Tierra, y estos elementos pueden deformarse muy levemente. El científico razona sobre el instrumento concebido, que es una idealización. El proceso de medición se basa en conceptos teóricos (fuerza, masa, energía, corriente eléctrica, presión de un gas, ...) y el resultado de la medición, el valor que representa el instrumento real, también se interpreta en el contexto. Teórico por el observador. Dado que las diferencias en el funcionamiento entre el instrumento virtual y el instrumento construido son generalmente pequeñas, las mediciones realizadas son útiles para el trabajo teórico.

Esto lleva a la siguiente reflexión: los instrumentos de medición son "teorías materializadas", según la palabra de Gaston Bachelard. De hecho, los datos en bruto suministrados por el instrumento son interpretados por el experimentador para su uso posterior: la variación de la aguja de un manómetro se interpreta automáticamente como el signo de un cambio de la presión de un gas. Por lo tanto, existe una relación entre dos niveles durante la medición: el nivel de percepción directa (vemos que la aguja del calibre se mueve) y el de la teoría (la presión del gas varía). Este enlace está asegurado por una elaboración teórica que se basa en las teorías científicas que se utilizaron para diseñar el dispositivo de medición. Por lo tanto, la confiabilidad de la medición se rige por la confianza que uno tiene en las teorías que subyacen en el diseño del instrumento de medición. Cuanto más numerosos son los problemas teóricos, menos se puede explotar la medición. En la práctica cotidiana, cuando se utilizan instrumentos de confianza y de uso común, el experimentador realiza esta conversión de datos sin procesar en resultados teóricos de forma automática, casi inconscientemente. Sin embargo, la historia de la ciencia proporciona muchos ejemplos en los que la falta de precisión de los instrumentos de medición condujo a la formulación de conclusiones erróneas. Por ejemplo, el astrónomo danés Tycho Brahe afirmó haber demostrado la falsedad de la teoría heliocéntrica de Nicolas Copernicus. De hecho, si la Tierra gira alrededor del Sol, las estrellas fijas deben tener un paralaje (lo que significa que su posición en el cielo debe variar durante el año). Pero sus observaciones no le permitieron ver este fenómeno, que lo empujó a rechazar el modelo de Copérnico para proponer otro, en el cual los planetas giran alrededor del Sol y el Sol alrededor de la Tierra que está inmóvil. El problema de Brahe era que sobreestimó el efecto de paralaje y que el efecto real era demasiado débil para ser detectado por los lentes astronómicos que tenía. Tomará varios siglos para que se desarrollen instrumentos ópticos lo suficientemente precisos para

medir este fenómeno. Pero las medidas de Tycho Brahé de las trayectorias de los planetas fueron lo suficientemente precisas para permitir que Johannes Kepler (1571-1630) formulara sus tres famosas leyes sobre las órbitas planetarias. Otro ejemplo de la imperfección en las gafas astronómicas es el de las aberraciones ópticas, lo que llevó a Kepler a notar que "las estrellas son cuadradas y de colores brillantes".

Ahora ilustraremos estas reflexiones analizando algunos dispositivos de medición.

4.2.5 Ejemplo 1: La máquina Atwood: medición de masa y fuerzas

Como primer ejemplo, volvamos a la máquina Atwood ya mencionada en la discusión sobre la definición de fuerza y masa. Veremos que este dispositivo, extremadamente simple en términos de tecnología y que utiliza solo una teoría científica "simple" (la mecánica de Newton), resulta de hecho muy complejo en términos de análisis teórico.

Primero dibujemos el diagrama de la máquina y analicemos el funcionamiento de la máquina virtual ideal.

Figura 21: Máquina Virtual Atwood. En negro: los pesos de los sólidos A y B. En azul: las fuerzas de reacción. Los dos sólidos A (de masa m_A) y B (de masa m_B) están conectados por el cable f , de masa cero, que permanece apretado gracias al uso de la polea, y que se supone que transmite las fuerzas sin modificar la Estándar (no es elástico). ¿Qué observaremos? Un observador "ingenuo" dirá que ve que los dos sólidos se mueven, los más pesados tiran de los más ligeros hacia arriba. ¿Es esta declaración realmente satisfactoria? No. Analicemos las fuerzas (descuidamos la fuerza de Arquímedes debido al aire): el sólido A está sujeto a la fuerza de la gravedad y la fuerza ejercida por el cable. De manera similar, el sólido B está sujeto a su peso y la fuerza ejercida por el alambre. Entonces, no podemos decir que el peso de un sólido se aplique al otro: es la tensión del hilo, deducida de la ley de la acción y de la reacción aplicada al otro extremo del hilo, que se aplica al sólido. Así que hicimos uso implícito de la tercera ley de Newton para interpretar nuestra experiencia. La confiabilidad de nuestras conclusiones, por lo tanto, depende de nuestra confianza en esta ley. ¿Es verificable? No, responde Henri Poincaré (1854-1912) (La ciencia y la hipótesis, 1902): no es posible verificar esta ley, que debe tomarse para una definición de la reacción (y como tal, no puede ser incumplido). Nuestra interpretación se basa en la confianza que depositamos en la articulación de los conceptos de la mecánica newtoniana. Continuemos con el análisis: el uso de la máquina de Atwood se basa en la segunda ley de Newton, que une fuerza, masa y aceleración. Lo que se mide es el tiempo que el sólido que se eleva para recorrer una distancia determinada. Deducimos la aceleración asumiendo que es constante durante el movimiento. Y luego usamos la ley de Newton para interpretar el resultado. Como vemos, aquí también, el llamado a la teoría es constitutivo del proceso de medición.

Veamos ahora las diferencias entre máquina real y máquina virtual. Estas diferencias son muy numerosas y no nos contentaremos con enumerar algunas: • Las propiedades mecánicas de los materiales utilizados no se tienen en cuenta: un cable nunca es perfectamente inextensible y sin masa, y además puede tener una cierta rigidez; puede haber fricción en la polea; durante su

movimiento, los sólidos pueden ser disminuidos por la resistencia del aire; la fuerza de Arquímedes no es cero ...

- El peso de un sólido en la superficie de la Tierra depende de la gravedad g en su superficie. Pero la gravedad no es constante en la superficie de la Tierra. Primero, se debe tener en cuenta que la Tierra no es esférica: bajo el efecto de la rotación, toma la forma de un elipsoide aplanado con una diferencia en el radio entre el polo y el ecuador del Orden de 21 kilómetros. La distancia desde un punto en la superficie de la Tierra hasta el centro es variable, lo que induce una variación de la gravedad en función de la latitud⁴¹: 9.78 ms^{-2} en el ecuador contra 9.83 ms^{-2} a los polos (una variación del orden de $5 \cdot 10^{-3} \text{ g}$). La gravedad sentida por un cuerpo pesado, por supuesto, también varía con la altitud en relación con la superficie de la tierra. Entonces, cuando un sólido sube o baja, su peso cambia, lo que no se tiene en cuenta en el análisis teórico. Además, el campo de fuerza producido por la atracción gravitatoria de la tierra no es uniforme, ya que las masas no están distribuidas simétricamente dentro de la corteza y el manto del globo terrestre. También es necesario tener en cuenta la atracción gravitatoria debida a otros objetos celestes, como la Luna y el Sol, que inducen el fenómeno de la marea (incluida la marea terrestre, menos conocida que la marea de los océanos, que eleva y baja la marea). suelo de unos 40 cm). De esta manera, se generan variaciones permanentes del orden de $5 \cdot 10^{-4} \text{ g}$, así como variaciones cíclicas del orden de $3 \cdot 10^{-7} \text{ g}$. Las variaciones también se registraron en escalas de tiempo más grandes que iban de 10^{-8} a 10^{-9} g . Estas variaciones locales de la gravedad están representadas por los geofísicos por la altura del geoide, que es la superficie virtual de la Tierra asociada con la diferencia de gravedad local medida en comparación con la que se obtendría si la Tierra fuera un elipsoide líquido. Densidad uniforme perfecta. Las variaciones de la superficie del geoide van desde -107 metros a + 85,4 metros.

- La medición es una medida de la aceleración, y su precisión, por lo tanto, está limitada por la de nuestro dispositivo para medir la aceleración, en nuestro caso la del tiempo.

Finalmente, tenga en cuenta que al analizar el funcionamiento de la máquina Atwood, usamos lo que Einstein llama el principio de equivalencia. Este principio establece que la masa inercial (es decir, la masa m del cuerpo que aparece en la declaración de la segunda ley de Newton) y la masa gravitacional (el coeficiente m asociado con el cuerpo en la fórmula newtoniana del fuerza de atracción gravitacional) son iguales. Galileo ya supone esta igualdad, ya que está en el origen de su resultado sobre la universalidad de la caída libre⁴⁴. Pero nada en la mecánica de Newton indica que esta igualdad debe ser verificada. Además, durante tres siglos, se han realizado muchos experimentos para corroborar experimentalmente esta hipótesis. Este interés se deriva de la importancia de esto.

La universalidad de la caída libre significa que todos los cuerpos pesados caerían en el mismo movimiento si fueran sometidos a la atracción terrenal en ausencia de cualquier otra fuerza, independientemente de su masa. .

Principio: es una de las bases sobre las cuales se basa la teoría de la relatividad general y es una prueba para los modelos de unificación de las cuatro fuerzas fundamentales (gravedad, fuerza electromagnética, interacción fuerte, interacción débil) desarrolladas por los físicos teóricos. Se han utilizado numerosas técnicas para validar esta igualdad con una precisión notable: ahora se ha probado con éxito con una precisión mayor que en 10¹². Se han implementado cinco tipos de procesos tecnológicos (los resultados se agrupan juntos en la tabla de abajo):

- Experiencias de caída libre. Si es cierto que Galileo nunca ha practicado este experimento por sí mismo, desde entonces se ha realizado varias veces. Las más recientes se han practicado en torres de caída libre en las que se logra un vacío casi perfecto. Los dispositivos de compensación de arrastre se utilizan para reducir los efectos del gas residual.
- Los relojes de alambre. Este procedimiento efectivamente utilizado por Galileo, basado en la propiedad isócrona del péndulo: el período de tiempo de un péndulo depende sólo de la longitud del cable y pesanteur⁴⁵, no la masa del cuerpo es pesado adjunta. Al colocar el péndulo en un plano inclinado muy suave, los efectos de la resistencia aerodinámica debida al aire se reducen considerablemente (porque la velocidad alcanzada es mucho menor que en el caso de caída libre).
- La observación del movimiento de los planetas. Esto es para verificar que el movimiento observado de los planetas y satélites corresponde al predicho por la mecánica newtoniana. Desde la década de 1970, esta técnica ha sido mejorada mediante mediciones muy precisas de la distancia entre la Tierra y la Luna utilizando rayos láser reflejados por espejos colocados en la superficie de la Luna.
- Escalas de torsión. Este dispositivo se ha promovido como uno de los métodos mecánicos más precisas para la medición de pequeñas fuerzas de Coulomb en su 1784 tesis Se utiliza en 1798 por el Inglés físico Henry Cavendish (1731-1810) para la primera medición de la constante G de la ley de gravitación publicada por Newton en 1686. Las escalas de torsión se utilizan siempre en la actualidad para medir la constante de gravitación.
- Mediciones de caída libre realizadas en el espacio en laboratorios satelitales.

4.2.6 Ejemplo 2: La cámara de burbujas: "ver" partículas en movimiento

El segundo ejemplo es el de la cámara de burbujas (detector desarrollado en 1953 por el físico estadounidense Donald Arthur Glaser, Premio Nobel de física en 1960), que permite visualizar las trayectorias de las partículas de la física atómica: átomos, electrones, ... Su principio de funcionamiento es el siguiente: un líquido (a menudo hidrógeno) colocado en una cámara, es comprimido por un pistón de modo que su temperatura es más alta que su punto de ebullición a presión atmosférica, pero más baja que su temperatura de ebullición. Temperatura de ebullición bajo la presión a la que se coloca. Las partículas se pasan a la cámara. Durante su movimiento, interactuarán con las moléculas cercanas a ellas y las ionizarán. Justo después del paso de la partícula a detectar, relaja el pistón (durante aproximadamente 1 ms) y el líquido vuelve a la presión atmosférica. La ebullición comienza alrededor de los iones creados por la partícula. Si iluminamos con un flash y fotografiamos, la trayectoria se materializa mediante una cadena de pequeñas burbujas.

¿Qué observamos? Líneas blancas, más o menos identificables, que se interpretan como las trayectorias de las partículas elementales que se proyectaron en la habitación.

Pero, más exactamente, ¿qué vemos? Partículas en movimiento? No. Observamos una fotografía del líquido contenido en la cámara de burbujas que, debidamente iluminada, muestra la presencia de burbujas. Analicemos las diferentes etapas que hacen posible establecer el vínculo entre el hecho en bruto (vemos una fotografía en color con formas reconocibles) y su interpretación (una partícula ha seguido una trayectoria de este tipo).

El primer paso es establecer el vínculo entre las diferencias de color en la foto y los fenómenos físicos. Las diferencias en el color de la toma están causadas por las variaciones de exposición de las moléculas fotosensibles de la película. Estas variaciones indican que la radiación electromagnética de longitudes de onda variables ha sido emitida por el líquido contenido en la cámara. Estas variaciones se interpretan como el resultado de fluctuaciones en las propiedades ópticas del material en la cámara. Las áreas blancas están asociadas con zonas que contienen gas (las burbujas) y el resto a las regiones ocupadas por el líquido.

El segundo paso es conectar las burbujas y las partículas. Como se dijo anteriormente, las burbujas resultan de la vaporización del líquido, la vaporización que comienza alrededor de los iones. Por lo tanto, aquí se utilizan dos contenidos teóricos: la física del cambio de fase (por qué hay vaporización y por qué alrededor de los iones) y la física de la interacción entre la partícula estudiada y las moléculas del líquido contenido en la cámara. El uso de estos dos corpus teóricos es necesario, y no está justificado por la foto: no "vemos" que las moléculas de hidrógeno pasan al estado de los iones durante una interacción, ni a la vaporización. para realizar (no se puede transmitir más de una fuerza desde el cable a los sólidos en el caso de la máquina Attwood): se supone, al concebir el instrumento virtual, que estos fenómenos estarán presentes.

La cámara de burbujas, por lo tanto, combina química, electromagnetismo y física atómica. Por lo tanto, moviliza un conjunto de teorías, modelos y suposiciones más grandes que la máquina Attwood. Su uso no permite observar.

Partículas directamente en movimiento, pero solo un rastro de su paso: esta es una medida indirecta.

4.2.7 Ejemplo 3: microscopio de túnel: "ver" los átomos

¿Podemos "ver" los átomos, incluso si no se mueven? Sí, con un microscopio de tunelización, cuya invención ganó el Premio Nobel de física a Gerd Binnig y Heinrich Rohrer en 1986. Las bases teóricas involucradas son muy avanzadas (el efecto de túnel pertenece a la mecánica cuántica). Nos limitaremos aquí a dar los principales principios operativos de este instrumento, para ilustrar la gran complejidad teórica que se puede enterrar en la medición.

El microscopio de tunelización (STM, por sus siglas en inglés) utiliza un túnel de electrones entre la muestra y una sonda de punta metálica a medida que se desplaza a través de la superficie de la muestra a una distancia muy corta.

El efecto túnel es una de las predicciones de la mecánica cuántica. En la mecánica clásica, una partícula, que no tiene suficiente energía para superar una barrera de potencial V_0 de altura, permanece bloqueada indefinidamente en el lado de la barrera donde está inicialmente. En la mecánica cuántica, por otro lado, la función de onda asociada con esta misma partícula no es cero en el otro lado de la barrera. Por lo tanto, existe una cierta probabilidad de que esta partícula cruce la barrera, incluso si su energía es menor que V_0 ; Esto se llama el efecto túnel. Todo sucede como si la partícula atravesara un "túnel" a través de la barrera potencial.

Cuando la punta de la sonda viaja por la superficie, los electrones se intercambian formando un túnel entre esta y los átomos de la superficie. La intensidad de la corriente inducida es una función de la distancia entre el átomo de la punta y la de la muestra. Al medir esta corriente, uno alcanza así una medida de esta distancia. Al escanear la superficie, se realiza un mapeo de la superficie de la muestra a la escala atómica. Este principio se ilustra en la siguiente figura:

A continuación se muestra un ejemplo de visualización (átomos de oro sobre una superficie plana). Las regiones amarillas indican las regiones donde la superficie es alta (presencia de un átomo) y las zonas rojas las regiones de baja altitud (vacías entre los átomos). Encontramos la organización de los átomos como se espera (red organizada).

