

LOS ACELERADORES, LA HUMANIDAD Y EL UNIVERSO

ACCELERATORS, HUMANKIND AND THE UNIVERSE

Phu Anh Phi NGHIEM

LOS ACELERADORES, LA HUMANIDAD Y EL UNIVERSO

De los grandes instrumentos científicos, el acelerador de partículas es el más utilizado en todo el mundo. Al punto de convertirse en un elemento estratégico clave para cualquier programa de desarrollo científico en el ámbito nacional. Este dispositivo, que permite comprender el mundo que nos rodea, también puede usarse para analizar, cortar, producir, grabar, fabricar, curar y, probablemente, muchas más funciones. Actúa en una gama de escalas que abarca ¡14 órdenes de magnitud! Además de ayudarnos a responder algunas de las preguntas que la humanidad lleva planteándose desde hace milenios, nos brinda soluciones a las necesidades presentes y futuras de la sociedad actual, y constituye una herramienta básica para un mayor control de la energía en el futuro.

ACCELERATORS, HUMANKIND AND THE UNIVERSE

Worldwide, the particle accelerator is the most commonly used of the big-sized scientific instruments, so much so that it has become a key strategic element for any national scientific development program. This device, which allows us to understand the world around us, can also be used to analyse, cut, produce, record, manufacture, heal and –probably– many more functions. It runs on a range of scales spanning 14 orders of magnitude! In addition to helping us answer some of the questions humankind has been asking for millennia, it offers solutions to the present and future needs of today's society, and it's a basic tool for a greater control of energy in the future.

Phu Anh Phi NGHIEM

Prefacio de / Preface by Manuel DURAND-BARTHEZ

Ilustraciones de / Illustrations by Mara-Flore DUBOIS



Consejería de Universidad,
Investigación e Innovación



eug EDITORIAL
UNIVERSIDAD DE GRANADA



eug

**Los aceleradores,
la humanidad y el Universo**

**Accelerators,
humankind and the Universe**

PHU ANH PHI NGHIEM

COLECCIÓN DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

Título original / Original title: *Les Accélérateurs, l'Homme et l'Univers. Réflexions sur la Physique des Accélérateurs... et sur la nature de la Nature*

Edición original en lengua francesa publicada por / Original edition in French language published by: EDP Sciences (2022)

17, Avenue du Hoggar–Parc d'Activité de Courtaboeuf BP 112
91944 Les Ulis, Cedex A

© De la presente edición, Universidad de Granada / IFMIF-DONES España

© De los textos, el autor

© De las ilustraciones, @CEA / la autora

Edita / Published by: Editorial Universidad de Granada

Campus Universitario de Cartuja

Colegio Máximo, s.n. 18071 Granada

Tels. 958 243 930 – 246 220 · www.editorialLugr.es

ISBN(e) 978-84-338-7337-8

ISBN 978-84-338-7336-1

DL. Gr. 41-2024

Autor / Author: Phu Anh Phi Nghiem

Ilustraciones / illustrations: @CEA/Mara flore DUBOIS, marafloredubois.com

Maquetación / Layout: María Torres Senés (Acento Comunicación)

Ilustración de cubierta / Cover illustration: Mara flore DUBOIS, marafloredubois.com

Traductores / Translators: Juan Carlos Sanz Martín, Francesc Pedrosa Martín

Imprenta / Printing: Ocaña. Granada

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra sólo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley.

Any type of reproduction, distribution, public disclosure or transformation, may only be performed with authorisation from its holders, unless exempt by law.

**Los aceleradores,
la humanidad y el Universo..... 7**

**Accelerators,
humankind and the Universe..... 129**

**Los aceleradores,
la humanidad y el Universo**

**Accelerators,
humankind and the Universe**

PHU ANH PHI NGHIEM

APORTACIONES

El autor

Phu-Anh-Phi NGHIEM, doctor en ciencias, ha efectuado investigaciones científicas en los campos de la física de plasmas, la astrofísica y la física de aceleradores en el CNRS y luego en el CEA. Ha publicado más de 130 artículos científicos en revistas especializadas y conferencias internacionales. Como experto del CEA en física de aceleradores, ha sido responsable del diseño de aceleradores nacionales e internacionales.

Prefacio

Manuel DURAND-BARTHEZ, doctor en Literatura Comparada y Germanística, ha sido formador en la Unidad Regional de Formación sobre Información Científica y Técnica (URFIST, de París) y en la Universidad Científica Paul Sabatier de Toulouse, así como conservador adjunto en la École nationale des chartes.

Ilustraciones

Mara-Flore DUBOIS, atraída por la ciencia y enamorada de los museos, se graduó en ilustración científica en la École Estienne, y en museología en el Museo Nacional de Historia Natural de París. Más detalles en su sitio web marafloredubois.com.

Traducción al inglés

Francesc Pedrosa es traductor todoterreno, aunque los temas científicos y técnicos son sus preferidos. Por sus manos han pasado textos de John D. Barrow, Edward Gibbon, Ian Stewart, Amartya Sen, Hannah Arendt, Stephen Hawking y Michio Kaku, entre otros muchos, a lo largo de más de 25 años de trayectoria profesional. Su página web es fptradu.com.

Traducción al español

Juan Carlos SANZ-MARTÍN, químico físico, ha trabajado en diferentes áreas: química cuántica, dinámica de incendios, seguridad en centrales nucleares y en la industria convencional, en la UAM, en ITSEMAP-Fuego y en el CIEMAT, donde fue jefe de la UGRI y de su editorial. Ha publicado más de un centenar de artículos científicos, informes técnicos, capítulos de libros, artículos de divulgación científica y reseñas técnicas en revistas especializadas y generales, en congresos internacionales y en programas de radio, y ha participado en la elaboración de las normas europeas para el ensayo de grandes aerogeneradores. Es el autor de todas las notas del traductor.

PREFACIO DE LA EDICIÓN FRANCESA

¿Le suena el *Acarus siro*? Familia *Acaridae*, clase *Arachnida*..., por citar sólo las categorías taxonómicas principales de este simpático bichejo. En tiempos de Blaise Pascal ningún animal se consideraba más pequeño que éste. Se lo juzgaba como el paradigma ofrecido al ser humano para que pudiera observar tamaños extremadamente reducidos.

Recordemos los términos exactos del Pensamiento núm. 72 de este filósofo y matemático, como prelude anecdótico a la física de partículas.¹

Aquí se le pide a una persona que «busque, dentro de lo que conoce, las cosas más delicadas. Que un cirón² le ofrezca en la pequeñez de su cuerpo partes incomparablemente menores, piernas con articulaciones, venas en sus piernas, sangre en sus venas, humores en esta sangre, gotas en sus humores, vapores en estas gotas; que, dividiendo todavía estas últimas cosas, agote sus fuerzas en estas concepciones y que el último objeto a que pueda llegar sea ahora el de nuestro discurso; ¿pensará tal vez que es ésta la extrema pequeñez de la naturaleza? Voy a hacerle ver aquí dentro un nuevo abismo. Voy a pintarle, no solamente el universo visible, sino la inmensidad concebible de la naturaleza, en el recinto de este compendio de átomos. Que vea en él una infinidad de universos, cada uno con su firmamento, sus planetas, su tierra, en la misma proporción que en el mundo visible».

¿No es esto exactamente el eco de lo que un científico contemporáneo como P. A. Phi Nghiem, investigador del CEA, nos muestra a todos en un lenguaje de gran claridad, en el que los conceptos se suceden lógicamente, paso a paso, para construir un conocimiento que viaja desde los datos altamente técnicos y cuantificados hasta una experiencia casi emocional de la Naturaleza?

En esta monografía sobre *Los aceleradores, la humanidad y el Universo*, el autor desarrolla este tema probando que «quien bien concibe dice claramente», como escribió Boileau.³ Es decir, exhibiendo un talento innegable para la divulgación de calidad, género en el que, curiosamente, los anglosajones sobresalen más que los franceses, que, a veces cohibidos por un sistema académico obsoleto, no siempre son capaces de cultivar.

A menudo, comparar conceptos arduos con una imagen trivial sirve de vehículo para que el lector lego los entienda. Así, para cumplir uno de los sueños de Pascal (y de otros pensadores clásicos más antiguos) y estudiar la estructura interna de la materia examinando sus constituyentes primordiales, primero habrá que «romperla» como hace un niño al desarmar un juguete mecánico para entender mejor su funcionamiento. Estos constituyentes primordiales son las partículas, y para «romperlas» se las hace

1 En Blaise Pascal: *Pensamientos* (trad. Xavier Zubiri). Espasa-Calpe, S.A., Madrid, 1940. Sección II. (N. del T.)

2 El cirón o tiroglifo de harina es uno de los nombres vulgares del *Acarus siro*. (N. del T.)

3 En Nicolas Boileau Despreau: *El arte poética* (trad. Juan Bautista Madramany y Carbone). Joseph y Tomas de Orga, Valencia, 1787. Canto primero (p. 16). (N. del T.)

chocar, impulsadas con aceleraciones formidables. Estas aceleraciones son difícilmente alcanzables siguiendo trayectorias rectilíneas, porque más pronto que tarde estos itinerarios acaban, se llega a su final. Por tanto, las trayectorias suelen ser circulares. Y, en efecto, los aceleradores comúnmente son circulares. Estos dispositivos, muy repartidos por todo el mundo, además de los muy conocidos equipos del CERN, presentan una amplia gama de modelos que responden a diferentes usos y procesos. Y esto es así porque realmente son herramientas ideales para estudiar la materia en sus más recónditas profundidades.

Para descifrar su funcionamiento y sus múltiples repercusiones en nuestra vida cotidiana conviene seguir una serie de etapas, cuyo hilo conductor traza brillantemente Phi Nghiem. Estas etapas, a veces expresadas en un lenguaje técnico, difícil de asimilar en una primera lectura para el profano, se articulan a través de imágenes familiares que otorgan seguridad al lector, dándole, en cierto modo, un respiro antes de acometer el siguiente escalón. He aquí el arte de este autor, que podríamos ilustrar con un ejemplo: hemos visto que la configuración circular de un acelerador (a diferencia de la lineal) permite conferir, cíclicamente, velocidades y energías cada vez mayores. Ahora, y cedo la palabra a nuestro escritor: «cuando una partícula cargada describe una trayectoria curva, sucede como en una antena: necesariamente emitirá radiación electromagnética (consúltese la discusión sobre las leyes del electromagnetismo más adelante) y, por tanto, perderá energía. Este efecto secundario anula claramente el propósito original de procurar mayor energía. Y hubo que minimizarlo intentando que las partículas trazaran curvas menos cerradas, de ahí que los aceleradores circulares sean cada vez mayores». Como una cosa lleva a la otra, nos vamos acercando a las nociones de campo eléctrico y campo magnético, ligadas íntimamente a la partícula cargada, induciendo el concepto combinado de electromagnetismo. Paulatinamente advertimos que se debe dominar esta fuerza circular, multiplicada y cada vez mayor, canalizándola y guiándola. De ahí una de las imágenes triviales antes mencionadas: la de un caballo remolcando una gabarra. Ambos siguen rumbos paralelos, pero permiten el despliegue de fuerzas opuestas. La del caballo tirando de la maroma y la controlada por el timón, que contrarresta y equilibra el arrastre lateral: un reflejo de lo que sucede en las gigantescas trayectorias cíclicas de un acelerador.

Acelerar, producir, guiar y luego focalizar, son cuatro palabras clave que surgen una y otra vez a lo largo de una ruta perfectamente marcada.

En el horizonte asoman entonces las seis físicas: «desde lo infinitesimalmente pequeño de la física cuántica pasamos, efectivamente, a lo infinitamente grande de la astrofísica», y estas seis físicas se declinan según una «clasificación de acuerdo con el tamaño de los objetos estudiados: física de partículas, o física cuántica, física nuclear, física de haces de partículas en un acelerador, física atómica y molecular, física de estado sólido, gases y plasmas y, finalmente, astrofísica». Este pasaje, muy conciso, es particularmente esclarecedor.

Cuando los párrafos más difíciles obligan al lector a realizar una o dos relecturas, la intuición viene a guiarlo convenientemente gracias al camino ya recorrido para deducir, estableciendo conjeturas, su significado. Una vez adquiridos los principios, hay que tratar de captar poco a poco sus variantes, agregando cada vez una pieza del puzle y continuando el viaje.

En apoyo de esta perspectiva, podemos citar la quinta de las *Reglas para la dirección del espíritu*, de Descartes: «[descubriremos alguna verdad] si reducimos gradualmente las proposiciones intrincadas y oscuras a otras más simples y si, después, partiendo de la intuición de las más simples, intentamos ascender por los mismos grados al conocimiento de todas las demás». ⁴ Aquí, de hecho, la repetición de conceptos básicos (atracción-repulsión, focalización-dispersión, desviación-centrado, etc.), examinados desde varias perspectivas, permite asimilar mejor el conjunto y comprender las aplicaciones que nos afectan más directamente: acelerar, producir, guiar y luego focalizar los haces hacia un objetivo tumoral, por ejemplo. Por ello este libro no es un tratado simplificador que popularice conceptos de manera arrogante. Por el contrario, los pone al alcance del lector profano, al que apenas se le exige un esfuerzo digerible y muy precisamente orientado. Tranquilícese, relea y avance.

Sin embargo, y éste no es un rasgo menor después de todo, además de lo fundamental y aplicativo, el texto finaliza examinando con cierta extensión y profundidad las repercusiones del tema central en las humanidades y las ciencias sociales.

Desde un punto de vista sociológico, el principio de colisión induce cambios en el corazón del Ágora y la República de Platón y Aristóteles. Una asamblea parlamentaria de «brazos de madera» pasivos es improductiva, y las revoluciones en sentido político generan movimiento como en la rotación forzada de las partículas...

Humanamente, las repercusiones de este estudio también son significativas.

Así, el autor rememora a nuestros lejanos antepasados prehistóricos que, de facto, vivían continuas penurias en un entorno «naturalmente» hostil. En la oscuridad de las cavernas recurrían a artificios, en el sentido etimológico del término (*artefacto*, como resultado de una elaboración del cerebro humano. Y arte, en el sentido de «artes y oficios»), no sólo diseñando herramientas (la técnica, que el autor, en su significado más básico, diferencia con rigor de la ciencia), sino también desarrollando aquellos soberbios murales que los representaban (los «presentan de nuevo» según su propia concepción) frente a los animales que debían dominar para sobrevivir. Aquí el arte resulta del uso a la par emocional y razonado de los pigmentos.

Manuel DURAND-BARTHEZ

⁴ En René Descartes: *Reglas para la dirección del espíritu* (trad., selec. y notas: Juan David García Bacca). Secretaría de Educación Pública, México DF, 1946, p. 29. (N. del T.)

ÍNDICE

Aportaciones	9
PREFACIO DE LA EDICIÓN FRANCESA.....	11
Prólogo de la versión bilingüe español-inglés.....	17
Prólogo: Sobre los físicos y los aceleradores	21
1. El hilo conductor.....	25
2. Partículas cargadas	31
3. Aceleradores de partículas.....	37
Para causar colisiones entre partículas.....	39
Para producir radiación sincrotrónica.....	42
Para irradiar objetivos específicos.....	46
4. Física de los haces de partículas.....	51
El haz de partículas.....	54
Acelerar... y algo más.....	55
5. Los campos eléctrico y magnético	59
Definir o no definir	61
Efectos de los campos eléctrico y magnético.....	62
6. Cómo producir campos eléctricos y magnéticos	67
Campos eléctricos y magnéticos estáticos.....	69
Campos electromagnéticos.....	70
Llegar a lo cotidiano y al universo desde los aceleradores	73
7. Cómo producir partículas cargadas.....	77
Las actividades humanas, preámbulo hacia otros procesos naturales	79
La fuente de partículas en los aceleradores.....	82
8. La física de aceleradores.....	85
El acelerador.....	87
Física del haz de partículas.....	89
Las seis físicas.....	91
Física de aceleradores, física cuántica y astrofísica	94
9. La física de aceleradores y la naturaleza humana	97
Cooperación y competencia.....	99
El cerebro humano	101
10. Aceleradores, naturaleza y sociedad.....	105
El principio de parsimonia	107
Lo artificial y lo natural.....	109
El síndrome de los efectos secundarios	111
11. Los aceleradores, la humanidad y el Universo	117
El cómo y el por qué.....	119
Materia y mente.....	121
Epílogo.....	125
Agradecimientos.....	127

PRÓLOGO DE LA VERSIÓN BILINGÜE ESPAÑOL-INGLÉS

LENGUAJE CIENTÍFICO frente a LENGUAJE COMÚN

Qué gozosa noticia cuando mis colegas españoles se ofrecieron a traducir este libro al castellano y el inglés. Los aceleradores de partículas merecen ser mejor conocidos por todos y cada uno de nosotros, ciudadanos-protagonistas del futuro de nuestros países y, en general, de nuestras sociedades. Y esto sólo puede lograrse empeñándonos en ir más allá del lenguaje científico —universal, pero saturado de una jerga sólo comprensible por los especialistas—, para acercarnos en lo posible al habla común, local y, por tanto, polisémica, pero entendida y «sentida» por un mayor número de personas, capaz incluso de «conmoverlas». De ahí la importancia de informar sobre los logros científicos en la lengua vernácula de cada país.

Históricamente, el conocimiento científico sólo ha podido ampliarse gracias al rotundo compromiso del conjunto de la comunidad científica internacional. Este compromiso, unas veces cooperativo y otras, competitivo, siempre ha generado un determinado glosario científico, universal y muy cribado, donde toda ambigüedad se ha desterrado al establecer correspondencias estrictamente biunívocas entre la palabra y el concepto. Sólo esta clase de lenguaje faculta el intercambio inequívoco de puntos de vista y, así, optar entre los pensamientos más antagónicos acerca de las cuestiones más espinosas concebidas por la mente humana. De hecho, los mayores avances científicos siempre han surgido de esta confrontación entre las ideas científicas más conflictivas. Y hay muchos ejemplos que incluyen la gravitación universal, la evolución de las especies, el Big Bang, la genética y el ADN, la mecánica cuántica, el espacio-tiempo, etc.

El acelerador de partículas es un ejemplo típico de este progreso científico, logrado en virtud de la colaboración científica global. La física de aceleradores ha ido adquiriendo paulatinamente un lenguaje universal, con conceptos tan abstractos como el espacio de fases hexadimensional o los famosos parámetros de Twiss⁵, que han facilitado el diseño de unas máquinas con características extraordinarias en apenas unas cuantas décadas. Potentísimos, aunque muy exactamente reproducibles y, aún

⁵ Los parámetros de Twiss (también conocidos como parámetros de Courant-Snyder o, simplemente, parámetros CS) son un conjunto de magnitudes utilizadas en física de aceleradores para describir la distribución de las posiciones y las velocidades de las partículas en un haz (N. del T.)

más: ultracomplejos y ultrafiabiles, con estos aceleradores cabe generar haces de partículas extremadamente intensos y, a la vez, enormemente precisos. ¿Quién da más?

Actualmente funcionan en todo el mundo decenas de miles de aceleradores que, con tamaños desde unos pocos metros hasta varias decenas de kilómetros, nos permiten comprender, analizar, cortar, producir, grabar, fabricar, curar y probablemente unas cuantas cosas más. Aptos para sondear la intimidad de las partículas en una escala de 10^{-15} m, pueden radiografiar objetos cuyo tamaño es del orden de las decenas de centímetros. ¡Sus aplicaciones, pues, abarcan 14 órdenes de magnitud!

Los aceleradores son herramientas fantásticas que ayudan a responder desde las preguntas más existenciales que los humanos nos hemos estado planteando desde nuestros albores (de dónde venimos, cómo evolucionamos, hacia dónde vamos), hasta otras, de índole social, sobre el mundo de hoy y de mañana (cómo vivir con buena salud en un ambiente sano, cómo producir energía sostenible...).

Sin duda, también cabe considerar que el acelerador de partículas es la máquina más compleja, sofisticada y grandiosa que la mente humana haya diseñado y erigido jamás. Hay otras construcciones kilométricas, que son patrimonio humano, como los templos o las pirámides de Egipto, los templos de Angkor, en Camboya, o la Gran Muralla, en China. Todas ellas son conjuntos de piedras, con frecuencia bellamente labradas, eso es cierto, pero inertes e inmóviles, que al cabo terminarán erosionándose con el tiempo. El acelerador a menudo es una máquina rotatoria, que suele funcionar día y noche durante años, con una fiabilidad impecable y una repetitividad cronométrica. Esto requiere el concurso de muchas disciplinas ingenieriles del más alto nivel, además de algunas de las físicas más abstractas. Piénsese que, además de tener que aplicar campos electromagnéticos muy potentes en diferentes configuraciones, cada una más sofisticada que la otra, la mayoría de las veces el acelerador debe estar enfilado en toda su longitud con precisiones submilimétricas, todo ello manteniendo de continuo una temperatura de -273°C , y una presión de 10^{-9} atmósferas. Innegablemente uno de los lugares más complejos, precisos, fríos y vacíos del Universo. Además, desde que se diseña hasta su puesta en marcha y su funcionamiento cotidiano, estamos constantemente obligados a utilizar conceptos radicalmente abstractos de la física de aceleradores.

Características, pues, verdaderamente asombrosas. ¿Pero, quién lo sabe? ¿Cuántos conocen que hasta hoy un centenar de aceleradores repartidos por todo el mundo han curado a 300.000 pacientes de cáncer? ¿Quién está al corriente de que, para producir las energías limpias del futuro, como la fotovoltaica o la de fusión, los aceleradores vienen al res-

cate? Probablemente sólo una muy pequeña fracción de la sociedad es consciente de las fantásticas contribuciones de los aceleradores a esta misma sociedad.

En consecuencia, más que nunca conviene suturar la brecha entre la comunidad científica, con su lenguaje limpio pero especializado en exceso, y el público en general, con sus diversos idiomas al alcance de cualquiera de nosotros. Por tanto, un esfuerzo de traducción como este que nos ocupa, de un texto destinado al gran público para verterlo a un lenguaje común y más cercano a la gente, es digno de aplauso y de calorosa felicitación.

De modo que el empeño de difundir los resultados científicos entre el público en general también puede plasmarse en un contexto de cooperación internacional, siguiendo la estela de la colaboración de los científicos de distintos países que hicieron posible la obtención de estos resultados.

Phu Anh Phi NGHIEM

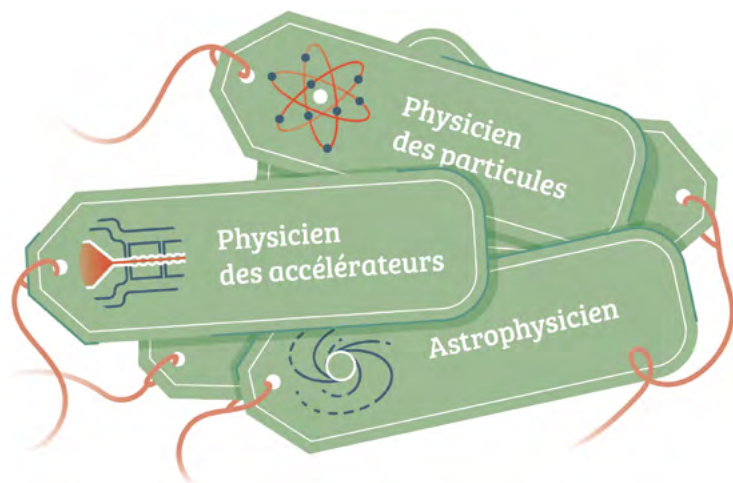
PRÓLOGO:

SOBRE LOS FÍSICOS Y LOS ACELERADORES

Como todos, a menudo tengo que responder a la pregunta: «¿cuál es tu trabajo?». A mi respuesta «soy físico», los más curiosos y enterados de los asuntos científicos automáticamente quieren saber más: «¿en qué campo?». Entonces hay un instante persistente y fugaz que suele incomodarme un poco. Uno de esos típicos momentos que nos obligan a justificarnos, a aclarar un malentendido. Apenas pronunciadas las palabras que especifican mi exacto objeto de estudio, «aceleradores de partículas», el rostro del interlocutor se ilumina de inmediato: «¡Ah, tú haces física de partículas en el CERN!». ¡Uh, no! No hago física de partículas, ni trabajo en el CERN...

El CERN, la Organización Europea para la Investigación Nuclear, goza de una justa y extraordinaria reputación entre el público en general. Con sede en Ginebra (Suiza), se fundó tras los horrores bélicos de la Segunda Guerra Mundial con un objetivo profundamente noble: mostrar que países muy diferentes, incluso enemigos en el pasado, eran capaces de aunar el esfuerzo de miles de científicos e ingenieros, y de reunir un presupuesto anual superior a los mil millones de francos suizos por una causa de interés universal: avanzar en el conocimiento humano. Desde entonces, además de ser una institución científica de excelencia, también es un símbolo de paz. Paz a través de la ciencia y paz para la ciencia. Este papel tan emblemático, pero particularmente difícil, está siendo interpretado con gran éxito. Prueba de ello son los impresionantes descubrimientos de partículas, predichos y esperados por la teoría, con los no menos asombrosos aceleradores y detectores. Estamos pensando aquí en el bosón ligero Z^0 y el bosón de Higgs. Por supuesto, las contribuciones de los investigadores del CERN no terminan con estos hallazgos. Se podrían señalar otras muchas aportaciones teóricas. Pero el hecho de que sean estas conquistas basadas en los aceleradores las que se celebran a bombo y platillo revela uno de los principios fundamentales de la ciencia: una teoría sólo se acepta si se prueba experimentalmente. De ahí que se destaque esta formidable herramienta de investigación que es el acelerador de partículas. Pero este éxito tiene una pequeña contrapartida. Protagonistas del triunfo de la física de partículas, los aceleradores han quedado retenidos en la memoria colectiva como instrumentos exclusivos del CERN, y al servicio de la física de partículas.

Esto nos lleva a constatar un paralelismo con el mundo de las artes y los medios. Habitualmente, a los protagonistas de una película de determinado género que ha cosechado laureles se los encasilla para siempre



en ese estilo. Estereotipados, estos actores tienen grandes dificultades para mostrar todo el potencial de su talento que, en ocasiones, podría desarrollarse en otros géneros u otras artes. Es raro ver a músicos o cantantes hacerse famosos simultáneamente en varios estilos musicales.

Sin embargo, en ocasiones descubrimos, casi siempre con gran satisfacción, a una famosa estrella del cine interpretando jazz con gran pasión en una oscura y estrecha cripta. Este es el caso, digámoslo ya, de los aceleradores de partículas. Aquí no se trata de una cripta, sino de grandes centros de investigación científica. De hecho, en todo el mundo existen unos doscientos grandes aceleradores, ¡ahí es nada!, operando en centros de investigación, al servicio de muchas disciplinas científicas y también de sectores tecnológicos de vanguardia. Lamentablemente esto es algo relativamente desconocido para el gran público. Sobre todo, si se tiene en cuenta que hay más de 24.000 aceleradores instalados en empresas industriales y, lo que es especialmente destacable, unos 11.000 aceleradores dedicados exclusivamente a tratamientos médicos.

En general, todas estas máquinas, de diferentes tamaños y potencias como consecuencia de sus aplicaciones específicas, nacieron en los grandes laboratorios de aceleradores. Por otro lado, no sólo se ponen

en marcha aceleradores para servir a diversas comunidades de usuarios, también se investigan y diseñan nuevos conceptos para estos dispositivos. Así, de ser una herramienta para la investigación, el acelerador se ha convertido de por sí en un objeto de investigación. De ahí, esta profesión de «físico de aceleradores». Pero insistamos de nuevo, hay físicos y físicos, como hay aceleradores y aceleradores. De los físicos, hay quienes usan los aceleradores como herramienta para sus investigaciones en física, y hay quienes estudian la física de aceleradores como objeto de investigación en sí mismo. En cuanto a su tamaño, los hay grandes, generalmente utilizados para la investigación científica y tecnológica, y también aceleradores de menor envergadura, para aplicaciones tecnológicas o industriales, así como médicas o sociales.

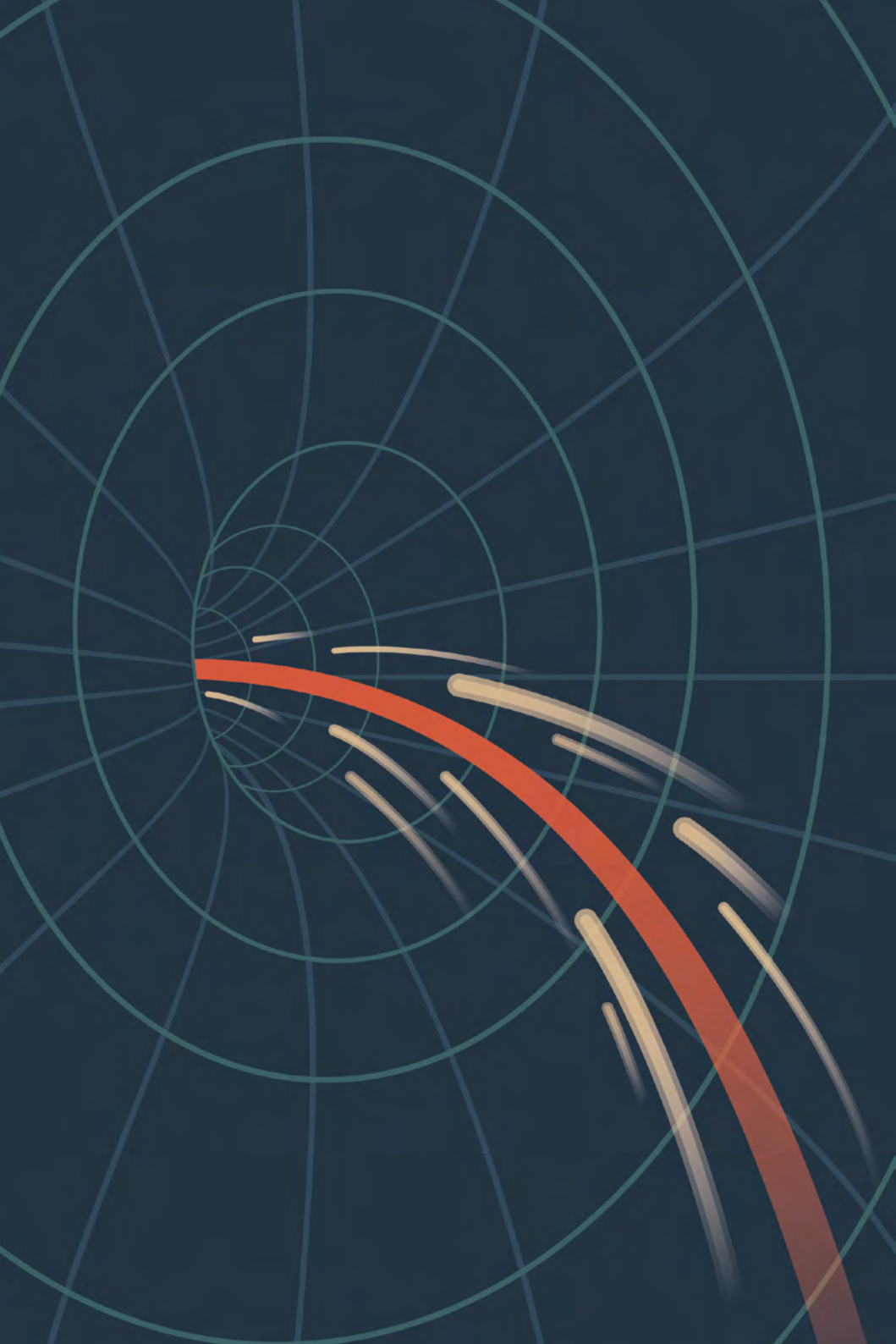
Para dar más sabor y despertar aún mayor interés, agregaremos que la investigación sobre aceleradores no sólo moviliza a físicos, sino también a científicos e ingenieros de muchas otras disciplinas. Así que, si al lector le tienta visitar este mundo de los aceleradores, le garantizo que encontrará una riqueza enorme, por su amplia presencia en los cuatro rincones del globo, sus variadas aplicaciones y, por tanto, sus muy diversas comunidades de usuarios; por los investigadores que los estudian desde diferentes ángulos, y por sus principios de funcionamiento, basados en las mismas leyes físicas vigentes en los objetos de la vida cotidiana y en los confines del Universo. Y eso no es todo. En algunos aspectos, el funcionamiento de los aceleradores y la organización en torno a ellos nos recuerdan las normas de funcionamiento y organización tanto del individuo como del colectivo humano.

Así que, querido lector, déjese tentar, déjese guiar. He dispuesto un viaje confortable, que, no obstante, le permitirá no sólo descubrir muchas facetas del mundo de los aceleradores de partículas, sino también explorar, más adelante, algunos profundos enigmas de nuestro lugar en el Universo.

El funcionamiento de los aceleradores y la organización en torno a ellos nos recuerdan las normas de funcionamiento y organización tanto del individuo como del colectivo humano

1

El hilo conductor



Empezaremos hablando sobre el hilo conductor que recorrerá todo el texto.

En compañía del acelerador de partículas, partiremos en un viaje hacia los conceptos científicos abstractos que sustentan este dispositivo técnico. De modo progresivo iremos abriendo el foco del análisis para abarcar el funcionamiento tanto de la ciencia como de nuestra sociedad, y no sólo de la reflexión científica, sino también de otros tipos de pensamiento humano.

Tras una breve introducción al mundo de las partículas cargadas, se repasarán los diferentes usos de los aceleradores de partículas. Veremos que estos dispositivos están presentes en muchos sectores de actividad, desde la investigación académica hasta las aplicaciones industriales y médicas, sectores todos ellos para los que estas herramientas son valiosas, incluso imprescindibles. El precio que debe pagarse es la necesidad de acentuar el rendimiento en una amplia gama de parámetros, sólo alcanzable cuando los propios aceleradores son, de suyo, objeto de investigación física.

Luego, nos sumergiremos en la física de los haces de partículas, lo que nos permitirá abordar los principios físicos que subyacen en los aceleradores para producir estos haces con los ajustes requeridos. En esencia, se analizarán las leyes de los campos eléctrico y magnético, lo que inevitablemente nos conducirá a las leyes del electromagnetismo. Veremos también que las mismas leyes físicas, ¡estrictamente las mismas!, rigen en todo el Universo, desde lo infinitesimalmente pequeño hasta lo infinitamente grande, abarcando tanto a los objetos cotidianos como a las más grandiosas manifestaciones naturales.

En este punto, el vínculo con otras áreas de la física ya resultará inmediato. Citaremos ejemplos de la astrofísica y la física cuántica, y discutiremos qué lugar ocupa la física de haces de partículas en la física clásica. Los lectores menos devotos de la física pueden relegar estos pasajes y seguir adelante sin perder demasiado el hilo de la discusión. Sólo deben saber que, en estos párrafos, los principios físicos mencionados en el contexto de los aceleradores se engazarán con los principios más generales del pensamiento científico.

De este modo, todas las piezas ya estarán en su sitio para desarrollar nuestra discusión, desde la ciencia hacia el Universo y la naturaleza, pero también hacia lo humano y la sociedad, analizando también las complejas relaciones existentes entre lo uno y lo otro.

Ya hemos señalado que el funcionamiento de un acelerador, que se basa en principios físicos y matemáticos, es desde cierta perspectiva muy similar al funcionamiento humano, individual y colectivamente.

Entonces podemos comparar el pensamiento científico con otros tipos de pensamiento humano, en términos de las preguntas que cada uno de nosotros se ha estado haciendo desde los albores de la humanidad

Para probarlo, primero destacaremos los aspectos de cooperación y competencia y luego veremos el caso del órgano medular de todas nuestras reflexiones: el cerebro humano.

La ciencia, precisamente, es un puro producto del cerebro humano. A lo largo de los años ha registrado éxitos cada vez más espectaculares al describir las leyes de la naturaleza. Usó estas leyes, y sólo estas leyes, para fabricar objetos y equipos (¡incluso aceleradores!) para subvenir a las necesidades de la sociedad humana. Con este enfoque, discutiremos la paradoja de la moderna sociedad, marcada por el éxito del dúo cerebro-naturaleza y el desencanto

del dúo natural-artificial. Una paradoja que cristaliza en el síndrome del efecto secundario, «el» síndrome del siglo, de nuestro siglo. Este síndrome será analizado con detalle, y colocado en un contexto temporal milenario.

Al ser claramente un producto del cerebro humano, el pensamiento científico es similar a otros tipos de pensamiento que también brotan de este mismo órgano. Mostraremos que la ciencia, igual que estos últimos, busca dar respuesta a las angustias existenciales de la humanidad. Para ello, está dispuesta a comprometer recursos tan colosales como se precisen (¡por ejemplo los grandes y complejos aceleradores de investigación!); y a poner en marcha primeros principios (¡incluidos los campos eléctrico y magnético!), que son mera construcción mental. A este respecto, discutiremos las opiniones populares, o popularizadas, que quieren restringir el quehacer científico al «cómo» y no al «por qué», a la «materia» y no la «mente». Entonces podremos comparar el pensamiento científico con otros tipos de pensamiento humano, basándonos en las preguntas que cada uno de nosotros se ha estado haciendo desde los albores de la humanidad.

Así cerraremos el círculo que arranca en la física de aceleradores, pasa por las cuestiones existenciales y termina en los aceleradores, los grandes centros de los aceleradores y el movimiento de una partícula cargada en el seno de un campo magnético.

¿Estamos listos para seguir este hilo conductor?

Empecemos, pues, por el principio, es decir por las partículas. Se trata aquí de partículas cargadas, es decir, portadoras de carga eléctrica. Son objetos muy pequeños que sólo pueden acelerarse con máquinas muy grandes, clasificadas como ICTS (Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares). Objetos estos cuyo estudio y utilización son igualmente fascinantes.

