

THE LAGOON. HOW ARISTOTLE INVENTED SCIENCE.

Por Armand Marie Leroi. Bloomsbury Circus, Londres, 2014.

Aristóteles

Primera aproximación sistemática al estudio de la naturaleza viva

A lo largo del siglo xx, toda una generación sobresaliente de eximios profesionales de los estudios clásicos (David Balme, Allan Gotthelf, Wolfgang Kullmann, James Lennox, Geoffrey Lloyd y Pierre Pellegrin) abordaron los tratados biológicos de Aristóteles como si fueran tratados de filosofía natural, con particular énfasis en la filología. En un giro copernicano, Armand Marie Leroi coloca ahora el foco sobre un Aristóteles poco conocido, el pionero del método científico llevado a la práctica.

Hijo del médico de la corte de Macedonia, Aristóteles (384-322 a.C.) aportó las bases de una ciencia que perduró 18 siglos. Quedó huérfano muy niño y se trasladó a Atenas, donde se hizo discípulo de Platón. En el año 342 a.C. volvió a Macedonia, como tutor y consejero de Alejandro Magno, hijo de Felipe II. Más tarde fundó en Atenas su propia escuela, en el jardín de su propiedad (Liceo). En la Academia platónica, aprendió la búsqueda de la verdad en el reino intangible de las ideas, pero no tardó en decantarse por el mundo de la realidad tangible.

Exploró los misterios del mundo natural y puso las bases de una ciencia que perduró 18 siglos. Enseñó sobre todo el conocimiento científico y filosófico de su tiempo. No fue, sin embargo, matemático. Sus opiniones en física y cosmología, a menudo erradas, no dejaban de tener su coherencia. Algunos errores tardaron tiempo en desecharse, como el de que los cuerpos supralunares eran perfectos e inmutables. Pero su imponente talla filosófica nunca se puso en cuestión. Poseemos muchas de sus lecciones en forma de libros: *Categorías*, *Sobre la interpretación*, *Análíticos anteriores*, *Análíticos posteriores*, *Tópicos*, *Refutaciones*

sofistas, *Metafísica*, *Ética a Nicómaco*, *Poética*, *Política*.

Durante los años 345-342 se dedicó a la investigación de la fauna marina en el golfo de Kallonis, en Lesbos. Los escritos de biología y zoología representan algo más de una quinta parte de su obra conservada. Presta atención a la vida en sus múltiples formas, reflejada en sus minuciosos datos y cuidados análisis. De los varios tratados que nos han llegado en el *Corpus Aristotelicum*, la *Investigación sobre los animales* (*Historia animalium*) es el más extenso. Junto a la *Investigación* (con sus diez libros, según la edición de Andrónico de Rodas, que añadió dos o tres libros al conjunto auténtico), hay que considerar *Sobre las partes de los animales*, *Sobre la marcha de los animales*, *Sobre el movimiento de los animales* y *Sobre la generación de los animales*. Este tipo de escritos enlaza con temas estudiados en los *Pequeños tratados de historia natural* y *Sobre el alma*.

En el Liceo impartió un gran curso de ciencia natural. Aconsejaba empezar por una descripción abstracta de la naturaleza, luego había que abordar el movimiento de las estrellas, para seguir con la química, meteorología y geología en riguroso orden, para acometer el grueso del estudio, a saber, la exposición sobre los seres vivos, del más humilde a nosotros. En el dominio de la zoología atiende a la morfología comparada, la anatomía funcional, el movimiento, la respiración, la muerte y lo que hace que los animales perduren. También, de la reproducción y del curso del desarrollo embrionario. Las cuestiones sobre las plantas se han perdido. Debió de ser un maestro exigente: «Las raíces de la educación son amargas» escribió, «pero sus frutos son dulces». «El hombre cultivado es superior al que care-

ce de formación, igual que el ser vivo es superior al muerto.»