Como en los ejemplos anteriores, la medición es indirecta (no vemos los átomos en el sentido común del término, reconstruimos una representación visual por computadora a partir de mediciones cuantificadas de corrientes eléctricas) y presupone, por parte del observador, el uso de un campo científico muy amplio (mecánica cuántica, electrónica, informática, matemáticas, ...).

4.2.8 Ejemplo 4: Lentes gravitacionales: "ver" objetos distantes

Las gafas ópticas han sido utilizadas durante siglos por los astrónomos para observar objetos cósmicos (planetas, estrellas, galaxias, cúmulos). El principio básico es simple: una lente de vidrio se usa para converger rayos de luz paralelos de fuentes muy distantes en un punto único y bien definido llamado punto focal. La forma convexa de la lente está diseñada para lograr la máxima eficiencia.

La teoría de la relatividad general publicada por Albert Einstein en 1915 predice (lo que Einstein hará explícitamente en 1916) que los rayos de luz son desviados por el campo gravitatorio de los objetos masivos. Esta predicción se verificará en mayo de 1919 mediante dos expediciones (una a Soral en Brasil, la otra en la isla de Príncipe desde África) liderada por Arthur Eddington durante un eclipse total de Sol: cuando el Sol pasa en frente de las estrellas, sus imágenes se mueven en 1.75 segundos de ángulo. Esta propiedad hace que algunos objetos muy masivos (galaxias, estrellas) puedan comportarse como lentes ópticas "naturales" que aumentan el tamaño de los objetos observados y amplifican su brillo. Los astrónomos y los astrofísicos los usan para ver objetos que no podían observar con medios ópticos. Véase "Espejismos gravitacionales", J. Wambsganss, Science Brief 38, 2003.

De hecho, las lentes gravitacionales son uno de los pocos métodos para mapear la materia oscura⁴⁷ en el Universo. También pueden detectar agujeros negros y sondear la estructura interna de los quásares.

La idea de que la luz puede ser sensible al campo gravitatorio no es nueva. Basándose en la teoría corpuscular de la luz de Newton, y atribuyendo así una masa a las partículas de luz que las hacen sensibles a la gravedad, el físico inglés John Mitchell había imaginado en 1783 el concepto de "estrella negra". Este concepto fue luego tratado por Pierre Simon de Laplace bajo el nombre de estrella "occlus". En 1801, el astrónomo y geógrafo alemán Johann Georg von Soldner sugirió que las partículas de luz seguirían la misma trayectoria que las bolas pequeñas y masivas lanzadas a la misma velocidad, pasando cerca del Sol. Sin embargo, después de 1808, cuando Thomas Young demostró que la luz se comportaba como una onda, el patrón de onda iniciado por Christiaan Huygens creció en popularidad y la idea de que la luz podía ser sensible a la gravedad dejó de ser explorada hasta el trabajo de Einstein.

Las lentes gravitacionales tienen algunas diferencias con sus contrapartes convencionales. De hecho, para una lente convencional, los rayos están más desviados que alejados del eje óptico, lo que permite enfocar en un solo punto. Para una lente gravitacional, los rayos más alejados

del eje son los menos desviados. Como resultado, el enfoque se produce en una línea o superficie y no en un punto. En una lente de vidrio convencional, la desviación depende de la longitud de onda de la onda de luz. Esto se debe al hecho de que la desviación proviene de la ralentización de la luz en el cristal, y que esta desaceleración depende de la longitud de onda. Con una lente gravitacional, todas las longitudes de onda se desvían de la misma manera, ya que la luz se propaga en el vacío. Los cuatro efectos principales inducidos por lentes gravitacionales, a veces llamados espejismos gravitacionales por analogía con espejismos ópticos "ordinarios", son:

- Cambio aparente de posición de los objetos
- Ampliación: ampliaciones de hasta 100 (¡pero también ampliaciones negativas!)
- Deformación de los objetos, que a menudo se extienden a lo largo de un círculo centrado en la masa que se desvía
- La multiplicación de la imagen de los objetos (para las lentes gravitacionales más potentes).

4.3 La observación no es neutral.

Las discusiones y los ejemplos anteriores muestran que la observación no es neutral, por dos razones.

En primer lugar, podemos decir que los hechos están "cargados de teoría": el observador solo puede captar en los hechos lo que su marco conceptual teórico le permite identificar, reconocer e interpretar: la máquina Atwood no nos enseña nada si no sabemos nada acerca de la mecánica newtoniana y los conceptos de fuerza, masa y aceleración nos son desconocidos. Todo lo que veríamos es un conjunto de cables, poleas y sólidos que se moverían en ciertas condiciones. Esto es lo que Auguste Comte (1798-1857) dice cuando escribe en su *Cours de philosophie positive*: "Si, por un lado, toda teoría positiva debe necesariamente basarse en observaciones, es igualmente sensata, por otro lado, Dejando de lado, que para participar en la observación, nuestra mente necesita algo de teoría. Si, al contemplar los fenómenos, no los vinculamos inmediatamente a unos pocos principios, no solo nos sería imposible combinar estas observaciones aisladas y, en consecuencia, extraer algún fruto de ellas, sino que seríamos totalmente incapaces de retenerlas; y, la mayoría de las veces, los hechos pasarían inadvertidos ante nuestros ojos. Más adelante, agrega: "En cualquier orden de fenómenos puede ser, incluso hacia el más simple, ninguna observación real es posible en la medida en que originalmente está dirigida y finalmente interpretada por cualquier teoría. En este pasaje, uno debe entender la observación neutral cuando Comte escribe la observación. La observación y la experimentación requieren la existencia de un marco teórico para poder llevarse a cabo, es decir, para que se pueda establecer el vínculo entre las sensaciones (visual en los casos estudiados anteriormente) y conceptos científicos. Además, las observaciones siempre se hacen en el contexto de la investigación científica y, por lo tanto, están orientadas: de alguna manera, podemos decir que solo encontramos lo que estamos buscando.

Ejemplos de descubrimiento accidental, como el de los rayos X por el físico alemán Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), quien recibió el Premio Nobel de física por eso en 1901, muestra que el descubrimiento accidental no significa "descubrimiento sin marco teórico". En noviembre de 1895, Röntgen realizó experimentos en tubos de rayos catódicos. Para no ser molestado por la luz producida por el tubo, lo cubre con papel opaco negro. El 8 de noviembre, al alimentar su circuito de alto voltaje, observa por casualidad que una pantalla colocada cerca del tubo se vuelve fluorescente. Entonces comienza una serie de experimentos. No conociendo la naturaleza de estos rayos misteriosos, los llama "rayos X".

Además de su aspecto divertido, la anécdota muestra que, si el descubrimiento es accidental, solo podría tener lugar porque Röntgen poseía las herramientas teóricas necesarias para identificar que algo estaba pasando y que merecía ser analizado. En este caso, no encontramos lo que buscamos, observamos lo que pensamos que no veríamos (el tubo se hizo opaco, no podría iluminar la pantalla si solo se emitieran los rayos visibles).

Las mediciones cuantitativas se realizan a partir de instrumentos que también están "cargados de teorías". Por lo tanto, la medida solo es posible si se dispone de un marco teórico que permita la interpretación de los hechos. Medir por tanto es movilizar teorías a través de los instrumentos.

La segunda razón por la que podemos decir que la medición no es neutral es que la medición está interrumpiendo el objeto que queremos medir. Cualquier medición se basa en la cuantificación de una diferencia, una variación, y esto es a lo que reaccionan nuestros sentidos: diferencia en la exposición a la luz en las células de la retina, diferencia de presión en la piel para el tacto, ... La máquina Attwood funciona gracias a las diferencias de las fuerzas ejercidas, la cámara de burbujas en las diferencias de exposición de las moléculas fotosensibles de la película, el microscopio de túnel en las diferencias de intensidad eléctrica. Para medir esta diferencia, los métodos de medición producen una perturbación del objeto sometido a la medición: los átomos de la muestra se someten al efecto de tunelización, las partículas se hacen para interactuar con los átomos de hidrógeno en el Burbujas, suspendemos el sólido y lo ponemos en movimiento con la máquina Attwood. Estas perturbaciones siempre afectan el objeto a medir. Por lo tanto, solo medimos las propiedades de un objeto que interactúa, nunca de un objeto aislado en reposo. Esto es intrínseco, ya que medir es la interacción entre el objeto a medir y el instrumento de medición. Pero, ¿se puede esperar obtener información sobre el objeto "aislado"?: sí, si la perturbación inducida por la medición es débil en intensidad frente a las propiedades del objeto cuando no está sujeto a la interrupción. ¿Podemos esperar, gracias al progreso tecnológico, desarrollar un instrumento perfectamente no intrusivo? No: la relación teórica debido a la físico alemán Werner Karl Heisenberg (1901-1976, Premio Nobel de Física 1932), llamado el principio de incertidumbre o principio de indeterminación muestra que hay una resolución de medición del umbral intrínseca debido a este disturbio Los valores exactos de todas las cantidades físicas asociadas con un sistema no se pueden acceder al mismo tiempo. Por lo tanto, no puede haber una medida neutral (ver Capítulo 11).

4.4 Percepción y fiabilidad de las observaciones.

Los experimentos, incluso con instrumentos que se utilizan para cuantificar y medir, se basan en nuestra percepción sensorial de las señales recibidas y la interpretación que nuestro cerebro hace de ellas. Por lo tanto, es necesario cuestionar las posibles fuentes de error o sesgo introducidas por nuestros órganos sensoriales y nuestro cerebro.

4.4.1 Recepción y percepción

Primero debemos distinguir entre la recepción de señales externas (luz, ondas de presión asociadas con el sonido, moléculas correspondientes al gusto, ...), que es un mecanismo estrictamente físico y fisiológico, de percepción, que es la forma en que nuestra mente interpreta los mensajes recibidos. La observación científica se basa, por supuesto, en nuestra percepción del mundo exterior, por lo que revisaremos brevemente los principales hallazgos aceptados con respecto a la percepción humana. Antes de eso, recordemos los límites fisiológicos de la recepción para la vista y el oído. Las limitaciones (en términos de longitud de onda y / o frecuencia e intensidad) para la vista y el oído en humanos "normales" se ilustran en la figura y la tabla a continuación.

La percepción es un fenómeno complejo, cuyo estudio involucra muchas disciplinas: psicología, psicofisiología, prácticas estéticas, lingüística, ... Cada disciplina comprende el fenómeno de la percepción desde un ángulo diferente.

Numerosos trabajos de psicología experimental se han dedicado al estudio de la percepción del espacio y el tiempo. Un primer resultado importante es que es injusto decir que percibimos el espacio y el tiempo. De hecho, no percibimos el tiempo, sino eventos que tienen una cierta duración y se suceden entre sí en un cierto orden. De manera similar, no percibimos el espacio sino objetos que todos tienen cierta extensión, y una relación de posición y orientación entre ellos. Hasta la década de 1960, era común tratar por separado la percepción del espacio y la del tiempo. Desde entonces, los enfoques "modernos" apuntan a una descripción global centrada en los procesos mentales que hacen posible procesar la información transmitida al cerebro, cualquiera sea su origen, entendiendo la percepción como un fenómeno esencialmente psicológico.

En cuanto a la percepción del tiempo, ahora hay muchos resultados sobre la percepción de la duración y la de la sucesión. Por ejemplo, la estimulación auditiva se considera más larga que la estimulación visual, y la estimulación intensa se percibe como más larga que la estimulación de menor intensidad. Una consecuencia es que los intervalos cortos tienden a ser subestimados, mientras que los intervalos largos se sobreestiman. Los estudios de percepción de sucesión se han centrado en varios parámetros: umbrales de combinación de eventos, simultaneidad de eventos e intervalos suficientes para detectar el orden de los eventos.

Las dos preguntas más discutidas sobre la percepción del espacio son la percepción de las distancias y el tamaño de un objeto. Para percibir distancias (o más precisamente para estimarlas), nuestro cerebro utiliza tres tipos de índices:

- Señales monoculares estáticas. Algunos ejemplos: la presencia en el campo visual de objetos familiares cuyo tamaño se conoce, lo que permite comparaciones; las sombras ; la interposición de los objetos, el objeto de máscara está más cerca que el objeto

enmascarado; perspectiva geométrica; La textura también es muy importante, ya que solo percibimos superficies (¡la retina es una superficie bidimensional!) cuyas variaciones de textura permiten apreciar la inclinación y la forma de un objeto.

- Índices monoculares dinámicos, como el paralaje del movimiento (la velocidad angular percibida de un objeto en movimiento depende de su distancia).
- Los índices binoculares, que provienen de las diferencias registradas por los dos ojos. La percepción auditiva es también un medio de localización en el espacio. Luego, el cerebro utiliza las diferencias en intensidad y el desplazamiento entre las señales percibidas por cada oído para reconstruir un diagrama tridimensional.

Una pregunta abierta es cómo el cerebro combina diferentes pistas y percepciones para construir una imagen global del mundo que lo rodea. Esta cuestión de los patrones mentales que son la base de esta reconstrucción es crucial, ya que son estos patrones los que gobiernan nuestra percepción del mundo y, en el contexto que nos interesa, nuestra capacidad para recopilar información a través de la observación. Estos esquemas están activos: además de la reconstrucción de la información, estructuran la información recibida al jerarquizar las señales. Actúan como filtros distorsionados. Este fenómeno es bien conocido en psicoacústica por el estudio de la percepción de sonidos y estructuras rítmicas.

Muchas preguntas surgen sobre estos patrones mentales. Una pregunta conocida es la de su confiabilidad, que no es total. Esto se ilustra mediante ilusiones sensoriales, las más conocidas son las ilusiones ópticas (consulte las figuras a continuación).

Pero también hay ilusiones auditivas⁵¹, ilusiones olfativas ... Cada uno de los cinco sentidos puede inducir ilusiones. Otra pregunta es la de la naturaleza de estos esquemas mentales: ¿son innatos o adquiridos por la experiencia? Los resultados de los experimentos realizados en niños de pocos minutos de edad y en mamíferos muestran que desde el nacimiento existen estos patrones, pero que la experiencia adquirida a lo largo de los años les permitirá ser refinados y modificados. También se estudian los aspectos fisiológicos y anatómicos del cerebro, que contienen alrededor de 10¹¹ neuronas. Por ejemplo, hoy en día parece que el hemisferio izquierdo del cerebro está especializado para el análisis de duraciones y sucesiones, y el hemisferio derecho está involucrado principalmente en la percepción del espacio. El hemisferio derecho también es superior para el manejo de conceptos geométricos, esta superioridad creciente con la complejidad de la geometría (la geometría "más simple" para el cerebro que parece ser la geometría euclidiana, ver sección 4.4.2).

4.4.2 Percepción del espacio y la geometría (s)

También podemos ver cosas que violan nuestra concepción de la realidad, como lo muestra la imagen "imposible" a continuación. Aunque se percibe, y no cae bajo el dominio de la ilusión óptica, esta imagen es "impactante" porque no corresponde a nuestra intuición de lo que es posible en nuestro espacio tridimensional.

Nuestra percepción intuitiva del espacio parece estar vinculada a la geometría euclidiana⁵². O, más precisamente, la geometría definida por Euclid en sus Elementos⁵³ procede de nuestra percepción visual del mundo. Esto es lo que dijo el matemático alemán David Hilbert cuando escribió, en su artículo sobre Los fundamentos de la geometría (1899): "Este problema [la geometría] es el del análisis de nuestra intuición del espacio". . Para entender esto, debe recordarse que la demostración matemática, desde el surgimiento de las matemáticas griegas hasta el desarrollo del análisis, se basó en la construcción de figuras geométricas en un plano para utilizando una regla y una brújula. Por lo tanto, la demostración estaba subordinada a la posibilidad de dibujar y ver objetos en una figura. La geometría euclidiana está, pues, subordinada a la estructura del espacio, tal como la percibimos directamente sin ningún instrumento de medición.