2

Partículas cargadas

Vivimos en vecindad permanente con partículas cargadas, que nos atraviesan viniendo del espacio —en primer lugar, desde el Sol—, o que se acumulan sobre nosotros en forma de electricidad estática por la fricción con nuestro entorno al movernos de continuo. Pero realmente sólo fuimos conscientes de que estaban ahí cuando la ciencia las «descubrió», es decir, cuando se identificaron como tales. Y esto ocurrió recientemente, hace poco más de cien años. Conviene saber que estas partículas son tan pequeñas a escala humana que es difícil adivinar o incluso imaginar su presencia. Hizo falta una gran dosis de curiosidad y perseverancia, además de cierta rivalidad entre los laboratorios a ambos lados del Canal de la Mancha, para detectar las primeras partículas cargadas. Aunque la electricidad ya era conocida desde antiguo⁶ y su producción y explotación sistemáticas comenzaron en el siglo XIX, aún no se tenía la certeza de su carácter continuo (igual que un fluido o una radiación) o discreto. A finales del siglo XIX, Henri Becquerel descubrió que las sales de uranio emitían espontáneamente una clase de radiación, que unos años más tarde Marie y Pierre Curie identificarían como radiactividad natural. Entonces, se fue viendo que esta radiación era diferente a los rayos X, descubiertos poco antes por Wilhelm Roentgen, porque no requería fuente excitadora externa alguna y podía ser desviada mediante campos eléctricos o magnéticos. Las experiencias revolucionarias de Joseph J. Thomson y Ernest Rutherford mostraron que esa emisión radiactiva realmente estaba formada por partículas de diferentes masas y cargas. Con ello nació un nuevo modelo del átomo con un núcleo central, compuesto por neutrones eléctricamente neutros y protones cargados positivamente, alrededor del cual había electrones, cargados negativamente y casi dos mil veces más ligeros que las partículas anteriores.⁷

Tener clara la noción de «partícula» resulta crucial. Sobre todo, porque también puede ocasionar controversias y confusiones. En efecto: hablar de partículas y no de fluidos o radiaciones, implica admitir que el objeto dado tiene una extensión limitada, es decir, un tamaño bien definido. Aquí, los puristas conocedores de la teoría cuántica ondulatoria se quejarán, asegurando que estos tenues objetos carecen de un

**Estas partículas
son tan pequeñas
a escala humana
que es difícil
adivinar o incluso
imaginar su
presencia**

⁶ También se conocía el magnetismo, como prueba el poema didáctico *De la naturaleza de las cosas*, obra de Tito Lucrecio Caro (siglo I a.e.c.), particularmente en su libro VI, verso 1.342 y ss. (N. del T.)

⁷ Cuando el número de cargas negativas y positivas está equilibrado, el átomo es eléctricamente neutro. De lo contrario, está cargado eléctricamente y se designa con el término «ion».

tamaño bien definido, pues a esta escala (por tanto, con ese... tamaño) también pueden adoptar características ondulatorias, con una extensión casi infinita. Pero insistamos. De todos modos, nos basta examinar el tamaño de estas partículas, aunque sólo sea de manera imprecisa. Como veremos, tener una idea del orden de magnitud de sus dimensiones ya será sumamente instructivo.

La escala humana es de 1 m. La anchura de un cabello es del orden de 10^{-4} m. Una célula viva o una bacteria, de 10^{-5} m. Pero un átomo mide 10^{-10} m, y un protón o un neutrón, 10^{-15} m.

Primera observación: las partículas cargadas son extraordinariamente pequeñas comparadas con la escala humana. Si decimos que el tamaño más pequeño perceptible por el ser humano es el diámetro de un cabello, ¡una partícula cargada es 10^{11} veces más pequeña aún! Por eso tardamos tanto en identificarlas y detectarlas. Ciertamente, desde hace milenios los fenómenos eléctricos ya eran perceptibles a través de las tormentas o gracias a la electricidad estática. Y aunque la electricidad ya venía «usándose» a diario —al encender fuego por fricción o produciendo chispas por percusión—, y se había domesticado industrialmente desde el siglo XIX tras las aportaciones de físicos como Alessandro Volta o James Watt, no fue hasta finales de esta misma centuria cuando se detectaron las partículas portadoras de esta electricidad. Incluso ahora, bien conscientes de su existencia, nos es imposible imaginarlas o concebir su pequeñez.

Mirando con más detalle, llegamos a una segunda observación: el electrón y el protón son mucho más pequeños que el átomo a que dan lugar. Sabiendo que el radio del átomo es la distancia que separa su núcleo de los electrones que lo rodean, notamos con horror que la naturaleza está llena de... vacío. Y no es que la naturaleza aborrezca el vacío, como todavía creían los físicos del siglo XVII. La distancia que separa el núcleo o los protones de los electrones es 100.000 veces mayor que su tamaño. Al final, es un poco como lo que sucede con los cuerpos celestes, que están separados, a su escala, por un vacío abismal.

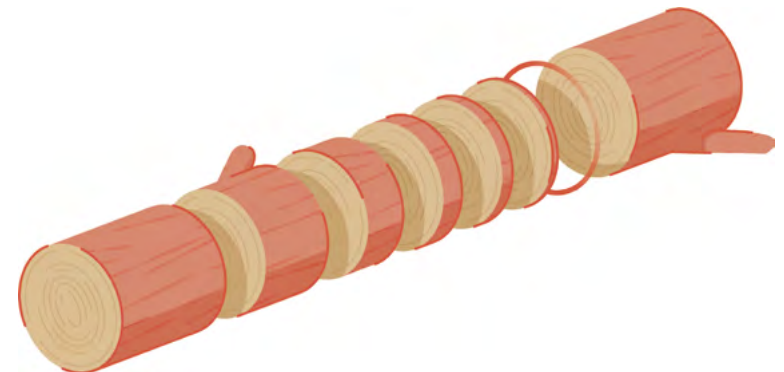
Esta diferencia entre los mundos macroscópico y microscópico explica en parte por qué es tan difícil acelerar partículas cargadas, y por qué se necesitan máquinas tan grandes para acelerar partículas tan pequeñas. Pero echemos un vistazo más de cerca a estas escalas de tamaño. Imaginemos que estamos ante un objeto del orden de un metro, por ejemplo, un trozo de madera. Nuestra curiosidad, que nos empuja a querer divisar su interior, nos lleva a fragmentarlo en pequeños pedazos. Hagámoslo de manera progresiva, cortando rebanadas cada vez más finas. Cuando llegamos al tamaño del cabello ya no las divisamos tan bien. Pero suponiendo que dispongamos de un microscopio que nos

Todos estos campos, desde los más básicos a los más aplicados, sólo se desarrollaron plenamente gracias a la adquisición de una extraordinaria herramienta acorde con sus aspiraciones científicas: los aceleradores de partículas

permita ver tan pequeño como queramos, aún podemos trocear la rebanada otras 10 veces, hasta distinguir las células de la madera. Si seguimos partiéndola, encontraremos moléculas de la madera. Entonces, llegamos al nivel de los átomos y, súbitamente, ¡zas, nada más se ve! Sobre todo, porque nada queda por cortar salvo el vacío (de la materia). Es preciso cortar 100.000 veces más para percibir los núcleos de los átomos y los electrones. Esta enorme brecha, esta formidable discontinuidad, explica por qué se tardó hasta el siglo XX para que la existencia de estas partículas fuera aceptada por todo el mundo.

Esta toma de conciencia muy tardía, debido al hiato en la escala dimensional de los objetos examinados, constituye una verdadera fisura en el conocimiento humano; y, en consecuencia, en las herramientas utilizadas para estudiar los aceleradores, que a su vez nos allanaron el camino para encontrar nuevas aplicaciones en los más diversos campos de la ciencia y la sociedad.

El descubrimiento de las partículas cargadas (eléctricamente) desbrozó el camino para la ciencia moderna en el siglo XX, y para todas las aplicaciones que vinieron con ella. Conceptualmente, esto condujo

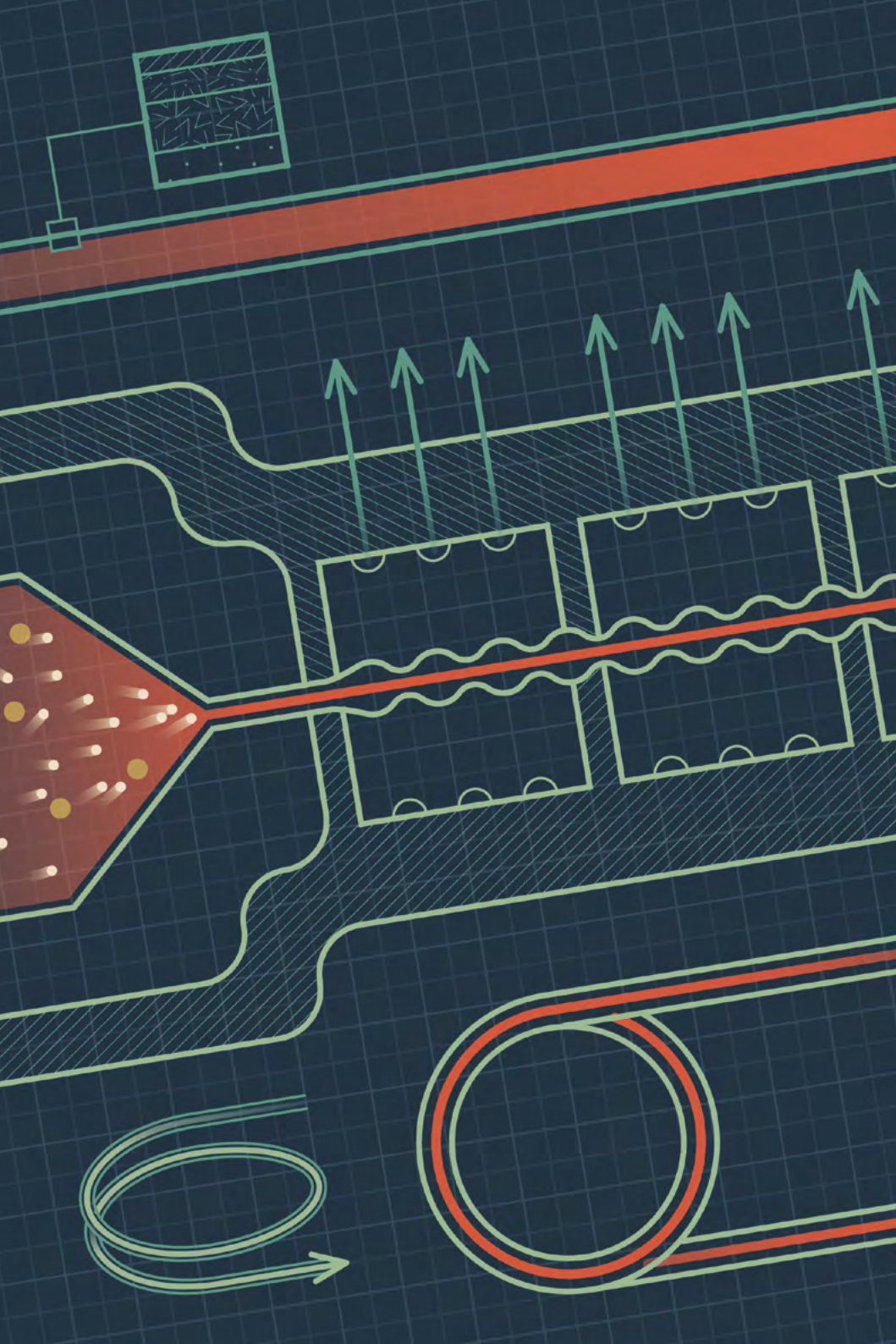


a la mecánica cuántica de Max Planck y a la relatividad de Albert Einstein. Científicamente, trajo el surgimiento de la física de partículas —que estudia los constituyentes elementales de la materia—, y de la física nuclear —que investiga la estructura del núcleo atómico—. También ha permitido generar energía nuclear por fisión, y utilizarla con objetivos militares, pero, sobre todo, con fines civiles.

Todos estos campos, desde los más básicos a los más aplicados, sólo se desarrollaron plenamente gracias a la adquisición de una extraordinaria herramienta acorde con sus aspiraciones científicas: los aceleradores de partículas. Así, junto con la física de partículas y la física nuclear, nació y se expandió la física de aceleradores. Tanto que ahora vemos muchas de estas máquinas, de múltiples tipos y tamaños, utilizadas en muy diferentes tareas.

3

Aceleradores de partículas



Si visitásemos un muestrario de aceleradores para tener una panorámica completa, los encontraríamos tan diferentes entre sí que sería difícil agruparlos en categorías simples. Considerando sólo su apariencia general, veríamos que mientras unos caben en una habitación pequeña otros ocupan una región entera, pues sus envergaduras varían desde unos pocos metros hasta algunas decenas de kilómetros. Igual ocurre con sus formas, que pueden ser rectilíneas, circulares o una combinación de ambas. Y si nuestro interés se centrara en las partículas aceleradas (electrones, protones o iones más pesados), éstas pueden acelerarse a energías desde unos pocos megaelectronvoltios ($\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$) hasta los teraelectronvoltios ($\text{TeV} = 10^{12} \text{ eV}$).⁸ Los nombres con los que se designan los aceleradores, ligados a sus principios de funcionamiento, tampoco resultan muy sugestivos para el profano: linac, ciclotrón, sincrotrón, anillo de almacenamiento, etc.⁹ En cuanto a las técnicas de aceleración, también varían: alta tensión estática, cavidad de radiofrecuencia, en el seno o no de un campo magnético, a temperatura ambiente o criogénica...

En lugar de enfocarnos sólo en aquellos aspectos que interesan principalmente a los especialistas, quizás sea más sencillo y significativo clasificar los aceleradores según sus aplicaciones. En tal caso hay tres tipos principales: para causar colisiones entre partículas, para producir radiación sincrotrónica y para irradiar objetivos específicos. En ese orden, estos tres usos también se corresponden aproximadamente con la biografía evolutiva de los aceleradores.

PARA CAUSAR COLISIONES ENTRE PARTÍCULAS

El propio concepto de acelerador se originó a partir de la necesidad de hacer chocar partículas entre sí para estudiar los constituyentes últimos de la materia, es decir, para ver qué sucede a la escala de 10^{-15} m . El golpe de intuición surgió en los experimentos de Ernest Rutherford y Patrick Blackett, en los que un núcleo de helio enviado a alta velocidad (por desintegración radiactiva) contra un núcleo de nitrógeno se rompe en dos protones y otros tantos neutrones, de modo que éstos y uno de

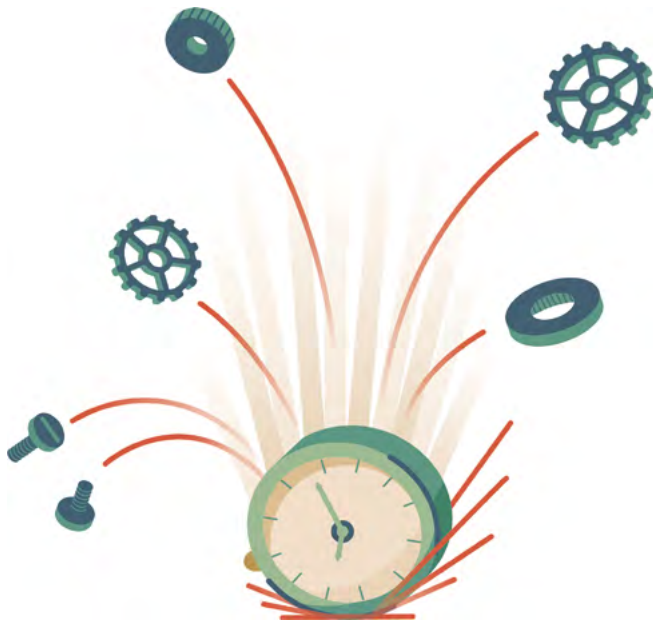
⁸ El electronvoltio (eV) es una unidad de energía cinética (es decir, la energía relacionada con la velocidad) usual en el ámbito de la física de partículas. 1 eV corresponde a la energía de un electrón acelerado sometido a una tensión eléctrica de 1 voltio.

⁹ En un linac, para acelerar se adopta la configuración en línea recta. En un ciclotrón, la configuración es circular y la presencia de un campo magnético fijo imprime al haz de partículas una trayectoria en espiral, con radios cada vez mayores. En un sincrotrón, también la configuración es circular, pero el campo magnético varía con cada vuelta, lo que permite que las partículas sigan una trayectoria circular con radio constante durante la aceleración. En un anillo de almacenamiento, la aceleración sólo es marginal para compensar las diversas pérdidas de energía, con objeto de mantener constante la energía del haz.

Para ver qué sucede a la escala de 10^{-15} m

los protones se recombinan con el núcleo de nitrógeno para dar otro de oxígeno. Y, de repente, fuimos conscientes de que podíamos romper la materia, diseccionarla y sondearla a esta escala, a pesar de su pequeñez.

Cortar o romper la materia siempre ha sido el punto de arranque para estudiar su estructura interna y comprender las propiedades físicas y mecánicas. Esto suele compararse con la curiosidad infantil, que busca desarmar objetos o aparatos tecnológicos para entender cómo funcionan. Con los modernos terminales telefónicos, que ya no se desmontan tan fácilmente, es natural que las criaturas tengan la ocurrencia de arrojarlos violentamente al suelo para fragmentarlos y ver qué hay dentro. Es cierto que los progenitores no estarán demasiado contentos, especialmente si el aparato telefónico es caro, pero, digámoslo, al científico que busca romper la materia lo impulsa esa misma actitud psicológica infantil. También es posible que algunas de estas criaturas acaben siendo profesionales de la ciencia. En cualquier caso, a menudo se dice que los científicos son «niños grandes», en el sentido de que conservan una



fuerte dosis de curiosidad y desean ver las cosas con mayor hondura. De todos modos, en un examen más detenido, esta afición de reducir a añicos para conocer es uno de los fundamentos del pensamiento científico mismo: se trata de la mente analítica, que, en presencia de un objeto complejo, trata de descomponerlo en trozos más simples para analizarlos por separado, esperando que al entender las partes individuales se comprenda el todo. Esta idea de análisis fue propuesta por el matemático y físico René Descartes en su texto *El discurso del método*, publicado en el siglo XVII.

La necesidad de dividir la materia en pedazos cada vez más diminutos para estudiar su estructura interna ha sido evidente desde la antigüedad, pero no fue hasta los experimentos de colisión de Rutherford, a principios del siglo XX, cuando advertimos que así podía llegarse a la escala del núcleo y a las partículas que lo constituyen. Descubierta al mismo tiempo, la relación de Einstein $E=mc^2$ establece claramente la equivalencia entre la energía, E , y la masa, m , a través de la velocidad de la luz en el vacío, c . Esta fórmula vino justo a tiempo, pues permite estudiar minuciosamente el resultado de los choques durante los cuales una fracción de la masa de las partículas se transforma en energía y viceversa.

Los aceleradores de partículas acreditaron, pues, ser herramientas ideales, esenciales para estudiar tanto la estructura de los constituyentes básicos de la materia como la naturaleza de sus interacciones. Estas herramientas pueden ayudar, en cada época, a discernir qué teoría es correcta entre las muchas posibles que compiten, así como a orientar las reflexiones teóricas subsiguientes. Incomparablemente más precisos, más regulares y más fiables que el flujo de partículas que nos llega desde el cosmos, los haces emitidos por los aceleradores han llevado a descubrimientos decisivos en este campo. Sin pretender ser exhaustivos, podemos mencionar a vuelapluma las interacciones fuerte y débil que actúan en los núcleos, los tres tipos de quarks, los bosones W y Z, así como el muy reciente bosón de Higgs. En definitiva, todos los ladrillos que sirven para construir el Modelo Estándar que, así lo suponemos, rige el micromundo donde se asienta el macromundo en que vivimos.

Por tanto, los primeros aceleradores se diseñaron para producir colisiones entre corpúsculos, tal como solicitaban los físicos nucleares y los de partículas. Después, ha sido preciso acelerar las partículas a energías

Esta afición de reducir a añicos para conocer es uno de los fundamentos del pensamiento científico mismo: se trata de la mente analítica

progresivamente más colosales, para que aquellos físicos que necesitan romper cada vez más vigorosamente la materia profundicen en ella con mayor sutileza, un poco al modo en que los niños mencionados antes exigen paulatinamente juguetes más preciosos y potentes. Y justo para ambas comunidades de físicos se han construido los más grandiosos aceleradores.

El mayor y más potente acelerador de todos los tiempos es el LHC (siglas en inglés de Gran Colisionador de Hadrones). Construido en el CERN, a uno y otro lado de la frontera franco-suiza, muy cerca de Ginebra, es un acelerador circular de unos 27 km de circunferencia, con 4 puntos de colisión para protones e iones pesados, con una energía en el centro de masas de 7 TeV. El LHC es, de hecho, el eslabón final de un sistema encadenado de aceleradores que comienza con uno lineal, de 86 m de longitud, seguido de otros dos, circulares, denominados PS y SPS, de 628 m y 7.000 m de circunferencia respectivamente.

En Francia, el GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) es una gran base de aceleradores dedicada al estudio del núcleo, ubicada en Caen. La instalación consta de un conjunto de fuentes, de sincrotrones y de líneas de transmisión, que ocupan un espacio de 250 m × 250 m. A partir de las colisiones de iones que chocan contra los núcleos situados en dianas fijas se generan otros con muy diversas combinaciones de protones y neutrones.

No obstante, intentando comprender el mundo a la escala más diminuta, surgió otro uso de los aceleradores de una manera bastante fortuita.

PARA PRODUCIR RADIACIÓN SINCROTRÓNICA

Esta segunda aplicación de los aceleradores partió de un fenómeno parásito e inesperado, que surgió cuando se diseñaron las máquinas descritas en el apartado anterior. Para lograr aceleraciones cada vez más energéticas, se adoptó la configuración circular, pues así, en cada ciclo, se daba un nuevo impulso a las partículas. De este modo puede reducirse el tamaño del acelerador, en comparación con una configuración lineal equivalente. No obstante, cuando una partícula cargada describe una trayectoria curva, sucede como en una antena: necesariamente emitirá radiación electromagnética (consúltese la discusión sobre las leyes del electromagnetismo más adelante) y, por tanto, perderá energía. Este efecto secundario anula claramente el propósito original de procurar mayor energía.¹⁰

¹⁰ El gran tamaño de los aceleradores circulares también se debe a la fuerza limitada de los elementos magnéticos usados para desviar la trayectoria de las partículas.

Sin embargo, muy rápidamente se advirtió que la radiación emitida tiene cualidades excepcionales. Tan direccional como el láser y con una brillantez que multiplica por 10.000 la de la radiación solar, su intervalo espectral (gama cromática) es muy amplio, abarcando desde el infrarrojo hasta los rayos X, pasando por el visible. Esta radiación, denominada sincrotrónica, puede emplearse para sondear materiales inertes o vivos, con un poder de resolución que engloba desde los micrómetros a los nanómetros (10^{-6} a 10^{-9} m). Además, la luz emitida por los sucesivos paquetes de partículas es pulsátil de forma natural, lo que permite estudiar fenómenos ultrarrápidos, en la escala de los nanosegundos (10^{-9} s). Por otro lado, esta radiación es tanto más potente cuanto más se aproxima a la de la luz la velocidad de las partículas, lo que, si éstas son las de menor masa, es decir los electrones, es más fácil de conseguir.

En consecuencia, para maximizar la producción de esta radiación se han diseñado y optimado aceleradores circulares de electrones de tipo sincrotrón. Éstos, al igual que los microscopios gigantes y superpotentes, están destinados a estudiar las estructuras microscópicas de los materiales en campos dispares de la investigación académica y tecnológica. Cada uno de estos aceleradores es una fuente de luz sincrotrónica para servir a diversos grupos de físicos, químicos, biólogos, ingenieros (materiales, microelectrónica, construcción, alta tecnología, etc.) y también a historiadores del arte y del patrimonio cultural. Como resultado, las naciones más desarrolladas industrial o económicamente tienen al menos un acelerador de radiación sincrotrónica. Los países en vías de desarro-



llo, buscando dotarse de un primer gran instrumento de investigación, comienzan por construir un acelerador de este tipo, de gran tamaño, pero no excesivo, que sirva de paraguas para todas las comunidades de investigación científica y tecnológica del país.

El acelerador de radiación sincrotrónica, pues, se está convirtiendo en un elemento estratégico clave en varios programas nacionales de desarrollo. Los países que actualmente son más poderosos y ricos se desarrollaron históricamente gracias a la hegemonía militar, hegemonía que precisaba desarrollar

la industria y la economía y dominar la energía y la alta tecnología. Estos países también saben ahora que el éxito en todos estos ámbitos sólo se puede garantizar impulsando la investigación científica de alto nivel. Hoy en día, los países que quieran incorporarse pacíficamente al círculo de las grandes naciones, pueden ahorrarse este proceso histórico, optando de inmediato por el desarrollo de la investi-

Actualmente los que producen radiación sincrotrónica son los aceleradores de investigación más comunes. Incluso cabría decir que es el instrumento de investigación científica grande más difundido en el mundo

gación científica, en cuyo caso el acelerador de radiación sincrotrónica es un elemento emblemático en torno al cual pueden agruparse numerosas disciplinas científicas y tecnológicas. Sin duda, países como Taiwán, Singapur, Tailandia, India o Brasil, siguiendo esta estrategia, han decidido instalar un acelerador de este tipo en su territorio.

Inicialmente la radiación sincrotrónica era un fenómeno parásito que se quería evitar. Sin embargo, hoy se optiman los aceleradores para maximizar su producción. ¿Es esto algo insólito en la historia de la ciencia y la tecnología? Ciertamente, las secuelas beneficiosas que se transmiten de un campo de estudio a otro son muy frecuentes. De hecho, los efectos secundarios de la investigación militar en la civil son numerosos (el radar, la energía nuclear...). Incluso habrá quien diga que la mayoría de los objetos tecnológicos que utilizamos provienen de desarrollos cuyo objetivo inicial era de defensa. También son comunes las transferencias desde el ámbito espacial al «terrestre». De ello da testimonio el uso de satélites meteorológicos, de análisis ambiental, cartográficos (GPS), etc. También es muy conocida la serendipia, o hallazgo inesperado, de un efecto beneficioso. Piénsese, por ejemplo, en el principio de Arquímedes, la penicilina, el Velcro® o el Post-It®. Sin embargo, que se estudie y

diseñe un objeto con un propósito definido en mente, tratando de minimizar a toda costa un efecto que frustra este propósito, descubrir luego las virtudes de tal efecto indeseable y, finalmente, optimar el objeto para usar intensivamente ese efecto, probablemente es algo inaudito. En todo caso, esto trasciende las nociones de transferencia beneficiosa o serendipia. Actualmente los que producen radiación sincrotrónica son los aceleradores de investigación más comunes. Incluso cabría decir que es el instrumento de investigación científica grande más difundido en el mundo.

En Francia, el sincrotrón SOLEIL, ubicado en la Universidad Paris-Saclay, es el centro nacional de radiación sincrotrónica. Es un sistema de aceleradores compuesto por un linac que suministra electrones con una energía de 100 MeV a un acelerador circular, que a su vez eleva su energía a 2,75 GeV (gigaelectronvoltio = 10^9 eV) para inyectarlos finalmente en un anillo de almacenamiento de 354 m de circunferencia. El SOLEIL tiene 29 líneas de luz sincrotrónica que atienden a poco más de 3.000 usuarios al año. En Grenoble, una instalación europea, denominada ESRF (European Synchrotron Radiation Facility), está formada por un conjunto de aceleradores y, en última instancia, un anillo de 6 GeV, de 844 m de circunferencia, equipado con 40 líneas de luz sincrotrónica.¹¹

La radiación sincrotrónica también la puede generar un dispositivo magnético rectilíneo llamado ondulator, que obliga al haz de electrones a realizar una serie de vibraciones periódicas (oscilaciones), trazando así una gran cantidad de pequeñas curvas. Gracias a la interferencia constructiva, la radiación producida durante todos estos giros puede ser muy intensa y con longitudes de onda muy cortas. El uso de un gran número de onduladores da lugar a un efecto láser intenso, llamado láser de electrones libres. Este es el principio implantado en el European XFEL (X-ray Free Electron Laser), un acelerador europeo con sede en Hamburgo (Alemania). En este caso los electrones, acelerados hasta 17,5 GeV mediante un acelerador lineal de 2 km, luego se envían a una serie de onduladores que ocupa 1 km. La radiación láser producida es mil millones de veces más potente que las fuentes de rayos X convencionales capaces de analizar, ya con bastante profundidad, materiales vivos o inertes.

¹¹ ALBA, un complejo de aceleradores de electrones, es la mayor fuente de radiación sincrotrónica en España (forma parte de la red ICTS y de la LEAPS). Emplazado en Cerdanyola del Vallès (Barcelona), es una instalación pública financiada en partes alicuotas por los Gobiernos central y catalán y gestionada por el Consorcio CELLS. Inaugurado en marzo de 2010, las aplicaciones de este dispositivo, que se emplea para analizar las propiedades de la materia a nivel atómico y molecular, abarcan numerosos ámbitos: física, química, biología, medicina, medio ambiente, patrimonio histórico, etc. (N. del T.)

PARA IRRADIAR OBJETIVOS ESPECÍFICOS

La tercera aplicación de los aceleradores consiste en irradiar con el haz de partículas un blanco específico. Estamos ante un caso típico en que los resultados de la investigación básica acerca del empleo inicial de los aceleradores se transfieren a otros usos. ¡Pero menuda transferencia! Asistimos a una proliferación de aceleradores y a una multiplicación de sus campos de aplicación absolutamente extraordinarias. Hoy en día los

haces de los aceleradores están presentes en muchos y variados ámbitos: desde la investigación básica hasta las actividades de alta tecnología, desde las ciencias de la vida hasta el sector médico, desde los materiales estratégicos hasta los objetos del patrimonio histórico y cultural. Cada uno de estos destinos requiere haces con características muy definidas, por lo que el acelerador, además de ser muy específico, debe optimarse cada vez. Esta es la razón por la que existen máquinas

de muy diferentes tamaños y tipos, que producen haces de partículas de naturaleza, intensidad y energía completamente distintas.

Podemos hacer que las partículas choquen entre sí para estudiarlas (escala 10^{-15} m), pero también para producir partículas de algún tipo concreto, muy útiles para sondear materiales (escala 10^{-9} a 10^{-6} m). Este es el caso del neutrón, generado en una reacción nuclear llamada de «espalación», que se logra bombardeando un blanco metálico con un haz de protones. De este modo se obtienen flujos muy elevados de neutrones en imponentes aceleradores, instalados en laboratorios de investigación, capaces de acelerar protones hasta el orden del GeV. Hoy por hoy el acelerador más potente de este tipo es el SNS (Spallation Neutron Source), instalado en Oak Ridge (EEUU). Consta de un acelerador lineal de 800 m que inyecta en un anillo de 250 m de circunferencia y que, a su vez, emite un haz de protones de 2 MW (megavatio = 10^6 W) en continuo. Se está construyendo una instalación europea equivalente, el ESS (European Spallation Source), en Lund (Suecia). Los neutrones producidos se distribuyen entre los usuarios a través de una veintena de líneas. Además de la investigación fundamental en la física de la interacción neutrón-núcleo, se estudia asimismo la estructura molecular o magnética de materiales como geles, polímeros, superconductores de alta temperatura, fármacos y materiales magnéticos, biológicos y biotecnológicos.

Asistimos a una proliferación de aceleradores y a una multiplicación de sus campos de aplicación absolutamente extraordinarias

En el otro extremo de la escala se encuentran las fuentes compactas de neutrones, constituidas por aceleradores lineales de unos diez metros de largo y que producen haces de protones de unas pocas decenas de MeV y otras tantas decenas de kW (kilovatio = 10^3 W). Estas fuentes pueden sustituir ventajosamente a los pequeños reactores nucleares de investigación cuando se trata de analizar neutrones y también de producir isótopos radiactivos destinados a la medicina nuclear.

En este mundo de pequeños aceleradores lineales, de corta longitud y que proporcionan haces de protones o iones de pocos MeV, es donde cabe catalogar esos aproximadamente 24.000 aceleradores repartidos en diversas empresas industriales. Se utilizan para grabar o implantar iones en componentes electrónicos, para cortar o soldar mediante haces



de partículas, para endurecer materiales destinados al sector de la automoción o aeronáutico, para estudiar materiales de alta tecnología como las células fotovoltaicas, o para controlar la contaminación del aire, o los gases liberados por actividades industriales. El análisis no destructivo también es otra área en la que se emplean estos pequeños aceleradores. Por ejemplo, para inspeccionar grandes envíos transfronterizos o para estudiar y datar obras del patrimonio histórico, como es el caso del AGLAE (Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire), instalado en el Museo del Louvre de París.

Los aceleradores también resuelven otros problemas sociales de suma importancia que procuran asegurar nuestro futuro

Existe otra propiedad de los haces de partículas que también se aprovecha: por encima de una determinada dosis, las partículas cargadas pueden destruir a las células vivas. Por tanto, los aceleradores también pueden usarse para exterminar bacterias de forma selectiva, es decir, para desinfectar o esterilizar recipientes o herramientas en los sectores alimentario y médico. En este sentido una de las aplicaciones más notables es la aniquilación diferencial de células cancerosas mientras se preservan las células sanas cercanas. Esto es posible gracias a la altísima estabilidad del haz de partículas, a su tamaño milimétrico y a que su penetración en el tejido humano está especificada en función de la energía del haz. Hablamos entonces de protonterapia (tratamiento mediante irradiación con un haz de protones) o hadronterapia (aquí el haz es de iones pesados). Hasta la fecha, más de un centenar de aceleradores especializados en estas técnicas han permitido tratar a unos 300.000 pacientes. Es una clase de terapia oncológica muy valiosa, que complementa a la radioterapia y la quimioterapia, particularmente cuando los órganos son pequeños o están profundamente ocultos en el cuerpo. En términos más generales, hay unos 11.000 aceleradores en todo el mundo dedicados exclusivamente a la terapia médica.

Pero eso no es todo. Los aceleradores también resuelven otros problemas sociales de suma importancia que procuran asegurar nuestro futuro. Estamos hablando de producir energía a gran escala, de manera segura y sostenible. Ello requiere aceleradores aún más potentes, capaces de generar haces de protones de hasta un centenar de megavoltios, para lograr un flujo de neutrones de características convenientes para obtener energía basada en la fisión y en la fusión nucleares.

La fisión es el proceso que utilizan actualmente todos los reactores nucleares existentes. Consiste en aprovechar la energía que se libera durante la fractura de los núcleos atómicos pesados (como el uranio o el plutonio) para dar otros más ligeros. Aquí se generan residuos radiactivos, algunos muy tóxicos y de larga vida, que pueden transmutarse al hacerlos interaccionar con los neutrones producidos en los aceleradores, reduciendo así ambos peligros. Incluso hay planes a más largo plazo para usar un acelerador productor de neutrones capaz de impulsar reactores de fisión nuclear. Actualmente los reactores de fisión se basan en reacciones nucleares en cadena, de modo que el exceso de neutrones producido durante la propia reacción origina otras reacciones en cascada, con

el riesgo inherente de que suceda una «divergencia» accidental. Sin embargo, la idea es emplear reactores subcríticos, que requieren un flujo de neutrones externo y bien controlado, para desencadenar las reacciones nucleares. Con ello se elimina cualquier posibilidad de «divergencias» indeseables. De hecho, las investigaciones al respecto comenzaron en China hace algunos años, en un proyecto denominado C-ADS (Chinese Accelerator-Driven System), cuyas primeras realizaciones se pusieron en marcha en Huizhou, en la provincia de Cantón (China). En Europa, el proyecto MYRRHA, con idéntico objetivo, se instalará en la localidad de Mol (Bélgica).

La fusión nuclear, actualmente en fase de investigación, consiste en aprovechar la energía liberada cuando núcleos atómicos ligeros (de helio y deuterio) se unen para dar otros más pesados. Las reacciones de fusión, que son extremadamente difíciles de lograr por la necesidad de vencer la repulsión coulombiana entre los núcleos (como hemos dicho su carga siempre es positiva), se estudian en reactores llamados «tokamak»,¹² sin riesgos nucleares, pues cualquier inconveniente hace que las reacciones de fusión se detengan debido a la repulsión de los núcleos reactivos. Sin embargo, aún se desconoce qué materiales deben utilizarse para fabricar las paredes de la cámara de combustión de esta primera generación de tokamak, que deberán soportar un intensísimo flujo de neutrones procedentes de las reacciones entre los núcleos. Las investigaciones en Europa y Japón se centran en aceleradores capaces de imitar semejante flujo neutrónico y así poder caracterizar los materiales apropiados. Por tanto, se necesita producir en continuo un haz de deuterio (1 protón + 1 neutrón) de varios megavoltios de potencia (esto es el equivalente al

¹² Para lograr una reacción de fusión eficiente se requiere que el combustible, extraordinariamente caliente (plasma) y bastante denso, esté confinado durante un tiempo suficiente («criterios de Lawson»). Los principales métodos de confinamiento son: el gravitatorio, el magnético y el inercial.

- El hecho de que existan las estrellas (el Sol) muestra que el mejor método es el gravitatorio, con tiempos de confinamiento de miles de años. No obstante, resulta inaplicable en la Tierra, al no disponer de tecnología para crear un campo gravitatorio suficientemente fuerte.
- El método más estudiado consiste en confinar el combustible mediante campos magnéticos. Esto es posible porque el combustible está fuertemente ionizado (las partículas que lo forman están cargadas) de modo que un campo magnético puede ejercer sobre él una fuerza. La inexistencia de monopolos exige el uso de bobinas magnéticas de forma toroidal (rosquilla) y el tokamak es una de las tecnologías de confinamiento magnético.
- Otro método consiste en desencadenar la reacción de fusión comprimiendo cierta cantidad de combustible en un espacio diminuto mediante la presión que puede ejercer la radiación sobre la materia. La radiación requerida, muy potente, se genera mediante láseres, cuya potencia se concentra en un punto donde se coloca una pequeña cápsula de combustible. El tiempo de confinamiento viene determinado por la inercia de la materia al expandirse tras la compresión.

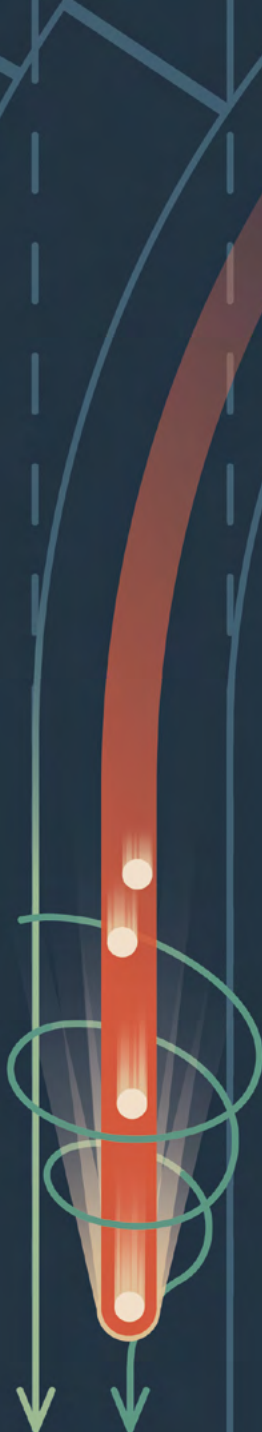
(N. del T.)

consumo eléctrico de 500 viviendas acumulado en un espacio de unos veinte centímetros). Se ha diseñado y fabricado en Europa un prototipo de acelerador de esta clase que ya está instalado en Rokkasho (Japón).¹³

4

Física de los haces de partículas

.....
¹³ Se trata de la instalación LIPAc, prototipo del futuro IFMIF. (N. del T.)