El término *naturaleza* (*physis* en griego) aparece ya en Homero. Aristóteles introdujo la expresión *ciencia natural* (*physike episteme*) y su complementaria, *filosofía natural*. Con el estagirita, se consolida la idea de un cosmos singular y geocéntrico, un universo cuya unicidad y eternidad, inmutables a lo largo del tiempo, no estaban aseguradas con Platón.

Para Aristóteles, la naturaleza, principio de actividad y movimiento, no hace nada en vano («*tèn physin methèn máten poiei*»), sino que procede siempre según un orden, dirigida a un *télos*. El Bien y la Belleza constituyen el objetivo final de toda esa atractiva pluralidad de seres y formas, organizados en la escala de perfección natural que va de las plantas y los organismos inferiores hasta el hombre, animal superior, lógico y político. La visión aristotélica del universo biológico está guiada por su teleología. Hay en toda la Naturaleza una teleología implícita e inmanente. Las funciones que cumplen diferentes órganos y organismos nos revelan las causas finales, que explican su existencia y propiedades. La teleología aristotélica no depende de un demiurgo, de una realidad externa, sino de su propia naturaleza.

Por sus obras desfila más de medio millar de especies. De ellas hay 75 mamíferos, 204 aves, 30 peces, 22 anfibios y reptiles, 7 cefalópodos, 18 crustáceos, 83 insectos y 39 ostracodermos y zoófitos. Sus observaciones sobre el mundo de los insectos marcan un progreso como fundación real de la ciencia entomológica. Realizó sus propias disecciones y así descubrió la «linterna de Aristóteles» del erizo de mar o la placenta de la musola dentada (*Mustelus asterias*). Otras veces realizó experimentos sistemáticos, como las disecciones seriales de huevos fecundados e incubados para describir el patrón de desarrollo del embrión. El desarrollo del embrión de pollo es un capítulo obligado en todas las historias de la experimentación científica.

Se trataba de determinar los rasgos que definían a cada especie para derivar de ellos su función. Había que identificar los rasgos muy generales para ir descendiendo y acotando los distintivos de grupos diferentes. En la Academia platónica había sido testigo de la reiterada discusión sobre la clasificación de seres y objetos, según el procedimiento de la dicotomía progresiva. Pero no le interesa una división o clasificación apriorística, sino la que esté fundada sobre la observación real. Trabaja con las

nociones de *genos* y *eidós*, género y especie, nociones, por otro lado, con un valor no muy exacto ni muy preciso siempre. La ordenación por dicotomía se acompaña de una anatomía comparada y de una concepción funcionalista de los animales y sus partes, analizadas por analogía y en mutuo contraste.

Aristóteles reconoce grupos mayores que nosotros agrupamos ahora en géneros, familias, órdenes, clases y phyla. Los llama *megista gene* («grupos grandes»). Algunos tenían nombres comunes: *ornis* («ave») o *ikthys* («pez»), pero otros eran tecnicismos: *malakostraka* («de concha blanda»), como la mayoría de los crustáceos, *ostrakoderma* («de concha dura»), la mayoría de los equinodermos, gasterópodos, bivalvos, percebes, *entoma* («divisibles»), los insectos, miriápodos, quelíceros, etcétera. La gran partición se ejemplifica entre *anhaima* («animales sin sangre», invertebrados) y *enhaima* («animales con sangre», vertebrados). Los que portan sangre se subdividen a su vez en vivíparos (hombre, cetáceos, rumiantes) y ovíparos (aves, anfibios, reptiles, serpientes y peces). Los privados de sangre se subdividen entre los que producen huevos perfectos (cefalópodos, crustáceos), huevos peculiares (insectos), mucílago o yema (moluscos, equinodermos) y los nacidos por generación espontánea (esponjas, celentéreos).