¿Existen otras geometrías, que no serían euclidianas, y son útiles para describir el universo? La respuesta a ambas preguntas es sí. En primer lugar, recordemos que la geometría euclidiana se apoya en los cinco postulados siguientes:

5 Postulados de la geometría euclidiana

- 1. Se puede trazar un segmento de línea uniendo cualquiera de los dos puntos.**
- 2. Un segmento de línea puede extenderse indefinidamente en línea recta.**
- 3. Dado cualquier segmento de línea, se puede dibujar un círculo tomando este segmento como el radio y uno de sus extremos como el centro.**
- 4. Todos los ángulos rectos son congruentes.**
- 5. Si dos líneas se intersecan con una tercera, de modo que la suma de los ángulos interiores de un lado es estrictamente menor que dos ángulos rectos, entonces estas dos líneas necesariamente se intersecan en ese lado.**

El quinto postulado se puede reformular en la forma del famoso postulado de los paralelos:

Postulado de los paralelos euclidianos Dejemos que una línea d y un punto p no pertenezcan a d . Existe una línea recta única paralela a d en el plano generado por d y p y que pasa a través de p .

Es la violación del postulado de los paralelos lo que sin duda es el personaje más espectacular de las geometrías no euclidianas, ya que el dibujo en una hoja de papel no parece indicar ninguna otra solución posible que la de Euclides.

El desarrollo de nuevas geometrías requiere el uso de herramientas matemáticas más sofisticadas que la demostración por construcción de figuras. Después del desarrollo de estas herramientas, bajo el ímpetu de científicos como René Descartes y Pierre Fermat, es posible abstraer las percepciones sensoriales para construir geometrías. Estas son las nuevas herramientas que permitirán decidirlo puede resolver utilizando una regla y compás los tres problemas principales de la geometría euclidiana son: la cuadratura del círculo, la trisección del ángulo y la duplicación del cubo. Pero tomará mucho tiempo para que surjan nuevas geometrías,

aunque los topógrafos han estado preocupados por la complejidad del quinto postulado de Euclides durante siglos. Ha habido varios intentos de intentar deducirlo de los otros postulados, es decir, hacer un teorema de ello. Así, en 1733, Giovanni Saccheri, al intentar probar la geometría euclidiana, sentó las bases de lo que luego sería la geometría elíptica. Casi un siglo después, a principios del siglo XIX, Carl Friedrich Gauss (1777-1855) cuestiona el postulado de los paralelos. Escribió en 1813: "Para la teoría de los paralelos, no somos más avanzados que Euclides, es una vergüenza para las matemáticas". Parece que Gauss adquirió a partir de 1817 la convicción de que es posible desarrollar geometrías no euclidianas, pero en este momento no publicará ningún trabajo sobre el tema. Entre 1820 y 1823, el matemático húngaro Janos Bolyai (1802-1860) trabaja en este tema. Será finalizar este trabajo en 1826, y escribió una tesis sobre el tema publicado en 1832. Hay no demuestra formalmente la existencia de una geometría no euclidiana, pero una fuerte presunción se adquiere. Independientemente, el ruso Nicolai Lobatchevsky (1792-1856) está por delante de Bolyai en la descripción de una geometría similar al publicar su trabajo en el periódico ruso El mensajero de Kazan en 1829 (i pero el sorteo estará disponible solo en 1831!), Luego en alemán en 1840. el trabajo de Bolyai y Lobachevsky, que abren el camino a las llamadas geometrías hiperbólicas, sin embargo, tendrá poco eco en el momento.

Los nuevos desarrollos se harán entonces por el matemático alemán Bernhard Riemann (1826-1866), que establece la existencia de alrededor de 1854 otra familia de geometrías no euclidianas, geometrías elípticas. Este resultado proviene de su trabajo de tesis, realizado bajo la dirección de Gauss. Aquí nuevamente, el impacto en ese momento es débil, y la tesis se publicó solo dos años después de su muerte.

Pero la situación se ha confundido, y la posibilidad de violar el quinto postulado de Euclides es controvertida. Una teoría unificada de diferentes geometrías será propuesto en 1872 por Felix Klein (1848-1925) durante su discurso de toma de posesión de su nombramiento como profesor de la Universidad de Erlangen. El trabajo sobre la generalización de la geometría será entonces objeto de un esfuerzo continuo. Pero hay que señalar que la geometría euclidiana sigue despertando interés. Así, David Hilbert publicó en 1899 sus Fundamentos de la geometría, en los que propone reconstruir la geometría euclidiana mediante una nueva base axiomática (que contiene 21 axiomas) y respetando los tres criterios a continuación⁵⁴:

- Para ser mínimo: ningún axioma debe poder sustraerse sin ser, por lo tanto, posibles otras geometrías que la de Euclide.
- Para estar completo: una demostración debe poder existir para mostrar la veracidad o no de cualquier propuesta.
- Al ser intrínseco: como el de Euclides, la base axiomática no debe usar otras nociones matemáticas, como los números reales.

¿Por qué romper con la geometría euclidiana para describir el mundo que nos rodea? La geometría euclidiana está íntimamente relacionada con la mecánica newtoniana, y muchos de estos desarrollos están inspirados en la mecánica de sólidos rígidos. Esto es lo que expresa el matemático Bela Kerekjarto cuando escribe: "Las bases empíricas de la geometría son proporcionadas por el examen de los movimientos de cuerpos rígidos". Durante todo el período durante el cual la mecánica newtoniana fue el modelo dominante en La física (es decir, hasta finales del siglo XIX), la

La geometría euclidiana satisfacía las necesidades de los físicos. El principal problema experimentado durante este período fue el de los geógrafos que intentaron establecer mapas precisos de la superficie de la Tierra: pasando de la geometría elíptica (la Tierra real) a la geometría euclidiana (el plan en el papel), es imposible Mantener distancias y ángulos⁵⁵. El uso de la geometría no euclidiana en física despegará con la teoría de la relatividad general de Einstein (1915), que establece la correspondencia entre el movimiento acelerado en un campo potencial a lo largo de una trayectoria curva en un espacio Euclides y un movimiento libre a lo largo de una línea geodésica en un espacio no euclidiano. Por lo tanto, el campo gravitatorio está asociado con una curvatura del espacio-tiempo (ver también la Sección 4.2.8). Cerca de un objeto masivo, esta curvatura es tal que el universo está descrito localmente por una geometría elíptica. La expansión del universo desde el Big Bang hace que en regiones sin importar la geometría del espacio-tiempo corresponda a un modelo hiperbólico. Finalmente, la invariancia de la velocidad de la luz en el vacío y la regla de composición de la velocidad resultante (la transformación de Lorentz) requiere el uso de una geometría hiperbólica.

Para la física moderna, el uso de un tipo particular de geometría está relacionado con la escala de los fenómenos en estudio. Hay cuatro niveles⁵⁶:

1. escala microscópica (<10-18 metros): este es el dominio de las teorías especulativas de la unificación y la gravedad cuántica. Estas escalas nunca se han observado hasta la fecha (los medios actuales no permiten el acceso a escalas menores de 10 a 18 metros). Se estima que las fluctuaciones cuánticas de la geometría espacio-temporal son del orden de la longitud de Planck ($2,10^{-35}$ metros). Las diferentes teorías (cadenas, supercórdenes, branas, teoría M, geometría cuántica ...) también muestran hasta más de 10 dimensiones espaciales adicionales. Estas dimensiones permanecerían invisibles en nuestra escala porque el universo se "plegaría" en una escala muy pequeña.
2. Escala local (entre 10-18 y 10¹¹ metros): los efectos de la curvatura del universo son a menudo despreciables. La geometría euclidiana es un buen modelo. Este es el campo de aplicación de la mecánica, la física clásica y la relatividad especial.
3. Escala macroscópica (entre 10¹¹ y 10²⁵ metros): los efectos de curvatura son importantes. Por lo tanto, debemos utilizar una geometría no euclidiana que describa las variaciones locales de curvatura del universo. Los campos de aplicación son la cosmología y la teoría de la relatividad general.
4. Escala global (todo el universo): este es el dominio de la topología cósmica. Nos interesa no solo la curvatura del universo, sino también su forma (este es el dominio de la topología), que puede ser muy complicado. Se utiliza geometría no euclidiana.

5 El valor de las ciencias empíricas.

Este capítulo aborda la cuestión del valor de las ciencias empíricas. Podemos distinguir tres niveles de reflexión.

La primera es la definición de valor: ¿cuál es el valor de la ciencia empírica? Se pueden prever múltiples criterios: veracidad, eficiencia predictiva, utilidad, ... Hoy existe un consenso sobre la idea de que una teoría científica, para ser válida, debe ser al menos capaz de explicar. Hechos observados dentro de su dominio. El valor dado proviene del vínculo íntimo que se supone que las teorías deben mantener con la realidad, un vínculo garantizado por la concordancia con los hechos conocidos.

El segundo nivel es la prueba de teorías y afirmaciones científicas. ¿Cómo, según qué método y con qué medios prácticos, ponen a prueba su validez?

El tercer y último nivel, más general, es el de los criterios de científicidad. ¿Qué es una teoría científica? Esta pregunta hace uso de los dos anteriores, ya que, para poder decir de una teoría que es científica, es necesario haber decidido qué hace que el valor de una ciencia y cómo probar si la teoría considerada es elegible.

5.1 Preliminar 1: ¿Cuál es la verdad?

La noción de verdad es muy valorada en la cultura occidental moderna y, a menudo, contribuye al valor otorgado a la ciencia: la ciencia a menudo se considera el ejemplo estándar de conocimiento "verdadero" y, por lo tanto, es valiosa. Antes de discutir la cuestión del valor de las ciencias empíricas, debemos revisar los diferentes significados del término verdad.

Empecemos por aclarar las diferencias entre lo verdadero, lo real y lo justo. Lo real (a diferencia de lo irreal) se refiere a las cosas que existen. Lo verdadero (a diferencia de lo falso) concierne a nuestras declaraciones que tratan con cosas que existen. Finalmente, los justos (a diferencia de los injustos) califican nuestras afirmaciones sobre lo que debe ser. Finalmente, tenga en cuenta que lo bueno y lo malo, que son juicios de valor moral, no son relevantes para caracterizar las afirmaciones científicas.

Pero ¿cuál es la verdad? Hay tres concepciones principales de la verdad.

- La verdad como la correspondencia entre una expresión y una realidad extralingüística (es decir, una realidad que existe independientemente de la expresión): es la verdad-correspondencia, todavía llamada verdad material o verdad objetiva. Un pensamiento expresado a través de una expresión es verdadero si el contenido de la expresión (objetos, relaciones, ...) existe en la realidad. Esta es la conformidad de una afirmación con la realidad que describe. Esta definición significa que

El verdadero o falso carácter de un enunciado es una propiedad en sí misma de ese enunciado. Una expresión del escolasticismo medieval lo define como "La verdad es la adecuación de la

cosa y el intelecto. Esta definición, que domina el pensamiento científico en las ciencias empíricas, puede entenderse de dos maneras.

- "La verdad es la adecuación del intelecto a la cosa": el intelecto debe ajustarse a los hechos percibidos que son el reflejo de la realidad. Por lo tanto, la verdad será establecida por la observación "neutral". o "La verdad es la adecuación de la cosa al intelecto": en este caso, la mente hace suposiciones y cuestiona la realidad a través de la experimentación, que es una manipulación de la realidad.
- La verdad como coherencia: es coherencia de la verdad, o verdad formal. La coherencia de la verdad no se refiere a una realidad extra-lingüística: una teoría es verdadera si está libre de contradicciones lógicas, es decir, si ninguna de sus afirmaciones (leyes, modelo, hechos previstos) contradice a otro. Esta es la definición de verdad usada en la ciencia formal: matemáticas, lógica.
- La verdad como consenso: es verdad-consenso. En esta última aceptación, una proposición es verdadera si obtiene el consenso dentro de la comunidad científica. Un argumento a su favor es que el consenso, si existe, debe haberse establecido por buenas razones. Esta definición, sin embargo, no es reconocida como aceptable por la gran mayoría de los científicos, porque la noción de consenso es muy vaga y difícil de verificar (¿cómo sondear a toda una comunidad?).

¿Cuál es la definición utilizada hoy en día en las ciencias empíricas? Correspondencia-verdad es la definición dominante, pero no excluye la verdadera coherencia, especialmente para las ciencias empíricas fuertemente matematizadas (mecánica, física). Estas ciencias tienen marcos conceptuales basados en las matemáticas (cálculo diferencial, geometría, ...) y sus afirmaciones a menudo se prestan a la verificación formal. Sin embargo, esta consistencia interna se considera necesaria, pero no suficiente.

5.2 Preliminar 2: un poco de lógica

5.2.1 Los 3 axiomas de Aristóteles.

Verdadero o falso ? Esta es la pregunta que nos viene a la mente cuando pensamos en una hipótesis científica. Después del uso de un procedimiento adecuado, esperamos poder responder a esta pregunta y concluir que la hipótesis es verdadera o falsa, y ciertamente no ambas al mismo tiempo ni verdaderas ni falsas. Pero, ¿de dónde viene esta idea de que una hipótesis sea verdadera o falsa? ¿Sería posible que una propuesta fuera otra cosa? Sí, en teoría.

Nuestra forma de pensar diaria se basa en una lógica, que es la que formalizó Aristóteles hace casi 2300 años, y que se basa en los tres axiomas siguientes:

Los 3 axiomas de la lógica de Aristóteles 1. Axioma de identidad: A es A, y eso para siempre. 2. Axioma de no contradicción: no es posible negar y afirmar al mismo tiempo. Lo que simbólicamente se expresa como: B no puede ser tanto A como no A 3. Axioma del tercero excluido: Todo es afirmado o negado. B es o A o no A.

Estos tres axiomas forman la base de nuestro razonamiento, y eso desde que el modelo conceptual de la ciencia occidental se formó en la antigua Grecia. ¿Son "verdaderas"? La pregunta no tiene sentido. Son axiomas, por lo que las cosas se piden a priori, desde las cuales basamos una lógica. ¿Hay otras soluciones? Sí. Los lógicos han desarrollado lógicas no estándar, basadas en otros axiomas, por ejemplo, reemplazando el axioma del tercero excluido por el del tercero incluido. Pero, tranquilizándonos, el estudio de las ciencias empíricas "simples" (mecánica newtoniana, ...) tal como existen hoy en día no requiere la llamada a estas otras lógicas. Es la lógica aristotélica que se utilizará en el resto de nuestro razonamiento. A la inversa, una teoría física radicalmente diferente, como la mecánica cuántica, que manipula objetos básicos correspondientes a densidades de probabilidad y objetos no deterministas, ha conducido a análisis lógicos muy diferentes. Estos desarrollos no serán discutidos aquí. Algunos de sus aspectos se mencionan en el capítulo 11. Finalmente, notemos que los epistemólogos contemporáneos como el francés Jean-Louis Le Moigne⁵⁷, para fundar una epistemología de las ciencias de la complejidad, como la biología, se proponen revisar las axiomáticas básicas de Aristóteles.

5.2.2 Tarski: correspondencia, verdad, lenguaje y meta-lenguaje

Una pregunta central en este capítulo es la correspondencia de la verdad con los hechos. De acuerdo con la correspondencia de verdad, una afirmación es verdadera si su contenido empírico está de acuerdo con los hechos. Surge entonces una dificultad, que es la de las paradojas lógicas autorreferenciales. Un ejemplo común es el de una hoja de papel en la que uno escribe en el frente "la oración escrita en el otro lado es verdadera" y en el reverso "la oración escrita en la otra fase es falsa". Llegamos a la conclusión paradójica (teniendo en cuenta el axioma del tercero excluido) de que cada proposición es verdadera y falsa. La correspondencia con los hechos no garantiza la validez lógica de una declaración de observación. La verdad de la correspondencia no parece inducir una coherencia real a priori. ¿Cómo garantizar esto? El lógico polaco Alfred Tarski (1902-1983) demostró que es posible evitar estas paradojas en un sistema lingüístico dado. Para esto, es necesario distinguir varios niveles lógicos del lenguaje:

También podemos identificar un meta-metalenguaje para analizar el meta-lenguaje, y así sucesivamente. Tarski ha demostrado que la paradoja no existe si consideramos que las dos oraciones escritas en la hoja de papel se encuentran en el mismo nivel (el lenguaje del objeto). La paradoja desaparece si los colocamos en dos niveles diferentes: uno en el nivel del lenguaje de objetos y el otro en el nivel del meta-lenguaje. Ya no hay un bucle autorreferencial. Un resultado fundamental de la teoría de la correspondencia de Tarski es que, para hablar de la verdad de las expresiones de este lenguaje, es aconsejable utilizar un meta-lenguaje. Gracias a este enfoque, Tarski ha logrado desarrollar sistemáticamente una teoría de la correspondencia de la verdad con los hechos para todas las expresiones del lenguaje de objetos. Demostró que

es posible evitar paradojas para declaraciones simples como "la nieve es blanca" al dar un significado matemático a la satisfacción de este tipo de declaración. A partir de esta teoría de la satisfacción para el objeto-lenguaje, fue capaz de extenderla al meta-lenguaje (y niveles más altos), obteniendo así una definición recursiva de la verdad. Mientras Tarski negó a su teoría cualquier implicación epistemológica, el epistemólogo Karl Popper ve un resultado muy importante. Escribe que Tarski rehabilitó "la teoría de la verdad objetiva o absoluta como correspondencia, que se había vuelto sospechosa. De hecho, ha afirmado el uso libre de la noción intuitiva de verdad como acuerdo con los hechos. Para Popper, la teoría de Tarski hace posible usar la correspondencia de verdad como un criterio de verdad para las ciencias empíricas. Para otros epistemólogos, la conclusión de Popper es exquisitamente optimista, porque la prueba de Tarski trata solo con lenguajes de objetos mucho más simples que los lenguajes reales.