Al cabo, no es algo tan insólito que una herramienta diseñada con determinado propósito resulte válida para otros. Pero que las aplicaciones abarquen tantos y tan heterogéneos campos de actividad, a escalas tan diferentes, con envergaduras y configuraciones tan variadas, **es una situación probablemente única en la historia de la ciencia y la tecnología**. Clásicamente, las herramientas pueden catalogarse como herramientas de análisis, de producción, de corte, etc. Pero los aceleradores se pueden emplear para comprender, analizar, cortar, producir, grabar, fabricar, curar y probablemente aún más funciones. Actúan a escalas de 10^{-15} a 10^{-1} m, es decir 14 órdenes de magnitud. Nos ayudan a responder preguntas que han acuciado a la humanidad durante milenios, brindan soluciones a las necesidades de la sociedad actual en muchos ámbitos y constituyen un utensilio esencial para controlar mejor la energía en el futuro.

Esta extraordinaria flexibilidad sólo ha sido posible gracias al hecho de que los aceleradores de partículas constituyen una disciplina de investigación por derecho propio. De ser una herramienta para estudiar, se ha convertido en objeto de estudio. Esto se debe a que, por los desafíos abordados, al haz de partículas no ha parado de exigírsele que sea más o menos penetrante, más agudo o más disperso, más pulsátil o más continuo, más intenso o más energético, más estable o más preciso, más fiable o más potente. En consecuencia, para satisfacer los criterios que a menudo aúnan varios de estos requisitos simultáneamente, el campo de los aceleradores ha tenido que incorporar muchas y muy diversas disciplinas científicas y técnicas de vanguardia: electromagnetismo, radiofrecuencia, magnetismo, diagnóstico de haces, superconductividad, criogenia, química de sala blanca, ciencia de los materiales, tecnología de vacío, mecánica de precisión, etc.

Pero eso no es todo. Las especificaciones se refieren principalmente a las características del haz, artífice principal en cualquier acelerador. Y los haces contienen miles de millones de partículas de 10^{-15} m que debemos saber acelerar desde casi el reposo hasta una velocidad cercana a la de la luz, constriñéndolas en un espacio del orden de un centímetro y con propiedades ultraprecisas. Esto únicamente es realizable debido al desarrollo de una nueva disciplina: la física de haces de partículas.

Los aceleradores nos ayudan a responder preguntas que han acuciado a la humanidad durante milenios, brindan soluciones a las necesidades de la sociedad actual en muchos ámbitos y constituyen un utensilio esencial para controlar mejor la energía en el futuro

Es interesante profundizar en esta materia recién nacida para dilucidar, no sólo las leyes físicas puestas en juego y que permiten vincular la nueva disciplina con las demás áreas de la física, sino también las particularidades que la distinguen y la contextualizan en el marco general de esta ciencia.

Para ello, de entrada examinaremos cómo se ve un haz de partículas en un acelerador. Luego presentaremos los dos únicos actores que pueden intervenir sobre tal haz: el campo eléctrico y el campo magnético. A continuación, veremos cómo se producen tales campos y cómo se generan esas partículas. Entonces ya estaremos listos para explorar los dispositivos que permiten al acelerador ejecutar sus misiones. Todo ello con amplias digresiones sobre la física de los fenómenos y objetos de nuestro entorno cotidiano, así como sobre la física que reina en el Universo...

EL HAZ DE PARTÍCULAS

De nuevo hay que considerar que hablamos de partículas cargadas eléctricamente. Sólo hay dos tipos de carga, positiva y negativa, indicadas por $+$ y $-$, respectivamente. Y su mutua relación sigue una regla ultrasimple. Las cargas del mismo signo ($+$ y $+$, o $-$ y $-$) se repelen y las de signo opuesto ($+$ y $-$) se atraen. Por otro lado, la fuerza con que se repelen o se atraen es tanto mayor cuanto más cerca estén las cargas.

Recordemos también que la materia que nos constituye y que nos rodea está formada por átomos, compuestos por un núcleo central con carga $+$, rodeado de electrones con carga $-$. Como las cargas $+$ y $-$ se atraen, el átomo es estable cuando hay tantas $+$ como $-$, compensándose perfectamente, es decir cuando el átomo es eléctricamente neutro. En la naturaleza este suele ser el caso, lo que significa que la mayoría de las veces no nos electrocutamos, no recibimos una descarga eléctrica al tocar algún objeto.

Ahora tomemos una colección de partículas no sometidas a fuerza particular alguna. Todas y cada una de ellas se mueven aleatoriamente en cualquier dirección y cada cual a su propia velocidad. Esto se llama agitación térmica, que caracteriza la temperatura de este surtido de partículas. Cuanta más alta es esta temperatura tanto mayor es su velocidad media, y si no están rellenas tienden a ocupar mayor volumen. Sin embargo, colectivamente el conjunto de partículas permanece en el mismo lugar, sin ir a parte alguna. No es un haz de partículas. Una situación equivalente se encuentra en un patio de colegio donde los escolares son libres de ocuparse de sus propios asuntos, sin instrucciones de sus profesores. También podríamos hablar de agitación térmica si los métodos de gobernanza de la administración de un Estado o una empresa no

estableciesen o mantuvieran unas directrices rigurosas. De hecho, un paso a la izquierda y otro a la derecha, un paso adelante y otro atrás, no lleva a sitio alguno.

En los aceleradores tratamos únicamente con haces, que son conjuntos de partículas dotadas de una velocidad colectiva. Es como un grupo de atletas durante una carrera pedestre. Las velocidades de las partículas no son exactamente iguales, pero sí bastante parecidas y, sin duda, se desplazan aproximadamente en el mismo sentido. Este conjunto de partículas se caracteriza por su energía cinética, es decir, la energía relacionada con la velocidad (cuanto mayor es ésta más considerable es aquélla). Hay otros muchos tipos de energía, como la térmica, la mecánica, la química o la másica (relativista), que pueden transformarse entre sí. Por ejemplo, un automóvil que viaja a gran velocidad tiene una gran energía cinética, que se convertirá en energía mecánica y térmica si choca contra un obstáculo (lo rompe y desprende calor). Pero en el contexto de los aceleradores, la palabra «energía» es en sí misma un tecnicismo utilizado para designar exclusivamente la energía ligada a la velocidad.

Y es esta energía la que queremos incrementar en estas máquinas, acelerando el haz, es decir intensificando la velocidad colectiva del paquete de partículas. En definitiva, convertir una carrera pedestre en una competición automovilística.

ACELERAR... Y ALGO MÁS

Para aumentar (o disminuir) la velocidad de un objeto es imperativo aplicarle una fuerza. Si queremos que un balón en reposo sobre el césped vuele hacia la portería, debemos darle una patada. Imaginemos que estamos, por ejemplo, montando en bicicleta. Si no se ejerce fuerza alguna sobre ella su velocidad permanecerá constante. Pero si hay fuerzas de fricción o de frenado, la bicicleta se ralentizará y su velocidad disminuirá. Por el contrario, si quisiéramos acelerarla para que rueda más rápido, es decir para que suba su velocidad, tendríamos que pedalear.

Otro punto importante es la relación entre la dirección de la fuerza y la del movimiento. Para ver esto claramente, examinemos el caso de la navegación fluvial a la sirga. Imaginemos que queremos que una gabarra avance con rapidez por un canal rectilíneo haciendo que por la orilla un caballo al trote tire de ella mediante una maroma. La gabarra se desplaza en dirección paralela al canal gracias a una adecuada orientación del timón. La fuerza ejercida por el caballo tiene una dirección materializada

En aceleradores
tratamos únicamente
con haces de
partículas, es decir
con conjuntos de
partículas dotadas
de una velocidad
colectiva



por la orientación de la maroma, que es oblicua con respecto al canal. Esta fuerza puede dividirse en dos componentes: uno paralelo a la dirección de movimiento del barco y otro perpendicular a esta dirección. Intuitivamente advertimos que sólo el componente paralelo contribuye a que gane velocidad la nave y, por tanto, a acelerarla, incrementando con ello su energía (cinética). En cuanto al componente perpendicular, éste sólo sirve para desviar la trayectoria del barco (en caso de que no se haya reajustado la orientación del timón). En modo alguno, pues, afectará a su velocidad y, por tanto, en modo alguno cambiará la energía (cinética) de la gabarra.

Así pues, para acelerar las partículas debe ejercerse una fuerza paralela a la dirección de su movimiento. Pero en un acelerador se precisa asimismo una fuerza normal a esta dirección si queremos desviar la trayectoria de las partículas y guiarlas hacia donde queremos que choquen (por ejemplo, la célula cancerosa que deseamos tratar) o producir luz sincrotrónica. Por otro lado, también se requieren fuerzas perpendiculares, dirigidas hacia el interior del haz, para focalizarlo (agruparlo) con objeto de contrarrestar la repulsión entre partículas de la misma carga, que constantemente amenaza con romper al haz.

Pero en un acelerador, además de elevar la velocidad de las partículas, también hay que generarlas, guiarlas y focalizarlas. Cuatro acciones cada una de las cuales requiere ejercer una fuerza.

Sin embargo, a una partícula no se le puede aplicar una fuerza de tipo mecánico como en los ejemplos que consideramos antes.

Recordemos que en un átomo existe un vacío abisal, pues el tamaño de las pocas partículas que lo componen es 100.000 veces menor que el propio átomo. En el macromundo, a escala humana, si queremos acelerar un objeto determinado, por ejemplo un balón, para ponerlo en movimiento o hacerlo avanzar más rápido, nos basta empujarlo con la mano o darle una patada. Si tratamos de hacer lo mismo con una partícula cargada, incluso si la viésemos y pudiéramos apuntar para sacudirla, no hay posibilidad de golpearla porque pasaría a través de nuestros átomos sin contacto directo alguno. Es parecido a lo que sucede a escala del Universo durante una colisión de galaxias, esos conjuntos de miles de millones de estrellas. Sabemos, por ejemplo, que la galaxia en la que se encuentra nuestro sistema solar, la Vía Láctea, chocará con su vecina, la galaxia de Andrómeda, dentro de unos 4.000 millones de años. ¡Pero no nos asustemos! Salvo en sus respectivas zonas centrales, la bajísima densidad de estrellas en general hace que semejante colisión pase inadvertida para los cuerpos celestes individuales.

Volvamos a nuestras partículas. Para aplicarles una fuerza, necesariamente hay que recurrir a los campos eléctrico o magnético.

5

Los campos eléctrico y magnético

Sólo hay dos «entidades» que pueden ejercer fuerzas sobre una partícula cargada: el campo eléctrico y el magnético. Aunque éstas son dos nociones recién incorporadas, no es posible ni útil ofrecer sus definiciones exactas.

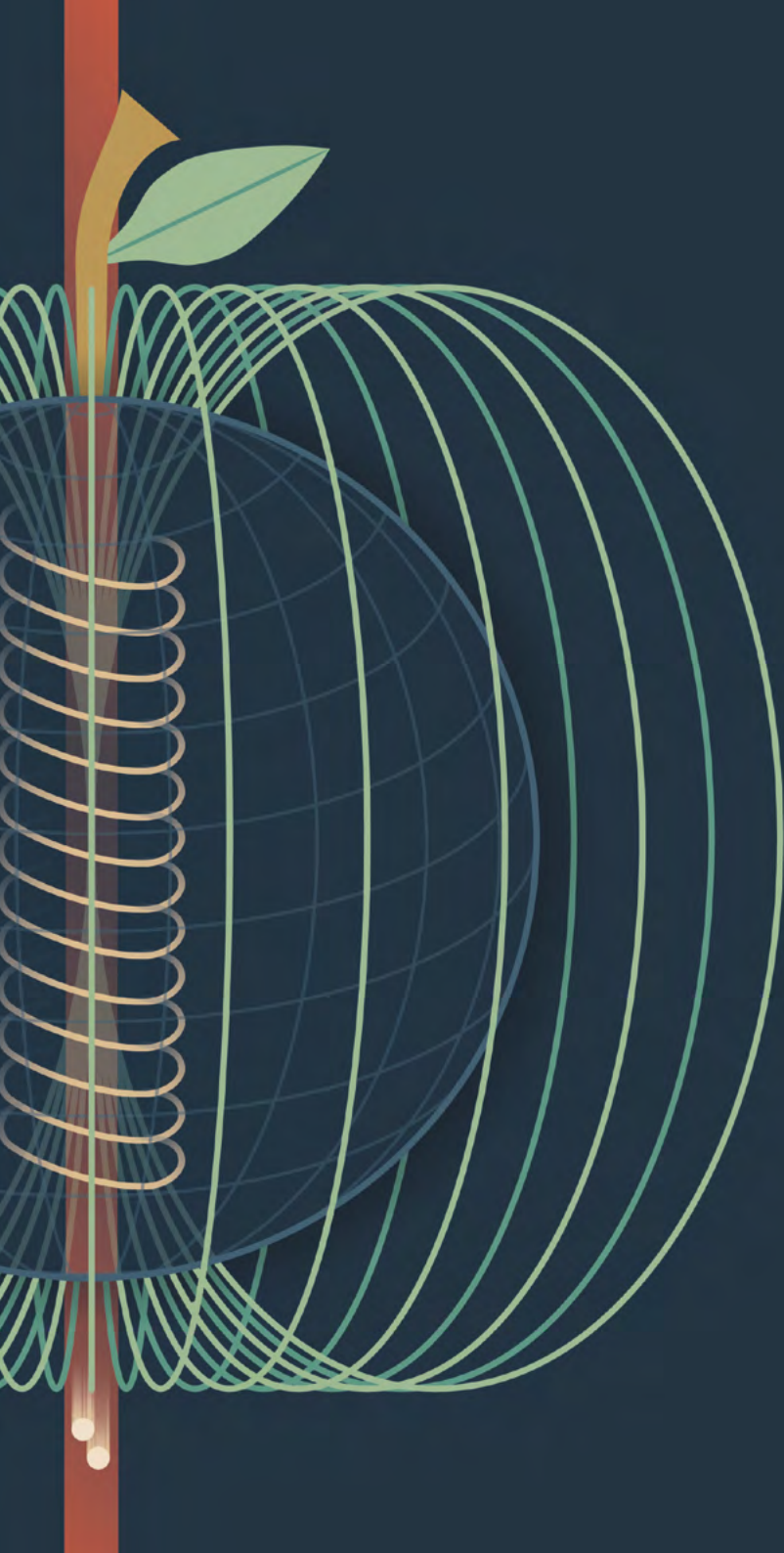
DEFINIR O NO DEFINIR

En la ciencia en general y más particularmente en esta argumentación, nos esforzamos en todo momento por detallar con la mayor precisión los conceptos introducidos. Por tanto, cabría esperar legítimamente que así se hiciera para los campos eléctrico y magnético. Pero no. Ambos forman parte de los primeros principios de la física (igual, por ejemplo, que el campo gravitatorio), cuyas definiciones sólo interesan a los ultraespecialistas en la materia. En matemáticas, y con más exactitud en geometría, el punto, la línea y el plano también constituyen primeros principios que no pueden definirse con rigor. Más adelante volveremos sobre esta noción de primer principio, fundamental tanto en la ciencia como en cualquier otro tipo de pensamiento humano.

No obstante, aunque no sepamos qué son estos campos, tampoco es muy útil definirlos. Digamos que, como el gravitatorio, los campos eléctrico y magnético son invisibles e impalpables. En lugar de tratar de detallarlos, es más fructífero decir dónde están y describir sus efectos.

El campo gravitatorio ejerce una fuerza sobre cualquier objeto con masa, en particular sobre los planetas y las estrellas y, en consecuencia, sobre la Tierra. Este campo, pues, nos afecta a todos nosotros. Por ejemplo, nos atrae hacia el centro de la Tierra, es decir, hace que pesemos. Los campos eléctrico y magnético aparecen y despliegan sus fuerzas cuando hay partículas cargadas. De ahí que sintamos los efectos de aquéllos sólo si éstas se encuentran en nuestro cuerpo o a nuestro alrededor. Pero como toda la materia se compone de partículas cargadas, vivimos permanentemente inmersos en ellas y en los campos eléctrico y magnético. Estamos tan zambullidos como en el gravitatorio, salvo que

En lugar de tratar de detallar qué son los campos eléctrico y magnético, es más fructífero decir dónde están y describir sus efectos



este último es muchísimo más débil en comparación.¹⁴ Por eso nos conciernen tanto los fenómenos eléctricos y magnéticos.

Para comprenderlos completamente basta reparar en los efectos sobre las partículas cargadas de estos campos, y luego observar cómo se producen. Veámoslo.

EFFECTOS DE LOS CAMPOS ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO

Igual que la velocidad y la fuerza discutidas antes, el campo eléctrico también es una magnitud direccional, a menudo representada por un vector que muestra su orientación y sentido, y cuya longitud simboliza su módulo. Una partícula cargada, colocada en este campo, sufrirá una fuerza paralela al mismo, es decir con la misma dirección de este campo (esta fuerza estará orientada en el mismo sentido cuando la carga sea positiva y en sentido opuesto cuando sea negativa). Por tanto, siempre que el campo eléctrico esté bien alineado y dependiendo de si lo aplicamos paralela o perpendicularmente a la dirección de desplazamiento de las partículas, entonces podremos acelerarlas, guiarlas o focalizarlas.

En principio, cabría pensar que basta utilizar un campo eléctrico para cumplir todas las funciones que se desean en un acelerador. Sin embargo, en la práctica esto no es muy conveniente. Las partículas tienen velocidades y direcciones ligeramente diferentes porque, al ser cargas de igual signo, existen repulsiones, que son aleatorias debido a la agitación térmica. Así pues, si aplicásemos un campo eléctrico para acelerarlas, también las desviaríamos un poco e, inversamente, si quisiésemos desviarlas o focalizarlas sirviéndonos de un campo de esta clase, acabaríamos acelerándolas algo. En resumen, no cabe desacoplar estos dos tipos de acción, cuyos efectos, sin embargo, son muy diferentes: uno aumenta la energía del haz de partículas y el otro no. Por otro lado, al ser proporcional a la carga eléctrica de la partícula, de suyo una cantidad infinitesimal, la fuerza eléctrica que ejerce el campo es minúscula. Además, cuanto más veloces son las partículas, tanto mayor tiene que ser la fuerza utilizada para curvar sus trayectorias. Entonces, para velocidades cercanas a la de la luz, no habría un campo eléctrico lo bastante fuerte

¹⁴ Si tenemos dos partículas cargadas, separadas por una distancia dada, entre ellas surge una fuerza eléctrica (atractiva o repulsiva) y una fuerza gravitatoria (siempre atractiva) debido a sus masas. Si fuera el caso de dos electrones, aquella fuerza es 10^{42} veces mayor que ésta, y si fueran dos protones la cifra sería 10^{36} , cifras ambas colosales. Sin embargo, en lo cotidiano, somos más conscientes de la fuerza gravitatoria porque se suma la de todas las partículas, mientras que la fuerza eléctrica se compensa con la neutralidad eléctrica en general. Solo percibimos esta última cuando se rompe este equilibrio, ya en las corrientes eléctricas artificiales que generan hasta cientos de miles de voltios, ya en las tormentas, con descargas eléctricas de centenares de millones de voltios.

como para desviarlas significativamente. De ahí el uso complementario del campo magnético.

El campo magnético, una magnitud también direccional, se representa como en el caso anterior mediante un vector que muestra su módulo, dirección y sentido. Pero la fuerza que este campo ejerce sobre una partícula es radicalmente diferente a la del eléctrico. La intensidad de la fuerza magnética, proporcional a la carga y a la velocidad de la partícula, siempre es perpendicular a la dirección de esta velocidad. Un primer corolario es que el campo magnético no afecta a las partículas en reposo, pero, cuando su velocidad es grande, este campo ya es suficiente para lograr el efecto deseado. Una segunda consecuencia es que el campo magnético no puede acelerar (ni desacelerar) a las partículas. Es decir, en modo alguno altera su energía (cinética). Se utiliza, pues, para dirigir o focalizar partículas, manteniendo sus energías constantes.

Con estos desiguales efectos sobre las partículas, los campos eléctrico y magnético se aprovechan de maneras complementarias en un acelerador. El primero se usa principalmente para acelerar y focalizar a baja energía. El segundo se usa exclusivamente para guiar y focalizar las partículas.

Tras conocer estas fuerzas, uno puede preguntarse: ¿cómo es el movimiento de una partícula sometida a ellas?

Por lo que respecta a la fuerza eléctrica, que es independiente del movimiento de la partícula misma, la circunstancia es bastante fácil de imaginar. Las partículas circulan, o son desviadas, en la misma dirección en que las empuja la fuerza. Volvamos al ejemplo de la bicicleta. Si nos ponemos en marcha y decidimos pedalear, el resultado es fácilmente predecible. Si pedaleamos hacia adelante, la bicicleta rodará más rápido. Si pedaleamos hacia atrás, la bicicleta disminuirá su velocidad. Si giramos a la derecha, la bicicleta se desviará hacia ese lado, y al contrario si torcemos a la izquierda.

En el caso de la fuerza magnética, que depende del movimiento de la partícula en cada instante, la situación es algo más difícil de ver. Siguiendo con el ejemplo de la bicicleta, si queremos moverla perpendicularmente a su velocidad, es decir, a la dirección de su marcha, ¿qué sucederá? Fácil: la bicicleta dará vueltas en círculo. Una vez comprendido este resultado, intuitivamente advertimos que la bicicleta siempre se desviará continuamente hacia el mismo lado, pero es probable que no estemos

Por lo que respecta a la fuerza eléctrica, que es independiente del movimiento de la partícula misma, las partículas circulan, o son desviadas, en la misma dirección en que las empuja la fuerza



completamente persuadidos de que la bicicleta realmente esté describiendo círculos. Para convencernos, estudiemos otro escenario. Imaginemos que somos un vaquero muy hábil con el lazo. Al observar delante de nosotros un corcel trotando en línea recta le echamos el lazo, lo atrapamos y tiramos de la cuerda. La dirección de ésta es perpendicular a la del movimiento del caballo. Supongamos que el animal, particularmente terco, sigue trotando a la misma velocidad que si no lo hubiéramos laceado (este es el caso de las partículas, que, por supuesto, carecen de consciencia propia) e imaginemos que nosotros, no menos testarudos, tiramos de la cuerda con una fuerza constante (que es el caso del campo magnético, desprovisto también de voluntad). Automáticamente vemos que el corcel gira a nuestro alrededor, describiendo una circunferencia de la que somos el centro. Este caso es análogo al anterior de la bicicleta, sólo que ahora la fuerza se materializa en la cuerda, lo que facilita la comprensión. También observamos que, si no cambia la velocidad del caballo, cuanto más intensa sea la fuerza de tracción aplicada al lazo, tanto más cerca trotará el animal del vaquero: es decir, la circunferencia descrita por el corcel tendrá un menor radio.

Resumamos: si una partícula cargada entra en un campo magnético éste la captura, como el lazo del vaquero al caballo. Y entonces, la partí-

cula comienza a girar alrededor del campo. Esta propiedad es la que se usa en los aceleradores para guiar y focalizar partículas. En efecto. Para desviarlas un cierto ángulo en su camino se pone un campo magnético, que las obliga a describir un arco de circunferencia cuya longitud se corresponde exactamente con el ángulo de giro deseado. Antes y después de encontrarse con ese campo magnético, las partículas siguen una trayectoria rectilínea. Téngase en cuenta que, en esta configuración, el campo magnético es perpendicular al haz de partículas, y su intensidad debe ser constante a lo largo de la longitud del haz para que cada una de sus partículas sienta el mismo campo y gire idéntico ángulo. Por otro lado, aplicando el campo magnético paralelamente al eje del haz, hacemos que las partículas giren alrededor de este eje. Con ello focalizamos el haz, algo necesario para evitar que éste se desmiembre debido a las fuerzas internas de repulsión. Además, esto tiene el efecto de reducir el tamaño transversal del haz, tanto más cuanto más fuerte sea el campo magnético.

Por supuesto, estos mismos movimientos de las partículas con carga cuando un campo eléctrico las acelera o uno magnético las captura se ven por doquier en la naturaleza. Resulta muy instructivo examinar algunos ejemplos, pero aún conviene esperar un poco. Primero debemos saber cómo producir los campos eléctrico y magnético. Sólo entonces estaremos equipados con toda la panoplia de conocimientos para explorar los emocionantes fenómenos que ocurren en la naturaleza y el universo que nos rodea.

Si una partícula cargada entra en un campo magnético éste la captura, y entonces, la partícula comienza a girar alrededor del campo

6

Cómo producir campos eléctricos y magnéticos

Básicamente existen dos maneras de generarlos. Una primera es hacerlo de forma estática. En principio esto parece lo más sencillo, pero tiene límites prácticos difíciles de superar. Un segundo modo, que permite traspasar estos límites, consiste en utilizar fenómenos variables en el tiempo, es decir, electromagnéticos.

CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS ESTÁTICOS

El modo más simple de obtener un campo eléctrico se parece a fabricar una pila o una batería eléctrica. Basta disponer dos placas eléctricamente conductoras (metálicas), separadas por un material aislante (aire, por ejemplo). En una de ellas se acumulan cargas positivas y en la otra cargas negativas. Si entre ambas placas se deposita, por ejemplo, una partícula de prueba cargada positivamente, ésta será repelida por la que está llena de cargas positivas, y atraída por la repleta de cargas negativas. La fuerza que experimenta la partícula de prueba muestra con claridad que hay un campo eléctrico entre una y otra placa, de manera que cualquier partícula cargada que se ponga ahí será acelerada.

Sobre la base de este principio se fabricaron los primeros aceleradores, y aún se fabrican algunos dispositivos actuales, que desarrollan energías bastante bajas, del orden de unas pocas decenas de MeV. El campo producido con esta técnica adolece de una intensidad muy restringida, que es una desventaja cuando lo que se pide constantemente es acelerar partículas a energías cada vez más altas. Podría parecer que basta depositar más y más cargas en cada una de las dos placas conductoras para incrementar la intensidad del campo. Sin embargo, acabarían siendo tan poderosas las fuerzas de atracción entre las cargas de signos opuestos que, rebasado cierto umbral, atravesarían el aislamiento que las separa para encontrarse y neutralizarse entre sí. Este fenómeno, denominado ruptura dieléctrica, puede ser tan violento —una vigorosa descarga eléctrica (chispa) entre ambas placas, acompañada de una detonación y una fuerte liberación de luz y calor— como para destrozar por completo el dispositivo. Este fenómeno, a mayor escala, es el que se observa en la naturaleza durante las tormentas, debido al exceso de cargas acumuladas en la parte baja de las nubes, y, a menor escala, en las baterías de nuestros dispositivos electrónicos, con consecuencias que pueden ser no menos aciagas. En nuestros actuales teléfonos inteligentes se instalan baterías de potencia creciente para que su carga dure más a pesar de acometer tareas cada vez más complejas. Al mismo tiempo, queremos minimizar el tamaño de estos dispositivos para cumplir con los criterios de movilidad urbana. Se necesitan, pues, baterías que acumulen mayor carga en sus terminales, separados éstos por un aislante más delgado. Entonces, salvo que se manufacturen con mucho cuidado, se debe temer

el sobrecalentamiento o la avería, con el riesgo de un incendio. Todos recordamos cierto modelo de teléfono inteligente de alta gama que hace unos años fue prohibido en las cabinas de los aviones, tras sufrir la batería accidentes como el descrito.

Los campos magnéticos estáticos pueden crearse mediante imanes permanentes, elaborados con aleaciones de materiales paramagnéticos, como hierro, níquel, cobalto, etc.¹⁵ En estos imanes, que constituyen un buen recurso para materializar el campo magnético, éste se orienta convencionalmente desde el polo sur al polo norte, igual que en cualquiera de los disponibles en las tiendas de juguetes. Es posible magnetizar aleaciones metálicas para generar campos magnéticos bastante poderosos, de unos 10.000 gauss —para hacernos una idea sepamos que la fuerza del campo magnético terrestre (gracias al cual podemos ubicarnos con una brújula) es de 0,5 gauss—. Sin embargo, los campos producidos así tienen una intensidad fija, lo que no casa bien con los aceleradores que requieren campos no sólo más potentes, sino, sobre todo, variables a voluntad para graduar con precisión la posición y el tamaño de los haces de partículas.

Esta intensidad relativamente escasa que, además, no puede variarse fácilmente, es una desventaja inherente a los campos eléctricos y magnéticos estáticos que solo cabe remediar mediante el campo electromagnético.

CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

Hasta ahora nos hemos ocupado de los campos de fuerza que afectan a una partícula cargada. Así, hemos visto cómo determinados dispositivos generaban tales campos, en cuyo seno una partícula cargada experimentaba determinadas fuerzas *ad hoc* de características muy precisas. Pero hemos procedido como si los campos eléctrico y magnético y la partícula cargada fueran tres entidades sin nada que ver entre sí. Ahora bien, ob-

¹⁵ En efecto, un material tendrá cualidades magnéticas tanto mejores cuanto mayor número de electrones desapareados contenga, de modo que puedan alinearse sus momentos magnéticos. Por tanto, los lantánidos son candidatos ideales, pues contienen muchos electrones desapareados. Hasta la fecha, una manera de alinear estos electrones era enlazando un lantánido con hierro (dando lugar a imanes permanentes muy potentes, como los de neodimio). Resulta obvio que, sustituyendo el hierro por otro lantánido, se lograría un imán permanente aún más fuerte. Sin embargo, la difícil tarea de enlazar lantánidos no se logró hasta enero de 2022, gracias a los esfuerzos del equipo de Colin A. Gould, del Departamento de Química de la Universidad de California en Berkeley (EEUU). Estos investigadores han conseguido enlazar dos lantánidos, provocando el alineamiento de los electrones desapareados de ambos átomos (el enlace, basado en un único electrón compartido, es tan débil que ambos lantánidos se mantienen unidos gracias a la intervención de tres átomos de yodo). La nueva molécula es extremadamente magnética. De hecho, si se forma con dos átomos de terbio y la temperatura es de unos 50 K, el campo coercitivo supera los 250.000 gauss. (N. del T.)

servando con más detalle, se constata que, incluso como conjetura, esto es bastante difícil de aceptar. Si los campos eléctrico y magnético son independientes de la carga, tan intrínsecamente característica de la partícula, ¿cómo puede ser tan preciso y exacto el vínculo entre esa carga y las fuerzas que ponen en juego estos campos? Y aún más inquietante, ¿cómo percibe el campo magnético la velocidad de la partícula en cada instante para ajustar permanentemente su fuerza, de manera que sea siempre estrictamente proporcional y, al mismo tiempo, perpendicular a esta velocidad? De hecho, la única manera de resolver estas dificultades conceptuales es admitir que estas tres entidades están íntimamente ligadas. Es decir, que son manifestaciones simultáneas de un mismo fenómeno físico que hemos denominado electromagnetismo.

Veamos. Una representación bastante correcta consiste en considerar que el campo eléctrico resulta de la interacción entre dos partículas cargadas, con las fuerzas repulsivas o atractivas ya mencionadas, denominadas de Coulomb. En este contexto importa señalar que, por razones de simetría, la fuerza ejercida desde la carga 1 sobre la carga 2 es idéntica que la ejercida desde la 2 sobre la 1. Así, una carga crea, según determinada ley, un campo eléctrico que, a su vez y obedeciendo exactamente esa misma ley, ejerce un efecto sobre otra carga que entra en este campo. Y de hecho, con cargas positivas y negativas repartidas en sendas placas conductoras se creó un campo eléctrico, gracias al cual pudieron acelerarse otras cargas.

Y similar tipo de representación también vale para el campo magnético. Debemos considerar que éste surge de la interacción entre dos cargas con movimiento curvilíneo. Una carga que gira en torno a un eje crea un campo magnético paralelo a ese eje, de modo que otra carga que se acerque por las inmediaciones experimentará una fuerza que la obligará a rotar alrededor de este campo. Inmediatamente advertimos que este principio abre la posibilidad de producir un campo magnético con electrones que se desplacen en un bucle, o lo que es igual, mediante una espira de corriente eléctrica. Este es el método para generar el campo magnético en los aceleradores.

El dispositivo se llama electroimán, porque se logra un imán a base de electricidad. También se denomina bobina magnética, o incluso solenoide, un tecnicismo que significa devanado helicoidal de cable eléctrico aislado. El campo magnético producido puede ajustarse fácilmente sin más que variar la corriente eléctrica que circula por el cable. Su intensidad en las direcciones transversal y longitudinal viene dada respectivamente por la sección de la espira y la longitud de la bobina. Un electroimán superconductor enfriado a temperaturas criogénicas puede producir un campo magnético de hasta 100.000 gauss.

Por tanto, llegar al electromagnetismo resultaba inevitable

En esta etapa de nuestro viaje intuimos que los campos eléctrico y magnético tampoco pueden ser fenómenos independientes. El término electroimán ya es muy evocador. Anteriormente vimos la interdependencia entre la carga y los campos

eléctrico y magnético. Cabe señalar, en el caso del campo magnético, que al entrar en juego la velocidad de la partícula se invoca la noción de movimiento, es decir, de variación en el tiempo.

Por tanto, llegar al electromagnetismo resultaba inevitable. En efecto. Hacia mediados del siglo XIX, los numerosos experimentos de Johann Carl Friedrich Gauss, André-Marie Ampère, Michael Faraday, Hans Christian Ørsted, etc. ya habían arrojado luz sobre los vínculos entre carga, electricidad y magnetismo, que condujeron al electromagnetismo, una prodigiosa síntesis teórica que se condensó elegantemente en las cuatro ecuaciones de Maxwell.¹⁶ Sin entrar en detalles técnicos, recordemos que en esencia esta teoría afirma lo siguiente: los fenómenos eléctricos y magnéticos no son independientes, pues toda variación temporal de un campo eléctrico hará que aparezca uno magnético, y viceversa.

Este avance auténticamente revolucionario en el pensamiento científico trajo consigo el concepto de onda electromagnética, alterando de raíz el conocimiento del universo que nos rodea y de nuestra vida cotidiana. ¿Qué es una onda electromagnética? Como una ola en el mar, que es una oscilación de las partículas acuosas que se propaga, una onda electromagnética es una oscilación conjunta de los campos eléctrico y magnético que se propaga. La luz visible es una onda electromagnética, igual que las ondas del radar, la radio, la televisión, el teléfono, el bluetooth, el wifi, etc. Vivimos bañados de continuo en ondas electromagnéticas, naturales o producidas por el ser humano.

Una onda electromagnética surge cuando hay cargas eléctricas en movimiento acelerado (es decir, cuando la dirección o el módulo de su velocidad cambian con el tiempo). Este es el efecto antena, en el que, al hacer oscilar electrones a lo largo de una barra metálica, se produce una onda electromagnética que, a su vez, causará un efecto recíproco, haciendo que los electrones de cualquier otra barra de metal oscilen. La emisión y

¹⁶ Sin duda, las aportaciones del danés Ørsted, realizadas en 1820, fueron decisivas para establecer la profunda unidad entre electricidad y magnetismo. No obstante, reviste interés una nota, aparecida el 26 de enero de 1852 en la *Gaceta de Madrid* (pág. 3, sección «Miscelánea»), sobre la posibilidad de que dos individuos separados una gran distancia pudieran comunicarse entre sí mediante una aguja magnética, citando un recopilatorio de problemas titulado *Deliciae Physico-mathematicae oder Mathematische und Philosophische Erquickstunden*, obra del alemán Daniel Schwenter —profesor de matemáticas y lenguas orientales en la Universidad de Altdorf— y publicado póstumamente en Núremberg, en 1636. ¡Casi doscientos años antes de los experimentos del danés! (N. del T.)

la recepción de ondas hertzianas (p. ej.: de radio, de televisión...) se basa en este principio, y también el origen de la radiación sincrotrónica, de la que ya hemos hablado. La velocidad de los electrones en movimiento curvilíneo varía continuamente de dirección y, por tanto, irradian ondas electromagnéticas, llamadas en este marco luz sincrotrónica.

Asimismo, una onda electromagnética puede capturararse en una cavidad metálica, que aquí desempeña el papel de caja de resonancia. Entonces, según el tamaño y la forma de dicha cavidad, la onda adoptará una configuración particular y, lo que es más importante, podrá amplificarse fuertemente. Así sucede en las cajas de resonancia de los instrumentos musicales, pero en ellos lo que se modula y se propaga son ondas sonoras —oscilaciones de la presión del aire—. Los sonidos producidos por violines, pianos o guitarras se escuchan fácilmente en las grandes salas de conciertos gracias a las respectivas cajas de resonancia de tales instrumentos. Sin ellas, los sonidos generados por sus cuerdas apenas serían audibles. Un método análogo es el que se aplica en los aceleradores. El dispositivo denominado cavidad aceleradora está optimado para maximizar la amplificación del componente eléctrico de la onda electromagnética cuando pasa el haz de partículas. De esta manera, en un volumen decenas de veces menor, se logra un campo eléctrico decenas de veces mayor que el obtenido estáticamente.

LLEGAR A LO COTIDIANO Y AL UNIVERSO DESDE LOS ACELERADORES

Los procesos físicos subyacentes tras la aceleración, el guiado y la focalización de las partículas que acabamos de explorar no son específicos del mundo de los aceleradores, también están en la raíz de los fenómenos electromagnéticos que suceden en todas las escalas de nuestro mundo (absolutamente en todas). Resulta instructivo darse una vuelta rápida para ver estos mismos procesos en muchas situaciones que nos resultan familiares.

Partamos de un solenoide, es decir, un devanado helicoidal de hilo conductor aislado. En cuanto circule por éste una corriente eléctrica surgirá un campo magnético paralelo al eje longitudinal de esta bobina. Se trata, simplemente, de una dinamo inversa. Una dinamo es ese pequeño dispositivo adosado a la rueda de una bicicleta que, al pedalear, produce una corriente eléctrica capaz de encender el faro. La dinamo consta de

Los procesos físicos
en un acelerador se
manifiestan en todas
las escalas de nuestro
mundo



una bobina eléctrica en cuyo centro hay un imán que gira solidariamente con la rueda de la bici. Al rotar el imán cuando pedaleamos se produce un campo magnético variable en el tiempo, que a su vez crea una corriente eléctrica en la bobina. En términos electromagnéticos, como se ve, es el fenómeno inverso al del solenoide.

A una escala aún mayor, este mismo método de la dinamo se utiliza para fabricar la electricidad que luego se envía a todos los hogares. Las bobinas, que ahora tienen unos cuantos metros de diámetro, están igualmente equipadas con un imán permanente en su centro. Estos imanes, sólidamente unidos a unas turbinas, se ponen a girar cuando éstas hacen lo propio impulsadas por la cascada de una presa hidráulica, o por flujos de gas a alta presión en una instalación de generación termoeléctrica, convencional o nuclear. En todos estos casos, la energía mecánica, térmica y nuclear se ha convertido en energía eléctrica.