Los tipos animales forman un *continuum* jerárquico. Crean una escala, que

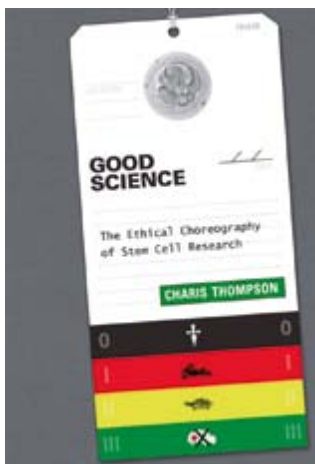
va de la materia inerte al primer motor, ascendiendo desde las plantas, los zoofitos (animales-planta, como las esponjas), los insectos, los cuadrúpedos ovíparos, los vivíparos y el hombre. La necesidad de trabajar con orden y parsimonia lleva a distinguir grupos en este continuo. El criterio fundamental es la vitalidad manifestada por el calor animal, que se refleja en el modo de reproducción, ya que los dotados de mayor calor interno engendran hijos vivos, seguidos por los que ponen huevos más o menos perfectos, hasta los que se generan espontáneamente de materiales inorgánicos u orgánicos en descomposición.

Reconoce que las características de los animales varían con la escala de la jerarquía de la naturaleza. Las diferencias entre grupos (pensemos en la diferencia entre un gorrión y un gavilán, dentro de un grupo mayor son relativamente sutiles). Comparten una misma estructura corporal y solo divergen en tamaño y forma, en «lo más y lo menos». Buena parte de sus descripciones biológicas se refieren a las diferencias en razón de picos, sistema excretor y cerebro. En cambio, las diferencias entre grandes grupos, entre peces y aves, es mucho más radical. Corresponden a la anatomía y disposiciones de los órganos, a la arquitectura global. Y a su geometría: el animal tiene tres ejes con seis polos: superior e inferior; anterior y posterior; izquierdo y derecho. El polo superior es la zona de la nutrición; el in-

ferior, la de excreción. El polo anterior concentra los órganos de los sentidos y la dirección en que se mueve; el opuesto es el posterior. Derecho e izquierdo tienen su significado común.

No se limita a recopilar datos y observaciones. Se plantea y responde a numerosas cuestiones: ¿por qué los peces tienen agallas y no pulmones? ¿Por qué tienen aletas y no patas? ¿Por qué las aves tienen buche y los elefantes trompa? ¿Por qué las águilas ponen pocos huevos y muchos los peces? ¿Por qué solo los humanos andan erguidos? ¿Qué pasa con los camellos? ¿Cómo vemos, olemos, oímos y sentimos el tacto? ¿Hasta dónde llega la influencia del medio sobre el desarrollo? ¿Por qué los hijos se parecen unas veces a los padres y otras no? ¿Qué función cumplen los fluidos vaginales, la menstruación, los testículos y el orgasmo? ¿Cuál es la causa de los nacimientos monstruosos? ¿Cómo consiguen mantenerse vivos los organismos? ¿Por qué se reproducen? ¿Por qué mueren? Con particular detalle se detiene en la anatomía del erizo de mar, ascidias y gasterópodos. Describe pico y patas de aves costeras. De los delfines le fascinan su respiración aérea y su amamantamiento de las crías, pese a su aspecto de pez. Su amplio análisis de peces ilustra su morfología, régimen alimentario, procreación, sonidos que emiten y pautas empleadas en sus migraciones. Su animal favorito fue la sepia (*Sepia officinalis*).

—Luis Alonso



GOOD SCIENCE. THE ETHICAL CHOREOGRAPHY OF STEM CELL RESEARCH.

Por Charis Thompson. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2013.

Células madre

Nulla scientia sine ethica

Los avances en ciencias biomédicas tienen, por lo común, implicaciones sociales. También éticas. Para recordarnoslo están los códigos deontológicos y los comités de bioética, disciplina esta

que se inicia tras la Segunda Guerra Mundial, cuando se hace obligatorio el empleo de modelos animales en ensayos, en sustitución de las pruebas sobre humanos. Pero antes de cualquier intervención des-

de fuera, importa tanto conocer el modo de proceder de la naturaleza.