5.2.3 Gödel: verdad, demostrabilidad e incompletitud

¿Se puede demostrar alguna proposición matemática verdadera en un sistema axiomático? La respuesta (negativa) a esta pregunta es la principal contribución del lógico y matemático Kurt Gödel (1906-1978) a las matemáticas del siglo XX. Al inventar una manera de superar la barrera entre los diferentes niveles de lenguaje de Tarski, logró demostrar en 1931 su famoso teorema de incompletitud que se puede afirmar de una manera no técnica de la siguiente manera:

Teorema de incompleto de Gödel (1931) Cualquier teoría no contradictoria axiomatizada suficientemente poderosa (es decir, capaz de expresar aritmética) es incompleta.

Esto significa que todas las proposiciones verdaderas de tales teorías (incluida la aritmética) no se pueden demostrar en un solo sistema formal: además de las proposiciones que pueden mostrarse como verdaderas o falsas, existen proposiciones indecidibles. Lo que no se puede decidir. Es importante recordar que la indecisión no está relacionada con la dificultad de la demostración, sino con el hecho de que esta demostración es imposible con la teoría. Este resultado es considerado uno de los mayores avances matemáticos hasta la fecha. Basado en el trabajo de Gödel, el lógico estadounidense Alonzo Church (1903-1995) demostró en 1936 el teorema que lleva su nombre y da una respuesta negativa al problema de la decisión tomada por David Hilbert (1862-1943) en su famoso Programa de refundación de las matemáticas: "Un problema matemático dado debe ser necesariamente capaz de admitir una solución exacta, ya sea en forma de una respuesta directa a la pregunta formulada, o por la demostración de su insolubilidad y el fracaso inevitable que está vinculado a ella. ". Hilbert se equivocó: hay proposiciones verdaderas indecidibles. El teorema de Gödel también se puede expresar en las siguientes formas:

Formas alternativas del teorema de incompletitud de Gödel • Las matemáticas son inagotables: no se pueden completar. • Cualquier teoría formal y no contradictoria de las matemáticas necesariamente contiene proposiciones indecidibles. Ningún sistema formal de matemáticas (incluyendo al menos la teoría de los números naturales) puede ser tanto contradictorio como completo.

Una consecuencia de este teorema, declarado por Tarski en 1933, es que es imposible definir objetivamente el concepto de una proposición verdadera en aritmética, en el sentido de que las proposiciones pueden ser verdaderas sin ser probadas.

La presencia de indecidibles también ha sido ilustrada de manera muy sorprendente por el matemático Gregory Chaitin, quien escribió en 1987 una ecuación indecidible. Esta ecuación tiene coeficientes de enteros y depende de un parámetro n y de ... 12 000 variables. Solo involucra operaciones aritméticas y poderes. El problema es saber, para cada valor de n , si esta ecuación tiene un número finito o infinito de soluciones enteras. Se muestra que responder a esta pregunta escapa a cualquier sistema formal y no contradictorio.

Estos resultados muestran que la noción de coherencia de la verdad es mucho más compleja de lo que sugiere un análisis "ingenuo". La teoría de Gödel no tiene una repercusión directa en la noción de correspondencia de verdad para las ciencias empíricas, pero muestra que la noción de verdad no está necesariamente asociada con la demostrabilidad.

5.3 ¿Es posible ver la ciudad en los hechos?

Las ciencias empíricas tienen una conexión especial con los hechos. De hecho, estos aparecen en los extremos del proceso de reflexión: las siguientes son las hipótesis que luego se validan mediante un paso de verificación basada en una prueba de concordancia entre los hechos y las hipótesis. Se estima que el valor de los valores empíricos es mayor que el de una realidad extra-lingüística, por lo tanto, no sus puras ficciones. La señal del valor de la ciudad está, por lo tanto, subordinada a las preguntas fundamentales: ¿cuál es la naturaleza de los hechos? ¿Cuál es la conexión entre los hechos y la teoría?

5.3.1 Carnap y empirismo lógico.

La primitiva posición filosófica con respecto a la referencia de la fundación de la sobriedad de los hechos es la llamada empirismo lógico, o positivismo lógico y, a veces, neopositivismo. Esta tesis, nacida en los años 1920-1930 en Europa e ilustrada principalmente por los trabajos realizados en Viena (el círculo de Viena⁶¹) y Berlín, contó entre los principales defensores al lógico y epistemólogo Rudolf Carnap (1891-1970). Para los defensores del empirismo lógico,

El criterio de la ciencia del empirismo lógico es científico, lo que es verificable (verificacionismo de llama), es verificable lo que puede estar relacionado con las percepciones compartidas e indiscutibles.

Este criterio de científicidad, basado en la verdad-correspondencia, mantiene el objeto de establecer una clara demarcación entre la ciencia y la no ciencia. Los empiristas lógicos van más allá, argumentando que el único conocimiento que merece este es el conocimiento científico.

Para incluir las implicaciones de esta definición, volvamos a tener la distinción entre declaración de observación, declaración teórica y metafísica. Por definición

Las declaraciones de observación son directamente verificables. Por lo tanto, formarán la base de la teoría científica. Para Carnap, está en virtud de esta concordancia que las declaraciones de

observación pueden ser verdaderas y que adquieren un significado cuando se verifican. Las afirmaciones teóricas no son verificables directamente: solo pueden verificarse las afirmaciones de observación que se pueden deducir de ellas. Una declaración teórica solo será verificada si todas las declaraciones de observación que induce se verifican, sin excepción. En consecuencia, para los empiristas lógicos, una teoría científica debe poder reducirse a un conjunto de declaraciones de observación, ya que son ellas las que permiten la verificación. El contenido de una ciencia no excede, por lo tanto, el del conjunto de hechos que considera para verificar las declaraciones de observación (de ahí el término empirismo en empirismo lógico). Para lograr tal objetivo, es necesario, gracias al análisis lógico del lenguaje (de ahí el término lógico en empirismo lógico), identificar el contenido fáctico de las expresiones sintéticas encontradas en la teoría.

¿El empirismo lógico está libre de problemas? No, porque su examen plantea varios problemas.

Uno de los principales problemas es el llamado problema de la integridad de la base empírica. La verificación, para los empiristas lógicos, es la piedra angular de la ciencia. Ahora esto se hace a través de un conjunto de hechos disponibles, que forman lo que se llama la base empírica, con la cual se compararán las declaraciones de observación deducidas de la teoría. Dicha verificación no adquiere un cierto valor que si la base está completa, es decir, si contiene todos los hechos posibles, sin los cuales no se podrían verificar ciertas declaraciones de observación, por la posible falta de comparación. Este problema fue señalado por el epistemólogo (empirista lógico) Carl Hempel (1905-1997) en su libro *Elementos de epistemología* (1966): "... la investigación científica así concebida nunca podría comenzar. Incluso su primer paso no pudo completarse, porque, en el límite, sería necesario esperar hasta el fin del mundo para constituir una recopilación de todos los hechos; e incluso todos los hechos establecidos hasta ahora no se pueden recopilar porque su número y diversidad son infinitos. ¿Podemos examinar, por ejemplo, todos los granos de arena de todos los desiertos y playas, sus formas, su peso, su composición química, sus distancias, su temperatura siempre cambiante y su distancia al centro de la luna? ¿Quién cambia, también, todo el tiempo? ¿Vamos a enumerar todos los pensamientos flotantes que pasan por nuestra mente durante este tedioso negocio? ¿Y qué pasa con la forma de las nubes y el tono cambiante del cielo? ¿De la construcción y marca de nuestra máquina de escribir? ... »

La base empírica no puede por lo tanto registrar todos los hechos. Sólo deben retenerse los hechos relevantes e importantes. Pero, ¿qué es exactamente un hecho relevante? Decir de un hecho que es relevante es un juicio de valor, y como tal tiene una parte de subjetividad. Un hecho es relevante para un propósito, y los hechos relevantes para dos propósitos diferentes pueden ser muy diferentes. Por ejemplo, para la dinámica de los gases perfectos, son los choques entre las moléculas lo que es importante, mientras que para el químico, son las propiedades químicas de las moléculas del gas las que serán interesantes. Entonces, el juicio de relevancia es hecho por un ser humano basado en su conocimiento y creencias previas. Una modificación de estos puede llevar a una reconsideración de la sentencia.

Como resultado, la idea de construir una base empírica completa debe ser abandonada. Esto lleva a la siguiente conclusión: dado que la base empírica es parcial y está constituida de manera subjetiva, es estrictamente invariable e irrefutable.

¿Pero debemos rechazar completamente la idea central del empirismo lógico? No necesariamente porque, en la práctica, la comunidad científica a menudo extiende la base empírica que utiliza (se agregan nuevas experiencias a las antiguas). Es principalmente un proceso acumulativo. Además, el ritmo de evolución de las bases empíricas retenidas por cada disciplina evoluciona lentamente.

Un segundo problema más fundamental se aborda en la siguiente sección.

5.3.2 El relativismo quine y ontológico

Una posición muy diferente es apoyada por los defensores del relativismo ontológico, de los cuales Willard V.O. Quine (1908-2000) es uno de los representantes más ilustres.

Esta tesis se basa en la siguiente proposición: todo lenguaje es una teoría. Detallarlo. Para Carnap y los empiristas lógicos, el lenguaje es una característica importante: el hecho de expresar las declaraciones de observación en un idioma (francés, inglés, ...) es perfectamente neutral, y no interviene en la correspondencia entre los hechos declarados y los hechos "reales" tal como existen fuera de la ciencia. ¿Es esto perfectamente correcto? No, porque un simple análisis lingüístico muestra que no todas las lenguas humanas tienen las mismas palabras, por lo que cualquier traducción es también una interpretación. Entonces, usar un lenguaje, usar las palabras de un lenguaje, es cortar y jerarquizar los hechos como los percibimos: expresamos las declaraciones de observación (ejemplo: la luz sólida aumenta cuando se pone la máquina de Attwood en operación) usando los conceptos adjuntos a las palabras del lenguaje que usamos (aquí, en el ejemplo: sólido, ligero, montaje, máquina, ...). Cada idioma es, por lo tanto, una cuadrícula de lectura, una cuadrícula conceptual del mundo. Sin embargo, esta división no es impuesta por la realidad extra-lingüística, ya que varía según los idiomas. Esto es lo que el epistemólogo austriaco Karl Popper (1902-1994) resume cuando dice, en *The Logic of Scientific Discovery* (1934): "cada afirmación tiene el carácter de una teoría, de una hipótesis".

Esta falta de neutralidad del lenguaje debilita considerablemente el programa de los empiristas lógicos para basar la ciencia en una base empírica invariable e irrefutable: como el lenguaje impone conceptos, es posible que los mismos hechos conduzcan a diferentes declaraciones de observación, tal vez para ser parejo o incompatibles. Esto permitiría a las comunidades científicas desarrollar teorías verificadas pero irreconciliables.

Quine llevó esta lógica a su límite, diciendo que la pregunta "lo que existe" no tiene un significado absoluto, y solo puede ser concebida dentro del marco de un lenguaje. Esta es la tesis de la relatividad de la ontología, que da nombre al relativismo ontológico. Según Quine, el hecho de que los conceptos inherentes a un lenguaje sean efectivos en el sentido de que nos permiten actuar sobre el mundo no garantiza de ninguna manera la existencia extra-lingüística de los objetos a los que se refieren: solo demuestra que los conceptos están bien adaptados a la existencia humana. Otra observación (ver sección 4.4) va en la misma dirección: los datos sensibles que recibimos son transmitidos por nuestros órganos sensoriales, que tienen áreas de operación limitadas. Si tuviéramos los órganos sensoriales del murciélago, o la visión de un insecto, ¿habríamos identificado los mismos objetos y desarrollado la misma mecánica? Un problema relacionado es la confiabilidad de nuestras percepciones en bruto, que se ilustra mediante ilusiones (ver sección 4.4).

5.4 ¿Se pueden verificar las afirmaciones científicas?

Vayamos a la cuestión de la verificación de las declaraciones. Para simplificar el problema, considere una comunidad científica ideal, hablando solo un idioma y teniendo una base empírica reconocida por todos como confiable. ¿Es posible verificar, de manera inmediata, justificada e irrefutable, las afirmaciones de las teorías que considera? ¿Puede determinar el valor de verdad y el significado de las declaraciones?

5.4.1 Verificación de las declaraciones de observación

Comencemos con el caso que parece más simple, a saber, el de las declaraciones de observación. ¿Son ellos, ya que expresan proposiciones que pueden ser confrontadas directamente con nuestras percepciones sensoriales, verificables trivialmente? No! El primer argumento es de naturaleza filosófica y proviene del hecho de que la correspondencia entre una declaración de observación y las percepciones no es lógicamente justificable, ya que estas dos entidades no tienen el mismo estatus teórico. La correspondencia entre una declaración de observación y los hechos percibidos es el resultado de un sentimiento de certeza inmediata (que declaro corresponde a lo que veo), que no es suficiente para justificar la conclusión de la verificación. En la práctica, es el consenso entre los diferentes participantes (consenso de verdad) que se toma como garantía de que la correspondencia es real. La verificación es subjetiva. Esto se ilustra con un ejemplo simple: ponga dos objetos, uno rojo y uno verde, en una mesa. Digamos la proposición "los dos objetos son del mismo color" y se los presentamos a dos observadores, uno de los cuales es ciego al color. Ellos, por supuesto, concluirán de la manera opuesta. Por lo tanto, para citar a Karl Popper "tan intenso como es, un sentido de convicción nunca puede justificar una afirmación". Si la experiencia no puede justificar una afirmación, puede, según Popper, "motivar una decisión y, por lo tanto, aceptar o rechazar una declaración". La relación con la experiencia es de alguna manera debilitado, pero la decisión no es completamente arbitraria: retiene algo de los hechos percibidos.

El segundo argumento es la influencia de las teorías sobre la aceptación o el rechazo de las afirmaciones de la base empírica. De hecho, cualquier afirmación puede variar en el tiempo, en su significado o en su valor de verdad, a medida que evoluciona la evolución del conocimiento teórico y técnico. Por ejemplo, la proposición "la longitud de esta regla es igual a un metro" verá su valor de cambio de verdad si cambiamos el estándar del medidor de manera significativa. En principio, el valor de verdad y el significado de una declaración siempre son revisables y nunca pueden considerarse definitivos.

¿Qué concluir de todo esto? Las declaraciones de observación tienen vínculos estrechos con los hechos percibidos, pero no derivan su significado y valor de verdad de este enlace único; También están relacionados con las afirmaciones teóricas. Es esta dependencia la que hace que se diga que "los hechos están cargados de teoría". Con esto queremos decir que la mente agrega algo a la percepción, lo cual es lógico en el pensamiento occidental que se basa en una oposición sujeto / objeto (debe observarse que esta teoría debe tomarse en un sentido muy amplio). Por

otro lado, solo hay hechos declarados para la ciencia: un hecho que no se informa en forma de una declaración no existe a nivel científico. Y, como hemos visto, los hechos declarados retenidos por la ciencia son declaraciones verificadas, y la verificación implica la teoría.