A una escala aún mayor, el campo magnético terrestre, que orienta nuestras brújulas señalando dónde está el norte, se rige por los mismos principios. Por su constitución y su mecanismo de formación (acreción gravitatoria), la Tierra tiene una temperatura interna muy elevada, superando los 5.000°C en el núcleo. La agitación térmica resultante hace que cristales, moléculas y átomos se desmiembren. Las rocas se licuan y las cargas $+$ y $-$ se separan, lo que desequilibra la neutralidad eléctrica del medio. Entonces, el movimiento de rotación de la Tierra hace que estas cargas giren igual que la corriente eléctrica en las espiras en un gigantesco solenoide. Esto crea un campo magnético paralelo al eje norte-sur terrestre, cuyas líneas perfilan alrededor del planeta una red que abarca toda la Tierra y converge en ambos polos.

Abandonemos ahora la Tierra y vayamos al Sol. Con una masa 300.000 veces mayor, necesariamente está mucho más caliente. Su superficie alcanza los 6.000°C . La agitación térmica es tal que toda la materia se encuentra en estado de plasma, es decir, de gas con todos los átomos disociados en partículas cargadas, dotadas de altísimas velocidades y, por tanto, lanzadas en abundancia al espacio, en particular, hacia la Tierra. Este flujo de partículas se llama viento solar. Ya dijimos, recordémoslo, que en dosis altas las partículas cargadas pueden dañar gravemente las células vivas. Se ha estimado que si todo el viento solar incidiera en la superficie terrestre la biosfera no habría surgido, ni mucho menos desarrollado, tal como la conocemos. Este viento solar también habría acabado volatilizando completamente la atmósfera, haciendo que nuestro planeta fuera tan estéril como Marte. Afortunadamente para nosotros esto no ha sucedido gracias al campo magnético terrestre, capaz de capturar gran parte de las partículas solares, obligándolas a girar alrededor de las líneas que constituyen esta red, como hacía el caballo laceado por el vaquero del que ya hemos hablado. Sólo cuando el viento solar es más intenso, sus partículas son capaces de penetrar por los polos, provocando las auroras al interaccionar con los átomos del aire.

Sin embargo, no todas las partículas son capaces de abandonar la superficie del Sol. Algunas son cazadas por las numerosas líneas de los campos magnéticos que imperan allí localmente, campos causados por los colosales vórtices de su atmósfera, equivalentes a gigantescas bobinas de corriente eléctrica. Cuando dos vórtices contiguos giran en direcciones opuestas en esa región surgen dos polos, norte y sur, que crean una espira magnética que brota del eje de uno de los vórtices para acabar en el otro. Las partículas allí captadas se enroscan en un movimiento helicoidal que va y viene incesantemente entre ambos vórtices. Cuando uno de ellos desaparece, la espira magnética se rompe y las partículas son expulsadas al espacio. Dependiendo de «la meteorología solar» estas espiras magnéticas locales y sus consiguientes capturas pueden llegar a producirse masivamente, liberando una enorme cantidad de partículas. Cuando eso ocurre, en la Tierra ya no hablamos de viento sino de tormenta solar. Los pasajeros en vuelos a gran altitud y los astronautas pueden llegar a experimentar picos bruscos en la tasa de dosis de partículas absorbidas. Los países cercanos al Polo Norte son los más vulnerables frente a este fenómeno. En 1989, una poderosa tormenta solar provocó un corte general de energía en Quebec (Canadá), sumiendo a millones de personas en la oscuridad y causando pérdidas económicas de varios millones de dólares. Entonces, las auroras boreales fueron visibles hasta en Texas (EEUU).

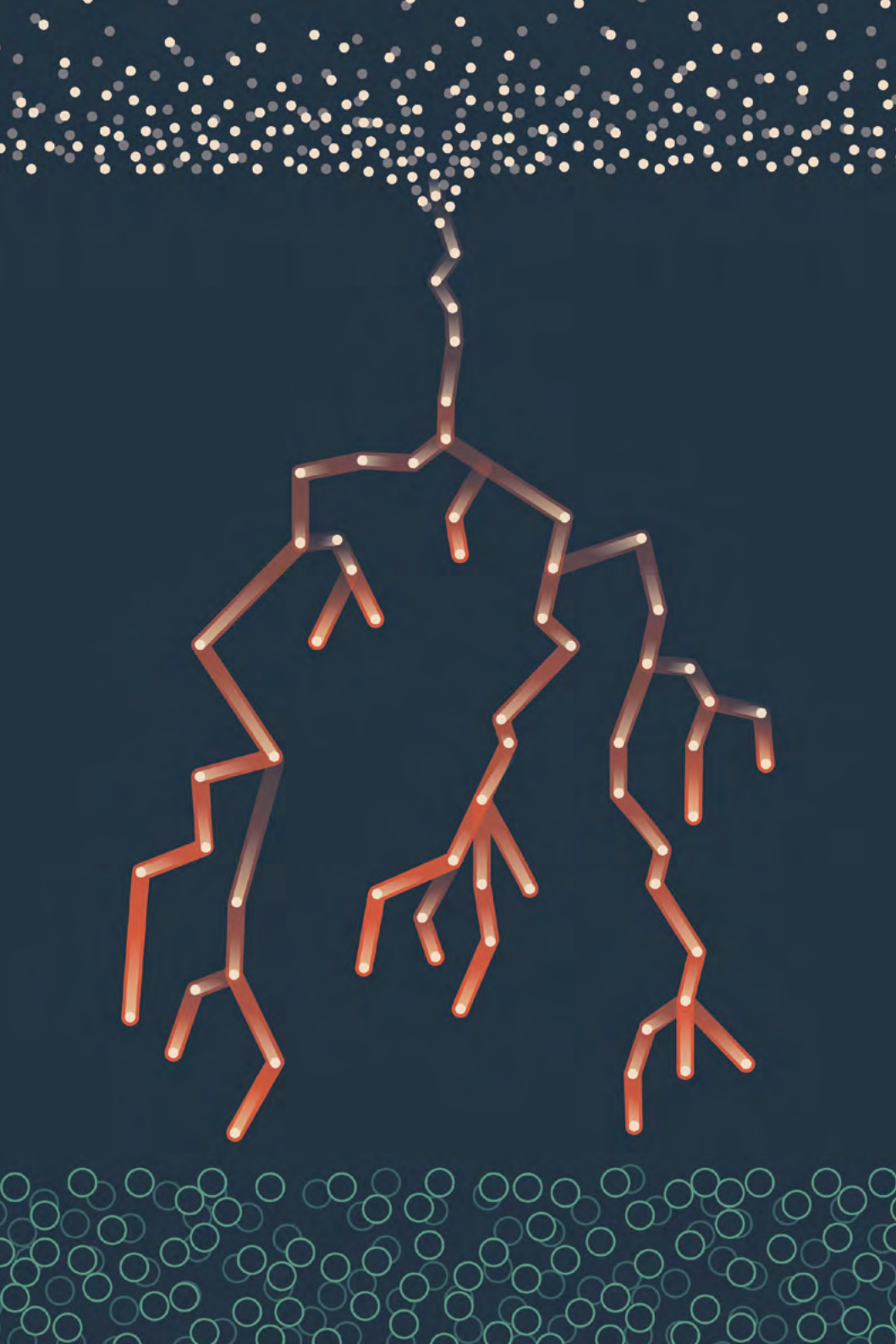
A una escala aún más vasta, escudriñemos ahora las galaxias, esos conjuntos que contienen billones y billones de estrellas. Las fotografías de los telescopios más potentes que escanean el espacio en alta resolución nos muestran las galaxias como masas brillantes, con formas más o menos aplanadas y, a veces, con un eje central luminoso. Que el conglomerado estelar resplandezca es comprensible, pero ¿de dónde viene este eje rutilante? La rotación de la galaxia sobre sí misma (de ahí su tendencia a aplanarse) significa que todas las estrellas con sus partículas cargadas están girando, lo que crea, como sucede en un solenoide, un campo magnético axial. Entonces, las partículas cercanas al eje expulsadas de la galaxia tendrán que circular alrededor de este campo magnético, un movimiento de rotación que implica la emisión de luz sincrotrónica, como ocurre en los aceleradores cuando se curva el haz.

Así pues, a todas las escalas encontramos los ingredientes básicos de un acelerador: partículas cargadas, corriente eléctrica, dinamo, dinamo inversa, campo magnético, radiación sincrotrónica y captura de cargas por un campo magnético. A escala grande sólo está ausente el campo eléctrico (pero aún tendremos tiempo de ver dos contraejemplos más tarde), pues éste surge de la interacción entre dos cargas, una interacción que al decrecer con el cuadrado de la distancia que las separa impone límites muy pronto. Por el contrario, el campo magnético es de la misma envergadura que la espira de corriente que lo origina. De ahí que, cuanto mayores sean la intensidad de la corriente y el tamaño de la espira tanto más potente y mayor alcance tendrá este campo.

Por lo que respecta a las partículas cargadas, éstas se encuentran por doquier y a todas las escalas. Será interesante saber cómo se producen en los aceleradores... y en la naturaleza.

7

Cómo producir partículas cargadas



Recordemos que en un átomo los electrones (carga $-$) están muy lejos del núcleo (carga $+$). Una imagen que nos encanta es esa en la que si dilatáramos el núcleo hasta alcanzar el tamaño de un balón de fútbol y lo colocásemos en medio del estadio más grande del mundo, los electrones se encontrarían en el lugar de los espectadores de la última grada.¹⁷

Una consecuencia importante es que la fuerza de Coulomb con que se atraen el electrón y el núcleo, debido a los signos opuestos de sus cargas, es muy débil. A pesar de ello, basta para que en la naturaleza los átomos sean eléctricamente neutros, pues las cargas $+$ atraen a otras tantas cargas $-$, neutralizándose entre sí. Sin embargo, la labilidad de esta fuerza implica que a la menor fricción o calentamiento,¹⁸ por simple incremento de la agitación térmica, los electrones y los núcleos se separarán. Entonces, se rompe la neutralidad del átomo y estaremos en presencia de partículas cargadas, cuyos movimientos son muy desiguales entre sí. En efecto, los electrones, al ser muchos más ligeros, se desplazan con mayor rapidez que los núcleos. Por ello, cada tipo de carga se acumula en diferentes lugares del objeto considerado, en función de su forma, estructura atómica y naturaleza conductora o aislante.

Ciertamente, en muchos procesos naturales surgen con facilidad partículas cargadas, incluso durante las actividades cotidianas. En el caso de los aceleradores, aplicaremos los mismos principios de calentamiento y fricción para fabricarlas, excepto que allí las necesitaremos en grandes cantidades, pero ocupando un volumen limitado.

LAS ACTIVIDADES HUMANAS, PREÁMBULO HACIA OTROS PROCESOS NATURALES

Realmente es sencillísimo producir partículas cargadas. Cada uno de nosotros lo hace a diario y regularmente. Al caminar, la fricción de los zapatos contra el suelo o una alfombra provocará que aparezcan cargas, en este caso electrones, que, al repelerse entre sí, se distribuyen por casi toda la superficie de nuestro cuerpo. Basta estrechar la mano o besar a alguien para que tales cargas fluyan súbitamente hacia esa otra persona, induciendo un chispazo eléctrico que puede ser bastante desagradable. Análogamente, al quitarnos el jersey por la noche cuando llegamos a

¹⁷ En realidad, el electrón está aún mucho más lejos del núcleo de lo que se pinta en esta imagen. El balón de fútbol tiene un radio del orden de 10 cm y el radio de los mayores estadios del mundo no supera los 200 m. El tamaño del estadio, pues, es como máximo 2.000 veces mayor que el del balón, mientras que el tamaño del átomo es 100.000 veces mayor que el del núcleo.

¹⁸ El roce y el calentamiento producen idéntico efecto. En invierno, nos frotamos las manos para calentarlas. El frenado del AVE (tren de alta velocidad) por fricción de una pastilla de freno sobre el disco de una rueda, eleva la temperatura del sistema hasta los 900°C.

casa, el roce de la prenda con el cuerpo y luego con el cabello intensifica el surgimiento de cargas: iones positivos que, al repelerse entre sí, ponen los pelos de punta. Si nos desvestimos en la oscuridad frente a un espejo, es posible observar diminutos destellos entre nuestro cuerpo y el jersey, acompañados de minúsculos chasquidos. Son pequeñas chispas, señal de que se están neutralizando las cargas de signos opuestos, al destruirse localmente el carácter aislante del aire.

Con una regla de plástico y unos pedacitos de papel cabe evidenciar a voluntad estas partículas cargadas. Si frotamos la regla contra la ropa durante medio minuto y, luego, la acercamos a esos papeles los atraerá y los hará «bailar». La cara de la regla que hemos friccionado se ha cargado negativamente, y repele a los electrones superficiales de los papelitos conforme se aproxima a ellos, desnudando así a sus iones positivos, que quedan expuestos, y, en consecuencia, acaban siendo atraídos por la regla. Este solía ser un entretenimiento infantil antes de la llegada de los juegos electrónicos.

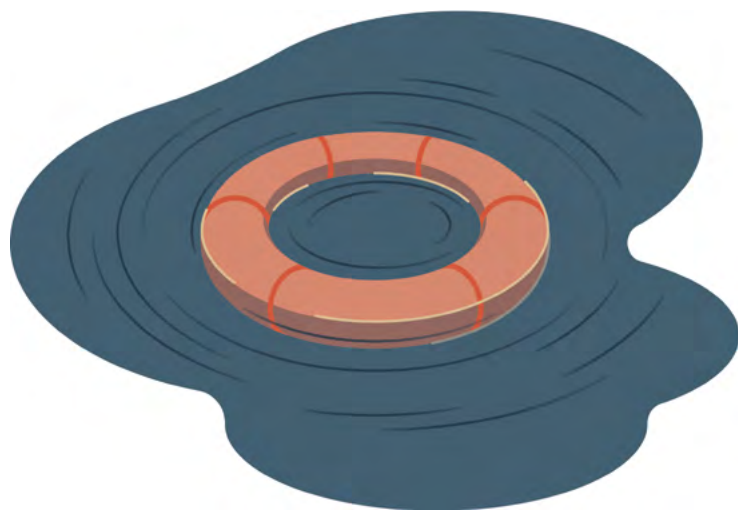
La creación de electricidad estática, un proceso ya muy conocido en la antigüedad, fue descrita hace 2.600 años por el célebre matemático Tales de Mileto a partir de la experiencia de frotar un trozo de ámbar. De ahí los términos electricidad y electrón, que provienen de la palabra *ἤλεκτρον*, que significa ámbar en griego clásico.

Este fenómeno también es muy común en la naturaleza, y a una escala espectacular. Consiste en la formación de rayos durante las tormentas

eléctricas. En sí, éstas son el resultado de un asombroso acopio de energía, agua, calor y electricidad. Se activan cuando tal acumulación rebasa cierto umbral. De ahí que, en determinados países tropicales, cuyo clima estival es invariablemente caluroso y con una gran insolación, las tormentas estallen con regularidad y a la misma hora cada día. Son sucesos violentos y breves, durante los cuales se desatan lluvias, vientos y rayos, hasta disipar el agua, el calor y la electricidad almacenados. Las tormentas suelen presentarse característicamente al final de la tarde, tras una jornada de bochorno. La atmósfera, muy transparente, apenas absorbe la radiación solar. Ésta, por el contrario, es captada casi en su totalidad por el suelo, donde una gran fracción se va convirtiendo poco a poco en energía térmica. El terreno se caldea intensamente, aumentando de temperatura conforme pasa el día. Entonces la capa de aire contigua al firme se calentará más que los estratos superiores y, por ser mayor su agitación térmica, se dilatará. Al disminuir en términos relativos de densidad (magnitud que caracteriza la cantidad de materia por unidad de volumen) el aire de esta capa ascenderá presuroso por la atmósfera (movimiento de convección).

Esta subida, vertiginosa, es el resultado del empuje arquimedeano, llamado así por otro sabio de la Grecia clásica. Su recuerdo quedó en la memoria colectiva gracias a la leyenda de la bañera y a la expresión «¡Eureka!», que significa «¡Lo encontré!». Cuenta la fábula que, cierto día, mientras se bañaba, Arquímedes de Siracusa se preguntó por qué el trozo de jabón se hundía irremisiblemente hasta el fondo de la tina mientras la esponja flotaba indefinidamente en la superficie del agua. Súbitamente advirtió que los objetos de menor densidad flotaban sobre los que la tenían mayor, como si éstos empujasen hacia arriba a aquéllos. Tan feliz estaba con su descubrimiento que, al parecer, salió de la bañera desnudo corriendo por la ciudad y gritando «¡Eureka! ¡Eureka!». Sin llegar a tales extremos, todo el mundo puede experimentar en una piscina con una boya. Ésta, llena de aire, es mucho menos densa que el agua (a igual volumen, su masa es muy inferior que este líquido) y asomará en la superficie. Aunque decidiéramos subirnos en ella la boya seguirá flotando. Si quisiésemos sumergirla tendríamos que desplegar cierta fuerza para contrarrestar el fuerte empuje del agua y, por otro lado, en cuanto la soltáramos, como un cohete, la boya subiría rauda a la superficie.

En su rápida ascensión el aire más caliente frotará las capas más frías de aire circundante, lo que, como al quitarnos el jersey, supondrá que afloren partículas cargadas, que en este caso se verán arrastradas rápidamente hacia las nubes. Además, al elevarse, el aire también se enfriará haciendo que el vapor de agua (transparente e invisible) se condense en gotitas (más opacas y perceptibles). Todo ello da como resultado enor-



Una tormenta es la naturaleza despojándose del jersey

mes nubes oscuras, saturadas de agua y electricidad, que se desarrollan vertical y principalmente en altura, a lo largo de más de 10 km.¹⁹ Las cargas negativas, acumuladas en la base de estas nubes, repelerán a los electrones a ras de suelo, provocando allí la masiva aparición de cargas positivas. Nos encontramos exactamen-

te en la situación vista antes: numerosas cargas de signos opuestos se aglomeran en sendas placas, separadas por un dieléctrico (como en una batería). Superado cierto límite, la rigidez aislante del aire desaparece o, más bien, se hace añicos y los electrones de las nubes se abren paso para unirse y neutralizar a los iones positivos del suelo. Y surge el rayo, un fenómeno explosivo que libera una cantidad colosal de luz, calor y ruido (los relámpagos y los truenos).²⁰

Una tormenta es la naturaleza despojándose del jersey. Lo que sucede es que nuestra prenda genera un máximo de cientos de voltios, mientras que el de la naturaleza origina hasta cientos de millones de voltios (para que conste, el voltaje de la electricidad doméstica es de 220 voltios). A escala humana se trata de pequeñas chispas, de unos pocos centímetros, que provocan crepitaciones de 10 decibelios, pero a escala natural son rayos, de kilómetros de longitud, que causan verdaderas detonaciones de 130 decibelios.

LA FUENTE DE PARTÍCULAS EN LOS ACELERADORES

Acabamos de ver que producir por calentamiento partículas cargadas es fácil. El problema es que en los aceleradores hay que fabricar, eficaz y establemente, muchísimas: típicamente millones o miles de millones, en un volumen de apenas unos pocos centímetros. Además, hay que lograr que todas estas partículas se muevan de inmediato y colectivamente en una dirección dada, es decir, sus velocidades y el sentido de su marcha tienen que ser tan parecidos como sea posible. Cualquier defecto inicial en estas características será luego muy difícil de corregir. Además, como los electrones son mucho más veloces que los iones, las técnicas para generar uno y otro tipo de partículas son diferentes.

A los electrones se los extrae de un metal, que es una reserva inagotable de estas partículas. Es la técnica del cañón electrónico: el metal se

¹⁹ Estas nubes suelen denominarse cumulonimbos. (N. del T.)

²⁰ Según la NASA en toda la Tierra se producen 44 ± 5 rayos por segundo. Se calcula que cada uno de ellos mide, en promedio, unos 5 km de longitud por 0,01 m de anchura., llegando a descargar 0,1 GJ de energía (igual a lo que consume una bombilla de 100 W permanentemente encendida durante un mes). La corriente de un rayo típicamente es de unos 30 kA, su potencia puede alcanzar 1 TW y la temperatura del aire circundante llega a 20.000 °C (más del triple de la que reina en la superficie del Sol). (N. del T.)

presenta unas veces en forma de filamento, a través del cual pasa una intensa corriente eléctrica para calentarlo, y otras, de una pequeña placa, que se ilumina con un potente rayo láser. Así, sea por agitación térmica o por colisión con fotones, los electrones se desprenden del metal y son acelerados por un electrodo (una placa metálica) cargado positivamente, con una abertura central para dejarlos pasar. Es obvio que los tamaños y la morfología del metal, el frente de onda del láser y el electrodo y su apertura son cruciales para obtener un primer haz de electrones lo más intenso y homogéneo que sea posible.

Para los iones se procede con una especie de horno de microondas. El horno es una cavidad cilíndrica por cuyo eje se extraen los iones. El proceso es así: en el horno se inyectan un gas y una onda electromagnética. Por efecto del campo eléctrico oscilante de ésta, los átomos del gas se calientan de modo que acaban disociándose en electrones y núcleos (iones). Para obtener muchos iones se requieren microondas de gran potencia y una buena cantidad de gas. Pero esto aún no es suficiente. Pensemos que si se fuerza demasiado la potencia del microondas para calentar apresuradamente la comida, ésta se hinchará vigorosamente hasta explotar y ¡quedar pegada en las paredes del horno! Es la agitación térmica de la que hemos hablado antes... que dilata el volumen de los cuerpos que se calientan. Algo parecido a lo que sucedía cuando se caldeaba la capa de aire contigua al suelo antes de una tormenta eléctrica. ¿Qué hacer para que nuestros iones se queden cerca del eje de la fuente y no se peguen a las paredes? Veo que lo hemos adivinado. Hay que aplicar un campo magnético axial con la ayuda de un cable eléctrico enrollado alrededor de la fuente. ¡Igual que ocurría con el campo magnético de la Tierra, las estrellas o las galaxias...! Luego se extraen los iones (positivos) de la fuente gracias a una serie de electrodos cargados negativamente, cada uno provisto de un orificio central para permitir el paso del haz de iones. Como en el caso anterior de los electrones, todo el dispositivo, las ondas electromagnéticas, el campo magnético, la presión del gas, las formas de los electrodos y los voltajes deben diseñarse y regularse con tino para obtener el haz más intenso, direccional y homogéneo posible.

8

La física de aceleradores

Hemos visto los principios físicos que permiten producir, focalizar, guiar y acelerar a las partículas. Sigamos ahora el itinerario de este haz en su viaje por el acelerador. Veremos así en qué se parece y en qué se diferencia la física implicada en ese haz de otras físicas y cómo encaja en el panorama de esta ciencia en general. Con ello descubriremos que la «vida» de este haz tiene varias concomitancias con nuestra propia vida.

EL ACELERADOR

Para comprender a fondo las diversas fuerzas que actúan sobre un haz de partículas mientras recorre el acelerador lo mejor es analizar los principales equipos técnicos que aparecen durante ese camino. Por lo dicho hasta ahora, estos dispositivos serán magnéticos o eléctricos. Examinemos con algún detalle, pero sin entrar en pormenores técnicos, sus configuraciones.

Comenzaremos con los instrumentos magnéticos. Observamos que aquí el protagonismo es de los electroimanes, cuyo elemento básico, el solenoide, es una bobina en la que se devana un cable eléctrico. Según el sentido de la corriente que fluye por ese cable, el polo sur (o el norte) estará en uno u otro de sus extremos. También sabemos que el campo magnético generado se dirigirá de sur a norte en el interior del solenoide y a la inversa en su exterior.

Para desviar el haz se utiliza un dipolo magnético. Se trata de una configuración en la que dos solenoides se disponen perpendicularmente a la dirección del haz, de modo que éste pase por el espacio existente entre aquéllos. El objetivo es lograr un campo tan homogéneo como sea posible en toda la extensión del haz de modo que sus partículas en conjunto sientan el mismo campo y giren idéntico ángulo.

Colocando un solenoide paralelamente al haz se lo podría focalizar, haciendo que éste atravesase por su eje a aquél, a cuyo alrededor giraría helicoidalmente. Sin embargo, este método no es el mejor.

Se consigue una focalización más eficiente mediante un cuadrupolo magnético. Esta es una configuración en la que, en torno al haz y normalmente a su trayectoria, se disponen cuatro solenoides, con los polos norte y sur alternados. Con ello se lo focaliza en un plano (por ejemplo, el horizontal) y se lo desfocaliza en el plano perpendicular (por ejemplo, el vertical). Colocando estratégicamente una tanda de cuadrupolos a lo largo del acelerador se logra una calculada sucesión de focalizaciones-desfocalizaciones, de modo que el haz se focalizará (o desfocalizará) con mucha precisión. Esto es similar al conjunto de lentes ópticas existente en los telescopios y las cámaras fotográficas, donde la luz sufre una serie de focalizaciones y desfocalizaciones.

Basándonos en el mismo principio, también se usan multipolos magnéticos, con 6, 8, 10 ó 12 polos, para focalizar los márgenes externos del haz más que las zonas cercanas a su eje. El objetivo es lograr un haz más uniforme, pues, de lo contrario, éste es naturalmente más denso en su zona media que en los bordes.

Adviértase que todas estas configuraciones multipolares están diseñadas para que el campo magnético en el eje del haz sea nulo. De este modo sólo las partículas extraaxiales sentirán un campo que las acercará o alejará del centro. En otras palabras, teóricamente el haz en su conjunto no se desvía. Pero, en la práctica, pequeños errores de fabricación o alineación, de unos pocos micrómetros (10^{-6} m), bastan para que surja un campo dipolar axial, desviando todo el haz. Por ello, para reubicar el haz en el eje teórico del acelerador, hay que instalar pequeños dipolos magnéticos correctores a lo largo de su camino.

Ahora pasemos a los dispositivos eléctricos. Aquí llevan la voz cantante las cavidades que atrapan ondas electromagnéticas, cuyo componente eléctrico es el encargado de acelerar el haz. Y esto sólo se logra si este campo está perfecta y paralelamente alineado con el haz. Cualquier error también provocará desviaciones que necesitaremos compensar con correctores magnéticos de mayor dipolo. Además, como este campo es oscilante (recuérdese que es parte de una onda), constantemente varía de sentido, en un vaivén de atrás hacia adelante, coincidente con la frecuencia de la onda, es decir, de varios millones o miles de millones de veces por segundo. En consecuencia, a lo largo de todo el recorrido por la cavidad hay que sincronizar la oscilación y el haz, de forma que éste siempre vea el campo dirigido hacia adelante y con una amplitud exactamente igual a la prevista teóricamente.

De hecho, esta sincronización debe ser incluso más sutil al comenzar el proceso de aceleración, cuando las partículas aún no han alcanzado velocidades cercanas a la de la luz (especialmente para los iones, que, más pesados que los electrones, alcanzan más tardíamente grandes celeridades). Además, en estos instantes, sus velocidades no son homogéneas. Así, las partículas más rápidas se adelantarán cada vez más, mientras que las más lentas se retrasarán, elongando paulatinamente el haz. Por tanto, es necesario que coincida la fase ascendente del campo acelerador con la llegada del haz para que las partículas más veloces, que llegan antes, sientan un campo más débil, y las que lleguen después lo sientan más fuerte. Las partículas en cabeza, pues, tratarán de retrasarse y las de cola intentarán adelantarse, acortando de este modo la longitud del haz. En otras palabras, también es necesario focalizar longitudinalmente el haz.

Para los iones ubicados al comienzo del acelerador existe aún otro problema acuciante. A estas bajas energías predominan las fuerzas de

repulsión entre las partículas, todas ellas de igual carga, lo que exige una focalización casi permanente. Los dispositivos de los que hemos hablado antes (cavidades y electroimanes), que aceleran y focalizan sucesivamente, resultan inadecuados, pues su longitud es del orden de las decenas de centímetros y el haz ya se habría desmembrado en la aceleración en ese trecho. La única salida es una configuración en la que se focalice y acelere sucesivamente casi centímetro a centímetro. De esto se encarga el RFQ (siglas en inglés de cuadrupolo de radiofrecuencia), una cavidad que tiene dispuestas a lo largo de su eje cuatro barras conductoras mecanizadas con mucha precisión (la tolerancia es de 0,1 mm en las tres dimensiones), cuya misión es atrapar ondas electromagnéticas, de modo que su componente eléctrico pase sucesivamente de ser paralelo a perpendicular respecto del eje del haz, en longitudes del orden del centímetro.

Todos y cada uno de los dispositivos arriba descritos ejercen fuerzas muy variadas sobre el haz, que, sumadas a las suyas internas (de repulsión), dificultan sensiblemente el estudio del movimiento de las partículas. De ahí la necesidad de todo un campo de la física específica de los aceleradores, con sus peculiaridades y dificultades.

FÍSICA DEL HAZ DE PARTÍCULAS

Dependiendo del uso previsto, a la salida del acelerador se exigirá que el haz tenga una energía y una intensidad (número de partículas) determinadas, así como una envergadura y una divergencia (en las tres direcciones espaciales) muy regladas. Asimismo, su perfil de densidad se requerirá en unas ocasiones más nítido en el centro, y en otras más aplanado transversalmente. Todos estos parámetros deben controlarse en los propios dispositivos de aceleración y guiado también desde el inicio para garantizar el éxito del proceso. Igualmente, la pérdida de partículas debe vigilarse con firmeza a lo largo del acelerador, por el daño y la peligrosa activación radiactiva que pueden causar en los materiales circundantes. En las secciones que emplean dispositivos superconductores, que requieren temperaturas ultrabajas, la pérdida de partículas debe controlarse aún más radicalmente. En el caso de los aceleradores de mayor energía, en esas secciones la potencia del haz puede llegar a varios MW, y un solo vatio perdido puede poner en aprietos los sistemas ultrafríos de refrigeración. En general, no conviene perder más de una partícula de cada millón.

Como ya resulta obvio, las fuerzas internas varían mucho de un punto a otro, a pesar de lo cual el haz de partículas debe controlarse de manera exacta y precisa a lo largo de su recorrido. Ello requiere usar distintos dispositivos para aplicar fuerzas externas de muy diversa índole en cada punto del acelerador. El conjunto confiere al haz unas características so-

metidas a una física compleja. Esta complejidad radica principalmente en que no basta el espacio 3D (tridimensional) donde vivimos —representado por las tres direcciones: horizontal, vertical y longitudinal— para estudiar el movimiento de las partículas del haz. Para ello se requiere un espacio físico 6D (hexadimensional), generado por las tres coordenadas espaciales más otras tres angulares que determinan la dirección del desplazamiento.

En efecto, al resolver la ecuación de movimiento de una partícula sometida a una fuerza cuando ésta varía en función de la posición de aquélla, se advierte que la solución solo es posible en un espacio físico

Para estudiar el movimiento de las partículas del haz se requiere un espacio físico 6D (hexadimensional)

6D. El motivo es que, a lo largo de la trayectoria del haz, la distribución de las fuerzas que actúan sobre las partículas cambia por completo cada decena de centímetros. Esta situación no suele darse en los problemas de dinámica, como el caso de una partícula en un campo electromagnético o gravitatorio, donde apenas se modifica la configuración de fuerzas en todo el espacio considerado. Así, en la física de los plasmas y la astrofísica, nos basta el espacio 3D y el

tiempo para describir el movimiento de los cuerpos. Sin embargo, en la física de aceleradores, para comprender y representar las propiedades del haz son absolutamente necesarios el espacio físico 6D y el tiempo.

Examinemos el recorrido de las partículas con relación al centro del paquete que forman. Los dispositivos de focalización transversal y longitudinal provocan que en ese punto se agrupen las partículas periféricas, induciendo en ellas oscilaciones en torno a ese **centro**. Veamos ahora el traslación de éste respecto al eje de su camino teórico. Como ya se ha dicho, los inevitables defectos de los focalizadores hacen que el centro del paquete se desalinee mucho del eje teórico, pero cuando los correctores dipolares subsanan esto desencadenan la vibración del paquete alrededor de ese eje. En resumen, en un acelerador las partículas fluctúan permanentemente en torno al centro del paquete en 6D, que a su vez bascula alrededor del eje central en 6D, movimientos ambos que responden a causas diferentes. Si a ello se añade que en un paquete hay miles de millones de partículas, de suerte que las periféricas están a pocos centímetros de los dispositivos técnicos que las rodean, que además pueden ser superconductores, ya se advierte cuál es el grado de dificultad de los problemas que la física de aceleradores debe resolver, no obstante, con gran precisión.



En consecuencia, además de ser un objeto técnico intrincado —como pueden serlo una central nuclear, un cohete o una aeronave—, un acelerador también es un ente físico para cuyo gobierno no bastan unos instrumentos de medida y unos actuadores, por más completos y complejos que sean. El acelerador más pequeño sólo puede controlarse ejecutando en paralelo, mediante una computadora, un modelo teórico que describa la física del haz en el espacio 6D. En efecto. Para lograr que tanto su ubicación como los valores de los parámetros de todo ese conjunto sean los adecuados, sobre el haz se realizan distintas y oportunas mediciones. Esos datos alimentan el modelo teórico en ejecución, que, gracias a sus optimizaciones, dictará finalmente qué acciones conviene efectuar para culminar el plan fijado.

LAS SEIS FÍSICAS

Así descrito, el estudio del haz de partículas en un acelerador es un asunto de física pero también de ingeniería.

En cuanto a la propia episteme de la ciencia, suele hablarse de «física» cuando hay una necesidad de conceptualización, de teorización para expresar e interpretar los resultados experimentales. Podemos comprender el movimiento de los cuerpos celestes gracias a la fuerza gravitatoria ejercida entre ellos, aunque no estén en contacto mutuo.

Sólo cabe observar o medir los efectos de dicha fuerza, pero nunca palparemos su esencia misma. Esa dinámica también es representable, de hecho más exactamente, mediante una curvatura espaciotemporal, cuya naturaleza tampoco se aprecia mucho mejor. Lo mismo cabe afirmar de la física cuántica en lo concerniente al efecto fotoeléctrico, o del modelo atómico con respecto a las propiedades químicas de los elementos. La física elabora conceptos, modelos que no tienen (necesariamente) una existencia material o efectiva, pero que explican, que predicen los fenómenos del mundo real con gran precisión.

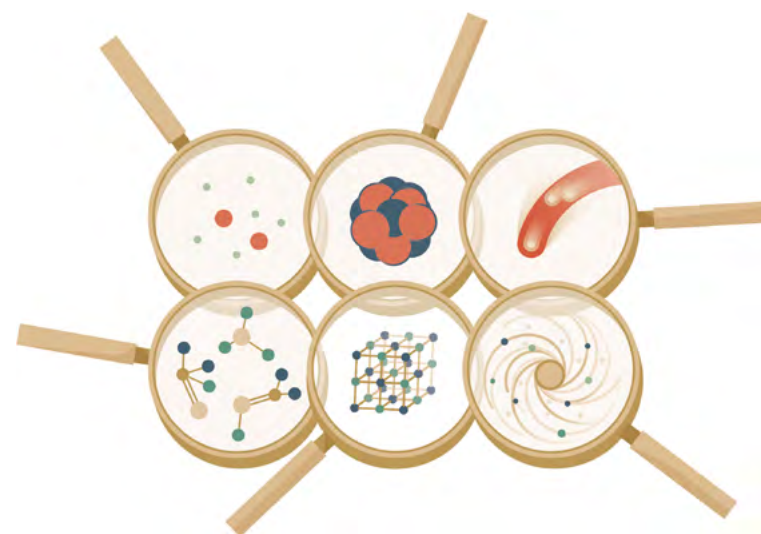
La física produce conceptos, modelos que no tienen (necesariamente) una existencia material o efectiva, pero que explican, que predicen los fenómenos del mundo real con gran precisión

En los aceleradores tal sucede con el haz de partículas. Éste, según el modelo matemático utilizado, «vive», evoluciona, en un espacio 6D, muy ajeno al espacio 3D donde efectivamente vivimos. Imposible para la mente humana imaginarse a sí misma en un espacio 6D. Para poder trabajar con él los teóricos de los aceleradores lo deben proyectar constantemente en diferentes subespacios 2D o 3D. Pero estos subespacios no son necesariamente más reales, pues en su mayoría deben incluir al menos una posición y un ángulo. Siempre son espacios fásicos, término utilizado para diferenciarlos

del espacio real que contiene sólo posiciones. Esto es tan árido que frecuentemente los profesionales entrenados para trabajar en estos espacios fásicos a veces se confunden durante sus discusiones de trabajo.

En los aceleradores la física de haces opera igual que otras disciplinas. O sea: no observamos el espacio fásico, ni podemos medirlo directamente, pues cuanto sabemos medir y cuanto cabe observar es la posición de las partículas. Pero comprender en detalle este espacio fásico, y calcular con su auxilio, es el precio que debe pagarse para pronosticar con la máxima precisión las posiciones de las partículas en cualquier lugar del espacio real.

Si la ciencia de los haces de partículas es física, entonces, ¿en cuál de los bien conocidos campos de ésta debemos catalogar a aquélla? Podríamos clasificarla considerando el tamaño de los objetos estudiados, lo que también se corresponde con el radio de acción de las fuerzas físicas fundamentales. En la escala más pequeña está la física de partículas, o física cuántica, que es el dominio de las llamadas fuerzas fuertes y débiles. A mayor escala, llega la física nuclear, todavía regida por las mismas fuer-



zas, a las que se suma la electromagnética, que empieza a dejarse ver. En este ámbito estudiamos el núcleo atómico, constituido por las partículas anteriores, pero observadas como un todo: su tamaño, sus deformaciones, sus cambios. A una escala inmediatamente superior comparece la física del haz de partículas en los aceleradores, protagonizada por los núcleos mencionados arriba, pero investigados aquí en su conjunto, ya con la fuerza electromagnética imperando dentro y fuera del haz. En la misma escala dimensional, pero abarcando una colección más amplia de objetos, entra en escena la física atómica y molecular, en la que la fuerza electromagnética sigue gobernándolo todo. Al subir en la escala otro peldaño tenemos la física del estado sólido y la física de gases y plasmas. Aquí núcleos, átomos y moléculas concurren en mayor número. Además de la fuerza electromagnética, hay que considerar las colisiones entre estos objetos y el fenómeno de la presión. Finalmente, en la escala suprema, está la astrofísica, con todos los cuerpos celestes regidos por el conjunto de las fuerzas precedentes, más la fuerza gravitatoria, que irrumpe en el escenario para desempeñar un papel estelar.

Hemos recorrido, pues, las seis áreas principales de la física.

FÍSICA DE ACELERADORES, FÍSICA CUÁNTICA Y ASTROFÍSICA

Resulta frustrante la escasa interacción entre la física en general y la de los aceleradores en particular. Contingencia debida tal vez al pequeño número de profesionales que trabajan en este campo. Sin duda sería deseable un mayor contacto entre unos y otros, pues son múltiples los aspectos que comparten. Mencionaremos sólo dos: el espacio fásico y la fuerza electromagnética.