Luego de fusionarse las membranas del espermatozoide con la del óvulo, comienza una serie de fenómenos biológicos que desencadenan el desarrollo embrionario. Se inicia una serie de interacciones entre el óvulo y el material del espermatozoide introducido en el citoplasma materno. A las pocas horas de la fecundación empieza la expresión del genoma del embrión. Pronto asistimos a la primera división del cigoto, que genera dos células, o blastómeros, cada una con 46 cromosomas. Cada blastómero tiene potencialidad para originar un ser humano completo como lo demuestra el fenómeno de los mellizos monocigóticos (gemelos idénticos). Cada blastómero se va dividiendo sucesivamente por mitosis de dos en dos. Al cabo de tres días, el embrión está lleno de células (blastómeros) y semeja una mora (mórula). Al cuarto día,

el embrión crece y se produce una cavidad: se genera un blastocisto. En el blastocisto aparecen territorios celulares comprometidos con funciones específicas. La masa celular interna del blastocisto posee las células troncales (células madre, o *stem cells*), que son células pluripotenciales con capacidad de producir cada una de las células de los diferentes tejidos propios del embrión humano. Las líneas de células estaminales pluripotentes pueden extraerse de embriones tempranos, antes de su implantación en el útero. Las células se denominan células madre embrionarias.

Las líneas de células madre pluripotentes pueden renovarse continuamente en cultivo y, a partir de esa autorregeneración, formar la mayoría de los tejidos del organismo (por eso son pluripotentes). Tamaño capacidad para desarrollar un amplio espectro de tipos celulares funcionales las convierte en cruciales para el estudio del desarrollo de los tejidos y para el estudio de las enfermedades degenerativas.

Suele fecharse el origen de la bioética moderna con el juicio de Nuremberg a los médicos nazis. La causa, «Estados Unidos de América contra Karl Brandt et alii», tuvo su vista durante 1946 y 1947. A los reos se les acusó de crímenes de guerra y crímenes contra la humanidad, de haber instigado y participado en experimentos médicos sobre prisiones de guerra y civiles de los países ocupados y conciudadanos sin consentimiento de ellos. Se les responsabilizó de asesinato en masa en aplicación del programa eutanásico Aktion T4 y experimentos clínicos que desarrollaron con brutalidad, crueldad y tortura hasta la muerte. En cambio, la investigación sobre células madre es de fecha más reciente. Comenzó con experimentos de biofísica sobre ratones diseñados para comprobar la supervivencia tras una exposición radiactiva. A partir de esos animales se aislaron y caracterizaron también, en 1981, las primeras células embrionarias. Dirigieron los ensayos Martin John Evans y Gail Martín. Los campos biomédicos humanos relacionados con las células madre embrionarias son la genómica, la bioinformática, la medicina regenerativa y personalizada, las técnicas seleccionadoras de reproducción y prenatales, la potenciación humana y la longevidad, las neurociencias y la biología sintética. Todas ellas tienen ética, porque interseccionan con temas controvertidos: eugenesia, privacidad genética, comercialización, regeneración y blindaje de la vida humana.

El año 1998 vio la publicación del ensayo científico que había logrado por vez

primera una creación de líneas de células madre embrionarias humanas. James Thomson y sus colegas, del Centro Regional de Wisconsin de Investigación sobre Primates, daban a conocer cómo habían conseguido líneas celulares pluripotentes derivadas de blastocistos. Tras la proliferación indiferenciada in vitro, mantenían capacidad para formar las tres capas germinales embrionarias.

Para crear líneas de células madre, se retiran células de la masa interior y se cultivan, lo que impide que el embrión se implante en el útero. En el año 2006 Robert Lanza y su equipo idearon un nuevo método: retirar una célula del estadio de ocho células de desarrollo (antes de la formación del blastocisto). Esa célula de blastómero, examinada por si portaba defectos genéticos, le sirvió al grupo de Lanza para producir líneas de células madre embrionarias, sin comprometer el embrión del que se obtenía un blastómero. Ese blastómero se cultivaba con líneas celulares de células madre embrionarias ya establecidas, y luego se separaba de ellas para formar líneas de células madre embrionarias enteramente competentes.