Esto implica que la concepción de la base empírica, como la imaginó Carnap, no es sostenible: los hechos declarados que componen la base empírica incluyen una parte de la subjetividad. Su selección proviene de una decisión humana, que no puede justificarse estrictamente, sino solo motivarse. La base empírica, por lo tanto, no puede ser la base del conocimiento porque es relativa a ella. Esto es lo que Karl Popper resume: "Por lo tanto, la base empírica de la ciencia objetiva no incluye nada absoluto. La ciencia no descansa sobre una base rocosa. La atrevida estructura de sus teorías está construida de alguna manera sobre un pantano. Es como un edificio construido sobre pilotes. Los pilotes están enterrados en el pantano, pero no hasta el encuentro de alguna base natural o determinada y, cuando dejamos de intentar empujarlos más, no es porque hayamos alcanzado un terreno firme. Simplemente nos detenemos porque estamos convencidos de que son lo suficientemente fuertes para sostener el edificio, al menos temporalmente. "

¿Debemos deducir que la ciencia tal como la imaginamos es imposible? No. Porque, en un momento dado y en una disciplina dada, los científicos llegan a la práctica para ponerse de acuerdo sobre el contenido de una base empírica suficiente para sus necesidades, que evolucionan con el tiempo.

5.4.2 Verificación de afirmaciones teóricas

Pasemos ahora a la verificación de las afirmaciones teóricas. ¿Cómo, a partir de las declaraciones de observación que siguen, podemos verificarlas? Aquí nuevamente, separamos los problemas admitiendo que los problemas relacionados con la existencia de la base empírica se resuelven: consideramos una comunidad científica que tiene una base empírica que no plantea un problema, y asumimos que las declaraciones de observación son verificables de manera satisfactoria. En estas condiciones, ¿es posible verificar una afirmación teórica? Aquí nuevamente, la respuesta es negativa, si repetimos lo que se ha dicho anteriormente: una declaración teórica se verifica si todas las declaraciones de observación adjuntas lo son. Pero el problema es que a menudo hay una infinidad de declaraciones de observación deducibles de la declaración teórica.

Este es particularmente el caso de las leyes, cuya estructura lógica se recuerda:

Cualquiera que sea x , si x es A , entonces x es B

Una ley tiene un alcance universal: establece una propiedad verdadera para todos los elementos que son " A ", lo que implica que se puede deducir una declaración de observación para cada x posible. Examinemos el caso de la forma más simple de la ley de Boyle-Mariotte: $PV = \text{constante}$. Para cada gas perfecto, se puede hacer una observación para cada valor de la presión y para cada valor del volumen. Estas dos variables son reales, por lo tanto continuas. Generan un conjunto infinito (¡e incontable!) De posibilidades. Por lo tanto, la ley de Boyle-Mariotte no es

verificable, en el sentido estricto del término. Pero, ¿cómo te aseguras de que no sea pura ficción? Volvamos al enfoque que condujo a su propuesta: se formuló sobre la base de una coherencia, una estabilidad observada en un número finito y significativo de observaciones (más precisamente un número suficientemente alto para ganar el apoyo de la comunidad científica).

¿Cómo pasar de un número limitado de ejemplos a una proposición universal? Este enfoque se denomina inducción amplificadora (introducido por Francis Bacon, en oposición a la inducción completa de Aristóteles, que se basa en el conjunto de hechos posibles): se supone que lo que se ha verificado en todos los casos conocidos es cierto de todos los casos posibles. Este enfoque no es lógicamente válido: no hay razón para afirmar que no hay un contraejemplo (y solo uno y solo uno para invalidar la afirmación teórica) que aún no ha sido cumplido. Más en general,

La inducción se llama inducción, que permite pasar de lo particular a lo general, en oposición a la deducción, que es la transición de lo general a lo particular.

Por lo tanto, existe una disimetría fundamental entre la deducción y la inducción. La inducción es necesariamente cierta si sus premisas también son ciertas, lo que no es el caso de la inducción amplificadora. La inducción amplificadora no justifica, conlleva convicción. Cuanto mayor sea el número de ejemplos empleados para la inducción, más plausible parece la afirmación teórica, menos probable es el descubrimiento de un contraejemplo.

Introducción a las sensibilidades científicas modernas 111

La verificación de nuevas declaraciones de observación relacionadas con una declaración teórica no conduce a su verificación, sino a su confirmación, a su corroboración.

Ellos "van con eso", pero no garantizan su valor de verdad. Carnap, en la última fase de su investigación, había observado este problema y tenía como objetivo desarrollar una lógica inductiva (y no una deductiva, como la lógica clásica), porque proponía identificar el grado de confirmación de una afirmación teórica para la probabilidad de que sea cierto.

La corroboración se basa en una creencia basada en la regularidad de los hechos observados. Pero esta regularidad puede ser engañosa, como Bertrand Russell señala con el siguiente ejemplo: "El hombre que alimentó el pollo todos los días de su vida termina por torcerlo, lo que demuestra que hubiera sido muy útil. Auditoría de pollos para tener una visión más sutil de la uniformidad de la naturaleza. El punto enfatizado aquí es la naturaleza psicológica y no lógica de la corroboración. ¿Cómo explicamos nuestra creencia de que los eventos futuros se parecerán a los del pasado? Como no hay una demostración lógica, David Hume propone que nuestra creencia debe basarse en otros dos principios psicológicamente importantes: la habituación y la adicción engendradas por la regularidad observada en experiencias pasadas.

5.5 Validar las teorías científicas: métodos.

Acabamos de discutir los aspectos filosóficos del problema de verificación de declaraciones. Ahora examinaremos la práctica científica de probar teorías y leyes. Esta práctica se basa en la existencia de métodos, que son diferentes para las ciencias formales y las ciencias experimentales. Antes de continuar con la descripción y la discusión, es importante tener en cuenta que es sobre la promesa de "seriedad" que estos métodos aportan que se basa en el consenso en torno al valor de la ciencia. La ciencia, en el espíritu común, es sinónimo de "rigor"; El uso de un método, una garantía de científicidad.

5.5.1 ¿Qué es un método?

De acuerdo con el diccionario Larousse, un método es "un proceso razonado y ordenado; Una técnica utilizada para obtener un resultado. Proviene de las raíces griegas meta (gusanos) y hodos (camino). Por lo tanto, el método se concibe como un medio racional para lograr un objetivo, sin cometer errores (intentamos garantizar que se logrará el objetivo) y de manera efectiva (el objetivo se logrará con el mínimo esfuerzo; Al azar requeriría mucho más esfuerzo para alcanzar la meta).

La cuestión del método no se puede discutir sin mencionar las obras de René Descartes (1596-1650), quien introdujo el método cartesiano, en el que se ha capacitado a todos los solteros franceses. Según Descartes, el uso de un método es una obligación de la mente, que de lo contrario no puede llegar a conclusiones (Discourse of Method, 1637): "Es mucho mejor no buscar la verdad sobre Nada más que hacerlo sin método. No utilice un método, es abrir la puerta al error: "La diversidad de nuestras opiniones no proviene del hecho de que algunas son más razonables que otras, sino del hecho de que conducimos nuestros pensamientos de varias maneras y no consideramos las mismas cosas. . Esta necesidad de método también está presente en otros filósofos, como por ejemplo Francis Bacon (1561-1626), quien, en su *Novum Organum*, escribe: "El experimento vago y que no tiene otra guía que es meramente una prueba y error y sirve para asombrar a los hombres en lugar de iluminarlos; pero cuando solo funcionará a la luz de un método seguro y fijo, cuando avance solo por grados y, por así decirlo, paso a paso, entonces será verdaderamente posible que podamos esperar Descubrimientos útiles. "

Su método se inspiró en Descartes por su trabajo matemático y el análisis de tres ciencias formales: lógica, álgebra y geometría: "Estudí un poco, siendo más joven, entre las partes de la filosofía, para la lógica y, entre las matemáticas, el análisis de los geométricos y el álgebra, tres artes o ciencias que parecían contribuir algo a mi diseño. Pero al examinarlos, me preocupé de que, para la lógica, los silogismos y la mayoría de sus otras instrucciones sirvan más bien para explicar a los demás lo que sabemos, o incluso, como el arte de Lull, hablar sin hablar. El juicio de los que no conocemos, solo para aprenderlos. Y aunque contiene, de hecho, muchos preceptos muy verdaderos y muy buenos, hay, sin embargo, tantos otros derretimientos, que son dañinos o superfluos, que es casi tan difícil separarlos como a para dibujar una Diana o una Minerva de un bloque de mármol que aún no está esbozado. Luego, para el análisis de los antiguos y el álgebra de los modernos, además de extenderse solo a asuntos muy abstractos, y que parecen inútiles, el primero está siempre tan limitado por el Cifras, que no puede ejercitar

la comprensión sin fatigar mucho la imaginación; y la última vez que uno se ha vuelto tan sujeto a ciertas reglas y figuras, se ha convertido en un arte confuso y oscuro que avergüenza a la mente, en lugar de ser una ciencia que la cultiva. Esto me hizo pensar que se debería buscar algún otro método que, al comprender las ventajas de estos tres, estuviera exento de sus defectos. Y, como la multitud de leyes a menudo da excusas a los vicios, para que un estado esté mucho mejor regulado cuando, al tener muy poco, se observan muy de cerca; así, en lugar de la gran cantidad de preceptos cuya lógica está compuesta, pensé que tendría suficiente de los siguientes cuatro, siempre que tomara una resolución firme y constante para no fallar una vez y observarlos.

- Lo primero fue nunca recibir nada por la verdad que, obviamente, no sabía que fuera así; Es decir, evitar cuidadosamente la precipitación y la prevención; y para entender nada más en mis juicios que lo que es. presentaría tan clara y tan claramente en mi mente que no tuve ocasión de cuestionarlo.
- El segundo, dividir cada una de las dificultades que examinaría en tantas parcelas como fuera posible y que serían necesarias para resolverlas mejor.
- La tercera, para llevar a cabo mis pensamientos en orden, empezando por los objetos más simples y más fáciles de conocer, para ir poco a poco, como por grados, hasta el conocimiento de los compuestos; e incluso suponiendo un orden entre los que naturalmente no se preceden unos a otros.
- Y, por último, para hacer los recuentos tan completos y las revistas tan generales, debo asegurarme de no omitir nada.

Estas largas cadenas de razones, todas ellas sencillas y fáciles, los topógrafos están acostumbrados a utilizar para alcanzar sus manifestaciones más difíciles me había dado ocasión a imaginar que todas las cosas que pueden caer bajo el conocimiento de los hombres s de la misma manera, y siempre y cuando nos abstengamos de recibir cualquier verdad que no sea cierta, y siempre mantengamos el orden necesario para deducirlos entre sí, no puede estar tan lejos de ellos que, por fin, uno no llega, ni tan oculto como uno descubre. "

Por lo tanto, podemos sintetizar el método cartesiano, que inspira la educación en Francia, como la combinación de cuatro reglas:

Las 4 reglas de Descartes

1. Regla de lo obvio: aceptar solo cierto conocimiento.
2. Regla de análisis: descomponer un problema en subproblemas más sencillos
3. Regla de orden: comenzar con los problemas más simples
4. Contar reglas: registrar todas las partes para no olvidar nada

El método cartesiano, basado en dos etapas sucesivas, la primera de descomposición y la segunda de recomposición, está bien establecido y estructurado por el pensamiento científico occidental. ¿Es único o se pueden prever epistemologías basadas en otros preceptos?

Una de sus reglas, la segunda, tiene un lugar central: dividir problemas complejos en subproblemas más simples, cuya resolución en secuencia proporcionará la solución al problema global. Esta regla es la base del reduccionismo de métodos (véase también el Capítulo 7.4), que consiste en reducir un problema a los subproblemas que se pueden resolver. Esta regla, a menudo muy fructífera, induce dos problemas. En primer lugar, no indica cómo determinar los sub-problemas, ya qu'objectait Leibniz⁶³ "Este segundo precepto del señor Descartes nos de poca utilidad, siempre y cuando no nos dice cómo romper en partes "A continuación, algunas disciplinas científicas que estudian objetos complejos (por ejemplo, biología y seres vivos) que no parecen reducirse a la suma de sus partes y les propriétés la de no simplemente deducido de las de sus partes (un ratón Es más que la suma de sus componentes químicos o incluso de sus órganos); Estamos hablando de propiedades emergentes. Por esta razón, las epistemologías constructivistas pretenden eliminar el principio reduccionista para el estudio de la emergencia.

5.5.2 El caso de las ciencias formales: demostración

Antes de discutir el método dominante en las ciencias experimentales, es necesario presentar lo que se usa en las ciencias formales (lógica, matemáticas). Una primera razón para esto es la anterioridad, ya que el método de demostración que veremos más tarde se formalizó en la antigua Grecia a mediados del siglo V antes de nuestra era, y que tiene, como hemos visto, Gran parte de reflexiones posteriores influenciadas, como las de Descartes. La segunda razón es que hoy en día, muchas ciencias empíricas están muy fuertemente matematizadas (la mecánica y la física son dos ejemplos perfectos), de las cuales algunas ramas teóricas exhiben teoremas. En estos casos, también se utiliza el método de demostración de la ciencia formal.

Primero, ¿qué está demostrando? Probar es probar, establecer la verdad de una afirmación teórica mediante una deducción rigurosa que demuestra que una proposición es verdadera porque es la consecuencia necesaria de una proposición previamente admitida. Por lo tanto, no hay relación con la experiencia sensible, sino solo con la lógica y con proposiciones no verificadas tomadas como un punto de partida (axiomas). La palabra griega de la que deriva Deicnumi tiene dos significados distintos: mostrar el significado de ver, presentar a la vista y mostrar el significado de explicar. La invención de la demostración es parte de lo que se llama el "milagro griego". Otras civilizaciones anteriores, en Egipto o Mesopotamia, conocían el cálculo, habían resuelto algunos problemas matemáticos y poseían conocimiento astronómico. Pero ninguno había racionalizado y codificado el proceso, y sobre todo, no lo había querido universal. Fue en Grecia que se llevó a cabo la abstracción, lo que llevó a mostrar para demostrar.

Los primeros pasos para probar una propuesta se basaron en la observación visual, en una figura realmente dibujada en un soporte. Este es el llamado enfoque pitagórico. Lo que gana la convicción es el sentimiento de certeza experimentado por el matemático antes del dibujo que observa. Así que es bueno aquí para "mostrar".

El pasaje a mostrar para demostrar ya está hecho en Euclides, en los Elementos. Euclid codifica el método en seis pasos, que siempre serán iguales y ordenados de la misma manera:

Demostración euclidiana 1. La declaración o proposición: se trata de establecer la proposición a verificar. 2. La exposición: se trata de introducir un dibujo en el que los puntos se designan con letras (todavía utilizamos la visualización aquí, ¡los griegos no sabían álgebra!). 3. La determinación: se trata de repetir la afirmación sobre la figura. 4. Construcción, o preparación: cuando sea necesario, prepare la figura con construcciones auxiliares. 5. La demostración: se trata de deducir el resultado. 6. La conclusión: se trata de reafirmar la proposición como resultado de la demostración. Agrega "qué demostrar" (CQFD) para un teorema o "qué hacer" (CQFF) para una construcción.

Lo importante aquí es que no es la vista de la figura la que gana la adhesión, sino el razonamiento que condujo a su construcción. Al construir la figura a partir de conceptos universales (triángulo, círculo, ...) cuyo dibujo es solo una ilustración, se llega a una conclusión de alcance universal.

La formalización de este tipo de demostración, llamada método hipotético-seductor, se ilustra en el siguiente ejemplo:

• Premisas: o Todos los hombres son mortales (se acepta la ley general) o Sócrates es un hombre (caso especial) • Conclusión: Sócrates es mortal

O, un poco más abstracto:

Método hipotético-deductivo

Premisas: 1. Lo que sea x , si x es A , es B 2. X es A Conclusión: X es B

Aquí vamos de lo general (la ley general aceptada) a lo particular (Sócrates): por lo tanto, hablamos de deducción. Este es el método formal de verificación de la ciencia. Estos resultados son universales (esto es cierto para todas las x , y para todos los tiempos) y necesarios (la conclusión deriva lógicamente de las premisas: aceptar las premisas como verdaderas implica necesariamente aceptar la conclusión como igualmente verdaderas: podemos aceptar las premisas y rechazarlas la conclusión).