El espacio fásico es un concepto utilizado en muchos ámbitos de la dinámica, como la mecánica analítica, la hamiltoniana, la del caos y la cuántica. Al examinar estas diferentes materias, vemos dos grandes capítulos: uno clásico y otro cuántico. En la física clásica el espacio real y el tiempo bastan para describir la evolución de un sistema. La incorporación del espacio fásico, algo no estrictamente necesario, se hace en ciertos casos, como en el estudio del movimiento ondulatorio y en los sistemas de muchos cuerpos y el caos, porque ello simplifica los cálculos. En este contexto, el espacio fásico es un artificio de cómputo más que una necesidad efectiva. Por el contrario, en la física cuántica, para describir las observaciones en el espacio real, se requiere analizar la evolución de los sistemas en el espacio fásico. Por ejemplo, el tránsito sucesivo de un electrón desde el estado ondulatorio al corpuscular, cuando atraviesa dos dispositivos macroscópicos diferentes, es una situación anticipada muy fielmente mediante el cálculo de la evolución de su función de onda en el espacio fásico. A pesar de ello, todos los físicos cuánticos han seguido diciendo durante cien años que no entienden nada. Uno de los más grandes teóricos de la física cuántica, Richard Feynman, dijo en cierta ocasión: «Creo que puedo decir con seguridad que nadie entiende la mecánica cuántica».²¹ Sin embargo, en física, cuando la teoría de cierto fenómeno se ve respaldada por el experimento, tenemos derecho a saltar de alegría y proclamar que hemos comprendido el fenómeno. Esta desconfianza (bastante inusual) en la teoría cuántica probablemente se explica al compararla con la física clásica, en la que la evolución de un sistema también puede describirse en el espacio real y no sólo en el espacio fásico, que sólo asoma para facilitar los cálculos.

En este sentido, la física de aceleradores, por su posición intermedia entre lo clásico y lo cuántico, aporta una nueva perspectiva conceptual de los hechos. En los aceleradores el itinerario del haz sólo se puede comprender y describir en el espacio fásico, que se proyecta en el espacio real cuando hay que examinar la interacción del haz con los dis-

positivos de medición y aceleración. Los físicos de haces de partículas habitualmente trabajan en el espacio fásico, es decir, reflexionan y calculan analítica y numéricamente ahí, pero confrontados de continuo con el espacio real, dado el conjunto de cuestiones prácticas impuestas por una máquina muy real. De esta ineludible confrontación entre ambos espacios, de este persistente ir y venir entre ellos, el espacio fásico ha terminado adquiriendo el mismo estatuto de realidad que el espacio real. Entonces, comprender el haz de partículas en el espacio fásico resulta satisfactorio para la mente. En suma, el debate constructivo y más profundo con la física cuántica sobre estas consideraciones sería muy interesante.

De lo infinitesimalmente pequeño de la física cuántica, pasemos a lo infinitamente grande de la astrofísica. Lo que comparten este último ámbito con el de los aceleradores es la acción de las fuerzas electromagnéticas sobre las partículas cargadas. En la breve digresión astronómica que realizamos antes vimos que a esta enorme escala el campo magnético atrapaba partículas cargadas exactamente igual que en los aceleradores, sólo que aquí sucede a una menor escala. Por el contrario, en el ámbito astrofísico no se observa la acción aceleradora del campo eléctrico, pues a semejante escala no puede desarrollarse tamaño campo eléctrico estático —de hecho, el mayor campo eléctrico que se conoce es el precursor de las tormentas—. Por tanto, como en el caso de las cavidades del acelerador, el campo eléctrico hay que buscarlo en las ondas electromagnéticas.

Así sucede en lo que se consideraba el «misterio del calentamiento de la corona solar». Un enigma que ha mantenido a generaciones de físicos trabajando durante más de 70 años. La corona solar es como se denomina a la atmósfera superior de nuestra estrella, que se eleva millones de kilómetros sobre su superficie y que observamos perfectamente desde la Tierra durante un eclipse total. Medidas espectrales de la luz emitida muestran que su temperatura alcanza millones de grados, mientras que en la superficie solar es inferior a 6.000 grados. Esto sorprendía mucho porque la fuente de calor son las reacciones termonucleares que ocurren en el corazón del Sol, lo que provoca en esta zona temperaturas muy altas, de hasta 16 millones de grados, que disminuyen paulatinamente conforme nos alejamos de ahí y vamos hacia la superficie. ¿Qué hace que la temperatura suba tan espectacularmente al distanciarnos de la superficie? ¿Cuál es el mecanismo de (re)calentamiento? Parece como si, para asar más eficientemente las viandas en una barbacoa, hubiera que colocarlas, escalera en ristre, a diez metros sobre las brasas. Debe entenderse aquí que la corona es un plasma, es decir un gas de partículas libres cargadas, cuya temperatura se debe a su agitación térmica. Cuanta

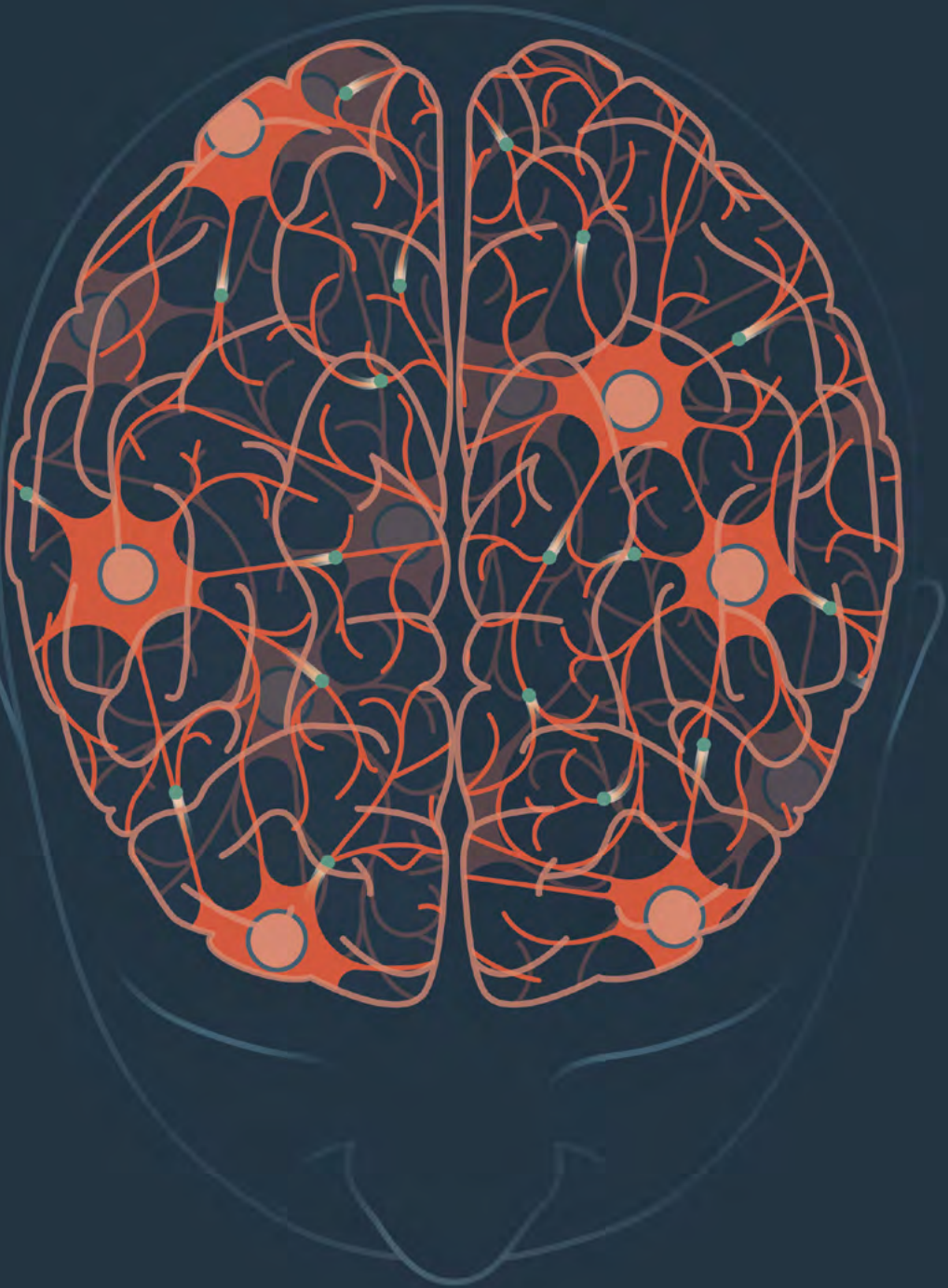
²¹ En Richard P. Feynman: «*Character of Physical Law*». *Messenger Lectures*. Universidad de Cornell, 1964 (N. del T.)

mayor es la velocidad de éstas, tanto más caliente estará aquél. Buscar el mecanismo de calentamiento es como preguntar por la razón que acelera estas partículas. Un físico de aceleradores nos dirá que se necesita un campo eléctrico (componente de una onda electromagnética) para acelerar partículas, y otro magnético, para guiarlas hacia el eléctrico.

Como ya hemos visto, las capas exteriores del Sol son el asiento de incesantes y gigantescos vórtices, es decir, de espiras de corriente que generan campos magnéticos ultrapotentes, capaces de elevarse a gran altura en la corona solar. Así pues, no hay escasez de campos magnéticos. Pero como éstos en modo alguno pueden acelerar partículas, la dificultad era encontrar un campo eléctrico. Muy pronto, el físico solar Hannes Alfvén observó un tipo de ondas electromagnéticas, específicas de este entorno, forjadas por el movimiento de las cargas que se arremolinan alrededor de las líneas del campo magnético. Estas ondas, que se crean en las capas profundas bajo la superficie solar, emergen a la corona y ascienden hacia la atmósfera superior a lo largo de las líneas del campo magnético, que a su vez atraerán a las partículas cargadas allí presentes para ser aceleradas por el componente eléctrico de las ondas electromagnéticas. Sin embargo, fue necesario realizar mediciones precisas, gracias a sondas espaciales, y ejecutar simulaciones numéricas mediante grandes computadoras, para demostrar en los últimos años que las ondas de Alfvén tienen energía suficiente para calentar la corona solar a millones de grados. Un mecanismo muy similar, en principio, al que se aplica en las fuentes de iones de los aceleradores.

9

La física de aceleradores y la naturaleza humana



Sin duda es congruente y explicable que la de aceleradores interactúe con otros campos de la física, pero asombra bastante que también permita descubrir algunos fundamentos de las ciencias humanas. Y, sin embargo, mirando de cerca ciertos aspectos, no se puede dejar de advertir.

COOPERACIÓN Y COMPETENCIA

Una vicisitud que parece fácil, pero no muy debatida en el diseño de aceleradores, es el montaje de los elementos de focalización y corrección. El lugar que se les suele reservar está en las secciones de transferencia, que conducen el haz de una a otra zona de aceleración. Surge la duda de cuántos de estos elementos conviene instalar. La tarea de los focalizadores es fijar en ciertos lugares el tamaño y la divergencia del haz. Por ejemplo, y es el caso más simple, esto debe hacerse horizontal y verticalmente (es decir, cuatro condiciones) a la entrada de cada zona de aceleración. Se intuye, pues, que por lo menos hay que usar cuatro focalizadores. Por otro lado, en determinadas posiciones del recorrido del haz donde se miden algunos de sus parámetros, éstos tienen que subsanarse, para lo cual hay que instalar elementos correctores. Cabe sospechar, entonces, que el número de éstos y el de mediciones que se toman en el haz sean cuando menos equivalentes.

Por tanto, en principio, la regla parece simple. Como mínimo se necesitan tantos elementos de focalización y corrección como parámetros quieran controlarse. Pero la locución «como mínimo» permite pensar que podrían usarse «más», y que «más» es «mejor»: es decir, más ventajoso en caso de que durante la operación posterior se necesitase hacer algo suplementario. Sin embargo, la cuestión de la cantidad de variables libres en comparación con la de requisitos, en otras palabras, el balance entre el número de incógnitas y de ecuaciones, es matemáticamente inequívoco, siquiera en los sistemas lineales. Existe una solución única si el cupo de variables coincide con el de requisitos (siempre que éstos no sean contradictorios entre sí, como pedir que el haz sea grande y pequeño en el mismo punto). Ahora bien, si el número de variables es inferior al de requisitos, éstos no pueden satisfacerse en su totalidad. No obstante, podemos decidir cumplirlos, «en el mejor de los casos», mediante un proceso de «optimización» para llegar a una solución, que es única. Finalmente, cuando hay más variables que requisitos, además de que las posibles soluciones son infinitas, las variables pueden contradecirse un sinnúmero de veces. Por ejemplo, si dos elementos de corrección con valores $+1$ y -1 constituyen una solución posible, entonces $+2$ y -2 , o $+1.000$ y -1.000 , etc., también son soluciones. La conclusión es que, al regular la máquina para satisfacer los requisitos, que siempre se hace mediante optimización numérica, hay que tener mucha suerte para

encontrar un ajuste que permita obtener valores finitos razonables para las soluciones solicitadas. En la gran mayoría de los casos, se producen valores desquiciadamente grandes. En otras palabras, casi siempre nos encontramos en situaciones de competencia en lugar de cooperación entre los elementos que deben regularse.

En concreto, un acelerador con más elementos de focalización y corrección de los necesarios es, simple y llanamente, una máquina no graduable. Sería muy fácil encontrar soluciones en las que literalmente las fuerzas de estos elementos extra explotasen. Cabría pensar entonces que es demasiado difícil satisfacer los requisitos solicitados, cuando bastaría desactivar los elementos sobrantes para encontrar la solución. En consecuencia, debemos considerar la posibilidad de usar tantos elementos como requisitos tengan que satisfacerse o, en su defecto, utilizar menos, lo que es contraintuitivo. Estamos aquí en la coyuntura típica en que «más» es visiblemente peor que «menos». No obstante, este error suelen cometerlo algunos jóvenes físicos de aceleradores, y a veces incluso los... no tan jóvenes caen en esta trampa. Por supuesto hay aceleradores en servicio que presentan este problema... Para resolverlo hay que utilizar un método matemático «inteligente», basado en la descomposición en valores propios y optar por los de mayor magnitud para evitar que los elementos se estorben entre sí.

Es fácil que surja un problema análogo en la sociedad humana... sin que exista realmente un modo perspicaz de resolverlo. Es el caso de las comisiones que surgen para discutir, opinar y actuar acerca de un tema determinado. Por ejemplo, si quisiéramos constituir un comité para deliberar sobre algún asunto ambiental o ético, probablemente se discutirían cuestiones de carácter científico, filosófico, religioso, sociológico, psicológico, médico, jurídico, etc. Para comprender los hechos

en profundidad podría pensarse en la conveniencia de convocar como participante al menos a un profesional de cada uno de estos campos. Pero cabría imaginar que, para cerciorarnos de cubrir adecuadamente las materias, se decidiera invitar a dos expertos de alguna o todas estas materias. Sin embargo, no es seguro que, en tal circunstancia, el comité o el área en cuestión se vean efectivamente fortalecidos, pues existe el peligro de que estos asesores dediquen más tiempo a contradecirse que a resolver el problema. Por tanto,

Si un acelerador con más componentes ajustables de los necesarios es no regulable, una asamblea humana donde hay más personalidades de las necesarias es inmanejable

la elección de los consultores debe hacerse con mucho moderación y juicio, de modo que no haya sobrerrepresentación y tengan la sensatez de centrarse en la misión encomendada y no perder el tiempo en refutarse.

Si un acelerador con más componentes ajustables de los necesarios es no regulable, una asamblea humana donde hay más personalidades de las necesarias es inmanejable.

EL CEREBRO HUMANO

El diseño de las secciones de transferencia de un acelerador puede ser problemático cuando los cometidos adjudicados son muy complejos y diferentes. Supongamos, por ejemplo, que se planificara una de estas zonas no sólo para adaptar el haz al subsiguiente tramo de aceleración, sino también para realizar diversas mediciones sobre el haz con objeto ya sea de corregir algún defecto aparecido aguas arriba, ya sea de dividirlo en bloques más cortos, etc. Entonces, esa sección de transferencia tendría que ser más larga y cobraría más importancia, en cuyo caso habría que colocar focalizadores y correctores adicionales para adecuar el transporte del haz en el propio tramo. Se convertirá, pues, en una sección aceleradora por derecho propio, con sus típicas necesidades.



Es en el ser humano mismo donde encontramos el caso de un gobierno cuyas propias necesidades suplantán pasmosamente a las que se supone que sirve

Una condición semejante se refleja, por supuesto, en diferentes instituciones de la sociedad humana. La corporación de mayor trascendencia a escala nacional es el Poder Ejecutivo. Éste, cuyo mandato es organizar actividades que satisfagan las necesidades ciudadanas de todo tipo (económicas, sociales, defensivas...), de suyo es inevitablemente complejo y multicomponente, al punto de que sus propias exigencias económicas y sociales se vuelven, a su vez, onerosas. Sin embargo, conviene fijar límites

a las necesidades del Poder Ejecutivo para que no predominen sobre las de la nación.

Pero es en el propio individuo humano donde se encuentra el caso de un gobierno cuyas propias servidumbres desbancan pasmosamente a las que se supone que sirve. Por supuesto, nos referimos al cerebro humano. Recuérdese que los imperativos básicos del reino animal del que formamos parte son, en principio, sólo tres: alimentarse, descansar y reproducirse. Básicos, sí, pero bastante complejos de resolver comparados, por ejemplo, con los de las plantas. Ello exige un órgano central, el cerebro, que ayude a cada individuo a satisfacerlos todos. Ciertamente, los animales que están en lo alto de la cadena trófica han desarrollado un cerebro bastante **más elaborado para** cumplir sus necesidades nutritivas, que requieren una planificación y una estrategia complejas. Pero resulta que sólo en los humanos, por razones que escapan al alcance de esta obra, se ha hipertrofiado asombrosamente el cerebro. De modo que, a lo largo de los siglos, las propias necesidades de este órgano han aumentado en cantidad y calidad, superando con creces a las comunes del resto de los animales. Piénsese en todos los juegos y actividades de entretenimiento que animan a la especie humana, sin parangón con las de cualquier otro animal: literatura, poesía, música, arte figurativo, sed de evasión..., y ocupaciones como el teatro, el cine, los espectáculos musicales y deportivos, la industria turística, la del juego, etc., sin otro fin que el de «ventilar la mente». En definitiva, tareas todas ellas para gratificar unas exigencias cerebrales no directamente ligadas a las tres demandas básicas citadas antes.

No sólo necesitamos descansar, sino también viajar, divertirnos y cultivarnos. No sólo necesitamos reproducirnos, sino también amar, ser afectuosos e intimar. No sólo necesitamos comer, sino también desa-

rollar nuestros gustos y afirmar nuestra identidad a través de las tradiciones gastronómicas. Pero también necesitamos, ante todo, alimentar nuestro cerebro con comprensión y conocimiento. Lo que diferencia a los seres humanos de otros animales, es innegable, son estas obligaciones dictadas por el cerebro, que no son funcionales ni orgánicas. Se equivocan quienes piensan que se trata de artificios creados por nuestras modernas sociedades. Sabemos que, desde los tiempos más remotos, cuando la humanidad apenas tenía qué comer, cómo vestirse o dónde refugiarse, y de eso hace varias decenas de milenios, las cuevas más oscuras ya estaban suntuosamente decoradas, los ornamentos más triviales ya se exhibían, la música más sutil ya se interpretaba y los paisajes más lejanos ya se exploraban.

Así pues, mucho antes de que las urgencias meramente vitales fueran satisfechas, nuestro cerebro ya nos impulsó, superponiéndolas, las suyas propias, ensartando exigencias puramente mentales como la capacidad de observar y el hambre de saber. Las páginas que siguen están dedicadas a examinar estos apremios, que impulsan todas las actividades de investigación científica en los aceleradores y en otros campos. Y el CERN, por reivindicar esta organización ya citada en las primeras páginas, resulta un símbolo ilustrativo de la voluntad humana a la hora de emplear medios excepcionales con objeto de cumplir este imperativo original de comprender, profundamente anclado en nuestro cerebro.

10

Aceleradores, naturaleza y sociedad

Análogamente a lo sucedido con las necesidades humanas respecto de las cerebrales, conforme se fueron diversificando y haciéndose más complejos los cometidos del acelerador de partículas, auxiliar en su origen de las actividades de investigación científica, éste acabó adquiriendo protagonismo y transformándose en objeto mismo de investigación. De mera herramienta para el estudio de la física, el acelerador ha impulsado la creación de su propio campo: la física del haz de partículas, que encaja notablemente bien en el panorama general de esta disciplina. Además, aun con sus propias especificidades, en los aceleradores ocurren los mismos fenómenos físicos que en el resto del Universo, sea cual fuere la escala dimensional. Gracias a esto cabe explicar el funcionamiento de estas máquinas sin recurrir a analogías *ad hoc*, sino a través de ejemplos prácticos que obedecen estrictamente a las mismas leyes físicas. Esto también sirve para resaltar la satisfacción que experimentamos cuando, al tratar de comprender determinado aspecto de la ciencia, terminamos entendiendo otros muchos.

Que la ciencia pueda describir la enorme diversidad de la naturaleza con muy pocas leyes significa asimismo que sus constructos son aptos para explicar muchas áreas de la actividad social humana. Esto, inevitablemente, plantea muchos interrogantes sobre la relación de la ciencia con la naturaleza y, también, con la sociedad.

EL PRINCIPIO DE PARSIMONIA

La capacidad de entender la heterogénea naturaleza con muy pocas leyes es una de las características más sobresalientes de la práctica científica, que consiste precisamente en tratar de describir el máximo número de fenómenos con el mínimo de prescripciones. Cabría hablar, incluso, de un fiero deseo de caminar en esta dirección. He aquí el principio de parsimonia,²² tácitamente aceptado por toda la colectividad científica. Cualquier nuevo fenómeno observado debe tratar de explicarse preferentemente mediante las leyes ya conocidas. Únicamente cuando esto sea inviable se considerará la modificación de alguna de las existentes o, en última instancia, la incorporación de una nueva ley. Sin duda, la aplicación de este sencillo principio está en la raíz de los espléndidos éxitos de la ciencia a la hora de elucidar los fenómenos observados en la naturaleza. Pensemos que todos ellos, desde los infinitamente grandes hasta los infinitesimalmente pequeños, se describen con sólo cuatro

²² El principio de parsimonia también se conoce como navaja de Ockham, debido a que quien lo popularizó fue Guillermo de Ockham (circa 1284-1349), pero sus orígenes se remontan a las obras de filósofos anteriores, como Pedro Auréolo (circa 1280-1322), Guillermo Durán de San Porciano (circa 1270-1332), Juan Duns Escoto (1265-1308), Tomás de Aquino (circa 1225-1274), e incluso Aristóteles (384-322 a.e.c.) (N. del T.).

interacciones fundamentales: la fuerza fuerte, la débil, la electromagnética y la gravitatoria. Irrumpe entonces una cuestión eminentemente epistemológica: ¿realmente la naturaleza se rige por tan pocas leyes, o es el ser humano quien quiere describirla con esa concisión? Visto de otra manera, cabría preguntarse: ¿cómo es posible que este principio de parsimonia, que es una invención puramente humana, se adecue tan bien a la naturaleza? ¿Cómo pudo concebir el ser humano este principio de parsimonia? Por su parte, ¿es la naturaleza verdaderamente parsimoniosa? ¿Hay alguna razón para que lo sea?

Sin duda, basta considerar el aspecto «orgánico» de las cosas para hallar una respuesta simple a estas preguntas «filosóficas». El órgano aquí, otra vez, es nuestro cerebro. Tras millones de años de evolución, el funcionamiento del cerebro humano tiene que reflejar de algún modo el de la naturaleza. Así pues, que este órgano esté en sintonía con la naturaleza parece bastante... natural. Pero

examinemos el asunto con más detalle. Al tener un tamaño tan exiguo comparado con la vastedad del Universo, el apremio que impone el cerebro a los humanos para comprender el entorno sólo se puede resolver economizando, restringiendo la cantidad de información que debe atenderse. Para ello hay que clasificar, categorizar y conceptualizar. Tres procesos bastante similares que están en el origen de la formalización de las leyes científicas. Y, sin duda, tres acciones específicamente humanas que está siendo muy difícil de articular en los sistemas de inteligencia artificial. Minimizar la información permite no sólo comprender más cosas con menos costo, sino

también atenuar éste a la hora de transferir dicha información, ya geográficamente, entre diferentes poblaciones, ya temporalmente, entre generaciones sucesivas (lo que contribuye a mejorar incesantemente el conocimiento humano y, por tanto, nuestra superioridad y hegemonía frente a otras especies animales). En cuanto a la naturaleza, sabemos que difundir información tiene un precio energético. Para propagar un fenómeno a todos los puntos del Universo y a cualquier escala dimensional, la información concernida también debe comunicarse a todos esos puntos y escalas. Entonces, tan colosal coste de energía debe minimizarse haciendo lo propio con la cantidad de información que se necesita distri-

buir. En consecuencia, cabe conjeturar que, a gran escala, el número de leyes tiene que ser finito. Luego, al cerebro y a la naturaleza les impulsa idéntico afán por abreviar la información que se almacena y transmite. Así pues, los seres humanos en general y el cerebro en particular, funcionan en armonía con la naturaleza de la que proceden. Lo que no es muy sorprendente.

LO ARTIFICIAL Y LO NATURAL

Sin embargo, un hecho, ahora de carácter sociológico, desmiente este hallazgo. Las sociedades modernas distinguen lo artificial de lo natural, atribuyendo un juicio cualitativo favorable a lo segundo en detrimento de lo primero. ¿Es justo tal dictamen? A primera vista, al menos, esta discriminación parece fácil y convincente. Todo lo que el ser humano elabora o modifica se juzga artificial, antinatural. Consideremos un acelerador de partículas. Pocas manufacturas tienen un tamaño tan imponente y un funcionamiento así de complejo. Hemos visto que es más imponente y más complejo que una central nuclear, un cohete o un avión. Incontestablemente, por tanto, es el objeto más artificial que existe. Pero si tomamos cualquier detalle al azar, sea cual fuere el punto de vista, es irrefutable que el acelerador funciona sometido a las leyes naturales, que son estrictamente las mismas dondequiera que miremos a nuestro alrededor o hacia el resto del Universo. Insistamos en este punto: la ciencia de suyo nunca ha inventado decreto alguno. Todas las leyes de la física, sin excepción, lo son de la naturaleza. Así mismo, todos los componentes del acelerador, sin excepción, realizados con materiales naturales, están moldeados y modificados según leyes naturales. El ser humano mismo, hasta que se demuestre lo contrario, es un puro producto de la naturaleza. En consecuencia, es difícil concebir que un producto de la naturaleza, que modifica su entorno con arreglo a las leyes de la naturaleza, pueda ser más antinatural o más artificial que el rayo capaz de electrificar el aire en una tormenta, o que los vientos generados en un huracán con ayuda de la energía solar, o que el cuásar que ilumina el Universo con gigantescas energías merced a la rápida rotación sobre sí mismo. ¿Podemos calificar de antinatural una planta que, como todas las del mundo, utiliza la luz del sol para transformar elementos minerales en compuestos orgánicos, ateniéndose a las leyes de la fotosíntesis? Visto así, separar lo natural y lo artificial es bastante... artificial.

La ciencia de suyo
nunca ha inventado
decreto alguno. Todas
las leyes de la física son,
sin excepción, leyes de
la naturaleza

Pensemos en que
todos los fenómenos
observados en la
naturaleza, desde
los infinitamente
grandes hasta los
infinitesimalmente
pequeños, se
describen con sólo
cuatro fuerzas
fundamentales

Sólo revelaría el capricho antropocéntrico del ser humano que exagera artificialmente las consecuencias de sus actos.

La desconfianza hacia lo artificial en general, y hacia la ciencia en particular, sin duda se ve acrecentada al observar que los objetos y los procedimientos derivados de la ciencia y la tecnología, aunque brindan soluciones eficaces a los problemas planteados, adjuntan secuelas nocivas. Son los famosos efectos secundarios que, en el peor de los casos, agreden y en el mejor, desagradan. Muchos seres humanos se han visto directamente afectados por desastres industriales. La naturaleza misma ha sido víctima de numerosas catástrofes ecológicas. Pero incluso para quienes no han sido rozados por estas felonías, la ciencia puede ser decepcionante —es la reacción infantil frente a la promesa de un sueño fabuloso que, al cabo, no resultó tan maravilloso—. Llenos de indignación al sentirse traicionados, o, cuando menos, frustrados tras descubrir que este mundo no es ideal, dirán de la ciencia: «¡No! ¡No me gusta! ¡Siempre habrá efectos secundarios!». Pero entonces, ¿es la ciencia adalid de los efectos secundarios? ¿Lo artificial suscita más efectos secundarios que lo natural? Si miramos a nuestro alrededor, el veredicto está lejos de ser inapelable. La patata es nutritiva por sus tubérculos, pero tóxica por sus hojas. Podemos comer el tallo del ruibarbo, pero sus hojas son altamente venenosas. La grasa y el azúcar, que proporcionan energía para nuestras actividades, también obstruyen los vasos sanguíneos. En conjunto, la naturaleza silvestre es una valiosísima fuente de mecanismos y sustancias a la que acudimos con frecuencia para elaborar nuestras medicinas o nuestros objetos de alta tecnología. Pero, con idéntica regularidad, el contacto con esta misma jungla ha sido germen de temibles infecciones virales como la rabia, el sida, el zika, el ébola, el chikunguña y la covid-19.

La lista de productos naturales, de origen vegetal o animal, que son simultáneamente beneficiosos y perjudiciales es, por descontado, interminable.

La vida misma tiene sus efectos secundarios, que son la enfermedad y la muerte. La historia del budismo cuenta que su fundador, el príncipe Siddhārtha Gautama, profundamente conmovido al contemplar la enfermedad y la muerte, intrínsecos sufrimientos de la vida, acudió a meditar

bajo el árbol bodhi²³ para encontrar un camino que los evitara.²⁴ Sólo alcanzando el estado de Buda, el ser despierto, descubrió que, al acceder al Nirvana, una especie de Nada, eludía el círculo vicioso de la Rueda de las Reencarnaciones, es decir, los inevitables renacimientos de la vida, soslayando así el padecimiento de los efectos secundarios que le son inherentes.

Por tanto, la aversión a los efectos secundarios no es nueva. Incluso podemos decir que es una constante de la humanidad. Es la semilla del budismo y, probablemente, también de otros credos, aunque quizás no tan explícitamente. Para muchas religiones, en efecto, la búsqueda de una especie de paraíso es su *leitmotiv*.

¿Qué es el reino de los cielos sino un lugar libre de efectos secundarios? Sea como fuere, Buda y sus miles de millones de discípulos encontraron los efectos secundarios tan insoportables que decidieron desde hace 2.600 años dedicar sus vidas a deshacerse de ellos.

La vida misma tiene sus efectos secundarios, que son la enfermedad y la muerte

¿Qué es el reino de los cielos sino un lugar libre de efectos secundarios?

EL SÍNDROME DE LOS EFECTOS SECUNDARIOS

Vivimos en un mundo cuyos efectos secundarios no son evitables. Nunca lo han sido. Y esto se debe sencillamente a la índole multicomponente del Universo, lo que significa que cualquier fenómeno acarrea de modo invariable numerosas consecuencias. Imaginemos un universo que tuviese un único ingrediente, por ejemplo, uno parecido al agua, pero un agua particular, perfectamente homogénea y que no pudiera descomponerse en otros elementos. En tal entorno, no ocurrirá fenómeno alguno y, por tanto, tampoco acaecerá ninguna secuela deplorable. Ahora admitamos que hay un segundo ingrediente, similar a la arena, pero cuyos granos son absolutamente idénticos entre sí. En semejante universo sólo puede acontecer un tipo de fenómeno: la interacción entre

²³ Un tipo de ficus (*Ficus religiosa*).

²⁴ Cuenta la leyenda fundacional del budismo que el príncipe Siddhārtha Gautama, que hasta entonces sólo había vivido en el deleite del palacio real, cierto día decidió descubrir el mundo para lo cual cruzó las cuatro puertas que separaban el recinto aulico del exterior. Al traspasar la primera puerta fue asaltado por llantos y gritos, y envió a su sirviente para indagar sobre su origen. Eran los lamentos de una mujer y su bebé durante el parto. En la segunda puerta escuchó los quejidos y los jadeos de alguien enfermo que se retorció de dolor. En la tercera puerta oyó los sollozos y las quejas de un anciano en el ocaso de su vida. Y, finalmente, en la cuarta puerta notó la pena y el desconsuelo de toda una familia, deplorando la muerte de un ser querido. El príncipe concluyó entonces que la vida, desde el nacimiento hasta la muerte, no es más que un océano de lágrimas y decidió buscar un remedio.

Es a partir de tres ingredientes cuando aparecen los efectos secundarios, también llamados daños colaterales

puede lesionar al animal, o por el contrario éste puede absorber parte de la gota de agua y cobrar fuerza para remover la arena más de lo que lo haría la gota de agua, o puede atacar a un congénere o aparearse con él, etc., etc. Esta es la célebre dinámica de tres cuerpos, bien conocida en la ciencia y mucho más compleja que la de dos cuerpos. En un universo multicomponente, cualquier efecto será necesariamente misceláneo. Desde este punto de vista, el budismo tiene razón al decretar que en la Nada, que *a priori* no tiene ingrediente alguno, no hay efectos secundarios. Cabe admitir que esto es cierto incluso si hay dos ingredientes. Es a partir de tres cuando aparecen los efectos secundarios, también llamados daños colaterales.

ambos ingredientes. Una gota de agua mojando la arena, pongamos por caso. Y sólo habrá una clase de desenlace posible: la absorción de la gota de agua y el desplazamiento de los granos de arena cercanos. Eso es todo. Pero en cuanto exista un tercer ingrediente, por ejemplo una especie de animal arenícola, la situación se vuelve mucho más compleja. La arena movida por la gota de agua



En nuestro Universo multicomponente cualquier fenómeno, artificial o natural, que tenga un efecto beneficioso (o perjudicial) sobre un sujeto dado conducirá, directa o indirectamente, y sin excepción, a un efecto perjudicial (o beneficioso) más o menos significativo sobre el mismo sujeto. El fuego o el cuchillo, que nos ayudan a preparar la comida, también pueden lastimarnos. La lluvia, que aporta el agua esencial para la supervivencia de hormigas y caracoles, los ahoga al mismo tiempo. Igual puede decirse del viento respecto de los árboles, del oxígeno y el sol con relación a los seres vivos o inertes. En resumen, no hay cara sin cruz. En el repaso que hicimos al analizar los fenómenos físicos que se desarrollan en los aceleradores, vimos que el escudo magnético que favoreció la aparición y el desarrollo de la vida en la Tierra tiene su origen en el abrasador núcleo planetario. Sin embargo, este mismo horno también es la fuente del magma fluido sobre el que flotan las rígidas placas tectónicas que, al separarse y al chocar, generan volcanes y terremotos que destruyen la vida.

A menudo, un acontecimiento notable también puede tener un efecto dominó, con secuelas alternativamente buenas y malas para el mismo sujeto. En este caso, no hay un único efecto secundario, sino una serie de ellos que, a su vez, causan otros efectos colaterales. Pongamos por caso una pandemia que dañe a la especie humana a escala planetaria como la covid-19. Lo cierto es que ésta ha afectado muy gravemente a todas las personas desde la perspectiva de la salud. Para frenar su propagación se han impuesto medidas de contención, prohibiendo la salida y el movimiento de la gente y paralizando a rajatabla la mayoría de sus actividades en regiones enteras. Esto ha sido particularmente beneficioso no sólo para la naturaleza, que ha podido funcionar sin la presión humana igual que hace unos siglos, sino también e indirectamente para las personas en términos sanitarios. Podemos citar una reducción efectiva de las enfermedades respiratorias tras un colosal descenso de la contaminación atmosférica. Pero esto también estimuló en todas las plantas una inusitada producción de polen primaveral, haciendo que el año de la covid-19 fuera el peor de todos, desde que hay registros, en cuanto a la fiebre del heno. Al mismo tiempo, la contaminación a escala mundial que ha sufrido la naturaleza por los productos usados para contrarrestar la covid-19 (mascarillas, viseras, guantes, batas, gel hidroalcohólico, etc.) tiene visos de desastre ecológico. Por otro lado, desde el ángulo económico, el confinamiento ha provocado enormes pérdidas en no pocos sectores de la sociedad, afectando gravemente a la salud de quienes trabajan en ellos. Pero otros han acumulado ganancias excepcionales, como en la gran distribución comercial, las ventas por internet y la industria de productos informáticos. El ramo de las aseguradoras también cosechó benefi-

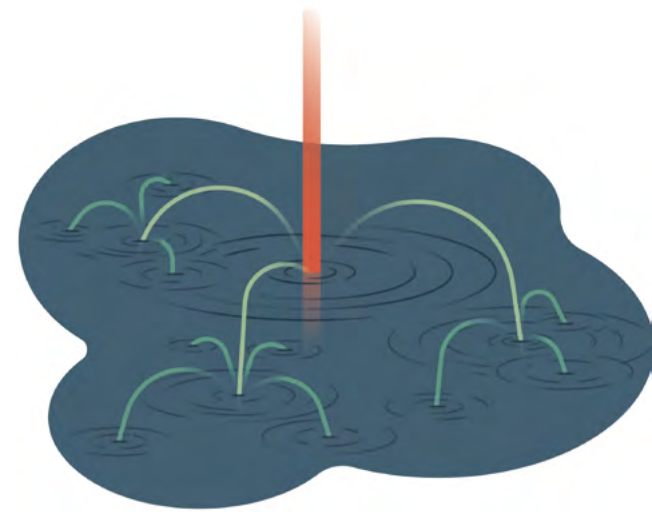
Cuanto mayor es una salpicadura, más salpicaduras genera

cios descomunales, debido a la disminución igualmente descomunal de los accidentes relacionados con las actividades humanas, incluidos los percances de tráfico en primer lugar. Adviértase que una mengua de éstos también significa un beneficio sanitario.

Por tanto, se constata que la covid-19 ha sido un desastre a la vez que una bendición para la salud, la economía y la naturaleza. En general, cuanto mayor es el calibre de un fenómeno, tanto más significativas y heterogéneas son sus consecuencias. Esto lo vemos cuando se arroja una piedra en un estanque: a mayor tamaño del guijarro más agua salpica, lo que a su vez produce más chapoteo. Cuanto mayor es una salpicadura, más salpicaduras genera.