«Lo que hemos conseguido por vez primera es crear células madre embrionarias humanas sin tener que destruir el embrión», declaraba el 23 de agosto de 2006. El artículo, publicado en línea, despertó un enorme interés. Pero no se decía toda la verdad. No tardó en descubrirse que se habían sacrificado los 16 embriones utilizados. Muchos científicos cuestionaron incluso que fuera real parte de lo expuesto por los autores. Llovía sobre mojado tras el escándalo provocado, tiempo atrás, por el investigador surcoreano Woo Suk Hwang, quien mintió cuando declaró que había creado líneas de células madre embrionarias a partir de embriones humanos clonados. Woo Suk Hwang publicó dos artículos famosos en *Science* en 2004 y en 2005, donde sostenía que había conseguido producir líneas de células madre a partir de embriones obtenidos por transferencia nuclear y, luego, haber creado líneas de células madre con ADN propio de los pacientes. No tardó en quedar descubierta la falsedad de lo publicado por Hwang y su equipo sobre los óvulos empleados; ni había tales líneas celulares. Fueron obligados a retractarse.

Desde que se obtuvieron hace más de 30 años, las células madre embrionarias se han propuesto como fuente de sustitución de células en medicina regenerativa, pero su plasticidad y capacidad ilimitada de autorregeneración ponían en cuestión

su seguridad, al sugerirse la posibilidad de formación de tumores, rechazo del sistema inmunitario y peligro de diferenciación en tipos celulares no deseados.

En razón de su natura privilegiada en lo que se refiere al sistema de rechazo inmunitario (capacidad para tolerar antígenos extraños o células no histocompatibles sin desencadenar una respuesta inmunitaria), las enfermedades que afectan a los ojos sí constituyen una aplicación atractiva para empezar a emplear esa técnica. La degeneración del epitelio del pigmento retiniano conduce a la pérdida de fotorreceptores en enfermedades que amenazan la visión. Encierra, pues, un evidente atractivo para una regeneración potencial. En la degeneración macular relacionada con la edad, los fenómenos genéticos y ambientales predisponen a los pacientes a unas tensiones que terminan por comprometer el epitelio pigmentario retiniano. En la distrofia macular de Stargardt, la degeneración del epitelio pigmentario retiniano viene inducida por segmentos de fotorreceptores genéticamente alterados. Esas dos degeneraciones maculares constituyen, respectivamente, dos causas principales de ceguera adulta y juvenil en los países desarrollados.

En fecha reciente, a mediados del último mes de octubre, los periódicos y medios de comunicación del mundo occidental resaltaban una noticia científica: en el laboratorio de Robert Lanza, de Advanced Cell Technology, se había logrado desarrollar epitelio pigmentario retiniano derivado de células madre embrionarias humanas en pacientes con degeneración macular asociada a la edad y distrofia macular de Stargardt.

Los autores de ese trabajo muestran la seguridad a medio y largo plazo de células derivadas de células madre embrionarias humanas que se han trasplantado en pacientes. Se trataba, en efecto, de discernir la seguridad y tolerancia del trasplante subretiniano de epitelio pigmentario retiniano derivado de células madre embrionarias humanas. De los voluntarios del ensayo, nueve eran mayores de 18 años y otros nueve mayores de 55 años. Los primeros sufrían distrofia macular de Stargardt; los segundos, degeneración macular atrófica asociada a la edad. Para cada trastorno ocular se trataron tres cohortes de dosis (50.000, 100.000 y 150.000 células). El seguimiento de los pacientes se prolongó a lo largo de 22 meses con series de pruebas sistémicas, oftálmicas y de imagen. No se advirtieron indicios de proliferación adversa o recha-

zo, ni problemas sistémicos de seguridad relacionados con el tejido trasplantado. Se logró una óptima agudeza visual en diez ojos, mejor o igual en siete y disminuyó en uno.

De ello se desprende que se ha conseguido la primera demostración de la seguridad, entre medio y largo plazo, la supervivencia del injerto y la actividad biológica de la progenie de células madre pluripotentes en cualquier paciente. El ensayo ha puesto de relieve la capacidad de las células madre embrionarias humanas para reparar o sustituir tejidos enfermos y sin fármacos adecuados.