Este pasaje de mostrar para demostrar no es epistemológicamente neutral. De hecho, consiste en dar primacía a las construcciones de la mente sobre las percepciones, es decir, basadas en el conocimiento a priori y no en el conocimiento a posteriori. Por lo tanto, es parte del proceso de racionalismo, en oposición al empirismo.

5.5.3 El caso de las ciencias empíricas: el método experimental.

Pasemos ahora al caso más complejo de las ciencias empíricas. El método asociado con ellos es el método experimental, que establece el vínculo entre las declaraciones teóricas y los hechos a través de las declaraciones de observación.

El método experimental, en su forma moderna, fue teorizado por el fisiólogo francés Claude Bernard (1813-1878), en su Introducción al estudio de la medicina experimental (1865): "El científico completo es el que abraza a ambos. Teoría y práctica experimental. Él nota un hecho; Sobre este hecho, una idea nace en su mente; En vista de esta idea, razona, instituye una experiencia, imagina y realiza las condiciones materiales. De esta experiencia resultan nuevos fenómenos que deben ser observados, y así sucesivamente. La mente del científico está, por así decirlo, siempre colocada entre dos observaciones: una que sirve como punto de partida para el razonamiento, y la otra que sirve como su conclusión. Para ser más claros, he tratado de separar las diversas operaciones del razonamiento experimental. Pero cuando todo esto sucede al mismo tiempo en la cabeza de un científico que se dedica a la investigación en una ciencia tan confundida como la medicina, entonces hay un enredo entre lo que resulta de la observación y lo que pertenece a la experiencia, que sería imposible y, además, inútil, tratar de analizar cada uno de estos términos en su mezcla inextricable. Bastará con mantener en principio que la idea a priori o mejor hipótesis es el estímulo del experimento, y que uno debe dejarlo ir libremente, siempre que se observen los resultados del experimento de un camino riguroso y completo. Si la hipótesis no puede ser verificada y desaparece, los hechos que ha servido para encontrar serán adquiridos como materiales inquebrantables de la ciencia. "

Por lo tanto, el método experimental se divide en tres etapas:

Las 3 fases del método experimental Observar, Conjeturar, Verificar

Si fue codificado por Claude Bernard en el siglo XIX, es mucho más antiguo. La idea de dar un lugar importante, incluso preponderante a las observaciones en las ciencias empíricas, se encuentra en Bacon (1561-1626) y Galileo (1564-1642). En Bacon, la ciencia consiste en una meticulosa recopilación de datos (que él llama "Pan Hunting"). Pero esta colección no es aleatoria: debemos centrarnos en "descubrir primero las causas y los principios verdaderos, buscar experiencias ligeras", también llamadas experiencias "cruzadas" (experiencias cruciales, en francés moderno).), con referencia a señales en un cruce. Estos experimentos cruciales, que él propone en 1620, deben permitir decidir entre dos hipótesis en conflicto refutando irrefutablemente una de las dos afirmaciones. Entonces, en Bacon, la experiencia no está exenta de razón. Una de las grandes contribuciones de Bacon es la inducción amplificadora: ¿cómo, a partir de un número limitado de hechos, formular una declaración teórica de alcance universal? Como ya hemos visto, está amplificando la inducción. Esto es nuevo, porque antes de Bacon, solo se aceptaba la inducción completa basada en la observación de todos los fenómenos posibles, y eso desde Aristóteles. A Nicolas Copernicus (1473-1543) a veces se le atribuye la paternidad del método experimental, ya que es en Copernicus que la manipulación del objeto por parte del observador parece obtener la respuesta buscada, en resumen, el pasaje de

Observación pasiva a la experimentación. Pero la contribución de Galileo (1564-1642) también es muy importante, ya que se atrevió a defender la teoría de la primacía de los hechos antes que las ideas: esta última debe inclinarse para corresponder a los hechos. Esto es lo que le ganó la hostilidad de la Iglesia, mucho más que la tesis heliocéntrica a la que no se oponía fundamentalmente. De hecho, la tesis heliocéntrica fue rechazada por la Iglesia porque parecía incompatible con ciertos versículos de la Biblia, que, en una interpretación literal, parecen indicar que el sol gira alrededor de la Tierra, uno de los más famosos.

(Josué, 10, 12-13) Luego Josué habló al Señor: "¡Sol, detente en Gabaon, luna, en el valle de Ayyalôn! Y el sol paró y la luna se congeló [...]. El sol se detuvo en los cielos y no se apresuró a acostarse durante casi un día entero.

El carácter revolucionario de la posición de Galileo fue dar primacía a las observaciones. En su carta del 21 de diciembre de 1613 a su amigo y discípulo, el Padre Benedetto Castelli, lanzó la controversia escribiendo: "... es obvio que dos verdades no pueden ser contradichas, el deber de los intérpretes sagaces es darse la tarea de demostrar que Los verdaderos significados de los textos sagrados concuerdan con las conclusiones naturales, tan pronto como nos hemos asegurado, y algunos de ellos, del testimonio manifiesto de los sentidos o demostraciones irrefutables. Yo diría más: las Escrituras, aunque inspiradas por el Espíritu Santo, admiten de muchas maneras, por las razones que he alegado, interpretaciones remotas de su significado literal, y nosotros mismos no podemos afirmar con certeza Para que todos sus intérpretes hablen bajo la inspiración divina, considero que es prudente no permitir que nadie cometa las oraciones de la Escritura y obligarlos de una manera que garantice la verdad de una conclusión tan natural que podría suceder que nuestros sentidos o demostraciones inequívocas nos demuestran un día lo contrario. "

Ahora volvamos a los tres pasos del método experimental.

- Observar: en vista de lo que ya se ha dicho sobre la medición, sabemos que la observación no es neutral, que no es separable de la teoría. Esto lo resume Auguste Comte (1798-1857) categóricamente en su Cours de philosophie positivo: "En cualquier orden de fenómenos puede ser, incluso hacia el más simple, no es posible una observación real tanto como originalmente está dirigido y finalmente interpretado por alguna teoría. "

118

- Conjeturar: conjeturar es formular una hipótesis, que por supuesto requiere el marco teórico apropiado. Pero la hipótesis contiene más que el contenido fáctico de las declaraciones de observación a partir de las cuales se formula, ya que procede de la inducción amplificadora. Los hechos no imponen la hipótesis, solo pueden sugerirla. La hipótesis, por lo tanto, también procede de la imaginación creativa de su autor. La hipótesis, para ser verificable, debe, dice Claude Bernard, "tener siempre un punto de apoyo en la realidad observada, es decir, en la naturaleza. Las teorías y los principios guían al científico en la formulación de sus hipótesis: son,

por lo tanto, instrumentos de descubrimiento para la investigación experimental. No existe un método automático para derivar los supuestos de las observaciones. Sin embargo, el lógico y filósofo inglés John Stuart Mill (1806-1873) codificó los métodos comúnmente empleados:

El método de los residuos. Para hacer frente a los fenómenos complejos, este método consiste en sustraer de un fenómeno complejo y los parámetros que actúan sobre él, todos los elementos explicados por leyes previamente conocidas, así como los parámetros que implican. Entonces se puede conjeturar que los fenómenos inexplicables restantes están asociados con los determinantes restantes. o El método de concordancia. Cuando dos fenómenos aparecen siempre al mismo tiempo, podemos suponer que están conectados y, por lo tanto, se puede formular una ley que los asocie. o El método de la diferencia. Idem, cuando dos fenómenos siempre desaparecen al mismo tiempo. o El método de las variaciones concomitantes. Ídem, cuando dos fenómenos siempre varían al mismo tiempo (ejemplo: la presión y el volumen en la ley de Mariotte a temperatura constante). • Comprobar. La verificación requiere experimentación, es decir, un experimento controlado, en el cual los diferentes términos de la hipótesis se pueden aislar por separado, para obtener una base empírica adecuada. El juicio de validez procede entonces de las preguntas tratadas anteriormente. Aquí aparece un nuevo problema relacionado con la objetividad de la verificación: el problema de detener la prueba experimental. ¿Cuándo detiene un experimento para validar una teoría y luego decide entre varias posibilidades? En un caso ideal, es la naturaleza misma de la experiencia la que decide, y la pregunta de por qué termina no tiene sentido. Pero el análisis de experimentos complejos (por ejemplo, en física de partículas) muestra que la realidad es bastante diferente. Detener los resultados del experimento a partir de una elección, basada en los datos adquiridos, pero también en juicios de valor: el experimento se detiene cuando se juzgan los resultados lo suficientemente convincente como para permitirle corroborar una de las hipótesis que uno busca probar (o invalidar todas).

5.5.4 Retorno a la teoría de la inducción.

El método de inducción se ha mencionado varias veces en lo que antecede, y se ha demostrado que está en el corazón del método experimental que sustenta las ciencias empíricas. Además, dada su importancia, volveremos a la teoría de la inducción.

Como ya se discutió en el Capítulo 5.4.2, la inducción total, que requiere que todas las declaraciones de observación posibles estén disponibles, no es práctica, y se utiliza la inducción de amplificación introducida por Bacon. . Para utilizar este último, se deben cumplir tres condiciones:

1. El número de declaraciones de observación disponibles debe ser alto.
2. Las observaciones deben ser repetibles y robustas (es decir, repetibles en muchas condiciones de observación).
3. Ninguna declaración de observación aceptada como válida contradecirá la declaración universal que se ha deducido.

La inducción amplificadora puede formalizarse según el siguiente principio:

Principio de la inducción amplificadora Si se ha observado un gran número de A en una gran variedad de circunstancias, y si observamos que cada A sin excepción tiene la propiedad B, entonces todas las A tienen la propiedad B.

¿Es este principio válido? Como ya se ha dicho, la incertidumbre que rodea la validación de las declaraciones de observación excluye cualquier respuesta positiva definitiva. Una respuesta positiva basada en el siguiente razonamiento.

1. El principio de inducción ha demostrado ser justo en el caso 1.

2. El principio de inducción ha demostrado ser justo en el caso 2. 3.

4. El principio de inducción es, por lo tanto, válido en todos los casos. caso no es lógicamente admisible, porque este razonamiento es circular: ¡uno valida el principio de inducción apelando al principio de inducción (se habla entonces de metainducción)! Por lo tanto, parece imposible validar este principio de cierta manera: este problema se conoce como el problema de la inducción. Además, debe señalarse que las nociones de "grandes números" y "circunstancias muy variadas" son vagas y subjetivas. Deben entenderse como condiciones suficientes para lograr el consenso entre la comunidad científica.

Un primer intento de resolver el problema de la inducción consiste en debilitar el alcance de la expresión universal dándole un carácter probabilístico:

Principio de la inducción de amplificación probabilística Si se ha observado un gran número de A en una gran variedad de circunstancias, y si observamos que todos los As sin excepciones tienen la propiedad B, entonces todos los A probablemente tienen la propiedad B.

Un examen en profundidad muestra que esta solución no es completamente satisfactoria porque no elimina la incertidumbre de las declaraciones de observación y requiere la capacidad de asignar un grado de probabilidad a una declaración. Lo cual no es factible en el caso más general. Otra posibilidad es no intentar asignar una probabilidad a una ley o teoría científica, sino a predicciones individuales (afirmaciones singulares) que pueden inferirse de ellas. Esto es posible, pero no resuelve completamente el problema, porque uno puede deducir una infinidad de predicciones individuales a partir de una declaración universal, y eso no puede reducir una ley a un número finito de observaciones.

La teoría de la inducción está vinculada a la de la verificación. Así que la paradoja de la confirmación de Hempel es también un problema para la teoría de la inducción. Esta paradoja se basa en el hecho de que una afirmación universal como "todos los A son B" es, lógicamente, estrictamente equivalente a su contrario "Todos los no B son no A". Probar la proposición original o su contraposición es probar ambos. Lo que lleva a ejemplos paradójicos, como el de los cuervos de Hempel. Partiendo de las dos proposiciones:

1. Todos los cuervos son negros

2. Todos los objetos que no son negros no son cuervos

observamos que validamos la hipótesis de que todos los cuervos son negros cada vez que observamos un objeto que no es negro (y no es un cuervo). ¡Un ornitólogo por lo tanto podría contentarse con observar flores y peces para estudiar cuervos! Resultado que es obviamente absurdo.

El problema de la inducción también surge en otros campos, como la teoría del lenguaje. Así, el filósofo Saul Kripke, basado en los escritos de Ludwig Wittgenstein, defiende la tesis de que el uso de las palabras en lenguaje común plantea el problema de la inducción. La pregunta es cómo usar una palabra en un nuevo contexto. Si uno abstraer palabras cuyo significado está definido explícita y completamente por otras palabras (en un diccionario, por ejemplo), es el uso de una palabra que determina su significado y nos guía. Para Kripke, saber el significado de una palabra significa saber cómo usarla de acuerdo con una regla; Sin embargo, muestra que los usos anteriores no permiten determinar de forma inequívoca esta regla de uso. Así encontramos el problema de la inducción definido antes. La solución de Kripke a este problema es decir que uno no debe buscar una justificación externa para la inducción. Según él, el razonamiento inductivo, así como el uso de las palabras, son parte de lo que Wittgenstein llama una "forma de vida", es decir, un conjunto coherente de prácticas. Como resultado, es dentro de este conjunto de prácticas que Inducción a un sentido, por lo que debemos buscar justificaciones internas. Esta posición es atacable, ya que es coherente (ver capítulo 1.4.4).

El problema de la inducción sigue sin resolverse. Es por esto que los epistemólogos han tratado de refundar la ciencia sin recurrir al principio de inducción. La teoría de la falsificación fundada por Karl Popper es un buen ejemplo.

5.6 Falsacionismo: Popper

Veamos ahora el tercer nivel de pensamiento mencionado al principio de este capítulo. ¿Cómo distinguir una ciencia de una disciplina no científica? Como acabamos de ver, las expresiones teóricas de importancia universal (como las leyes) no son estrictamente verificables, incluso recurriendo a la experiencia. Por lo tanto, ¿debemos concluir que no hay solución y que la distinción entre la ciencia y el resto del conocimiento humano solo puede ser puramente subjetiva? No, dice el epistemólogo Karl Popper (1902-1994) quien, en 1932, propone una nueva teoría: la falsificación.

Esta tesis se basa en el hecho de que si la confrontación con la experiencia nunca puede responder "sí" a la pregunta del valor de la verdad para una afirmación, puede responder "no". Para responder que sí, sería necesario verificar una infinidad de declaraciones de observación. Para responder con no, solo encuentra un contraejemplo. Por lo tanto, existe una disimetría fundamental entre las dos respuestas posibles. Entonces, si no podemos verificar completamente, podemos probar fácilmente la falsedad de una expresión. Abandonando la idea defendida por los empiristas lógicos de que es la verificación o confirmación parcial que debe ser el criterio de la científicidad, Popper sostiene que

Criterio de la científicaidad falsificadora. Una teoría empírica es científica si es falsificable, es decir, si es probable que la experiencia la invalide.

Esta es la tesis central del falsacionismo. En consecuencia, no se puede incluir en una teoría, por lo que es científica, que las afirmaciones refutables. Esto parece fácil en el caso de declaraciones de observación. Para las afirmaciones teóricas, el caso es un poco más complicado. Para que una declaración teórica sea refutable (aún se dice que es falsificable), debe poder asociarse, por deducción, con al menos una declaración de observación falsificable. Las declaraciones metafísicas, ya que por definición no son asociadas con ninguna declaración de observación, están excluidas del campo de la ciencia. Por lo tanto, el falsicismo no rompe el vínculo con la experiencia, solo modifica el criterio de científicaidad propuesto por el empirismo lógico.

Desde el punto de vista de la falsificación, una teoría científica es aún más interesante porque el número de declaraciones de observación que hacen posible su prueba es grande. Estas declaraciones de observación falsificables derivadas de la teoría se denominan falsificadores virtuales. Así, las teorías científicas más interesantes son aquellos que son altamente falsificables, es decir, aquellos con el mayor grado de falsificabilidad. Una consecuencia es que debemos concentrarnos en considerar solo las afirmaciones más precisas y claras, porque son las que permiten las pruebas más seguras.