Esta observación ayuda a comprender por qué la ciencia y lo artificial se ven en cierto modo como monopolios generadores de los efectos secundarios. Se debe a que la ciencia estudia exclusivamente fenómenos perceptibles; o sea, que producen en nosotros, nuestro entorno y el Universo secuelas aptas para ser observadas y medidas. Como éstas son siempre plurales (no se conoce fenómeno alguno que cause una única consecuencia), también lo son sus efectos. Y la ciencia también los pondrá de manifiesto, sean éstos deseables o indeseables. Lo artificial, es decir, lo elaborado por el ser humano a partir del conocimiento científico y concebido para producir un único y determinado efecto, será tanto más reiteradamente manufacturado cuanto mayor o más obvio sea tal efecto. Pero éstos, ya lo sabemos, son necesariamente copiosos, de modo que, junto con el efecto primario que se persigue, acaecerá una multitud de efectos secundarios, más o menos significativos, que pueden favorecer o inhibir otros procesos. En suma, la ciencia y lo artificial se ocupan tan solo de conceptos y entidades que implican efectos muy materiales y visibles, lo que hace que los efectos secundarios sean muy claros y ostensibles.

Otras formas de conocimiento humano, como las artes, la filosofía, las religiones, lo paranormal, etc., tratan sobre temas esencialmente ligados a la mente, la imaginación o lo psíquico, sin efectos materiales inmediatos o directos. Así, los efectos primarios y secundarios se limitan al ámbito mental y, por ello, son mucho menos patentes en general. Sin embargo, cuando estas formas de conocimiento logran incumbir a un gran número de mentes, los efectos secundarios, no deseables *a priori*, son igualmente importantes. La historia humana registra dolorosas huellas de masacres y contiendas armadas a escala planetaria desencadenadas por doctrinas económicas o religiosas que, inicialmente, estaban diseñadas para la felicidad humana.



Este somero análisis muestra los vínculos de la ciencia no sólo con lo natural y lo artificial, sino también con los efectos primarios y secundarios desencadenados. La ciencia elabora modelos de lo natural y guía lo artificial y, más que cualquier otra forma de conocimiento, estudia detallada y profundamente los efectos primarios y secundarios de lo uno y lo otro para compararlos cuantitativamente y determinar qué consecuencia prepondera. Cierta fármaco tiene la virtud principal de erradicar un microorganismo dañino y el efecto secundario de dañar ciertas funciones del cuerpo. Un microorganismo patógeno tiene la acción primaria de deteriorar algunos estados fisiológicos y el efecto secundario de estimular el sistema inmunitario del organismo. Para optar es necesario entender cómo funcionan ambos y cuantificar sus efectos con objeto de evaluar con precisión el efecto dominante que se deriva de ellos.

«Cuantificar», pues, debería ser la palabra clave en esta discusión sobre los efectos secundarios. Lo problemático de las formas no científicas de conocimiento es que, al basarse en lo cualitativo y no en lo cuantitativo, cuando surge un efecto secundario se asume como tal, sin conciencia alguna de su importancia relativa y sin considerar en absoluto sus aspectos numéricos. En la práctica, esto motiva la prohibición de cualquier cosa siempre que pueda acarrear consecuencias colaterales. Esta conducta, llevada al extremo, aboca, primero, a la insoportable ima-

**«Cuantificar»
debería ser la
palabra clave en
esta discusión
sobre los efectos
secundarios**

gen de que todo tiene aspectos adventicios e indeseables; luego, a la conclusión de que el mundo en que vivimos es inhabitable, y, al cabo, que la única salvación posible supone la búsqueda de un cierto paraíso. Sin embargo, ignorar las cifras, desdeñar la importancia relativa de 10 o 100.000, empuja fatalmente a un comportamiento sin sentido. Es como si alguien, temiendo que algo pudiera aplastarlo, tomase idénticas precauciones

para evitar la caída de la hoja de un árbol y la de un avión sobre su cabeza. Por este desconocimiento de las cifras algunos se ven arrastrados a rechazar una vacuna cuyos efectos secundarios adversos son de uno entre un millón, pero que puede salvarles la vida en el 90% de los casos. Aún más radical, y sin embargo bastante extendido: no ver la diferencia entre 0 (cero) y 10.000, como sucede con quienes ya no quieren comer carne alguna, ni pescado, ni un determinado alimento, tras saber que el consumo masivo de estos comestibles es potencialmente cancerígeno. No. Hay que trascender de lo cualitativo y considerar el aspecto cuantitativo, que es fundamental para juzgar si un efecto secundario es o no realmente dañino. Solo la ciencia, con sus ecuaciones y números, puede ponderar con precisión la importancia relativa de los fenómenos. Entonces advertiremos que el mundo en que vivimos es bastante habitable, a pesar de todos sus efectos secundarios. En cualquier caso, eso es lo que nos muestra la vida. La que fructifica en la ladera de los volcanes, fraguada por lava destructiva a corto plazo, pero nutritiva a la larga. O, más generalmente, la que se difunde por toda la Tierra, a pesar de los muchos cataclismos que sufre regularmente.

La ciencia en general, y los aceleradores en particular, pueden ayudarnos a comprender y cuantificar. Entonces, la consciencia puede elegir apropiadamente. Elegir conscientemente.

11

Los aceleradores, la humanidad y el Universo

Hemos visto que (i) las leyes de la física de aceleradores, de la física general y de toda la ciencia, nos ayudan a comprender muchos fenómenos naturales de una manera extraordinariamente precisa, duradera y universal, y que (ii) esto venía a satisfacer la necesidad de entender, dictada por el cerebro humano.

Ambos rasgos contravienen la opinión, ampliamente difundida, que atribuye a la ciencia el papel: (i) de explicar exclusivamente el «cómo» y no el «por qué» de las cosas, y (ii) de estudiar la materia, pero no la mente. Es interesante explorar con más detalle estas dos consideraciones.

EL CÓMO Y EL POR QUÉ

Desde los primeros avances significativos de la exploración científica, hace unos cientos de años, no ha sido raro que pensadores, filósofos y teólogos limitasen el papel de la ciencia al estudio del «cómo» y no del «por qué» del Universo, al punto de convertirse en un axioma reiteradamente aceptado. Sin embargo, en vista de cuanto acabamos de examinar, es difícil suscribir esta opinión. Analicemos un fenómeno que ya se ha mencionado antes: la trayectoria helicoidal de las partículas cargadas en su movimiento alrededor de las líneas de un campo magnético. Desde la perspectiva del «cómo», esto podría suscitar la siguiente pregunta: «¿Cómo obligar a las partículas a seguir un itinerario curvilíneo?». Está claro que la respuesta no la procura la física sino la técnica. Ésta nos dirá cómo producir, mediante un imán permanente o un electroimán, un campo magnético con esta o aquella intensidad y cómo lanzar en él partículas de tal o cual velocidad, ángulo, etc. Otro posible interrogante sería: «¿Cómo es el giro de una partícula cargada en un campo magnético?». Y cuya réplica incumbe a las técnicas de medición, básicas para calibrar la fuerza del campo magnético, la velocidad de las partículas, el radio de la ruta curvilínea, etc. Análogamente, si quisiéramos aclarar la cuestión: «¿Cómo cae un objeto al suelo?», supondría medir su recorrido y velocidad durante el descenso en el campo gravitatorio.

La técnica, que deriva de la ciencia y, al mismo tiempo, la inspira, no es del todo ciencia. El principal objetivo de ésta nunca ha sido estudiar el «cómo» de los procesos, sino describir y hacernos comprender las razones por las que éstos suceden de una manera y no de otra. Y las «razones» o las «causas» están directamente ligadas al «por qué». ¿Por qué las partículas se mueven en círculos en lugar de en línea recta?: porque están inmersas en un campo magnético. ¿Por qué los objetos masivos caen en lugar de flotar en el aire?: porque están sujetos a un campo gravitatorio. Una vez que la física responde a estos «porqués» —lo que equivale a conjeturar y luego demostrar la existencia de un campo magnético o de uno gravitatorio y, luego, definir las características de tales campos—, su

papel, por así decirlo, ha concluido. En otras palabras, explicar el «por qué» de las cosas del Universo es, de hecho, el único papel de la ciencia.

No es fácil, pues, deducir cómo (o por qué) la creencia popular llegó a otorgar a la ciencia el papel de estudiar el «cómo» y no el «por qué». Un posible motivo podría ser la confusión entre técnica y ciencia, dos campos próximos y ligados entre sí. Otro, estaría en el significado mismo de la palabra «razón» (o «causa»), que invoca dos acepciones radicalmente

opuestas entre sí. Para algunos, la razón de un determinado fenómeno subyace en un plan o un objetivo previos, que sólo adquieren sentido tras acontecer el fenómeno. Por tanto, aquí la causa es posterior al fenómeno mismo. ¿Por qué me quedo en casa a estudiar mis lecciones en lugar de ir a pasear?: porque quiero aprobar el curso a fin de año. Adviértase que este punto de vista, muy antropocéntrico, troquela la conducta humana para emprender la acción si existe una meta determinada. Los procesos suceden como si se hubiera personificado a la naturaleza, a la que se le atribuyen ciertos designios que expli-

can los fenómenos que ocurren en su seno. Sin duda, esta perspectiva es problemática por el hecho, justamente, de adjudicar determinado propósito a tal o cual proceso. La mitología grecorromana nos lo recuerda. En ella, antes de cada una de sus campañas bélicas, los héroes enfrentados suelen revestir con rasgos contradictorios a sus dioses respectivos. Los científicos asumieron un punto de vista exactamente opuesto para explicar una naturaleza objetiva, supuestamente desprovista de cualquier plan, y cuyos fenómenos tendrían lugar incluso en ausencia del ser humano. Con esta visión, la causa es necesariamente anterior al fenómeno. La causa, pues, precede al efecto, y las mismas causas conducirán implacablemente a idénticos efectos. ¿Por qué los átomos son eléctricamente neutros?: porque las partículas de signos opuestos se atraen y neutralizan entre sí. ¿Por qué los niños se parecen a la madre y al padre?: porque llevan los genes de ambos. Ignoramos si el Universo tiene o no un propósito, pero, para entenderlo, asumir que carece de él sigue dando lugar a numerosos y notables éxitos.

De esta discusión retendremos, pues, que la ciencia sólo se ocupa de estudiar el «por qué» de los fenómenos del Universo, y que las razones del «por qué» necesariamente son previas a los fenómenos.

Explicar el «por qué» de las cosas del Universo es, de hecho, el único papel de la ciencia

MATERIA Y MENTE

Otra opinión que parece bien asentada en la sociedad humana es que la ciencia se ocupa únicamente del mundo material, pero no del mental. Sin embargo, tal como se discutió antes, la ciencia, impulsada por un ineludible apremio impuesto por el cerebro humano, busca comprender el funcionamiento del Universo y de los objetos que allí se encuentran. Y cuando se habla de comprensión y cerebro, difícilmente podemos obviar el aspecto mental. En efecto. Con tal de satisfacer imperiosas necesidades exclusivamente mentales —y el consenso es casi unánime—, hace 50.000 años unos individuos desafiaron el frío, la oscuridad y el peligro de cuevas de muy difícil acceso para realizar suntuosas pinturas rupestres. Siguiendo la estela de estos artistas prehistóricos hoy el CERN y otros grandes centros de aceleradores aglutinan considerables recursos humanos y financieros sólo para cumplir una exigencia intelectual, cual es la sed de saber, la sed de conocimiento, impulsada por el cerebro humano.

Y no sólo la motivación es puramente mental; en gran medida también lo son los objetos que estudia la física de aceleradores y, en general, la ciencia. Citemos algunas muestras a vuelo pluma: las cuatro fuerzas fundamentales, el espacio fásico 6D, la curvatura espaciotemporal, la evolución de las especies, la herencia biológica, etc. Todas ellas son entidades invisibles, impalpables, que no esperamos siquiera materializar algún día. Son cualquier cosa menos algo material. Como ya se subrayó en el caso de los campos eléctrico y magnético, se trata de primeros principios, de axiomas, que no son deducibles ni fácilmente definibles, pero que explican todos los fenómenos observados. De hecho, son constructos humanos estrictamente intelectuales. Sin ellos, la mente se sumiría en una especie de angustia sorda ante el complejo espectáculo de la naturaleza. Pero con ellos, la mente se tranquiliza, se apacigua, porque puede comprender el «por qué» de los fenómenos que ocurren a su alrededor. Con conceptos inventados desde cero los científicos han construido modelos con los que explicar los objetos y los fenómenos observados, tornando inteligible el Universo. Al hipertrofiarse tanto, el cerebro se ha dotado de consciencia (de sí mismo y de su entorno), lo que a su vez le provoca ansiedad (ante la complejidad de ese entorno), para cuyo desahogo erige a toda costa arquitecturas mentales (capaces

Con conceptos inventados desde cero los científicos han construido modelos con los que explicar los objetos y los fenómenos observados, tornando inteligible el Universo



de explicar ese entorno). Cuando es consciente de sí mismo es propio del ser humano preguntarse: «¿por qué estoy aquí?, ¿de dónde vengo?, ¿adónde voy?». Y, cuando es consciente del Universo que le rodea: «¿por qué existe algo en lugar de nada?, ¿qué había antes?, ¿cómo evolucionará?, ¿qué habrá después?».

Esta última reflexión nos permite extraer una característica típica de todos los sistemas humanos de pensamiento, incluida la ciencia, capacitándonos para compararlos entre sí aún más concreta y detalladamente. Si consideramos que cualquier gran sistema de pensamiento busca responder a las preguntas existenciales antes enunciadas, proponiendo uno o varios primeros principios que no son deducibles ni definibles, pero que explican los fenómenos observados, entonces las leyes científicas fundamentales constituyen los primeros principios de la ciencia. Para el psicoanálisis éstos podrían ser el inconsciente y los mecanismos de placer-displacer; para la filosofía serían la verdad, el alma, la ética, la moral, etc., dependiendo de la escuela de pensamiento. Sin embargo, donde más clara resulta la noción de primer principio es en el pensamiento de tipo religioso. Éste, pues, es el más directamente comparable con el de índole científica. Según la religión monoteísta (o politeísta) dios (o los dioses) es (o son) la causa primera de la que derivan como efectos

todos los demás fenómenos del Universo. Obviamente, las religiones politeístas admiten muchos primeros principios diferentes, en número ilimitado y sin excluir que, a su vez, también puedan ser consecuencia de otros primeros principios. Por el contrario, las religiones monoteístas se basan en dos suposiciones adicionales: que el primer principio es único y que no hay otra causa de la cual éste sea efecto. Desde esta perspectiva, la ciencia ocupa una posición intermedia. Admite una pluralidad de primeros principios, pero trata de minimizar su número (recuérdese el principio de parsimonia ya comentado), y no descarta que los primeros principios efectivos puedan derivarse de otros primeros principios.

Sin embargo, los objetos de estudio de la ciencia no coinciden exactamente con los de otras formas de pensamiento, y acaso por esto se la tilda de materialista. En efecto, aunque su motivación y las entidades que estudia son incuestionablemente mentales, la ciencia se interesa exclusivamente en principios y objetos que provoquen (o puedan provocar) sobre el Universo algún efecto observable por el ser humano. Adviértase que una ley se convierte en científica sólo cuando se contrasta experimentalmente. En consecuencia, la ciencia no se interesa en aquello que no pueda someterse a palpable experimentación por falta de interacción con nuestro Universo.

Cabe deducir, por tanto, que cualquier pregunta del tipo «¿la ciencia estudia la cuestión de la existencia de dios?», «¿estudia qué sucede después de la muerte?», «¿estudia los universos paralelos al nuestro?» o, en general: «¿estudiar tal o cual entidad?», siempre tendrá una respuesta clara y rotunda: «Sí», cuando la entidad en cuestión ya interactúa o en algún momento pueda interactuar con nuestro Universo, y «No», cuando todavía no sepamos cuál es su modo de interacción con el Universo.

La ciencia se interesa exclusivamente en principios y objetos que provoquen (o puedan provocar) sobre el Universo algún efecto observable por el ser humano

EPÍLOGO

Perfectamente ajustada en el puzle de la física en general —inscrita ésta, a su vez, en la partitura de la ciencia básica—, así opera la física de aceleradores, que surca el laberinto del cerebro humano igual que otros grandes sistemas de pensamiento. Y como a éstos, de inequívoca raíz mental, es el cerebro mismo el que estimula al pensamiento científico, una actividad profundamente intelectual. A la par, la ciencia puede presumir de numerosos éxitos materiales, cada uno más rotundo que el anterior, en la modelación del Universo y, por tanto, en su comprensión. Pero conviene recalcar que esto se concreta al filo de una doble paradoja: a diferencia del cerebro humano, siempre dotado de intencionalidad, sólo eliminándola totalmente del Universo podemos hacerlo inteligible, siempre, eso sí, que nos limitemos a un Universo con el que el cerebro pueda interactuar.

Los aceleradores se utilizan para comprender, analizar, recortar, producir, grabar, fabricar y curar con precisión y fiabilidad extremas y a escalas que abarcan 14 órdenes de magnitud. Esto ha sido posible gracias, entre otras circunstancias, al desarrollo de la física de aceleradores, que baraja herramientas teóricas abstractas basadas en conceptos fundamentales de la física general. En consecuencia, la física de aceleradores, vínculo tangible entre las actividades típicas de la sociedad y los métodos distintivos del pensamiento científico, es un valioso trampolín para explorar no sólo las aportaciones de la física a la descripción del Universo observable, sino también la compleja relación entre ciencia y sociedad. Su fuerte anclaje en lo concreto también hace de la física de aceleradores un medio para abordar las preguntas más profundas y espirituales que el ser humano se plantea sobre el Universo y el lugar que ocupa en él, con un enfoque específico y directo.

Sin duda, la historia de los aceleradores aún se está escribiendo. La demanda de haces de partículas cada vez más eficaces en términos de energía, potencia, precisión y fiabilidad es incesante. La búsqueda de nuevos mecanismos de aceleración y focalización más capaces, que promete aceleradores cientos de veces más compactos que los actuales, se basa en el estudio de las cavidades aceleradoras microscópicas generadas por rayos láser o haces de partículas en los plasmas. Estamos seguros de que son muchas las sorpresas agradables que aún nos reserva este campo, cuya física seguirá avanzando a buen ritmo en esta aventura de iluminar el mundo tangible de la realidad mediante el mundo abstracto de la teoría.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer calurosamente sus críticas y sus enriquecedoras discusiones a Claire Antoine, Manuel Durand-Barthez, Angèle Sene y Didier Uriot. Y en especial a Angèle Sene, por su constante apoyo a todos los niveles. El proyecto de este libro ha contado con el respaldo del CEA-IRFU (Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives-Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers) y la red de laboratorios de excelencia P2IO (Physique des 2 Infinis et des Origines) de la Universidad París-Saclay.

Accelerators, humankind and the Universe

Reflections on the physics
of accelerators...
and the nature of Nature

PHU ANH PHI NGHIEM

CONTRIBUTIONS

The author

Phu-Anh-Phi NGHIEM has conducted scientific research in the fields of plasma physics, astrophysics and accelerator physics at the CNRS and at CEA. He has published over 120 scientific papers in specialized journals and international conferences. As a CEA expert in accelerator physics, he has been responsible for the design of national and international accelerators.

Foreword

Manuel DURAND-BARTHEZ, PhD in Comparative Literature and German Studies, has been a trainer at the Unité régionale de formation à l'information scientifique et technique (URFIST, Paris) and at the Université scientifique Paul Sabatier in Toulouse, as well as a curator at the École Nationale des Chartes.

Illustrations

Mara-Flore DUBOIS, curious about science and in love with museums, graduated in scientific illustration from the École Estienne and in museology from the Museum National d'Histoire Naturelle in Paris. More details on her website marafloredubois.com.

Translation to English

Francesc Pedrosa is an all-round translator, although scientific and technical subjects are his favorite. Through his hands have come and gone texts by John D. Barrow, Edward Gibbon, Ian Stewart, Amartya Sen, Hannah Arendt, Stephen Hawking and Michio Kaku, among many others, over more than 25 years of professional experience. His webpage is fptradu.com.

Translation to Spanish

Juan Carlos SANZ-MARTÍN, a physical chemist, has worked in different areas: quantum chemistry, fire dynamics, safety in nuclear power plants and in conventional industry, at the UAM, at ITSEMAP-Fuego and at CIEMAT, where he was head of the UGRI and its publishing house. He has published more than a hundred scientific articles, technical reports, book chapters, popular science articles and technical reviews in specialised and general journals, at international congresses and broadcasting programmes, and has participated in the drafting of European standards for the testing of large wind turbines. He is the author of all the translator's notes.

PREFACE TO THE FRENCH EDITION

Are you familiar with *Acarus Siro*? Family *Acaridae*, class *Arachnida*... to mention only the main taxonomic categories of this cute little critter. In Blaise Pascal's time, no animal was considered smaller than this one. It was thought of as the paradigm offered to the human being so that he could observe extremely reduced sizes.

Let us recall the exact terms of Thought No. 72 of this philosopher and mathematician, as an anecdotal prelude to particle physics.¹

In it, a person is asked to "examine the most delicate things he knows. Let a mite² be given him, with its minute body and parts incomparably more minute, limbs with their joints, veins in the limbs, blood in the veins, humours in the blood, drops in the humours, vapours in the drops. Dividing these last things again, let him exhaust his powers of conception, and let the last object at which he can arrive be now that of our discourse. Perhaps he will think that here is the smallest point in nature. I will let him see there a new abyss. I will paint for him not only the visible universe, but all that he can conceive of nature's immensity in the womb of this abridged atom. Let him see therein an infinity of universes, each of which has its firmament, its planets, its earth, in the same proportion as in the visible world."

Isn't this exactly the echo of what a contemporary scientist like P. A. Phi Nghiem, CEA researcher, shows us in a language of great clarity, in which concepts follow one after another in a logical way, step by step, in order to build a knowledge that goes from the highly technical and quantified data to an almost emotional experience of Nature?

In this monograph on *The Accelerators, Humankind and the Universe*, the author develops this subject by proving that "what we conceive with ease, we can express", as written by Boileau.³ In other words, by showing an undeniable talent for quality science popularization, a genre in which, for some reason, the Anglo-Saxons excel more than the French, who, sometimes inhibited by an obsolete academic system, are not always able to cultivate.

Often, comparing hard concepts with a trivial image acts as a way for the lay reader to understand them. Thus, to fulfil one of Pascal's (and other older classical thinkers') dreams and study the internal structure of matter by examining its fundamental constituents, one will first have to "break it down", the way children do when they take apart a mechanical toy to better understand how it works. These constituents are the particles, and to "break" them, they are made to collide, propelled with stupendous accelerations. These accelerations are hardly attainable by

¹ In Pascal's *Pensées*, New York, E. P. Dutton & Co, 1958, section II. (N. of the T.)

² Flour mite or grain mite are just two of the popular names of *Acarus Siro*. (N. of the T.)

³ In Nicolas Boileau Despreau, *The art of poetry*, trans. Howes, Pitt and Soame; Boston, USA, Ginn & Company, 1892 (N. of the T.)

following rectilinear trajectories, because sooner rather than later these itineraries end. Therefore, the trajectories are usually circular. And indeed, accelerators are usually circular too. These devices, spread all over the world, in addition to the well-known CERN equipment, have a wide range of models that respond to different uses and processes, because they really are ideal tools for studying matter in its innermost depths.

To decipher how the accelerators work and what are their many repercussions on our daily lives, it is useful to follow a series of stages with a common thread, superbly traced by Phi Nghiem. These stages, sometimes expressed in a technical language that is difficult to assimilate for the nonexpert at first reading, are articulated through familiar images that reassure the reader, giving him, in a way, a breathing space before tackling the next step. Such is the art of this author, which we could illustrate with an example: we have seen that the circular configuration of an accelerator (as opposed to the linear one) makes it possible to confer, cyclically, increasing speeds and energies. Let me yield now the floor to our writer: "when a charged particle describes a curved trajectory, it happens as in an antenna: it will necessarily emit electromagnetic radiation (see below the discussion on the laws of electromagnetism) and, therefore, it will lose energy. This side effect clearly defeats the original purpose of giving more energy, and it had to be minimized by trying to make the particles trace less tight curves, hence the circular accelerators getting bigger and bigger". One thing leads to another, so we are approaching the notions of electric field and magnetic field, intimately linked to the charged particle, thus inducing the combined concept of electromagnetism. Gradually we realize that this circular force, multiplied and increasing, must be mastered, channelled and guided. Hence one of the trivial images mentioned above: that of a horse towing a barge. Both follow parallel courses but allow the unfolding of opposing forces: that of the horse pulling the rope and that controlled by the rudder, which counteracts and balances the lateral drag: a reflection of what happens in the gigantic cyclic trajectories of an accelerator.

Accelerate, produce, guide and then focus are four key words that come up again and again along a perfectly marked route.

On the horizon then loom the six physics: "from the infinitesimally small of quantum physics we pass, effectively, to the infinitely large of astrophysics", and these six physics are declined following a "classification according to the size of the studied objects: particle, or quantum, physics, nuclear physics, particle beam physics in an accelerator, atomic and molecular physics, solid state physics, gases and plasmas and, finally, astrophysics". This concise passage is particularly enlightening.

When the more difficult paragraphs force the reader to reread once or twice, intuition comes to their aid and guides them conveniently, thanks to the path already travelled, to deduce, by setting up conjectures, their meaning. Once the principles have been acquired, we need to try and

grasp, little by little, their variants, adding each time a piece of the puzzle and resuming the journey.

In support of this perspective, we can quote the fifth of Descartes' Rules for the Direction of the Mind: "[We shall be following this method exactly] if we first reduce complicated and obscure propositions step by step to simpler ones, and then, starting with the intuition of the simplest ones of all, try to ascend through the same steps to a knowledge of all the rest".⁴ Here, in fact, the recurrence of basic concepts (attraction-repulsion, focusing-dispersion, deviation-recentering...) examined from several angles, makes it easier to assimilate the whole and to understand applications that affect in a more direct way: accelerating, producing, guiding and then focusing beams towards a tumour target, for instance. That's why this book is not a simplistic treatise for a cavalier popularization of concepts, but one that is accessible to the lay reader, who is just expected to make an agreed-upon effort in the right direction. Settle down, reread and move forward.

However, and this is not the least important aspect –quite the contrary–, in addition to the fundamental and the applicative, the text concludes by examining, at some length and in depth, the implications of the subject for the Humanities and the Social Sciences.

Socially, the principle of collision induces a dynamic at the core of Plato's and Aristotle's *Agora* and *Republic*. A parliamentary assembly of passive "adepts" is unproductive, and revolutions in the political sense generate movement, as happens in the forced rotation of particles...

In human terms, the benefits of this study are also significant.

In this fashion, the author evokes our distant prehistoric ancestors, living out continuous trials in a *de facto* "naturally" hostile environment. In the darkness of the caves, they resorted to artifice, in the etymological sense of the term (*artifact*, resulting from an elaboration of the human brain, *art* in the sense of "Arts and Crafts"), not only by designing tools (a technique which, in the basic sense, the author rightly differentiates from the scientific) but also by deploying those superb wall paintings that represent them ("present them again" according to their own conception), the human beings, facing the animals they had to master to survive. Here, the art results from both the emotional and reasoned use of pigments.

Manuel DURAND-BARTHEZ

⁴ In René Descartes, *The Philosophical Writings of Descartes*, trans. John Cottingham, University of Reading, Robert Stoothoff, Dugald Murdoch, Cambridge University Press, 1985.

TABLE OF CONTENTS

Contributions	131
Preface to the french edition	133
Foreword for the bilingual Spanish-English version	139
Prologue: Physicists and accelerators.....	143
1. The common thread.....	147
2. Charged particles.....	151
3. Particle accelerators.....	157
Colliding particles.....	159
Generating synchrotron radiation	162
Irradiating specific targets	165
4. Particle beam physics	169
The particle beam.....	172
Accelerate... and more.....	173
5. Electric and magnetic fields	177
To define or not to define.....	179
The effects of electric and magnetic fields	180
6. Generating electric and magnetic fields.....	185
Static electric and magnetic fields.....	187
Electromagnetic fields	188
From accelerators to everyday objects and those of the universe	191
7. How to generate charged particles.....	195
From human activities to natural phenomena	197
The particle source of accelerators	200
8. Accelerator physics.....	203
The accelerator	205
Particle beam physics.....	207
The six physics.....	209
Accelerator physics, quantum physics, and astrophysics	211
9. Accelerator physics and human nature	215
Cooperation and competition.....	217
The human brain	219
10. Accelerators, nature and society.....	223
The principle of parsimony.....	225
The artificial and the natural.....	227
Side-effect syndrome	229
11. Accelerators, Humankind and the Universe.....	235
The how and the why.....	237
Matter and spirit.....	239
Epilogue.....	243
Acknowledgements.....	245

FOREWORD FOR THE BILINGUAL SPANISH-ENGLISH VERSION

SCIENTIFIC LANGUAGE versus COMMON LANGUAGE

What joyful news when my Spanish colleagues offered to translate this book into Spanish and English. Particle accelerators deserve to be better known by each one of us, citizens, and protagonists of the future of our countries and our societies. And this can only be achieved by striving to go beyond scientific language -which is universal, but flooded with a jargon that only specialists can understand- to get as close as possible to common, local and, therefore, polysemic speech, a speech that is nevertheless understood by a greater number of people and even capable of making them “feel”. Hence the importance of reporting scientific achievements in the vernacular of each country.

From a historical point of view, scientific knowledge has only been able to expand thanks to the categorical commitment of the international scientific community. Such commitment, sometimes cooperative, others competitive, has always generated a certain universal and highly selected scientific glossary, where all ambiguity has been banished thanks to strictly biunivocal correspondences between the word and the concept. Only this kind of language enables the indisputable exchange of points of view and, thus, to choose between the most antagonistic thoughts about the thorniest questions conceived by the human mind. In fact, the greatest scientific breakthroughs have always arisen from the confrontation between the most conflicting scientific ideas. There are many such examples: universal gravitation, the evolution of species, the Big Bang, genetics and DNA, quantum mechanics, space-time, etc.

The particle accelerator is a typical example of this scientific progress, achieved through global scientific collaboration. Accelerator physics has progressively acquired a universal language, with such abstract concepts as six-dimensional phase space or the famous Twiss parameters,⁵ which have enabled the design of extraordinary machines in just a few decades. These accelerators, very powerful and yet very precisely reproducible -and even more: ultra-complex and ultra-reliable-, can generate extremely intense -and, at the same time, extremely precise- particle beams. Who can go beyond?

⁵ Twiss parameters (also known as Courant-Snyder parameters or, simply, CS parameters) are a set of magnitudes used in accelerator physics to describe the distribution of particle positions and speeds in a beam. (N. of the T.).

Tens of thousands of accelerators are currently in operation around the world, ranging in size from a few meters to several tens of kilometers, allowing us to understand, analyze, cut, produce, engrave, manufacture, cure and probably a few other things. These machines, able to probe the intimacy of particles on a scale of 10^{-15} m, can X-ray objects of the order of tens of centimeters in size. Their applications, thus, span 14 orders of magnitude!

Accelerators are fantastic tools that help us give answer to a multitude of questions, from the most existential questions that we have been asking since the dawn of time (where we come from, how we evolved, where we are going), to others, of a societal nature, about the world of today and tomorrow (how to live in good health in a healthy environment, how to produce sustainable energy...)

Undoubtedly, the particle accelerator can also be considered the most complex, sophisticated, and magnificent machine that the human mind has ever designed and built. There are other great constructions that are part of human heritage, such as the temples, the pyramids in Egypt, the temples of Angkor in Cambodia or the Great Wall in China. They are all sets of stones, often beautifully carved, is true, but inert and immobile, which will eventually erode over time. The accelerator is a machine that is working, usually running day and night for years, with impeccable reliability and chronometric repeatability. This requires the involvement of many engineering disciplines at the highest level, in addition to some of the more abstract physics. Just think that, in addition to having to apply very powerful electromagnetic fields in different configurations, each more sophisticated than the next, most of the time the accelerator must be connected along its entire length with sub-millimeter accuracies, all the while maintaining a continuous temperature of -273°C , and a pressure of 10^{-9} atmospheres. It is, undeniably, one of the most sophisticated, precise, cold, and empty places in the Universe. Moreover, from its design to its commissioning and day-to-day operation, we are constantly forced to use radically abstract concepts of accelerator physics. Truly amazing features, all of them.

But who knows that? How many people know that, to date, some 100 accelerators around the world have cured 300,000 cancer patients? Who is aware that accelerators are coming to the rescue to produce the clean energies of the future, such as photovoltaic or fusion energy? Probably only a very small fraction of society is aware of the fantastic contributions of accelerators to this very society.

Consequently, it is more important than ever to bridge the gap between the scientific community, with its refined but overly specialized language, and the public, with its diverse languages within the reach of

any of us. Therefore, a translation effort such as this one, from a text intended for the public into a common language that is closer to the people, is worthy of applause and warm congratulations.

So that the effort to disseminate scientific results among the public can also take place in a context of international cooperation, following in the wake of the collaboration of the scientists who made it possible to obtain these results.

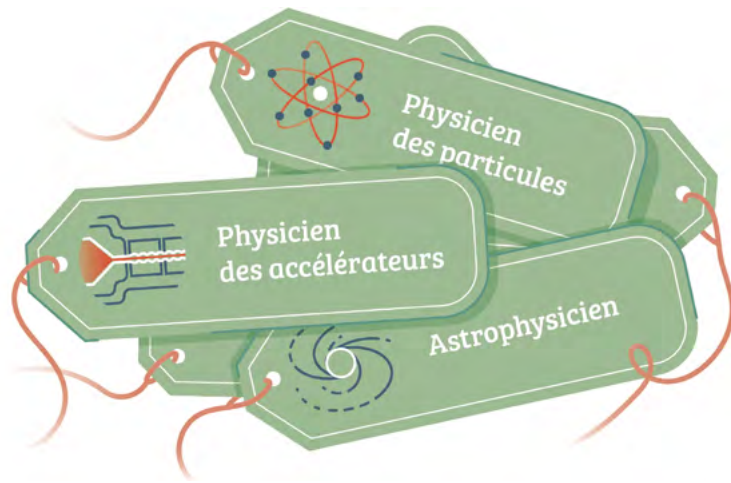
Phu Anh Phi NGHIEM

PROLOGUE: PHYSICISTS AND ACCELERATORS

Like everyone else, I've often had to answer the question "What do you do for a living?". When I answer, "I'm a physicist", the most curious and scientifically informed automatically want to know more: "In what field?". Then, there's always a lingering and fleeting instant that often makes me a little uncomfortable, one of those classic moments when we're forced to justify ourselves, to clear up a misunderstanding. As soon as the very words that characterize my precise object of study are uttered, namely "particle accelerators", my conversation partner's face at once lights up: "Ah, you do particle physics at CERN!" Well, no, I don't do particle physics and I don't work at CERN...

CERN, the European Organization for Nuclear Research, rightly enjoys an excellent reputation among the public. Based in Geneva, Switzerland, it was founded in the aftermath of the Second World War for a profoundly honourable cause: to show that very different countries, even enemies in the past, were capable of pooling thousands of scientists and engineers, and a budget that exceeds a billion Swiss francs a year, for a common cause: to advance human knowledge. Since then, in addition to being a scientific organization of excellence, it has also become a symbol of peace. Peace through science and peace for science. This highly emblematic, but particularly difficult, role has been fulfilled with flying colours. The proof is in the spectacular discoveries of particles predicted and expected by theories, with no less spectacular accelerators and detectors. These include the light boson Z^0 and the Higgs boson. Of course, the involvement of CERN researchers goes beyond these discoveries. Many other theoretical contributions have also been made. But the fact that only these discoveries made with the accelerators were the ones being celebrated with such fanfare reveals one of the founding principles of science, namely that a theory can only be enshrined on the condition that it is proven experimentally. Hence the spotlight on particle accelerators as a formidable research tool. But this success has a small downside. Accelerators, which have been instrumental in the success of particle physics, have remained fixed in the collective memory as the sole facilities of CERN, dedicated exclusively to particle physics.

This brings us to the parallel with the world of arts and media. The actors in a successful film of a given genre are often forever pigeonholed as emblematic of that genre. Stereotyped, they will find it exceedingly difficult to show the full range of their talent, which could sometimes



extend to different genres or even other arts. It's rare for musicians or singers to become famous for several styles of music at the same time.

Sometimes, however, we discover –usually with immense pleasure– a famous film star performing with great passion in a dark, narrow jazz cellar. This is also true of particle accelerators. In this case, we're not talking of a cellar, but a major scientific research centre. In fact, there are no fewer than a whopping two hundred large accelerators in operation in research centres around the world, in the service of many scientific disciplines as well as cutting-edge technological fields. It's a pity that the general public knows so little about them, especially when one considers that there are more than 24,000 accelerators installed in industrial companies and, eminently remarkable, 11,000 accelerators dedicated exclusively to medical treatments.

All these accelerators of assorted sizes and energies due to their specific applications, were born in large accelerator laboratories. There, not only are accelerators put into operation for diverse user communities, but they are also studied and conceptualized. From being a tool for research, the accelerator itself has become an object of research. Hence the profession of “accelerator physicist”. But let's be clear: there are dif-

ferent kinds of physicists, just like there are distinct kinds of accelerators. Among physicists, there are those who use accelerators as a tool for their research in physics, and there are those who study accelerators as an object of physics research themselves. Among accelerators, there are those on an exceptionally large scale that are generally used for scientific and technological research, and those on a more modest scale that are used for technological or industrial, as well as medical or societal, applications.