Llevada al terreno de la legislación, la investigación sobre células madre pluri-

potentes, las normas sugeridas, aprobadas o rechazadas de acuerdo con el juego democrático de la alternancia en el poder, dependen del enfoque que se posea sobre la dignidad de la persona y el respeto a la vida en sus diferentes fases. La controversia se hace especialmente intensa cuando se trata de la derivación de nuevas líneas celulares a partir de embriones sobrantes en los procesos de fecundación in vitro. El criterio ético del que nadie, públicamente al menos, quiere mostrarse alejado es que el fin no justifica los medios. Unos lo esgrimen para mostrar su oposición al sacrificio de embriones. Otros creen ver una compatibilidad entre los fines de la ciencia (medicina regenerativa) y los fines

de la ética. A la postura de los segundos se le conoce por ética consecuencialista o utilitarista. Para los primeros, la labor de la ciencia, como la de cualquier actividad humana, debe estar sujeta a un código de valores o ético; para los segundos, la opinión de la mayoría resulta determinante. La ética se ocupa del bien y del deber de realizarlo. Cuenta el hombre para ello con el conocimiento de la naturaleza, que le permite tomar decisiones morales mejores o, al menos, mejor informadas. Ahora bien, un conocimiento particular de la naturaleza no dicta una misma moral. Existe una relación compleja entre naturaleza y acción moral.

—Luis Alonso



WORLDS WITHOUT END. THE MANY LIVES OF THE MULTIVERSE.

Por Mary-Jane Rubenstein. Columbia University Press, Nueva York, 2014.

Multiverso

Entre el rigor de la matemática y la fantasía científica

La difusión de la idea de multiverso y de los conceptos asociados de inflación y teoría de cuerdas debe mucho a *Scientific American* (Investigación y Ciencia en el mundo de expresión española). De hecho, son tres los foros principales donde ha venido madurando la cuestión: las revistas de física subatómica, las de cosmología y la nuestra. Así lo reconocen quienes trabajan en el campo o relatan su historia. Como la autora de este libro.

La palabra griega *kosmos* la encontramos ya en la *Iliada* de Homero, para designar el orden de los soldados en el campo de batalla o el de los remeros en la nave. Con ese término indicaba Herodoto el alto grado de organización del estado de Esparta; también, el orden en general. De ahí pasó a denominar al mundo en su globalidad, con Pitágoras, en el siglo VI a.C., y en Protágoras, un siglo después. Ese significado quedó plenamente asentado en el tiempo de Platón (429-347 a.C.). Otros términos empleados

por este para referirse al universo fueron *pan* («todo»), *onta* («todas las cosas»), *ouranos* («el firmamento») y *to olon* («el todo»). En el *Timeo*, Platón insiste en que el mundo debe ser singular y perdurable. Pero su mundo está sembrado de diferencias, de mezcla y pluralidad; es un universo de interrelación entre orden y desorden, entre lo singular y lo plural, entre la unidad y la diferencia.

Con Aristóteles se consolida la idea de un cosmos singular y geocéntrico, un universo cuya unicidad y eternidad no estaban aseguradas con Platón. Como el estagirita explica en *De caelo*, el mundo puede ser generado y corruptible o increado e incorruptible. Pero no al mismo tiempo generado e incorruptible. Un universo con un principio no puede ser un universo sin un final. De las dos opciones que plantea (generado y corruptible, o increado e incorruptible), Aristóteles optará por la segunda, para subrayar que un mundo que exista eternamente ha de ser único.

La teoría de una posible multiplicidad de mundos se remonta a los filósofos atomistas del siglo V a.C. Frente a los principios de la materia constituidos por un solo elemento (agua, aire, fuego, lo indefinido) de los filósofos jónicos, Leucipo y su discípulo Demócrito sostenían que el mundo estaba compuesto no de un elemento básico, sino de piezas microscópicas e indivisibles de materia denominadas átomos. Esos átomos se mueven eternamente en un vacío (*kenon*). En un tiempo y lugar indeterminados colisionan al azar y forman un vórtice, en el que los átomos quedan mutuamente entrelazados, entrelazamientos que terminarán por dar lugar a un universo. Lo mismo acontecerá con otros vórtices. Pero ni la multiplicidad espacial de los atomistas ni la posterior multiplicidad temporal de los estoicos triunfaron.