En este enfoque, no podemos decir con certeza lo que es verdad. Pero podemos decir lo que es falso: es falso cualquier afirmación falsificable falsificada, es decir, que ha sido refutada por la experiencia. Pero, ¿cuál es el estado de una declaración falsificable pero no falsificada (es decir, una declaración para la cual no se ha descubierto ningún contraejemplo hasta ahora)? No es cierto, ya que nunca podremos concluir eso. Por otro lado, se dice que está corroborado por hechos adquiridos: estos no lo contradicen, lo que intuitivamente le da un cierto valor de verdad. Pero tenga cuidado: mientras verdadero y falso son atributos absolutos, corroborado solo tiene sentido con respecto a la base empírica utilizada para realizar la prueba de falsificación. Por lo tanto, una teoría nunca se corrobora en lo absoluto.

La tesis defendida por Popper propone una clara demarcación entre la ciencia y la no ciencia. Se excluyen del campo de la ciencia las teorías que producen declaraciones demasiado vagas para ser refutadas indiscutiblemente (Popper cita a la astrología), o aquellas que lo explican todo (Popper cita al psicoanálisis adleriano). Para ser científico, una teoría debe ser falsificable, lo que implica que, por construcción, ¡no debe ser compatible con todos los hechos del universo!

¿Es el falsacionismo una epistemología descriptiva o normativa? Las opiniones están divididas. Popper defendió un carácter descriptivo. Otros epistemólogos, como Imre Lakatos, argumentan, por el contrario, que es una epistemología normativa, porque la historia de la ciencia no permite identificar ejemplos "puros" del funcionamiento falsacionista de una ciencia. A menudo ocurre que las afirmaciones teóricas se conservan, aunque se hayan falsificado. En la práctica, uno no niega ningún valor a una teoría si descubre un hecho con el que es incompatible, porque la corroboración de muchos otros hechos parece indicar que no es pura ficción. Así que hay

variantes más elaboradas y más flexibles de la tesis original de Popper. Estas variantes "sofisticadas" toman en cuenta el valor de ciertas corroboraciones, distinguiendo entre corroboraciones insignificantes, cuyo contenido empírico difiere muy poco de otras corroboraciones anteriores, corroboraciones decisivas, que conducen a un contenido verdaderamente innovador.

Antes de concluir, es necesario discutir los límites de la falsificación. Un primer problema es que las pruebas a las que se someten las declaraciones de observación en un intento de falsificarlas se basan en la base empírica disponible. La falta de integridad de este último, así como la incertidumbre que pesa sobre las observaciones, prohíben, por lo tanto, considerar una falsificación como definitiva y absolutamente segura. Las falsificaciones son falibles. En consecuencia, considerar una expresión como falsificada es el resultado de una decisión, y tiene una parte de subjetividad. Popper atribuyó gran importancia a la decisión consciente de los científicos: "nuestra aceptación de declaraciones básicas es el resultado de una decisión o un acuerdo, y en este sentido estas declaraciones son convenciones. 65 A continuación, la falsificación de una declaración es relativa a una base 65 citada por A. Chalmers, "¿Qué es la ciencia? Col. Biblio ensayos, libro en rústica, p.110

Empírico, y por lo tanto hereda la naturaleza incierta de ello. En este sentido, la falsificación sufre, por lo tanto, los mismos problemas que la confirmación del empirismo lógico.

5.6.2 El concepto de verosimilitud de Popper

Popper interpreta la ciencia como la búsqueda de la verdad, y el progreso científico como un movimiento hacia la verdad (en el sentido de la verdadera correspondencia). Pero como las teorías son imperfectas, en el mejor de los casos pueden interpretarse solo como aproximaciones de la verdad. Una contribución importante de Popper a la teoría de la verdad como una correspondencia entre la ciencia y la realidad es su trabajo sobre la aproximación a la verdad, que él llama verosimilitud. Para juzgar la verosimilitud de una teoría científica, Popper propone distinguir su contenido de verdad, que designa todas sus verdaderas consecuencias, y su contenido de falsedad, que representa todas sus falsas consecuencias. Estas dos nociones no permiten juzgar la calidad de una teoría en lo absoluto: solo permiten hacer un juicio relativo, en comparación con otra teoría: "Si uno postula que los contenidos de verdad y los contenidos de la falsedad de dos teorías t_1 y t_2 son comparables, podemos decir que t_2 está más estrechamente relacionado con la verdad o mejor se corresponde con los hechos que t_1 si y solo si: 1. El contenido de verdad de t_2 es mayor que el de t_1 , sin sea lo mismo con su contenido de falsedad. El contenido de falsedad de t_1 es mayor que el de t_2 , sin que sea igual con su contenido de verdad. »

Notemos, con Alan Chalmers, que en una perspectiva realista (que es la de Popper), el concepto de verosimilitud adolece de una debilidad. Porque, si los conceptos básicos de una teoría son falsos, entonces toda la teoría es falsa: su contenido de verdad está vacío. El ejemplo de Chalmers es la comparación de la mecánica newtoniana y la teoría de la relatividad. En sus dos teorías, los conceptos de masa son inconmensurables: la masa newtoniana es una propiedad de un cuerpo, mientras que se trata de una relación entre un objeto físico y un sistema de referencia en Einstein. Si consideramos que la teoría de la relatividad está más cerca de la

verdad, entonces la mecánica newtoniana es completamente falsa, ya que se basa en un concepto equivocado. Esta debilidad desaparece desde una perspectiva instrumentalista, para la cual la eficiencia predictiva es el criterio dominante (y parece que la mecánica newtoniana es una buena aproximación de la física relativista a bajas velocidades). 5.7 Holismo epistemológico: Duhem, Quine

5.7 Holismo epistemológico: Duhem, Quine

Volvamos al criterio de cientificidad defendido por los empiristas lógicos: es una teoría científica cuyas afirmaciones teóricas son verificables. Una teoría científica es verdadera si todas sus afirmaciones son verificadas. Por lo tanto, el enfoque clásico consiste, siguiendo el reduccionismo cartesiano, en tomar las afirmaciones teóricas que constituyen la teoría y verificarlas una por una, metódicamente.

K. Popper, "Conjeturas y refutaciones"

¿Es esto posible? No, dicen los defensores del holismo epistemológico, para quienes no es posible verificar una declaración de forma aislada porque todas las declaraciones están interconectadas.

Esta interconexión se ha descrito de muchas maneras en capítulos y secciones anteriores. Los diferentes puntos de vista se expresan en el holismo epistemológico.

Para el físico y epistemólogo francés Pierre Duhem (1861-1916), toda la teoría se pone a prueba cada vez que una declaración se somete a verificación. Primero, las afirmaciones teóricas están relacionadas entre sí. Entonces, como ya hemos visto, los instrumentos de medición que utiliza el experimentador no son neutrales, ya que son "teorías materializadas". Se puede observar que, además, los instrumentos a menudo utilizan diferentes teorías (química, mecánica, óptica, ...). Por lo tanto, los resultados de la observación se interpretan en un marco teórico que les da sentido. Intentar validar una declaración de observación es, por lo tanto, probar no solo toda la teoría a la que pertenece, sino también toda una gama de disciplinas científicas. En consecuencia, para Duhem, es el conjunto de la física lo que debe considerarse como un todo inseparable (La teoría física, su objeto, su estructura, 1906): "La ciencia física es como un sistema que nosotros debe tomar en su totalidad; es un organismo que no puede funcionar sin que entren en juego las partes más lejanas".

Willard V.O. Quine (1908-2000) apoya un punto de vista más radical: para él, las conexiones no se limitan solo a la física (o a las ciencias empíricas), sino a la totalidad del conocimiento humano. Para Quine, todo nuestro conocimiento forma una red dinámica y coherente (Los dos dogmas del empirismo, 1951): "La totalidad de lo que se conoce como nuestro conocimiento o nuestras creencias, la más importante. Las anécdotas desde la historia y la geografía hasta las leyes más profundas de la física atómica, o incluso las matemáticas o la lógica puras, son un tejido tejido por el hombre y cuyo contacto con la experiencia solo se hace. a los contornos. O, para cambiar la imagen, toda la ciencia es comparable a un campo de fuerzas, cuyas fronteras serían la

experiencia. La refutación de un enunciado muestra que el sistema debe modificarse, pero sin indicar qué partes de este sistema deben ajustarse. Los reajustes se realizarán debido a los enlaces lógicos que existen entre las diferentes declaraciones.

El holismo epistemológico tiene implicaciones importantes para la capacidad de verificar declaraciones utilizando la experiencia:

Consecuencias de la teoría del holismo epistemológico está infravalorada por la experiencia: en el caso de un conflicto entre dos afirmaciones, la lógica no dice qué partes del sistema global deben cambiarse. Hay, por tanto, a priori, varias posibles modificaciones satisfactorias.

Puede haber teorías separadas pero empíricamente equivalentes, es decir, teorías que tienen la misma base empírica pero no son idénticas. Esto es una consecuencia de la sub-determinación. Ninguna declaración es inmune a la refutación y cualquier declaración siempre se puede guardar de la refutación, ya que los ajustes del sistema de conocimiento son globales, no locales.

El tercer punto hace que el concepto de la experiencia crucial de Bacon sea obsoleto. Aún más profundamente, el holismo en el sentido de Quine hace que toda teoría científica sea parcialmente subjetiva: como nada impone los ajustes del conjunto de declaraciones, cada modificación es el resultado de una decisión arbitraria.

Pero volvamos al proceso por el cual los científicos desarrollan teorías. ¿Qué es, ya que no hay experiencia crucial para decidir una hipótesis en detrimento de otra? ¿Es el resultado del azar, de una marcha ciega? No, responden los defensores del holismo epistemológico. Si no existen experimentos cruciales como los imaginó Bacon, existen, por otro lado, experiencias psicológicamente cruciales que motivarán ciertas decisiones dentro de una comunidad científica. Los criterios que inclinarán la balanza a favor de una solución pueden ser diversos: pragmáticos (ley del menor esfuerzo), estéticos u otros.

Dado que ninguna hipótesis puede ser refutada en absoluto, ¿es el holismo epistemológico compatible con el falsacionismo? Sí, responde Popper, si uno se abstiene, de evitar refutar una afirmación, de recurrir a hipótesis ad hoc, es decir, en el sentido de Popper, hipótesis que no son verificables de forma independiente. del efecto a explicar⁶⁷. Las dos epistemologías, por lo tanto, no son fundamentalmente incompatibles.

5.8 Eficiencia y producción tecnológica.

Como se dijo al comienzo de este capítulo, el valor otorgado a una disciplina científica puede basarse en otros criterios que no sean el grado de veracidad. La eficiencia predictiva y la producción de poderosas herramientas tecnológicas (es decir, valor de utilidad) también son criterios sólidos que impulsan una gran cantidad de investigación. El desarrollo de nuevas tecnologías eficientes basadas en afirmaciones teóricas puede considerarse como otra forma de corroboración más compleja que la evocada en lo que antecede. Lo que podría decirse como "es cierto, ¡ya que funciona!". Ilustraremos esta eficiencia tecnológica con algunos ejemplos,

que completan la discusión sobre los dispositivos de medición (cámara de burbujas, microscopio de tunelería, lentes gravitacionales) conducida en la sección 4.2.4.

Pero tenga en cuenta que algunos avances tecnológicos son adelantados a la teoría: los ingenieros a veces diseñan sistemas innovadores basados en su intuición y un enfoque de prueba / error para el que no existe una explicación teórica completa. Por supuesto, la intuición está guiada por el conocimiento científico disponible. Y la existencia de tecnologías escénicas al menos parcialmente inexplicables es una fuente de motivación e inspiración para los teóricos.

5.8.1 Relatividad general y ubicación por sistema GPS68

El posicionamiento por satélite es ahora muy común, el sistema más conocido es el GPS (Sistema de posicionamiento global) cuyo primer satélite se lanzó en junio de 1977. El sistema es simple: mediante la triangulación de 3 satélites GPS que se encuentran en órbitas a 20 000 kilómetros de altitud, uno puede obtener una ubicación con una precisión del orden del milímetro (ya que tres esferas tienen solo dos puntos en común, de los cuales solo uno representa una posición posible, el otro situándose en las profundidades de la tierra o en el espacio). Para medir la distancia entre el receptor GPS y un satélite, se eligió (por razones de sigilo: ¡no olvide que el sistema GPS se desarrolló originalmente para aplicaciones militares!) Para usar las señales de radio emitidas por satélites en épocas conocidas. Al medir el retraso entre el tiempo de transmisión y la recepción, se obtiene una estimación de la distancia. Un punto crucial es, por lo tanto, la sincronización entre los relojes de los satélites y el del receptor. Para garantizar la precisión del sistema, cada satélite GPS contiene un reloj atómico. ¡Pero eso no es suficiente! De hecho, para obtener la mejor precisión posible, uno debe tener en cuenta y corregir algunos de los efectos predichos por la teoría de la relatividad general. Estos efectos son: • El efecto Sagnac, que se debe a la rotación de la Tierra. Dos relojes girando uno en la dirección de la Tierra y el otro en la dirección opuesta, cambiar. Para el sistema GPS, esto representa un retraso de propagación de las señales de 207 nanosegundos después de una rotación de los satélites alrededor de la Tierra (62 metros de trayectoria de luz). • Desplazamiento gravitacional de la luz69 a rojo o azul. Este efecto representa 60 microsegundos, que es un desplazamiento de posición de 18 kilómetros por día. • Los relojes atómicos integrados en los satélites también están sujetos al campo de gravedad de la Tierra y giran rápidamente a su alrededor, induciendo un efecto Doppler relativista. La suma de estos dos efectos representa un desplazamiento de 21 microsegundos (un desplazamiento de posición de 6,5 kilómetros) por día.

Por lo tanto, como podemos ver, la física teórica puede tener aplicaciones muy concretas en la vida cotidiana.

5.8.2 Moléculas manipuladoras: clips ópticos y tijeras

¿Cómo manipular objetos muy pequeños (el tamaño de algunas moléculas o una macromolécula) sin destruirlos? ¿Cómo esculpir el material en una escala muy pequeña, o cortar segmentos dentro de moléculas largas? Estas preguntas son de gran importancia hoy para los biólogos, que necesitan manipular las células vivas y sus orgánulos sin destruirlos. La solución es

proporcionada por la óptica: ¡podemos construir alicates y tijeras con alta precisión usando rayos láser! La acción de un rayo láser depende de la absorción del objetivo y del resplandor (medido en vatios por unidad de área), es decir, la energía que llega al objetivo durante un período de tiempo determinado. .

La función de las tijeras se obtiene mediante diferentes mecanismos: creación de ondas de choque, calentamiento o rotura de enlaces moleculares. Generalmente se utilizan pulsos cortos de alta energía.

La función de pinza se obtiene de una manera más sutil por medio de un par de rayos láser simétricos. Cuando se refracta un rayo láser con un objetivo transparente, se cambia el impulso del láser. ConservaciónLa cantidad global de movimiento del sistema (láser + objetivo) implica que la cantidad de movimiento del objetivo se modifica y, por lo tanto, que este último está sujeto a una fuerza. Cuando el punto de enfoque de los dos haces está entre el centro del objetivo y la lente, la fuerza resultante atrae al objetivo hacia la lente. Sin embargo, si está ubicado más allá del centro del objetivo, será empujado hacia atrás. También se pueden producir desplazamientos laterales. Los láseres continuos de baja intensidad se utilizan para este propósito para obtener fuerzas de piconewton.

La capacidad de manipular células utilizando rayos láser fue descubierta en la década de 1970 por Arthur Ashkin, de los Laboratorios AT & T Bell, y luego Steven Chu (Premio Nobel de Física en 1997) demostró que es posible manipular moléculas al mismo tiempo. Medios de pinzas ópticas. Estos tienen muchas aplicaciones hoy en día: permiten medir la posición de una enzima con una precisión de 1 angstrom (10⁻¹⁰ metros, es decir, el tamaño de un átomo. !) y manipular las moléculas con gran precisión. Utilizados en conjunto con tijeras ópticas, también permiten realizar actos de cirugía celular. Tenga en cuenta que la idea de que la luz puede generar estrés mecánico no es reciente: la noción de presión de radiación (es decir, la presión ejercida por las ondas electromagnéticas en la superficie de un cuerpo iluminado) tenía Fue anticipado por Johannes Kepler quien, a fines del siglo XVI, había especulado que la cola de un cometa está hecha de granos de polvo empujados por la luz del sol. Trató de explicar por qué, cuando un cometa se aleja del Sol, su cola lo precede.