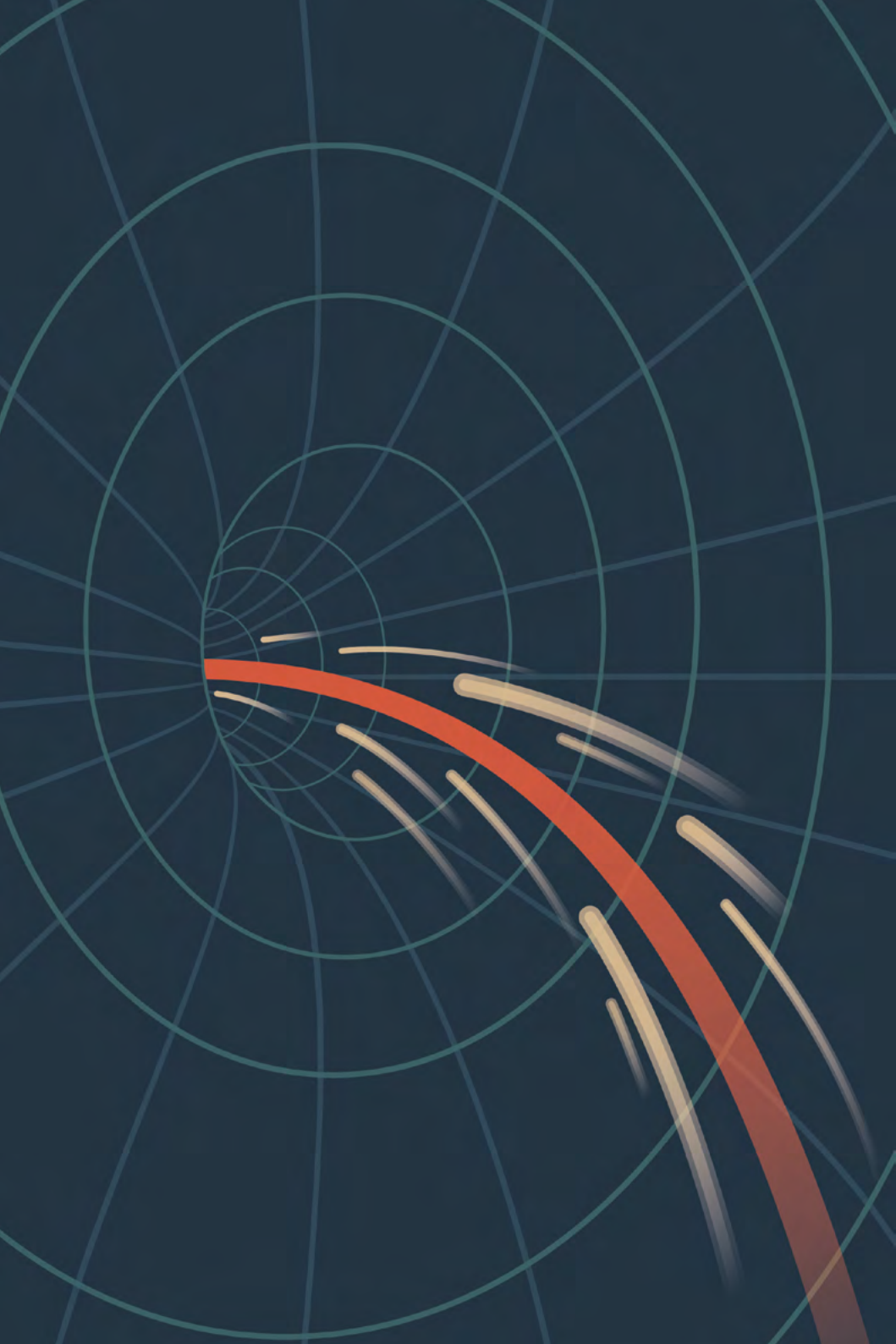
To spice things up even further, to pique your interest even more, let's add that accelerators research doesn't just involve physicists, but also scientists and engineers from many other disciplines. So, if you are tempted by a visit to the world of accelerators, I can guarantee that it will reveal itself to you in all its richness. Because of their widespread presence in the four corners of the world, their abundant applications and therefore their remarkably diverse user communities, the researchers who study them from different perspectives, and their operating principles, based on the same laws of physics governing everyday objects right up to those of the universe. And there's more. In certain respects, the operation of accelerators and the organization around them is reminiscent of the operating and organizational principles of human society, and even of human beings themselves.

So, let yourself be tempted, let yourself be guided. I've concocted a gentle journey that nonetheless allows you to discover many aspects of the world of particle accelerators. And beyond that, some of the deeper questions about our place in the Universe.

The operation of
accelerators and the
organization around
them is reminiscent
of the operating
and organizational
principles of human
society, and even
of human beings
themselves

1

The common thread



First, a few words about the thread that runs through the text that follows.

Together with the particle accelerators, we'll embark on a journey to the abstract scientific concepts that underpin this technical device. In this way, we'll be able to broaden the scope of our discussions, from the workings of science to the workings of human society, and from scientific thought to other types of human thought.

After a brief introduction to the world of charged particles, we will review the various uses of particle accelerators. We'll see that they are present in many sectors of activity, from academic research to industrial and medical applications, for which they are valuable, even essential, tools. The price to pay is the need for the most extreme performance over a wide range of parameters, which can only be achieved when the accelerators themselves are considered as objects of research in physics.

Next, we delve into the physics of particle beams, looking at the physical principles involved so that accelerators be able to deliver beams with the required performances. These are essentially the principles of electric and magnetic fields, which inevitably lead to the laws of electromagnetism. We'll see that the same physical principles, rigorously the same, are at work throughout the Universe, from the infinitely small to the infinitely large, from everyday objects to the most magnificent manifestations of Nature.

At this point, the link to other fields of physics will be self-evident. We'll cite examples from astrophysics and quantum physics and discuss the place of particle beam physics within classical physics. Less physics-savvy readers can just skim over these passages and move on without losing too much of the thread of the discussion. Just know that in these paragraphs, the physical principles evoked in the context of accelerators will engage with the more general principles of scientific thought.

All the elements will then be in place to broaden our discussion, from science to the Universe and Nature on the one hand, and to humans and society on the other, as well as the complex relationships between the former and the latter.

We can already see that the operation of an accelerator, which is based on physical and mathematical principles, is, from a certain point of view,

We can then compare
scientific thinking
with other types of
human thinking, in
terms of the questions
that all of us have
been asking ourselves
since the dawn of
humanity

remarkably similar to the one of human individuals and human society. To prove this, aspects of cooperation and competition will be highlighted, followed by the case of an organ central to all our considerations: the human brain.

Science is a pure product of the human brain. Over the years, it has achieved increasingly spectacular success in describing the laws of nature. It has used these laws, exclusively these, to manufacture objects and equipment (including accelerators!) that meet the needs of human society. With this in mind, we'll discuss the paradox of modern society, marked by the success of the brain-Nature duo, and the disappointment of another duo, the natural-artificial one. This paradox is crystallized by the side-effect syndrome, "the" syndrome of the present century. This will be analysed in detail and placed in a millennial context.

Being a pure product of the brain, scientific thought is like other types of human thought that originate from that same organ. We'll show that science, like other types of thought, seeks to respond to humankind's existential anxieties by being ready to commit resources as large as needed (including large and complex research accelerators!), and implement first principles (including the electric or magnetic field!) that are pure constructs of the mind. On this subject, we'll discuss popular –or popularized– opinions that want to confine scientific thought to dealing only with "how" and not "why", with "matter" and not "mind". We can then compare scientific thinking with other types of human thinking, in terms of the questions that all of us have been asking ourselves since the dawn of humanity.

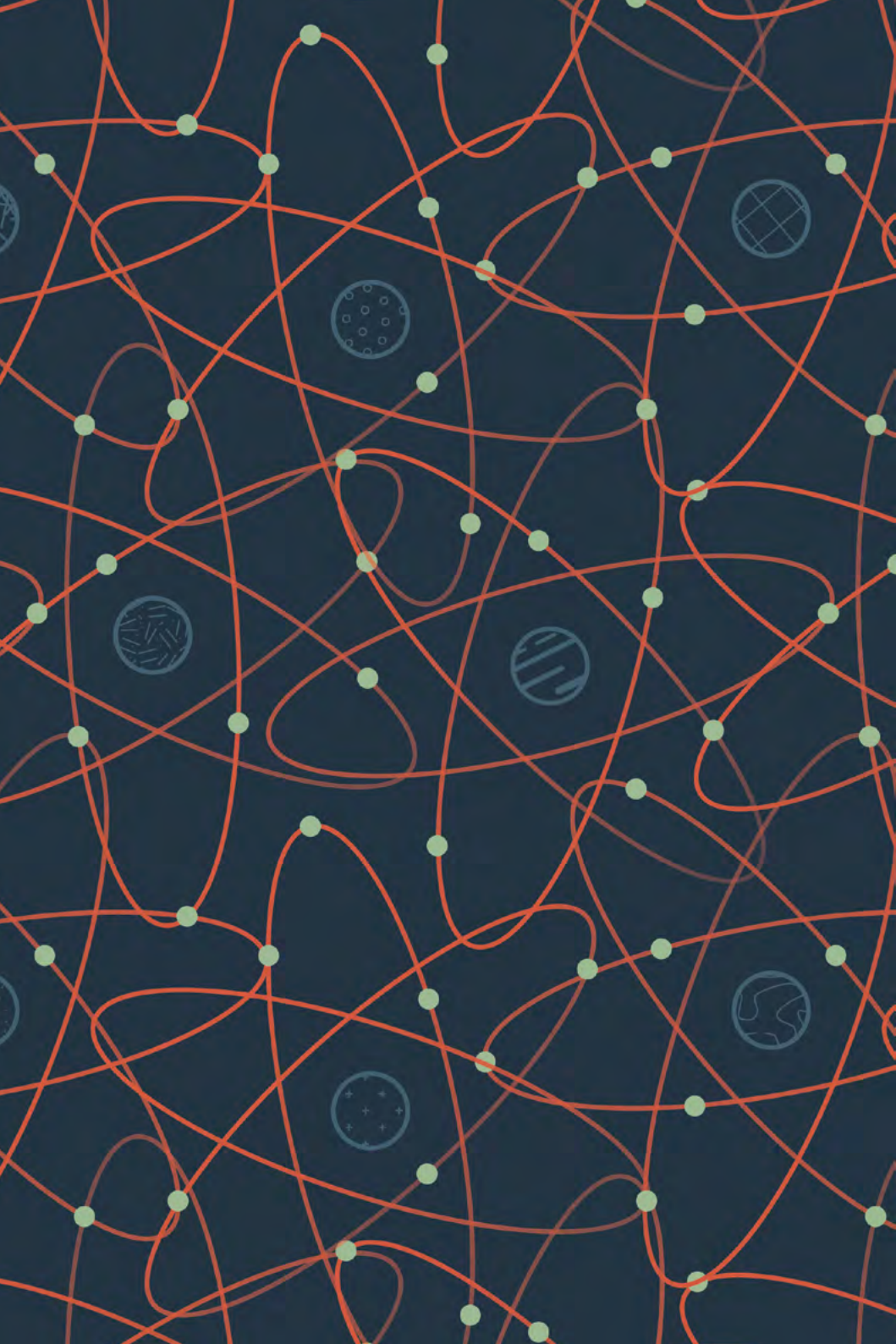
Thus, we will close the circle that starts with accelerator physics, goes through existential questions and ends with accelerators, large accelerator centres and the motion of a charged particle in a magnetic field.

Are you now ready to follow this thread?

So, let's start at the beginning, with particles. We are talking here of charged particles; in other words, particles carrying electrical charges. These exceedingly small objects can only be accelerated using exceptionally large machines, classified as Very Large Scientific and Technic Infrastructures (VLSTI), fascinating objects, be it their study or their use.

2

Charged particles



We live in constant contact with charged particles, which pass through us from space, primarily from the Sun, or are deposited on us in the form of static electricity in our daily movements, which cause friction with our environment. But for us to become truly aware of them, science had to “discover” them, which means identify them as such. And this only happened recently, a little over a hundred years ago. It must be said that these particles are so small on the human scale that it’s hard to guess or even imagine that they exist. It took a great deal of curiosity and perseverance, plus a certain amount of rivalry between laboratories on both sides of the Channel, to bring the first charged particles to light.

Although electricity had already been known since the old times⁶ and had been produced and harnessed systematically since the 19th century, nobody was yet sure whether it was continuous (like a fluid or a radiation) or discrete (particles). In the last years of the 19th century, Henri Becquerel discovered a form of radiation emitted spontaneously by uranium salts, which would be found a few years later by Marie and Pierre Curie as being natural radioactivity. Since then, it has been noted that this radiation is different from the X-rays discovered a little earlier by Wilhelm Röntgen, as it is emitted without the need for an external excitation source and can be deflected by electric or magnetic fields. The groundbreaking experiments of Joseph J. Thomson and Ernest Rutherford proved that the radiation emitted by radioactivity is in fact formed by particles of different masses and charges.

Hence, a new atom model was born, with a nucleus at the centre composed of electrically neutral neutrons and positively charged protons, and around it, negatively charged electrons, almost two thousand times lighter than the other particles.⁷

This notion of “particle” is crucial. Even more so as it can also lead to controversy and confusion. To speak of a particle and not of a fluid or radiation is to admit that the object in question has a limited extension; in other words, a well-defined size. At this point, purists familiar with quantum wave theories will rise to protest that these tenuous objects don’t have a well-defined size, because at this scale (and therefore at this... size) they can also adopt wave-like behaviour, with an almost infinite extension. But let’s insist; anyway, we just need to examine the

These particles
are so small on
the human scale
that it’s hard to
guess or even
imagine that they
exist

⁶ Magnetism was also known, as evidenced by the didactic poem *On the Nature of Things* by Titus Lucretius Carus (1st. century B.C.E.), particularly in Book VI, verse 1,342 ff. (N. of the T.)

⁷ When the number of negative and positive charges is balanced, the atom is electrically neutral. Otherwise, it is electrically charged and is designated by the term “ion”.

sizes of these particles, even if only imprecisely. As we shall see, having an idea of the orders of magnitude of the sizes will already be extremely instructive.

The human scale is 1 m. The width of a hair, 10^{-4} m. A living cell or bacterium, 10^{-5} m. Whereas an atom is 10^{-10} m, and a proton or neutron, 10^{-15} m.

The first observation is that charged particles are immeasurably insignificant compared to the human scale. If we say that the smallest size discernible by man is a hair, a charged particle is still 10^{11} times smaller! That's why it's taken so long to identify and detect them. Although electrical phenomena have been visible for thousands of years, in the form of thunderbolts and static electricity, and "used" on a daily basis – if only to light fires by friction or by producing a spark through percussion – and even it had been industrially mastered since the 19th century, with the contributions of physicists such as Alessandro Volta and James Watt, it wasn't until the turn of that century that we were able to detect the particles that carry this electricity. Even now, when we're well aware of their existence, it's impossible for us to imagine them or their diminutive size.

Looking in more detail, we come to the second observation: the electron and proton are much smaller than the atom they make up. Knowing that the radius of the atom is the distance between its nucleus and its electrons, we can see with horror that nature is filled with... emptiness. And it's not that nature abhors a vacuum, as physicists of the 17th century still believed. The distance separating the nucleus or protons from the electrons is 100,000 times greater than their size. It's a bit like what happens to the celestial bodies of the Universe, which are separated, on their own scale, by a vertiginous void.

This difference between the macroscopic and microscopic worlds partly explains why it is so difficult to accelerate charged particles, and why it takes such a large machine to accelerate so small an object. But let's take a closer look at these size scales. Let's imagine we're in the presence of an object on the order of magnitude of a metre, for example a piece of wood. Our curiosity drives us to want to see what's inside, so we set about cutting it into small pieces. This can be done in a gradual process, cutting it into finer and finer slices. Once we've reached the size of a hair, we can't see them very well, but if we have a microscope that lets us see as small an object as we want, we can cut the slice another 10 times, and be able to see the wood cells. If we keep on cutting, we can find molecules in the wood; then, suddenly, at the atomic level, wow, there's nothing left to see! And above all, there's nothing left to cut, except a vacuum (of matter). We still need to be able to cut 100,000 times more to perceive atomic nuclei and electrons. This enormous gap, this

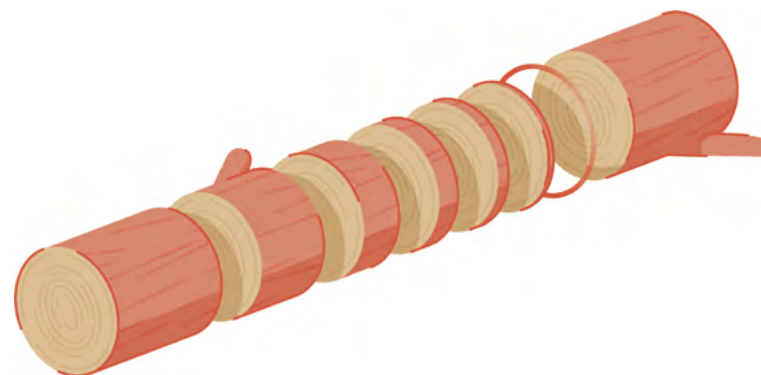
All these fields of science, from the most fundamental to the most applied, have only been able to develop fully by equipping themselves with a fabulous tool to match their scientific ambitions: the particle accelerator

formidable discontinuity, explains why it took until the 20th century for the existence of these particles to be acknowledged by everyone.

This very late realization, due to a hiatus in the scaling of the sizes of the objects studied, constitutes a real break in human knowledge and, consequently, in the tools used to study said objects, the accelerators, which in turn open the way to new applications in the most diverse fields of science and society.

The discovery of (electrically) charged particles paved the way for modern science in the 20th century, and all its applications. Conceptually, this led to Max Planck's quantum mechanics and Albert Einstein's relativity. Scientifically, it led to the emergence of disciplines such as particle physics, which studies the elementary constituents of matter, and nuclear physics, which probes the structure of atomic nuclei. Socially, it led to the generation and use of nuclear energy through fission, for both military and, above all, civilian purposes.

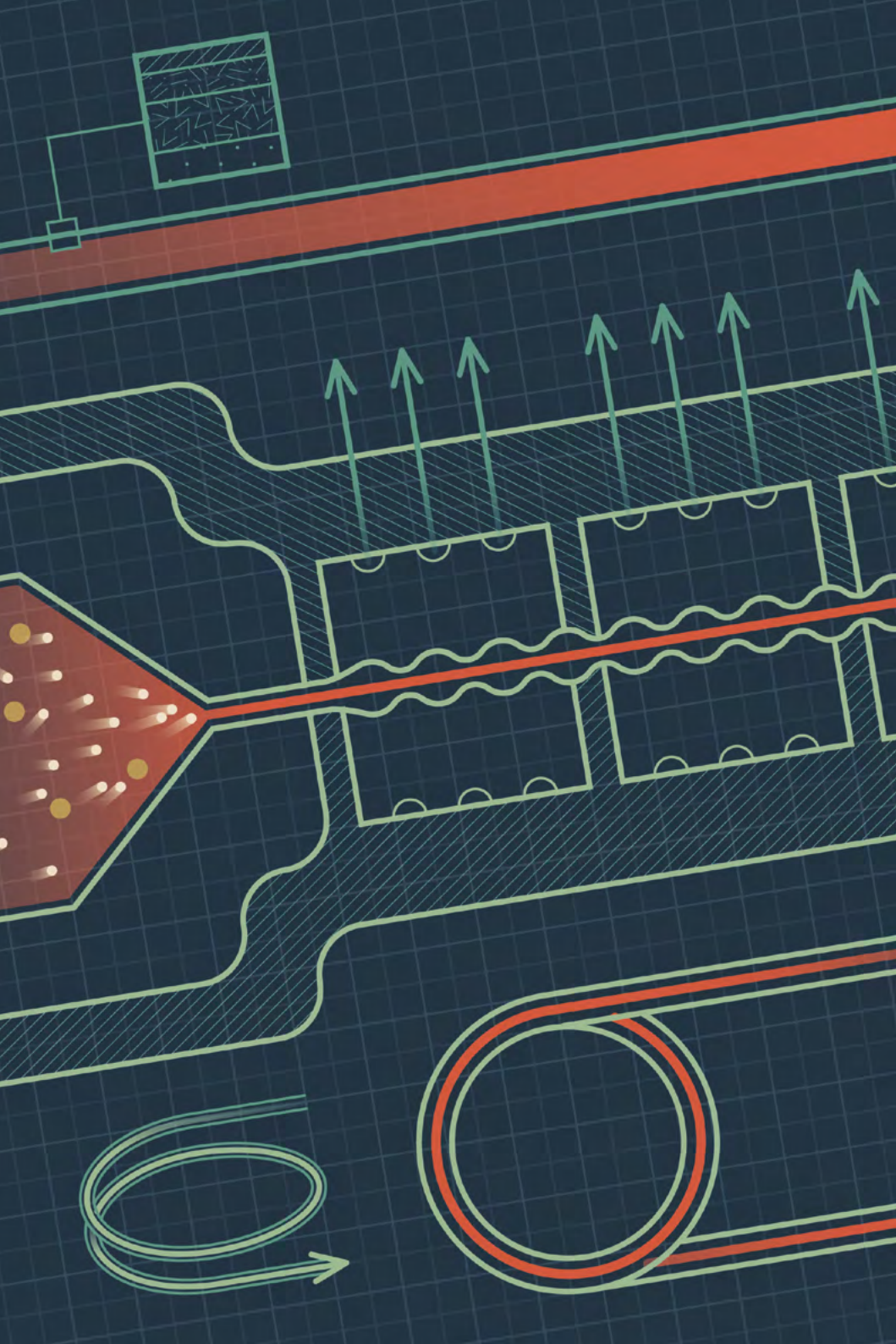
All these fields of science, from the most fundamental to the most applied, have only been able to develop fully by equipping themselves with



a fabulous tool to match their scientific ambitions: the particle accelerator. As a result, together with particle physics and nuclear physics, accelerator physics was born and developed. So much so that there are now many accelerators of lots of types and sizes, used for quite different purposes.

3

Particle accelerators



If you want to visit a sample of accelerators to get a general idea, you'll find that they are so different from one another that it's hard to group them into simple categories. Considering only their overall appearance, we'll see that some can fit into a small room while others occupy an entire region, as their spans vary from a few meters to tens of kilometres. The same applies to their shapes, which can be rectilinear, circular or a combination of the two. Looking at the particles, they can be electrons, protons or heavier ions, accelerated to energies ranging from a few megaelectron volts (10^6 eV) to teraelectron volts (10^{12} eV).⁸ The names by which accelerators are referred to, related to their operating principles, are also not very evocative for the layman: linac, cyclotron, synchrotron, storage ring, etc.⁹ As for the acceleration techniques, they are just as diverse: high-voltage static, radio-frequency cavity, inside a magnetic field or not, at ambient or cryogenic temperature...

Instead of focusing on those aspects which are of particular interest to specialists only, it is perhaps simpler and more meaningful to classify accelerators according to their uses. There are three main types of accelerators use: colliding particles, producing synchrotron radiation, and irradiating specific targets. In this order, these three uses also roughly correspond to the history of accelerator development.

COLLIDING PARTICLES

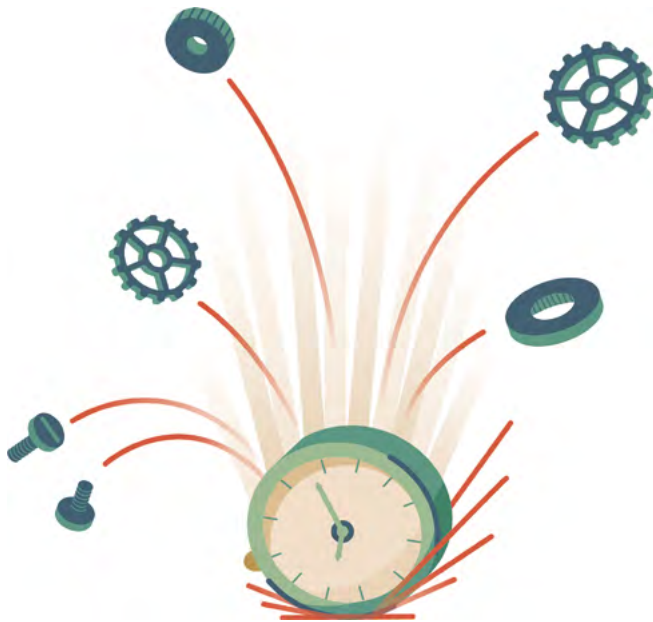
The concept of the accelerator itself arose from the need to collide particles to study the ultimate constituents of matter, i.e. to see what happens on the scale of 10^{-15} m. The original idea came from the experiments made by Ernest Rutherford and Patrick Blackett, who showed that a helium nucleus sent at high speed (by radioactive decay) onto a nitrogen nucleus could be broken into two protons and as many neutrons, with one proton and the neutrons recombining with the nitrogen nucleus to form an oxygen nucleus. All of a sudden, we realized that we could break down matter, dissect it and probe it, even on this infinitesimal scale.

⁸ The electron volt (eV) is a unit of kinetic energy (i.e. the energy related to velocity) usual in the field of particle physics. 1 eV corresponds to the energy of an accelerated electron subjected to an electrical voltage of 1 volt.

⁹ In a linac, a straight line configuration is adopted for acceleration. In a cyclotron, the configuration is circular and the presence of a fixed magnetic field gives the particle beam a spiral trajectory, with increasing radii. In a synchrotron, the configuration is also circular, but the magnetic field varies with each revolution, allowing the particles to follow a circular trajectory with constant radius during acceleration. In a storage ring, acceleration is only marginal to compensate for the various energy losses in order to keep the beam energy constant.

To see what happens on the scale of 10^{-15} m

It has always been intuitive to want to cut or break up matter to study its internal structure and understand its physical and mechanical properties. This is often compared to the most curious children who try to take apart objects or technological devices to understand how they work. With today's smartphones, no longer so easy to dismantle, these children would be naturally inclined to throw them violently to the floor in order to smash them and see what's inside. True, in such a case parents wouldn't be too happy, especially if the smartphone is expensive, but it has to be said that the scientist who seeks to break the material has the same psychological aptitude as these children. In fact, it's possible that some of these children will grow up to be scientists. In any case, scientists are often referred to as "big kids", meaning that they always keep a strong dose of curiosity and want to see things in greater depth. In any case, on closer inspection, this drive to cut things up into small pieces to understand them is in fact one of the foundations of the scientific mind itself. This is the spirit of analysis, which is all about breaking down a complex object into simpler parts and



analysing them separately, in the hope that a good understanding of the individual parts will enable us to, later, understand the whole. This spirit was well put forward by the mathematician and physicist René Descartes in his text *Discourse on the Method* published in the 17th. century.

The need to break matter into ever smaller pieces in order to study its internal structure has been apparent since antiquity, but it wasn't until Rutherford's collision experiments in the early 20th century that we realized we could go down to the scale of the nucleus and the particles that make it up. Einstein's equation $E=mc^2$, discovered around the same time, clearly shows the equivalence between energy E and mass m , via the speed of light c . This formula arrived just at the right moment, as it enables us to study exhaustively the products of collisions in which a certain proportion of the particles' mass is transformed into energy and vice versa.

Particle accelerators proved to be the ideal tools for studying the structure of matter's basic constituents as well as the nature of their interactions. These tools can help us choose, at each stage, the proper theory from among the many possible competing ones, as well as guiding the theoretical reflections of the next stage. Infinitely more precise, regular and reliable than the flow of particles from the cosmos, particle beams delivered by accelerators have led to decisive discoveries in the field. These include, but are not limited to, the strong and weak forces at work in nuclei, the three types of quarks, the W and Z bosons, and the recently discovered Higgs boson. In short, all the building blocks for the so-called standard model, which is supposed to govern the microscopic world that forms the basis of the macroscopic world we live in.

The first accelerators were therefore designed to collide corpuscles, at the request of nuclear and particle physicists. Rather like the big children mentioned above, who, every time they are offered a toy, soon afterwards ask for ever more beautiful and powerful ones, the need was felt to break harder and harder to reach deeper into matter. This meant accelerating particles to ever so higher energies. It is for these communities of physicists that the biggest accelerators have been built.

The biggest and most powerful accelerator of all time is the LHC (Large Hadron Collider) built at CERN, straddling the French-Swiss border near Geneva. It is a circular accelerator twenty-seven km in circumference, with four collision points for protons or heavy ions, at a centre-of-mass

This drive to cut things up into small pieces to understand them is in fact one of the foundations of the scientific mind itself: this is the spirit of analysis

energy of 7 TeV (teraelectron volts). The LHC is in fact the final link in a chain of accelerators that started with an 86 m-long linear accelerator, followed by two other circular accelerators called PS and SPS, with circumferences of 628 m and 7000 m, respectively.

In France, the GANIL (French acronym for Great national accelerator of heavy ions) is a large accelerator centre in Caen dedicated to the study of the nucleus. The facility consists of a set of sources, synchrotrons and transport lines occupying an area of 250 m x 250 m. From collisions of ions hitting nuclei located in fixed targets, other nuclei made up of remarkably diverse combinations of protons and neutrons are generated.

As well as looking to understand the world at the most elementary scale, though, another use for accelerators has arisen in an unexpected way.

GENERATING SYNCHROTRON RADIATION

This second use of accelerators stemmed from a parasitic and unintended phenomenon that arose after designing those devices for the first use described above. To accelerate to ever-higher energies, the circular configuration was adopted so that the particles could take an extra boost each time they pass through the accelerator. This reduces the size of the accelerators compared with an equivalent linear configuration. However, a charged particle in a curved line will necessarily, as in an antenna, emit electromagnetic radiation (see discussion of the laws of electromagnetism below) and therefore lose energy. This is clearly a side-effect that runs counter to the first objective of increasing energy.¹⁰

However, it soon became plain that the radiation emitted has quite exceptional qualities. It is as directional as a laser, has a brightness up to 10,000 times that of the Sun, and has a wide spectral range (range of colours) extending from infrared through visible to X-rays. This radiation – aptly named *synchrotron radiation* – can be used to probe inert or living materials, from micrometres to nanometres (10^{-6} to 10^{-9} m). What's more, the light emitted by successive particle packets is naturally pulsating, which permits studying ultra-fast phenomena on the nanosecond scale (10^{-9} s). This radiation is even more powerful for particles travelling at speeds close to the speed of light, which is easier to achieve for the lightest particles, i.e. electrons.

Circular electron accelerators of the synchrotron type have therefore been designed and perfected to produce as much of this radiation as possible. Like giant, overpowered microscopes, they are designed to study the microscopic structures of materials in all fields of academic and technological research. Each accelerator installation is a synchro-

¹⁰ The large size of circular accelerators is also due to the limited strength of the magnetic elements used to deflect the trajectory of the particles.

tron light-serving centre for communities of physicists, chemists, biologists, engineers (materials, microelectronics, construction, high-tech, et cetera) and art and cultural heritage historians. As a result, every major industrial and economic nation has at least one synchrotron accelerator. Developing countries looking to get their first major research instrument all start by building such an accelerator, which, while not excessive in scale, is useful to all the country's scientific and technological research communities.

The synchrotron accelerator is becoming a key strategic element in a number of national development programs. The greatest and wealthiest nations of our time have historically developed through military power, which inevitably involves the growth of industry, followed later by mastery of the economy, energy and high technology. These nations also now know that the success of all these aspects can only be guaranteed by the development of high-level scientific research. Nowadays, new countries intending to enter the circle of great nations in a peaceful manner can avoid this whole historical process, by jumping at once to the advancement of scientific research, where the synchrotron radiation accelerator is the emblematic element around which many scientific and technological areas can be brought together. It is undoubtedly through this strategic path that countries such as Taiwan, Singapore, Thailand, India or Brazil have decided to install one such accelerator on their territory.

Today's accelerators can be perfected to produce as much synchrotron radiation as possible, a parasitic phenomenon that was initially intended to be avoided. Is this phenomenon unique in the history of science and



technology? In fact, the phenomenon of beneficial spinoffs from one field of study to another is quite common. Military to civilian spinoffs are the most numerous, such as radar and nuclear energy. Some would even go as far as to say that most of the technology we use originated in defence-related research. Spin-offs from the space domain to very terrestrial applications are also commonplace. The use of satellites for weather, environment analysis, cartography (GPS), and others, is a case in point. The phenomenon of serendipity, or the unexpected discovery of a beneficial effect by chance, is also well known. Examples include Archimedes' principle, penicillin, Velcro® and Post-It®. But if we think about studying and designing an object with a given purpose in mind, minimizing at all costs a phenomenon that thwarts this aim, then discovering the virtues of this unwanted phenomenon and optimizing the object to make mas-

sive use of it, this is probably unique. In any case, it goes beyond the notions of beneficial spin-off or serendipity. Accelerators producing synchrotron radiation are nowadays the most widespread research accelerators. In fact, they are arguably the world's most widely used big scientific research instruments.

In France, the SOLEIL synchrotron at the University of Paris-Saclay is the national

centre for synchrotron radiation. This is a set of accelerators including a linac injecting electrons at an energy of 100 MeV into a circular accelerator, which in turn boosts the energy to 2.75 GeV and finally injects them into a storage ring, 354 m in circumference. The SOLEIL is equipped with 29 synchrotron light lines serving just over 3,000 users per year. In Grenoble, a European facility, called ESRF (European Synchrotron Radiation Facility), consists of a set of accelerators ending on a 6 GeV ring, 844 m in circumference, equipped with 40 synchrotron light lines.¹¹

¹¹ ALBA, an electron accelerator complex, is the largest synchrotron radiation source in Spain (part of the ICTS and LEAPS networks). Located in Cerdanyola del Vallès (Barcelona), it is a public facility financed in equal parts by the central and Catalan governments and managed by the CELLS Consortium. Inaugurated in March 2010, the applications of this device, which is used to analyze the properties of matter at the atomic and molecular levels, cover many fields: physics, chemistry, biology, medicine, environment, historical heritage, etc. (N. of the T).

Synchrotron radiation can also be produced by a rectilinear magnetic device called an undulator, which forces the electron beam to make periodic undulations (oscillations), thus describing a large number of small bends. Thanks to constructive interference, the radiation produced during all the bends can be very intense and at noticeably short wavelengths. The use of a large number of undulators can help produce an intense laser effect, known as free-electron laser. This is the principle used at the European XFEL (X-ray Free Electron Laser) accelerator in Hamburg, Germany. Here, electrons are accelerated to 17.5 GeV by a 2 km linear accelerator, then sent through a series of undulators that total a length of 1 km. The laser radiation produced is a billion times more powerful than conventional X-ray sources used for in-depth analysis of inert or living materials.

IRRADIATING SPECIFIC TARGETS

The third use of accelerators is to irradiate a specific target with the particle beam itself. This can be seen as a typical case of spin-off from the fundamental research for which accelerators were originally intended. But what a spin-off! We are witnessing an extraordinary proliferation of accelerators and their fields of application. Today, accelerator beams are used in a huge variety of applications, ranging from scientific research to high-tech activities, from life sciences to the medical sector, from strategic materials to heritage objects. As each application requires highly specialized beam characteristics, an extremely specific accelerator must be optimized for each one. The result is accelerators of quite varied sizes and types, delivering particle beams of completely different natures, intensities and energies.

Particles can be made to collide against each other to study the particles themselves (10^{-15} m scale), but they can also be made to collide in order to produce particles of a specific type, useful for probing materials (10^{-9} to 10^{-6} m scale). This is the case of the neutron, produced by the nuclear reaction known as "spallation", achieved by bombarding a metal target with a beam of protons. Extremely high-flow neutron streams are thus produced by great-sized accelerators installed in research laboratories, accelerating protons up to the GeV range. The most powerful accelerator of this type today is the Spallation Neutron Source (SNS) at Oak Ridge in the USA. It includes an 800-m linear accelerator injecting in a ring 250 m in circumference, which delivers a continuous 2-MW (2 million watts) proton beam. An equivalent European facility, ESS (European Spallation Source), is currently under construction in Lund, Sweden. The neutrons produced are distributed to users via some twenty lines. In addition to fundamental research into the physics of neutron-nucleus

interaction, the molecular or magnetic structure of materials such as gels, polymers, high-temperature superconductors, drugs and magnetic, biological and biotechnological materials is also studied.

At the other end of the scale, we find compact neutron sources in the form of linear accelerators some ten meters long, producing proton beams of a few tens of MeV and a few tens of kW (1 kW = 1 thousand watt). These sources are ideal for replacing small research nuclear reactors for neutron analysis and to produce radioactive isotopes for nuclear medicine.

We are witnessing an extraordinary proliferation of accelerators and their fields of application

In this domain of small linear accelerators measuring just some meters in length and delivering proton or ion beams of a few MeV, we should mention the 24,000 or so accelerators scattered throughout various industrial companies. They are used to engrave or implant ions on electronic components, to cut or weld with particle beams, to harden materials for the automotive or

aeronautical industries, to study high-tech materials such as photovoltaic cells, or to monitor air pollution or gases released by industrial activities. Non-destructive analysis is another application for these small accelerators. These include the supervision of large shipments at border crossings, or the analysis and dating of works of art (such is the case of AGLAE, French acronym for Accelerator Grand Louvre of Elementary Analysis, found at the Louvre Museum in Paris).

Another property of particle beams has also been put to beneficial use: above a certain dose, charged particles can destroy living cells. Accelerators can therefore be used also to selectively destroy bacteria; in other words, to disinfect or sterilize containers or tools in the food or medical industries. The most remarkable application in this aspect is the targeted destruction of cancer cells, while preserving healthy cells in the vicinity. This is made possible by the high stability of the particle beam, its millimetric size and its penetration in human tissue at a defined depth, depending on the beam energy. This is known as *proton therapy* (treatment by irradiation with a proton beam), or *hadron therapy* (heavy ion beam). More than 100 accelerators specialized in these techniques have treated some 300,000 patients to date. This is recognized as a highly valuable way of treating cancers, complementing radiotherapy and chemotherapy, particularly in the case of small or deeply buried organs. More generally, there are some 11,000 accelerators worldwide dedicated exclusively to medical therapy.

But that's not all. Social issues of paramount importance to the future of us all also call for accelerators. These include the production of energy on a large scale, in a safer and more sustainable way, which requires accelerators even more powerful than the existing ones. They must be able to deliver proton beams up to 100 MW, to achieve a flow of neutrons with the characteristics needed to obtain energy production based on nuclear fission or fusion.

Nuclear fission is the process used in all existing reactors to harness the energy released by the fracturing of heavy atomic nuclei (uranium, plutonium) into lighter ones. The resulting, very long-lived and toxic, radioactive waste can be transmuted to reduce its lifespan and toxicity, by interaction with neutrons produced by accelerators, thus reducing both dangers. In the longer term, there are even plans to use a neutron-producing accelerator to drive nuclear fission reactors. Currently, these



reactors employ the so-called chain reaction process, where neutrons produced in excess by the nuclear reactions themselves will trigger other cascading reactions, with inherent risks of accidental divergence. The idea is to use sub-critical reactors that require a well-controlled external neutron flow to trigger nuclear reactions, thereby dropping any possibility of unwanted divergence. This type of research began in China a few

Social issues of paramount importance to the future of us all also call for accelerators

years ago, under the name C-ADS (Chinese Accelerator-Driven System), and the first installations are currently underway in Huizhou, Guangdong province. In Europe, the MYRRHA project in the same field is about to be implemented in Mol, Belgium.

Nuclear fusion, currently only at the research stage, involves harnessing the energy released by the assembly of light atomic nuclei (helium, deuterium) into heavier ones. These fusion reactions are extremely

difficult to achieve, since the electrical repulsion of positively charged nuclei must be overcome. They are studied in reactors called “tokamak”,¹² where there is no risk of nuclear runaway, since any incident will see the nuclear reactions extinguish themselves by repulsion of the constituents. However, for the next generation of tokamaks, we still don't know what materials we should be using to manufacture the walls of the combustion chamber, which will have to withstand the very intense flow of neutrons coming from the fusion reactions. Research in Europe and Japan is focusing on accelerators capable of mimicking this neutron flow, to characterize the appropriate materials. This involves producing a continuous beam of several MW of deuterium (1 proton + 1 neutron), equivalent to the electricity consumption of 500 homes, concentrated in a space of just some twenty centimetres. A prototype accelerator of this class has been designed and built in Europe, and is currently being installed in Rokkasho, Japan.¹³

.....
12 Achieving an efficient fusion reaction requires that the extraordinarily hot (plasma) and fairly dense fuel be confined for a sufficient time (“Lawson's criteria”). The main confinement methods are gravitational, magnetic and inertial confinement.