De Aristóteles hasta Einstein, la tradición filosófica y científica sostuvo que el universo era uno e inmutable. En la Edad Media, santo Tomás de Aquino defendió la singularidad cósmica en la línea de Aristóteles, una postura que años más tarde condenaría el obispo Etienne Tempier de París cuando declaró que la tesis de que Dios no podía crear más de un mundo era anatema. Los decenios y siglos que siguieron fueron testigos de un torrente de tratados sobre la posibilidad de mundos múltiples; citemos, por mor de ejemplo, el multiverso sin centro de Nicolás de Cusa en el siglo XV y los mundos infinitos de Giordano Bruno.

Una característica notable de nuestro universo reside en que las constantes físicas poseen los valores que se necesitan para permitir la formación de estructuras complejas, entre ellas, los seres vivos.

A eso se le llama ajuste fino. Steven Weinberg, Martin Rees, Leonard Susskind y otros sostienen que la hipótesis de un multiverso proporciona una explicación elegante para esta llamativa coincidencia: si las constantes de la naturaleza adoptan todos los valores posibles en un conjunto lo bastante grande de universos, aquellos que hacen posible la vida deberán darse en algún lugar. De ese modo se introdujo la «solución multiverso» que resolvía el problema del ajuste fino sin necesidad de apelar a una mente extramundana. Hay más de un multiverso, más de un conjunto hipotético de universos. Algunos de esos conjuntos son incompatibles entre sí. De otros se dice que se encuentran encajados a la manera de muñecas rusas, en una jerarquía cósmica de infinitos dentro de infinitos. Otros modelos podrían ser maneras diferentes de expresar el mismo conjunto. Tal es lo que acontece cuando hablamos del «paisaje» de la teoría de cuerdas [véase «El paisaje de la teoría de cuerdas», por Raphael Bousso y Joseph Polchinski; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2004].

La primera hipótesis de fuste científico sobre el multiverso emergió a finales de los años cincuenta, cuando Hugh Everett convirtió la interpretación de los muchos mundos en explicación alternativa a la interpretación de Copenhague, entonces estándar, de la mecánica cuántica, avanzada por Niels Bohr y Werner Heisenberg [véase «Los muchos mundos de Hugh Everett», por Peter Byrne; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2008]. Otra hipótesis temprana sobre el multiverso entró en escena a mediados de los ochenta, cuando Alexander Vilenkin, André Linde, Alan Guth, Andreas Albrecht y Paul Steinhardt propusieron que el proceso inflacionario que generó nuestro universo podía ir eternamente engendrando nuevos universos [véase «El universo inflacionario», por Alan H. Guth y Paul J. Steinhardt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1984 y «El universo inflacionario autorregenerante», por André Linde; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1995].

El universo observable se extiende hasta una distancia de unos 42.000 millones de años luz, nuestro horizonte visual cósmico. Pero no existe ninguna razón para suponer que todo termina ahí. Más allá podría haber muchos —tal vez infinitos— dominios similares al nuestro. Cada uno habría comenzado con una distribución diferente de materia, pero todos se regirían por las mismas leyes de la física. La mayoría de los cosmólogos aceptan ese tipo

de multiverso, que Max Tegmark tipifica como de «nivel 1» [véase «Universos paralelos», por Max Tegmark; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2003]. Se supone que nuestro volumen constituye una muestra representativa del total. Otros seres en lugares lejanos verían regiones diferentes. El conjunto de todas esas regiones, visibles o no por nosotros, conformaría la versión más sencilla de multiverso.