6 ¿La ciencia explica algo?

Esta pregunta puede parecer provocativa. De hecho, en general se acepta que la ciencia tiene un fuerte valor explicativo: esperamos que nos informe sobre el mundo y nos diga por qué ocurren los fenómenos. Pero, en una inspección más cercana, veremos que el valor explicativo de las ciencias empíricas no es una cuestión trivial, y que es necesario articular la reflexión en torno a cuatro nociones: describir, explicar, comprender e interpretar. .

6.1 Describe o explica?

6.1.1 ¿Qué significa explicar?

La oposición describir / explicar parece a primera vista simple de concebir.

Para el sentido común, describir es mostrar, es decir, relacionar los hechos lo más fielmente posible mediante una serie de declaraciones de observación. Describir es decirle a una tercera persona cómo van las cosas. Explicar es decir por qué los fenómenos se desarrollan de la manera observada.

Vamos a ilustrar esto en el caso de la dinámica del gas perfecto. Describir es enunciar las leyes asociadas al fenómeno observado. En el caso de una reducción del volumen a temperatura constante, el fenómeno observado (aumento de la presión) se describe en la ley de Boyle-Mariotte, que dice que la presión y el volumen varían en proporciones inversas. Pero la ley de Boyle-Mariotte no dice por qué la presión y el volumen varían de esta manera. Para explicar, tenemos que realizar un análisis más profundo. Esto es lo que proporciona el modelo de Maxwell en la teoría cinética de los gases: explica el fenómeno al aumentar la frecuencia de los choques entre las moléculas del gas en las paredes del recipiente.

¿Pero es eso tan simple? No. De hecho, la explicación debe ganar la convicción de la persona a quien se proporciona, y el valor explicativo de una serie de afirmaciones es, por lo tanto, en parte subjetivo, debido a su naturaleza psicológica. Por lo tanto, el valor explicativo no es absoluto: depende de las creencias (en el sentido amplio) de los individuos. Una secuencia de afirmaciones que no se reconoce como una explicación se asimila a una descripción, tal vez más fina porque utiliza afirmaciones teóricas más complejas que la descripción original del fenómeno. Por lo tanto, el valor explicativo está asociado con la llamada del nivel más profundo de descripción, es decir, lo que es aceptado como el nivel final por los individuos. La naturaleza relativa del valor explicativo es, por lo tanto, obvia, ya que este último nivel puede variar según los individuos, los períodos y las disciplinas científicas. Por ejemplo, Newton y Descartes invocaron a Dios como la causa principal de los movimientos naturales. Más tarde, el matemático y físico Pierre-Simon Laplace (1749-1827), para remarcar a Napoleón Bonaparte sobre el lugar de Dios en su obra Exposición del sistema del mundo, "Sr. Laplace, me dicen que tiene escribir este voluminoso trabajo sobre el sistema del Universo sin hacer una sola mención

de su Creador "respondió" Señor, no necesitaba esta hipótesis ", a lo que Napoleón respondió a su vez" ¡Ah! Es una bella hipótesis; ella explica muchas cosas

Se acuerda hacer una distinción entre explicación en el sentido fuerte y explicación en el sentido débil. Una explicación en el sentido fuerte es una explicación que involucra causas no observables (también llamadas metafísicas), a diferencia de la explicación en el sentido débil, que involucra solo causas observables. Esta distinción hace posible dar cuenta de las diferencias de opinión entre los científicos. Para algunos, hay una explicación solo en el sentido fuerte: la explicación debe involucrar un primer principio, metafísico (Dios, ...), y la explicación en el sentido débil no se considera una explicación, pero como una descripción (cómo en lugar de por qué). Para los demás, solo la explicación en el sentido débil es admisible, y es ella quien en la actualidad es considerada en gran parte como la explicación científica por excelencia. Esta distinción no es trivial: Pierre Duhem defendió la idea de que la noción misma de explicación era ajena al campo científico, porque necesariamente se basa (según él) en conceptos metafísicos que escapan a la experimentación.

Para resumir la posición más comúnmente aceptada hoy en día entre los científicos, se puede decir que

Para la descripción / explicación de la oposición, es necesario sustituir una jerarquía de niveles de descripción.

6.1.2 Explicación Nomológico-Deductiva (N-D)

En las ciencias empíricas, hay un tipo de explicación que ocupa un lugar especial: es la explicación (o método) nomológico-deductivo (método abreviado ND), que consiste en deducir los fenómenos observables de las condiciones. Particularidades y leyes (nomos en griego). El esquema de este tipo de explicación propuesto en 1948 por Carl Hempel y Paul Oppenheim es

Explicación o método N-D

Explicaciones: Ley universal, llamada ley de cobertura (ejemplo: Boyle-Mariotte) Datos especiales (ejemplo: reducimos el volumen) Explicación: aumento de la presión (lo que se observa)

Este tipo de explicación es legalista porque se basa en leyes y no en explicaciones no legalistas. Al anticipar la discusión de la noción de causa desarrollada en el Capítulo 10, se puede observar que en la explicación N-D los explicantes y la explicación del efecto a menudo se denominan causa. Hablamos en consecuencia de la explicación causal. Se dice que las ciencias empíricas basadas en el método N-D son explicativas. También son predictivos, porque las leyes permiten predecir lo que se observará antes de que tenga lugar el experimento

La explicación N-D es la heredera de una larga tradición científica que se remonta a Aristóteles, para quien un conocimiento científico debe expresarse como la conclusión de un razonamiento. Es compatible con la teoría aristotélica en varios puntos: como se basa en una ley, procede del conocimiento universal; verifica la restricción de la generalidad necesaria del conocimiento, ya

que las consecuencias de la ley de cobertura son necesarias; Finalmente, el conocimiento científico se concibe como el conocimiento de las causas. Sin embargo, difiere de la teoría aristotélica en varios aspectos:

- Permite explicar los hechos singulares, mientras que, para Aristóteles, los hechos singulares no caen dentro del campo del conocimiento científico.
- La relación entre causa y explicación científica no es la misma: mientras que en Aristóteles, la teoría del conocimiento se basa en una teoría más fundamental de la causalidad, la teoría ND concibe un vínculo más débil, ya que solo se solicita que la explicación explique la causalidad.

La explicación N-D tiene varios problemas.

- Un primer problema es el uso de una ley universal, que no siempre puede distinguirse de una generalización accidental (ver capítulo 3.1.2) cuya veracidad no está establecida universalmente.
- El segundo problema es que el esquema explicativo ND no impone nada a la sucesión en el tiempo de los hechos singulares que entran en la explicación (causa) y la explicación (efecto): ese es el problema precedencia temporal. Si bien el sentido común y la mayoría de las teorías de causalidad dictan que la causa debe preceder al efecto, es posible construir explicaciones retroactivas de N-D. Por ejemplo, conociendo las posiciones actuales de la Tierra, la Luna y el Sol, es posible encontrar las fechas de los eclipses que ya han ocurrido, y así explicarlas usando las leyes de Kepler o Newton.
- El tercer problema proviene de la identificación realizada en el método N-D entre explicación y causalidad. Es posible construir ejemplos para los cuales la explicación del efecto por su causa no sea satisfactoria. El ejemplo del tamaño de la sombra de una torre fue propuesto por Bromberger en 1966. El tamaño de la sombra se explica perfectamente desde la posición del Sol en el cielo y el tamaño de la torre en el Marco de un diagrama causal ND. Pero también podemos, a la inversa, deducir el tamaño de la torre a partir del tamaño de la sombra, sabiendo la posición del Sol. ¡Pero este razonamiento no es satisfactorio como una "explicación" del tamaño de la torre! La teoría N-D es, por lo tanto, incompleta en este sentido, ya que no distingue estos dos casos.
- Un cuarto problema proviene de la identificación hecha por Hempel y Oppenheim entre la explicación y la predicción. Según el modelo N-D, el mismo modelo lógico se aplica en ambos casos. Pero los dos procesos son diferentes: en el caso de la explicación, el sujeto con conocimiento de las explicaciones y la explicación, que son dos fenómenos que tienen una existencia concreta.

6.2 ¿Explica o entiende?

La filosofía de la ciencia distingue entre entender y explicar. La comprensión se asocia con un sentimiento de familiaridad, con la percepción de una conexión íntima con el fenómeno analizado. Explicar también se usa en el marco de las ciencias de la naturaleza, mientras que entender se aplica a las ciencias humanas: uno explica los fenómenos naturales, comprende los hechos humanos. Los primeros están asociados con causas, los últimos por razones que reflejan

el hecho de que los humanos tienen intenciones. La explicación también suele asociarse con la explicación N-D, mientras que la comprensión a menudo se refiere a métodos no legalistas.

6.1 Interpretación, explicación y comprensión.

Vayamos ahora a la interpretación, que es diferente de las nociones descritas anteriormente. Decir que uno interpreta algo tiene dos implicaciones. En primer lugar, que preexiste algo independiente de la interpretación. Entonces, que son posibles varias interpretaciones: la interpretación tiene un carácter subjetivo. Cualquier explicación es una interpretación. La interpretación puede (en el caso de las ciencias humanas) o no (en el caso de las ciencias de la naturaleza) estar acompañada por la comprensión.

Las ciencias explicativas, basadas en la explicación N-D, están disociadas de las ciencias interpretativas, que apelan a la explicación no legalista por razones. Esta distinción abarca la mencionada anteriormente entre las ciencias naturales y las ciencias humanas.

6.2 Ciencias predictivas y ciencias anticipatorias.

6.2.1 Predicción, anticipación y científicidad.

Las distinciones que se acaban de hacer también permiten diferenciar las ciencias de acuerdo con la forma en que ofrecen para predecir los fenómenos. Para una ciencia empírica, esta capacidad predictiva es de gran valor para los científicos y se considera un criterio de científicidad. La capacidad de predecir permite la producción de declaraciones de observación refutables, que son esenciales para el método experimental y necesarias para los falsificadores. Confiere a las ciencias empíricas un gran valor de verdad, porque parece indicar que las afirmaciones teóricas (teorías, leyes, ...) no son puras ficciones, es decir que, de una manera u otra, están relacionados con el mundo real. En un nivel más práctico, es la posibilidad de predecir fenómenos que hacen que las ciencias empíricas sean herramientas para actuar sobre el mundo y que, por lo tanto, les otorga cierta eficiencia.

Como ya hemos visto, la explicación N-D involucra leyes universales que, gracias al cálculo, permiten predecir con precisión un cambio para un conjunto fijo de condiciones iniciales, y así formular declaraciones de observación. La ciencia basada en tales explicaciones, es decir, las ciencias explicativas, se denomina en consecuencia ciencias predictivas, y se dice que el método N-D es una estructura predictiva.

¿Significa esto que las ciencias interpretativas no tienen capacidad para predecir fenómenos? No. Sin embargo, la interpretación integral a menudo conduce a pronósticos más vagos que son

más difíciles de cuantificar que el método N-D. Esto se llama anticipación en lugar de predicción, y ciencia anticipatoria.

6.2.2 ¿Predicción = validación? El descubrimiento de Neptuno.

Un famoso ejemplo de pronóstico de la mecánica newtoniana es el del descubrimiento del planeta Neptuno (el octavo planeta del sistema solar) por el astrónomo francés Jean Joseph Urbain Le Verrier (1811-1877).

El planeta Urano (el séptimo del sistema solar) fue descubierto en 1781 por el astrónomo holandés William Herschel (1738-1822). Es el primero en identificar a Urano como un planeta y no como una estrella. Pero nos damos cuenta muy pronto de que la trayectoria de Urano no corresponde a las predicciones que se pueden hacer gracias a las leyes de Newton y Kepler. Además, las anomalías son mayores que los errores de precisión de los telescopios de ese tiempo y los de los cálculos manuales. Entonces surge la pregunta: ¿deberíamos revisar estas leyes, complementarlas con otras o suponer que son válidas y que debemos encontrar una solución compatible con ellas? Esta es la última solución que se adoptará de inmediato. Desde 1835, astrónomos como George Biddel Airy (1801-1892), François Arago (1786-1853) y Friedrich Bessel (Alemania) especularon que estas irregularidades se debían a la existencia de una novena Planeta que, por atracción gravitatoria, perturbaría la órbita de Urano. En 1845, Arago persuadió a Le Verrier para que abordara este problema revolucionario: en lugar de justificar las observaciones a posteriori, se trata de predecir la existencia de un objeto por adelantado. Después de 11 meses de trabajo y 10,000 páginas de cálculo, Le Verrier presenta tres memorias en la Academia de Ciencias. El último, decisivo, data del 31 de agosto de 1846 y se titula En el planeta que produce las anomalías observadas en el comportamiento de Urano. Determinación de su masa, órbita y posición actual. Se realiza la predicción teórica. Ahora se trata de comprobarlo por observación. El 18 de septiembre, Le Verrier le escribió a Johann Galle en el Observatorio de Berlín. La noche de la recepción de la carta, el 23 de septiembre, Galle apuntó su telescopio a la posición predicha por Le Verrier, y descubrió un objeto hasta ahora desconocido: Neptuno. Esta observación cierra el problema y demuestra el poder predictivo de las leyes de Newton.

El descubrimiento de Neptuno también revela que la posteridad puede ser cruel. Un brillante astrónomo inglés de 22 años, John Couch Adams, realizó el mismo trabajo matemático en Cambridge. Había predicho la posición de Neptune en septiembre de 1845, casi un año antes que Le Verrier (quien no estaba al tanto de su trabajo). Primero escribió a un astrónomo de Greenwich y luego, sin recibir respuesta, al director del Observatorio de Greenwich, George Airy. Este último, desinteresado, pidió detalles tan triviales que Adams abandonó.

6.2.3 ¿Y cuándo no funciona? Las trayectorias de mercurio y la luna.

El descubrimiento de Neptuno es un argumento a favor de la validez de las leyes de Newton. Pero, ¿qué pensar cuando la mecánica newtoniana no explica un fenómeno astronómico, en el sentido de que las observaciones no son compatibles con las afirmaciones teóricas y las afirmaciones de observación deducidas de las leyes de Newton?

Un ejemplo similar al del descubrimiento de Neptuno es el de la perihelia⁷⁴ de Mercurio, el primer planeta del sistema solar, en comparación con la teoría newtoniana. Para explicar estas irregularidades, Le Verrier y otros trataron de utilizar el mismo "truco" que en el caso de Urano: hacer que el supuesto de la existencia de un nuevo planeta (llamado Vulcano) interrumpiría la órbita de Mercurio. Los cálculos fueron realizados, pero este hipotético planeta nunca fue observado. Tuvimos que enfrentarnos a los hechos: ¡estas anomalías escaparon a la mecánica newtoniana!

Un segundo ejemplo es la trayectoria de la Luna: a veces estaba ligeramente por delante o por detrás de las predicciones teóricas. Además, las anomalías parecían evolucionar de una manera arriesgada e impredecible.

¿Qué se puede deducir de estos dos casos donde los cálculos hechos de las leyes de Newton no nos permiten establecer una correspondencia con los hechos observados?

En el primer caso, el de la trayectoria de Mercurio, son los fenómenos físicos involucrados los que escapan a la mecánica newtoniana. No fue hasta que Albert Einstein (1879-1955, Premio Nobel de Física de 1921) revisó la teoría de la gravitación en el marco de la teoría de la relatividad general en 1915 para poder explicar la trayectoria de Mercurio, después de casi 50 años de Derrota de la teoría newtoniana.

El segundo caso es diferente: la trayectoria de la Luna se rige por la física contenidas en las leyes de Newton, pero esta es la predicción (en tiempo de longitud arbitraria y con precisión infinita) a través del cálculo matemático que sea imposible ! Para entender esto, no fue hasta 1890, cuando Henri Poincaré (1854-1912) analizó la estructura de las ecuaciones e introdujo las bases de lo que hoy se llama la teoría del caos. La trayectoria de la Luna es caótica, y por lo tanto no es predecible, en el sentido tradicional del término usado desde Laplace (esto se discutirá con más detalle en el capítulo 10).

Estos dos ejemplos muestran la complejidad de la interpretación de la incompatibilidad entre una teoría y las declaraciones de observación. En el caso de Mercurio, es la teoría que debe extenderse para dar cuenta de nuevos mecanismos. En el segundo caso, la teoría no necesita extenderse, ¡pero es la idea de predicción la que debe revisarse!