En el segundo nivel de Tegmark, las leyes físicas varían dentro del multiverso, de suerte que las regiones remotas pueden considerarse universos distintos. Esta versión es necesaria para explicar, por ejemplo, la constante cosmológica. La mayoría de esos universos serían estériles, pero algunos hervirían de vida. Defensor de este multiverso de «nivel 2» es Vilenkin, quien defiende un conjunto infinito de universos, con un número infinito de galaxias y planetas. Por su propia naturaleza, la idea de multiverso de nivel 2 trasciende toda verificación empírica. Quienes se adhieren a ese modelo han elaborado mecanismos diversos para explicar cómo habrían surgido esos mundos y dónde podrían encontrarse. De entre todas las opciones, la que goza de mayor aceptación es el modelo de inflación caótica. Sostiene este que, a gran escala, el espacio es un vacío en eterna expansión. En el tercer nivel de Tegmark, habría universos paralelos solo como estados cuánticos. El multiverso de nivel cuarto proclama que el multiverso no solo está bien descrito por la matemática, sino que es matemática. Todas las estructuras matemáticas posibles presentarían existencia física y, colectivamente, ofrecerían un multiverso que subsumiría todos los demás.

Gozó de especial predicamento el avanzado en 1977 por John Archibald Wheeler: un universo cíclico. Una secuencia infinita de universos que van alternando su colapso y su expansión, que perdura siempre. Cada gran implosión rebota en una nueva singularidad inicial (*big bang*). Los universos se van sucediendo bajo condiciones iniciales enteramente inéditas.

Lo mismo el multiverso de Vilenkin que el de Linde se basan en la cosmología cuántica (una derivación especulativa de la mecánica cuántica) y en el universo inflacionario. Para ellos, las fluctuaciones cuánticas en la nada (donde «nada» significa no solo ausencia de materia, sino también de espacio y tiempo) producen una multiplicidad (infinitud) de nucleaciones, cada una de las cuales conduce a un superuniverso diferente y eternamente inflacionario. En 1987 Steven Weinberg

partió de la hipótesis de multiverso para predecir que nuestro universo observable debía tener una constante cosmológica de valor no cero, de una cuantía suficiente para acomodar una aceleración en la expansión del universo. La predicción se confirmó diez años más tarde a través de las observaciones de supernovas lejanas por dos equipos de astrónomos, liderados por Saul Perlmutter, Adam Riess y Brian Schmidt [véase «Cuando la aceleración cambió de signo», por Adam G. Riess y Michael S. Turner; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2004]. Posteriormente, la teoría de cuerdas y la cosmología inflacionaria apuntalarían la hipótesis de la existencia de un multiverso, un conjunto enorme de 10^{500} universos. La inflación eterna, teoría dominante sobre la evolución temprana del universo, se halla estrechamente unida a la teoría de cuerdas.

Lee Smolin propuso un modelo cosmológico evolutivo en cuyo marco, siempre que se forma un agujero negro, los procesos que se desarrollan en su interior podrían desencadenar la creación de otro universo en un espacio disjuncto del suyo propio. El así llamado universo-bebé hereda algunas de las propiedades de su universo progenitor, incluida la capacidad de producir nuevos agujeros negros y engendrar nuevas generaciones de universos sin final. Lisa Randall y Raman Sundrum consideran los multiversos brana, subespacios tetradimensionales de un supuesto espaciotiempo pentadimensional. Las branas se hallaban separadas en dimensiones espaciales extra, sin contacto entre sí [véase «Salir de la oscuridad», por Giorgi Dvali; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2004].

Muy pocos discuten que con el multiverso nos hallamos ante un nuevo paradigma cosmológico. Sin embargo, su punto de apoyo, la inflación, tendrá que esperar. En marzo de 2014 los científicos que trabajaban en el experimento BICEP2, del Polo Sur, declararon que, a través del estudio del resplandor de la gran explosión inicial, habían obtenido una prueba directa de que el cosmos recién nacido había acometido un brote singular de desarrollo exponencial, una inflación cósmica. Pero, pasados unos meses, los investigadores del observatorio espacial Planck de la ESA, demostraron que la radiación procedente del polvo de nuestra galaxia explica parte y, posiblemente toda, la señal de BICEP2 [véase «¿Inflación o polvo?», por Licia Verde; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2014].

—Luis Alonso