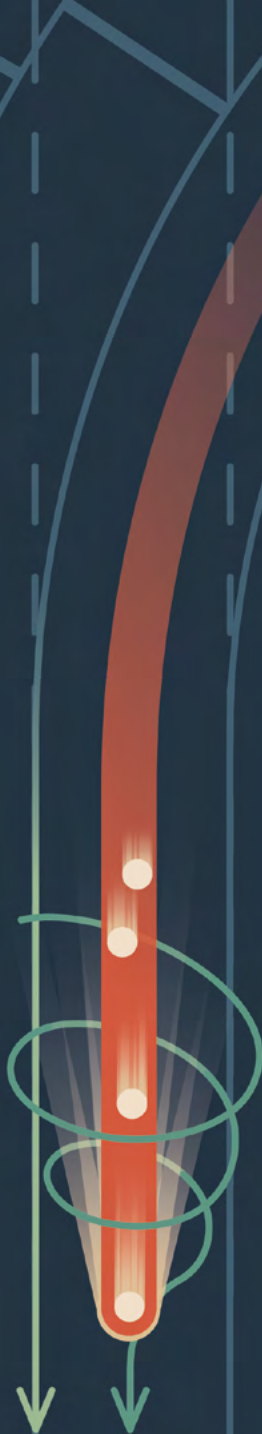
- The fact that stars (the Sun) exist shows that the best method is gravitational, with confinement times spanning thousands of years. However, it is inapplicable on Earth, since we do not have the technology to create a sufficiently strong gravitational field.
- The most studied method is to confine the fuel by means of magnetic fields. This is possible because the fuel is strongly ionized (the particles that form it are charged) so that a magnetic field can exert a force on it. The non-existence of monopoles requires the use of toroidal(doughnut)-shaped magnetic bottles, and the tokamak is one of such magnetic confinement technologies.
- Another method is to trigger the fusion reaction by compressing a certain amount of fuel in a tiny space by means of the pressure that radiation can exert on matter. The required radiation, which has to be very powerful, is generated by lasers, the power of which is concentrated at a point where a small fuel capsule is placed. The confinement time is determined by the inertia of the matter as it expands after compression.

(N. of the T.)

13 This is the LIPAc facility, the prototype of the future IFMIF (N. of the T.).

4

Particle beam physics



A tool that has been designed for a given purpose and proves useful for other applications is, after all, commonplace. But the fact that such usefulness encompasses so many different fields of activity, on such different scales, and in such varied configurations and sizes, **is probably unique in the history of science and technology**. Classically, tools can be categorized as analysis tools, production tools, cutting tools, and so on. But accelerators can be used to understand, analyse, cut, produce, engrave, fabricate, heal, and probably more. They run on scales from 10^{-15} to 10^{-1} m, i.e. 14 orders of magnitude. They help us answer questions that have haunted humankind for millennia, supply solutions to the needs of today's society on many levels and are an essential tool for a greater energy control in the future.

This extraordinary flexibility has only been possible because particle accelerators are a research discipline in their own right. Initially a research tool, they have now become a research object. This is because, depending on the field, particle beams are constantly being asked to be more or less penetrating, more concentrated or more spread out, more pulsed or more continuous, more intense or more energetic, more stable or more precise, more reliable or more powerful. To meet these demands, which often join several of these criteria at the same time, the accelerator field has had to bring together many scientific and technical professions from a wide range of cutting-edge disciplines: electromagnetism, radiofrequency, magnetism, beam diagnostics, superconductivity, cryogenics, clean-room chemistry, materials science, vacuum technology, precision mechanics, etc.

But that's not enough. After all, the demands primarily concern the characteristics of the beam, the central object of any accelerator. And, because the beams comprise billions of 10^{-15} m particles that need to be accelerated from near-zero to near-light speeds, while being contained in a space of the order of a centimetre with ultra-precise properties, this has only been possible through the development of a new discipline of physics: particle beam physics.

It's worth taking a closer look at this new-born discipline, to highlight both the laws of physics at work, which allow us to link it to the most well-known disciplines of physics, and its particularities, which allow us to distinguish it from these disciplines and place it in relation to them.

Accelerators help us answer questions that have haunted humankind for millennia, supply solutions to the needs of today's society on many levels and are an essential tool for a greater energy control in the future

To do this, we'll start by showing what a particle beam looks like in an accelerator. We'll then introduce the only two actors that can intervene on such a beam: the electric field and the magnetic field. We'll then consider how to produce such fields and how to generate those particles, and then be ready to review the devices in an accelerator that enable it to carry out its missions. All this, with wide-ranging detours into the physics of the phenomena and objects that surround us in our everyday lives, as well as the physics that reigns in the entire Universe.

THE PARTICLE BEAM

Once again, we should remember that we're talking about electrically-charged particles. There are only two types of charge, positive and negative, noted + and -. Their mutual relationship follows an ultra-simple rule. Charges of the same sign (+ and +, or - and -) repel each other, and charges of opposite sign (+ and -) attract each other. Also, the closer the charges are to each other, the greater the forces of repulsion or attraction.

Let's not forget that all the matter around us, and even ourselves, is constituted by atoms, which are made up of a + charged nucleus at the centre, surrounded by - charged electrons. As + and - attract each other, the atom is stable when there are as many + as - that perfectly compensate for each other, i.e. when it is electrically neutral. This is generally the case in nature, which means that most of the time we don't get electrocuted or receive an electric shock as soon as we touch an object.

Now, let's consider a set of particles to which no particular force is applied. These particles make random movements in any direction, each at its own speed. This is called thermal agitation, and it characterizes the temperature of this collection of particles. The higher the temperature, the faster the particles move, and they tend to fill a larger space if not confined. Nevertheless, this collection stays collectively put and goes nowhere. It's not a particle beam. The equivalent can be found in a school playground, where children are free to go about their own business, with no instructions from teachers. We could also speak of thermal agitation if the governance methods of a state or a corporation didn't set or maintain a precise course. Indeed, a step to the left and a step to the right, a step forward and a step back, lead nowhere.

In accelerators, we only deal with particle beams, i.e. a set of particles endowed with an overall speed. It's like a group of athletes in a foot race. The particles don't have exactly the same speed, but it's pretty similar, and they're heading in roughly the same direction. This set of particles is characterized by its kinetic energy, i.e. the energy linked to speed, which is greater at higher speeds. There are many other types of energy,

such as thermal energy, mechanical energy, chemical energy or mass (relativistic) energy, which can be transformed from one form into another. For example, a car travelling at high speed has great kinetic energy, which can be transformed into mechanical and thermal energy when it hits an obstacle, breaking it and releasing heat. But in the context of accelerators, the word "energy" is in itself technical jargon, as it is used to refer exclusively to speed-related energy.

And it's this energy that we want to increase in accelerators, by speeding up the beam, i.e. by increasing the overall speed of the particle packet. In short, to transform a foot race into an automobile competition.

ACCELERATE... AND MORE

To increase (or decrease) the speed of an object, a force must be applied. For a ball at rest on the lawn to fly towards the goal, you must kick it. Let's imagine we're riding a bike, for example. If there are no forces exerted on the bike, its speed stays constant. If there are frictional or braking forces, the bike will slow down, its speed decreasing. If, on the other hand, we want to make the bike go faster, in other words, increase its speed, we must start pedalling.

Another crucial point is the direction of the force relative to the direction of travel. To see this clearly, let's consider the case of towing. Let's imagine that we want to make a barge move faster in a straight canal, by having it pulled with a strong rope by a horse trotting on the bank. The barge moves in the direction parallel to the canal, thanks to the correct orientation of the rudder. The force exerted by the horse has a direction represented by the position of the rope, which is inclined compared to that of the canal. This force can be broken down into a component parallel to the boat's direction of travel and one perpendicular to it. Intuitively, it's clear that only the parallel component can contribute to increasing the boat's speed, thus accelerating it and increasing its (kinetic) energy. As for the perpendicular component, it can only be used to deviate the boat's trajectory (if the rudder's orientation has not been readjusted) and can in no way change its speed, and therefore cannot change the barge's (kinetic) energy.

So, in order to accelerate particles, a force must be exerted parallel to the direction they move in. But in an accelerator, a force perpendicular to this direction is also necessary if you want to deflect the particles' trajectory to guide them towards the collision site (towards the cancer cell we want to treat, for instance), or to make them produce synchro-

In accelerators, we only deal with particle beams, i.e. a set of particles endowed with an overall speed



tron light. On the other hand, perpendicular forces directed towards the inside of the beam are also desirable to focus (regroup) the beam to counteract the forces of repulsion between particles of the same charge that constantly threaten with splintering the beam.

In an accelerator, you don't just accelerate particles. Bear in mind that they must not only be accelerated, but also generated, guided and focused. Four actions for which you need to exert force.

However, a mechanical force cannot be applied to a particle, the way we did in all the examples considered above.

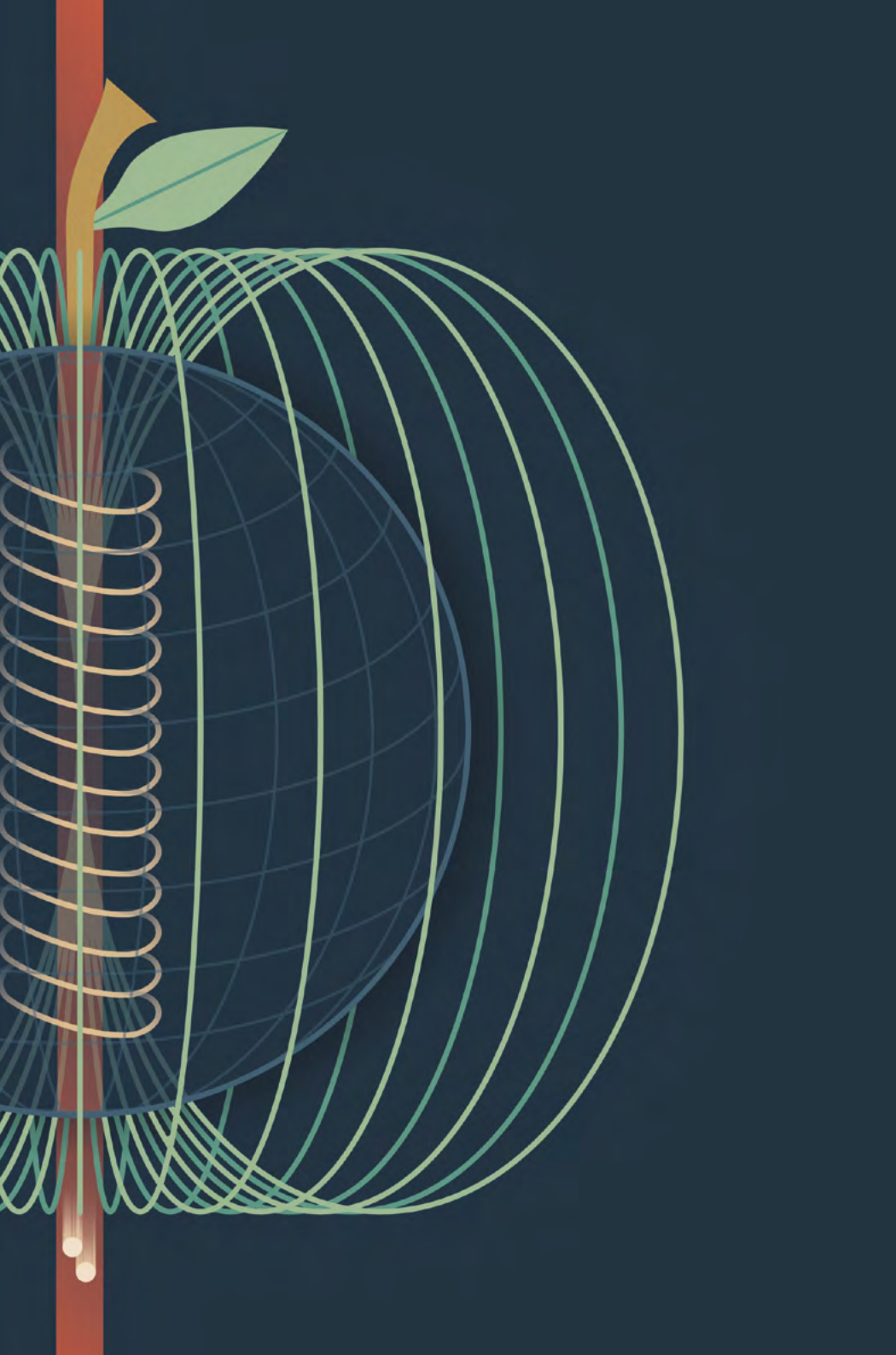
Let's not forget that there's an abysmal vacuum inside an atom, because the size of the few particles that make it up is 100,000 times smaller than that of the atom itself. In our macroscopic, human-scale world, if you want to accelerate a given object - a ball, for example - to set it in motion or make it move faster, you simply push it with our hand, or kick it. If you try to do the same with a charged particle, even if you can see it and aim to flick it, there's no chance of hitting it, because it would pass through our atoms without any direct contact. Pretty much the same thing happens on the scale of the Universe when galaxies, those collections of billions of stars, collide. We know, for example, that the galaxy

in which our solar system is located, the Milky Way, will collide with its neighbour, the Andromeda galaxy, in around 4 billion years' time. But don't panic: apart from in the central parts, the exceptionally low density of stars means that this collision will go unnoticed by individual stars.

Let's go back to our particles. To apply a force to them, we must necessarily resort to an electric or magnetic field.

5

Electric and magnetic fields



There are scarcely two “entities” that can exert a force on a charged particle: the electric field and the magnetic field. Although these are two newly introduced terms at this stage, it is neither possible nor useful to give exact definitions yet.

TO DEFINE OR NOT TO DEFINE

In science in general, and in this rationale in particular, we always strive to define the concepts we introduce as precisely as possible. So, you might legitimately expect this to be done for the electric and magnetic fields. But no; these are first principles in physics, just like the gravitational field, for example, whose definitions are of interest only to ultra-specialists in the subject. In mathematics, and more specifically in geometry, the point, the line and the plane are also first principles which cannot be precisely defined. We will come back later to this notion of first principle, as fundamental to science as it is to any other type of human thought.

In any case, even if you don’t know what these fields are, there’s little point in defining them. Like the gravitational field, these fields are invisible and impalpable. Instead of trying to define them, it’s more useful to say where they are and describe their effects.

For example, the gravity prevails around all massive objects, including planets and stars, and consequently around our Earth. This field exerts a force on objects with mass, of which we are one, so that we are drawn towards the centre of the Earth, which is to say, gravity bestows weight upon us. Electric and magnetic fields surround charged particles and exert forces on other charged particles. So, we only feel their effects through the charged particles in and around our bodies. As all matter is made up of charged particles, we are permanently bathed in these and in electric and magnetic fields. Just like in the gravitational field, except that the latter is much, much weaker in comparison.¹⁴ Hence the interest in electrical and magnetic phenomena.

¹⁴ When we consider two charged particles separated by a given distance, there is an electric force (attractive or repulsive) due to their charges, and a gravitational force (always attractive) due to their masses. For two electrons, the former is 10^{42} times greater than the latter, and for two protons, the figure is 10^{36} ; both are colossal. In everyday life, however, we’re more aware of the gravitational force, because it adds up for all particles, whereas the electrical force is offset by overall electrical neutrality. We only become aware of the latter when this neutrality is broken, either in man-made electrical currents generating up to hundreds of thousands of volts, or in natural storms, in which lightnings involve up to hundreds of millions of volts.

Instead of trying to define what electric and magnetic fields are, it’s more useful to say where they are and describe their effects

To fully understand them, all we need to do is look at the effects of electric and magnetic fields on charged particles, and then see how these fields are generated. Which is what we're going to do right now.

THE EFFECTS OF ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS

Like the velocity and force discussed above, the electric field is a directional magnitude, often represented by an arrow showing its direction, and whose length represents its modulus. A charged particle placed in this field will experience a force parallel to the field. This force will point in the same sense as the field when the charge is positive, and in the opposite sense when it is negative. So, provided it is properly oriented, an electric field can accelerate particles as well as guide or focus them, by applying it either parallel or perpendicular to the direction in which the particles are moving.

In principle, then, one might think that the use of the electric field alone would be sufficient to perform all the actions you want in an accelerator. From a practical point of view, however, this is not quite ideal. As particles have slightly different speeds and directions, due to repulsions between particles of the same sign, which are randomized by thermal agitation, the electric field applied to accelerate the particles will also deflect them a little, and, in turn, the one applied to deflect or focus them will also accelerate them a little. It is therefore impossible to decouple these two types of action, which have vastly different objectives: one is to increase the energy of the particle beam, the other is not. On the other hand, the electrical force is very weak because it is proportional to the particle's electrical charge, which is itself an infinitesimal quantity. The higher the particle's velocity, the greater the force needed to bend its trajectory. At speeds approaching the speed of light, there would be no electric field strong enough to significantly deflect a trajectory. Hence the supplementary use of magnetic fields.

The magnetic field is also a directional magnitude and is similarly represented by an arrow showing its modulus, direction and sense. The force this field exerts on a particle is radically different from that of the electric field. The magnetic force is proportional to the particle's charge and velocity, and its direction is always perpendicular to the particle's velocity. A first consequence is that the magnetic field has no effect on a particle at rest, but when the particle's speed is great, the magnetic field is enough to achieve the same desired effect. The second consequence is that the magnetic field cannot accelerate (or decelerate) a particle. Under no circumstances can it change their (kinetic) energy. It is then used to drive or focus particles, keeping their energies constant.

With their different effects on particles, electric and magnetic fields are used in complementary ways in accelerators. The former is used primarily to accelerate, and to focus, at low energies. The latter is used exclusively to guide and focus particles.

Once we know what these forces are, we can ask the question: what does the motion of a particle subjected to such forces look like?

For the electric force, which is independent of the particle's motion, it's easy enough to imagine. Particles move, or are deflected, in the direction in which the force pushes them. Let's take the bicycle example again. If you start going and decide to pedal, the result is easily predictable. If you pedal forward, the bike will go faster. If you pedal backwards, the bike will slow down. If you turn to the right, the bike will be diverted to the right, and if you turn to the left, the bike will be diverted to the left.

For the magnetic force, which depends on the particle's movement at any given moment. Continuing with the example of the bicycle, if you want to push it perpendicular to its speed, i.e. its direction of travel, what's going to happen? I'll tell you: the bike will go round in circles. Once you've understood this result, you'll intuitively feel that the bike will always be deflected to the same side, but you're probably not totally convinced that the bike will really describe a circle. To convince you, let's consider another scenario. Imagine you're a cowboy who's an expert at lassoing. Seeing a horse running in front of you in a straight line, you throw your lasso, catch it, and pull back. The lasso is perpendicular to the horse's direction of travel. Imagine that the horse is particularly stubborn, that it continues to run at the same speed as if it had not been caught (which is the case with particles, that don't have, of course, any self-consciousness) and imagine that you, being no less stubborn, pull on the lasso with constant force (which is the case with the magnetic field, also devoid of any will of its own). You'll see that the horse will automatically wrap itself around you and describe a circle of which you are the centre. This case is the same as that of the bicycle, except that now the force is materialized on the rope, making it easier to grasp. You can also feel that, for the same horse speed, the stronger the force pulling on the lasso, the closer the horse will have to run to the cowboy, as the circle described by the horse will have to be smaller.

For the electric force, which is independent of the particle's motion, it's easy enough to imagine. Particles move, or are deflected, in the direction in which the force pushes them



If a charged particle that encounters a magnetic field is captured by that field, and then, the particle starts turning around in it

examples. But wait a little longer. First, let's take a look at how electric and magnetic fields are generated. Then we'll be fully equipped to explore the exciting phenomena of Nature and the Universe around us.

To sum up, a charged particle that encounters a magnetic field is captured by that field, like the horse lassoed by the cowboy in the example above. And then, the particle starts turning around in it. This property is used in accelerators to guide or focus particles. To deflect them a given angle, a magnetic field is installed along their path, forcing them to describe an arc of a circle, over a length corresponding exactly to the desired angle of rotation. Before and after this field, the particles follow a straight trajectory. Note that in this configuration, the field is perpendicular to the particle beam and its magnitude must be constant over the entire length of the beam, so that all particles see the same field and rotate the same angle. To focus a particle beam, a magnetic field is installed parallel to the axis of the beam, forcing the particles to rotate around this axis. This allows us to focalize the beam to prevent its bursting due to internal repulsive forces. Additionally, it reduces the transverse beam size; the stronger the field, the smaller that size.

All these movements of charged particles following acceleration by an electric field or capture by a magnetic field can of course be found everywhere in nature, and it's very interesting to examine a few

6

Generating electric and magnetic fields

There are basically two ways of producing these fields. The first is to do it statically, which is simpler in principle but has practical limits that are difficult to overcome. The second is to use time-varying phenomena - in other words, electromagnetism - to push these limits much further.

STATIC ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS

The simplest way to produce an electric field is to proceed in the same way as for making a battery. You need two electrically conductive (metal) plates separated by an insulating -dielectric- material, such as air. Positive charges are accumulated on one plate, and negative charges on the other. If a positively charged test particle is deposited between the plates, for example, it is repelled by the positively charged plate and attracted by the negatively charged one. This force on the particle shows that there is indeed an electric field between the two plates, and that a particle injected into it can be accelerated.

The first accelerators were built on this principle, as are some of today's, which develop relatively low energies of the order of a few tens of MeV. This technique suffers from the limitation of the amplitude of the field produced, a disadvantage when you need to accelerate particles to ever higher energies. Apparently, to produce a higher field, it should be sufficient to deposit more charges on the two conducting plates. However, beyond a certain limit, the attractive forces of opposite-sign charges on the plates become so powerful that these charges can force their way through the insulator to meet and neutralize each other. This is the phenomenon of dielectric breakdown, which can be very violent, resulting in a powerful electrical discharge (flashover) between the two plates that generates a detonation with an intense release of light and heat that can destroy the device. This phenomenon can be seen on a much larger scale, with the thunderbolts in a natural storm, when there is too great an accumulation of charge at the bottom of the clouds, or on a smaller scale, in the batteries of our electronic devices, with consequences that can be no less dramatic. In our everyday smartphones, we ask batteries to be ever more powerful, to be able to cope with heavier tasks over longer periods of time. At the same time, we want to keep the size of these devices to a minimum, to meet the demands of urban mobility. Batteries must therefore be able to accumulate more charge on their terminals, which are separated by a thinner insulation. Unless they are manufactured with the utmost care, overheating or a breakdown leading to fire is a real risk. We all remember a certain model of high-end smartphone that was banned from flying a few years ago, following battery incidents of this kind.

As for the static magnetic fields, these can be produced by permanent magnets made from an alloy of paramagnetic materials such as iron, nickel, cobalt, etc.¹⁵ With these small magnets –like in the ones available in toy stores– the magnetic field is conventionally oriented from south to north pole. Such a magnet is an effective way of materializing the magnetic field. Metal alloys can be magnetized to generate powerful magnetic fields, up to 10,000 gauss. To get an idea of the magnitude of this field, we can refer to the Earth's magnetic field (thanks to which we can find our bearings with a compass), which is 0.5 gauss. The field thus produced has a fixed amplitude, however, something not well suited to accelerators, which require fields that should be more powerful and, above all, variable at will, so as to be able to precisely adjust the position and size of particle beams.

Not powerful enough, or not easily variable, these are the inherent limits of static electric and magnetic fields that must be overcome. This can only be done with electromagnetic fields.

ELECTROMAGNETIC FIELDS

So far, we've been concerned with the force fields that can affect a charged particle. We have considered cases where these fields are produced by a given device and where a particle arriving in these fields will be subjected to *ad hoc* forces with precise properties. The electric and magnetic fields and the charged particle have been treated as if they were three independent entities. However, a closer look reveals that, even conceptually, this is rather difficult to accept. How can the forces released by these fields depend so precisely, so exactly, on the intrinsic characteristic of the particle –namely, its charge– if such charge is independent of the fields? More troubling still, how can the magnetic field be always aware of the particle's speed, to constantly adjust the magnetic force in such a way that it is always rigorously proportional to, and at the

¹⁵ Indeed, the more unpaired electrons a material contains, the better its magnetic qualities, so that the magnetic moments of those electrons can be aligned. Lanthanides are therefore ideal candidates, since they contain many unpaired electrons. To date, one way to align these electrons has been to bond a lanthanide with iron (giving rise to very powerful permanent magnets, such as neodymium magnets). It is obvious that, by replacing iron with another lanthanide, an even stronger permanent magnet would be possible to make. However, the difficult task of bonding lanthanides was not achieved until January 2022, thanks to the efforts of Colin A. Gould's team in the Department of Chemistry at the University of California, Berkeley (USA). These researchers have succeeded in linking two lanthanides by bringing about the alignment of the mismatched electrons of both atoms (the bond, based on a single shared electron, is so weak that both lanthanides are held together by the intervention of three iodine atoms). The new molecule is extremely magnetic. In fact, if it is formed with two terbium atoms and the temperature is about 50 K, the coercive field exceeds 250,000 gauss. (N. of the T.)

same time perpendicular to, this speed? The only way to resolve these conceptual difficulties is to admit that these three entities are, in fact, intimately linked, that they are simultaneous manifestations of the same physical phenomenon. This phenomenon has been given a name: electromagnetism.

Indeed, a more correct representation is to consider that the electric field results from the interaction between two charged particles, with the repulsive or attractive forces already mentioned, known as the Coulomb forces. It's important to note in this context that, owing to symmetry, the force exerted by charge 1 on charge 2 must be the same as that exerted by 2 on 1. Consequently, a charge creates an electric field according to a given law, which in turn exerts an effect on a charge entering this field according to the same law. It was indeed with positive and negative charges distributed over two conductive plates that an electric field was produced, enabling other charges to be accelerated.

The same type of representation is valid too for the magnetic aspects. The magnetic field arises from the interaction between two charges moving in a curved trajectory. A charge rotating around an axis gives rise to a magnetic field aligned with this axis, and a charge entering this field undergoes a force that causes it to rotate around this field. This principle opens at once the possibility of producing a magnetic field with rotating electrons, i.e. with an electric current loop. This is how the magnetic field is generated in accelerators.

The device is called an electromagnet because electricity is used to generate a magnet. It's also known as a magnetic coil, or even solenoid, a jargon term meaning a spool on which isolated electrical cables are wound. The magnetic field produced can easily be adjusted by varying the electric current flowing through the cable. The transverse or longitudinal amplitudes of this field are given respectively by the cross-section and the length of the coil. A superconducting electromagnet cooled to cryogenic temperatures can produce a magnetic field of up to 100,000 gauss.

At this point, it's clear that electric and magnetic fields can't be independent phenomena either. The term electromagnet is already very evocative. We've also just pointed out the interdependence between a charge and the electric field on the one hand, and that between the same charge and the magnetic field on the other. In the latter case, the speed (of the particle) comes into play, invoking notions of movement and variation over time.

The path to electromagnetism was therefore inevitable. By the mid-19th century, numerous experiments by Johann Carl Friedrich Gauss, André-Marie Ampère, Michael Faraday, Hans Christian Ørsted, etc. had

The path to electromagnetism was therefore inevitable

already highlighted the links between charge, electricity and magnetism. The result was the beautiful synthesis of the theory of electromagnetism, elegantly condensed into Maxwell's four equations.¹⁶ Without going into the technical details, let's just say that this theory essentially states that electrical and magnetic phenomena are not independent, since any variation in time of an electric field will give rise to a magnetic field, and vice-versa.

This truly groundbreaking advance in scientific thinking led to the concept of electromagnetic wave, which has revolutionized our knowledge of the universe around us, as well as radically changing our everyday lives. What is an electromagnetic wave? Just as a wave on the surface of the sea is an oscillation of water particles, an electromagnetic wave is a joint oscillation of the electric and magnetic fields. Light is an electromagnetic wave, as are radar, radio, television, telephone, Bluetooth, Wi-Fi and others. We are constantly surrounded by electromagnetic waves, both natural and manufactured.

An electromagnetic wave is generated whenever there are electric charges moving at variable speeds over time (that is to say, when the direction or modulus of their speed changes over time). This is the antenna effect, where electrons are made to oscillate along a metal rod to produce an electromagnetic wave which, in turn, will produce the opposite effect, making the electrons of any other metal rod in its path oscillate. It is the principle on which the transmission and reception of Hertzian waves (radio, television) are based, as well as the principle behind the synchrotron radiation described above. Electrons following a curved trajectory have a speed that continuously changes direction and must therefore radiate an electromagnetic wave called synchrotron light in this context.

We can also capture and trap an electromagnetic wave in a metal cavity, which acts as a resonance chamber. The wave will then adopt a particular configuration depending on the size and shape of the cavity, and,

¹⁶ Undoubtedly, the contributions of the Danish Ørsted, made in 1820, were decisive in establishing the profound unity between electricity and magnetism. However, of interest is a note, which appeared on January 26, 1852, in the *Gaceta de Madrid* (p. 3, section "Miscellaneous"), on the possibility that two individuals separated by a great distance could communicate with each other by means of a magnetic needle. It quoted a compilation of problems entitled *Deliciae Physico-mathematicae oder Mathematische und Philosophische Erquickstunden*, by the German Daniel Schwenter - professor of mathematics and oriental languages at the University of Altdorf - and published posthumously in Nuremberg, in 1636, almost two hundred years before the experiments made by the Danish scientist! (N. of the T.)

what's more important, will be able to be strongly amplified. This is what happens in the resonance boxes -or chambers- of musical instruments, where it is a sound wave, an oscillation of the propagating air pressure, which is strongly amplified. The sounds produced by violins, pianos or guitars can be easily perceived in large concert halls thanks to their respective resonance boxes. Without them, the sounds generated by their strings would be barely audible. In accelerators, this principle of wave trapping is applied too. The accelerator cavity is perfected to amplify as strongly as possible the electrical component of the electromagnetic wave as the particle beam passes through it. The electric field obtained can then be tens of times greater than that obtained statically, in a footprint tens of times smaller.

FROM ACCELERATORS TO EVERYDAY OBJECTS AND THOSE OF THE UNIVERSE

We have just reviewed the physical processes involved in accelerating, guiding, and focusing particles in accelerators. These processes are not, however, specific to the world of accelerators, as they are in the core of electromagnetic phenomena that manifest themselves on all (and I mean all) scales of our world. It's instructive to take a quick look around to see that the same processes govern many familiar situations.

Let's take as our starting point the solenoid, a coil wound with electric cables which, as soon as an electric current flows through them, produces a magnetic field aligned with the coil's central axis. Quite simply, it's an inverted dynamo. The dynamo is the small device attached to a bicycle wheel which, when you pedal, generates an electric current capable of lighting a bulb at dusk. The dynamo is made up of an electric coil with a magnet at its centre, whose rotation is linked to the wheel. As you pedal, the magnet rotates, producing a time-varying magnetic field that generates the electric current in the coil. Electromagnetically speaking, this is the opposite of the solenoid phenomenon.

On a larger scale, the same dynamo principle is applied to generate the electricity distributed to all homes. This time, the coils are a few meters in diameter, and are similarly equipped with permanent magnets in their centres. These magnets are rotated by propellers attached to them, which are driven either by a waterfall from a hydro dam, or by a high-pressure gas flow from a thermal or nuclear power station.

The physical processes
involved in accelerators
[...] manifest themselves
on all scales of our
world



In all these cases, mechanical, thermal or nuclear energy is transformed into electrical energy.

On an even larger scale, the Earth's magnetic field –the one that orients our compasses and helps us find our way by showing the direction of North– is governed by the same phenomena. By virtue of its constitution and the mechanism by which it was formed through gravitational accretion, the Earth has an extremely high inner temperature, exceeding 5,000°C towards the centre. The resulting thermal agitation causes all crystals, molecules and atoms to break apart. Rocks are liquefied and + and – charges are separated, breaking the electrical balance and neutrality of the medium. The Earth's rotation then generates the rotational movement of the charges which, like an electric current loop in a colossal solenoid, generates in turn a magnetic field aligned with the Earth's North-South axis of rotation, just as it happens in a solenoid. The Earth's magnetic field lines form then a network of lines converging towards the two poles that encompass the whole planet.

Let's leave the Earth for a moment and head for the Sun. With a mass 300,000 times greater, the Sun is inevitably much hotter. Its surface reaches 6,000°C. Thermal agitation is such that all matter is in a state of plasma, i.e. a gas in which all atoms are dissociated into charged particles with exceedingly high velocities. These particles are then expelled *en masse* into space, and in particular towards the Earth, in a flow of particles known as the solar wind. As mentioned above, high doses of charged particles can cause severe damage to living cells. It has been estimated that if all the solar wind reached the Earth's surface, life as

we know it today would not have been able to appear and develop. This solar wind could also have blown our atmosphere completely into space, making our Earth as sterile as Mars. Fortunately for us, this didn't happen, thanks to the Earth's network of magnetic field lines, which capture a large proportion of the particles, forcing them to turn around these lines, just like the horse captured by the cowboy described above. It's only when the solar wind is a little stronger that its particles can penetrate to the poles and cause the *aurora borealis* or northern (and southern) lights, by interacting with the atoms in the air.

It should be noted, however, that not all particles can leave the Sun's surface, as some are readily captured by the numerous magnetic lines that prevail locally, originating from the gigantic vortices in its atmosphere that are equivalent to so many huge electric current coils. When two nearby vortices rotate in opposite directions, this creates a pair of confined magnetic North Pole and South Pole, generating a magnetic loop exiting through the axis of one vortex and entering the other. Particles captured in the loop wrap around it in spirals, moving back and forth between the two vortices. When one of these vortices disappears, the magnetic loop is broken, and the particles are expelled into space. Depending on the “solar weather”, these local magnetic loops and their captures can occur on a massive scale, releasing colossal amounts of additional particles. At the Earth level, this is referred to as a solar storm, rather than a solar wind. Astronauts and passengers on high-altitude flights might experience acute particle absorption peaks. Countries near the North Pole are the most vulnerable to these storms. In 1989, a powerful solar storm knocked down all power in Quebec (Canada), plunging millions of people into darkness and causing millions of dollars in economic losses. At the time, the aurora borealis was visible as far away as Texas in the US.

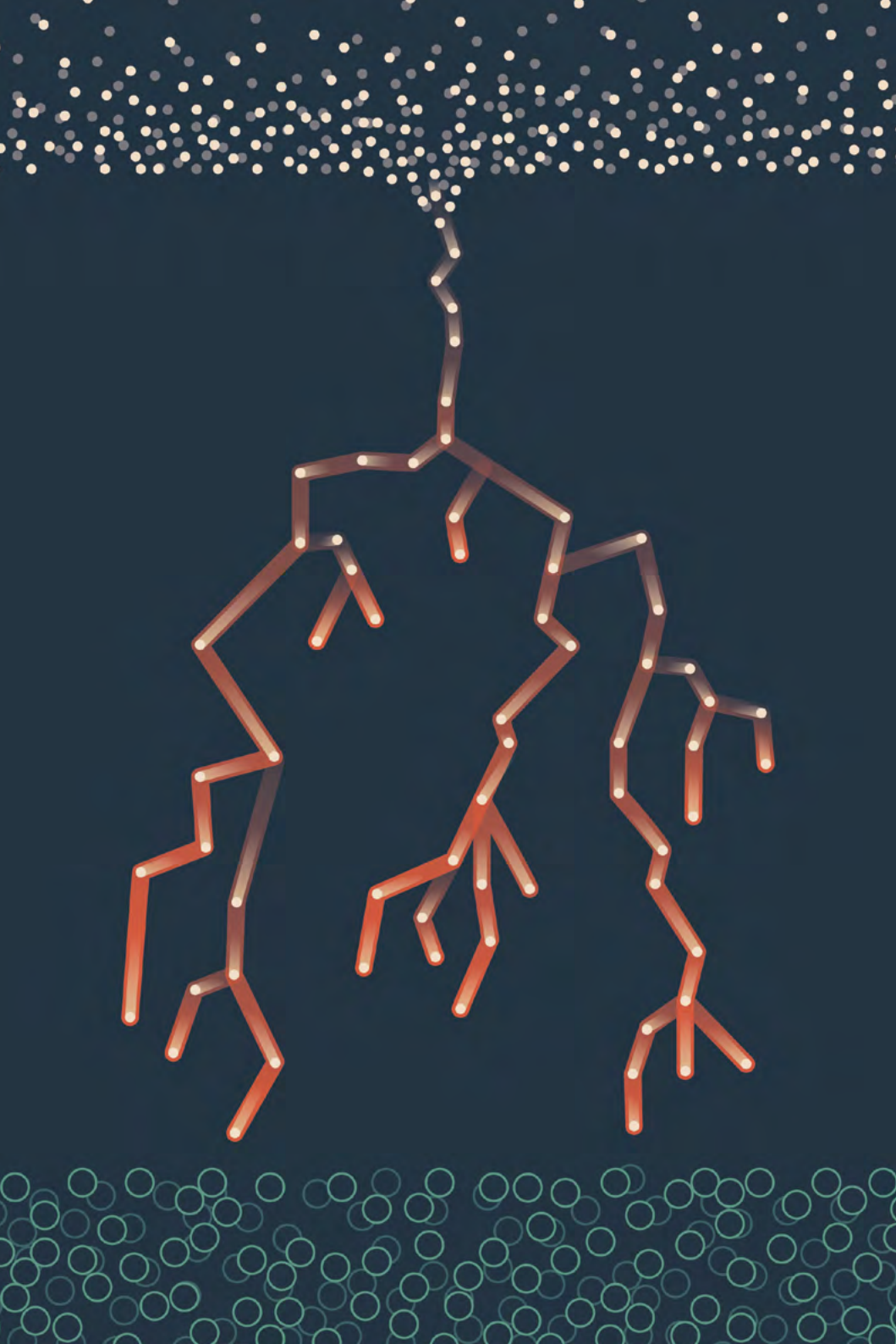
On an even larger scale, let's take a look at galaxies, those collections of stars containing billions and billions of them. Photos from the world's largest telescopes, that scan the space in high resolution, show galaxies as luminous masses with more or less flattened shapes, sometimes with a particularly bright central axis. That the bulk of stars is luminous is understandable, but where does this dazzling axis come from? The rotation of the galaxy on itself (hence its tendency to flatten out) causes all the stars to rotate, along with their charged particles, which generates a magnetic field along the axis, like a solenoid. Of the particles expelled from the galaxy, those close to the axis will have to spiral around this magnetic field, a rotational movement that causes synchrotron light to radiate, as happens in the curved parts of accelerators.

All the basic ingredients of accelerators can be found at every scale: charged particles, electric current, dynamo, inverse dynamo, magnetic field, synchrotron radiation and capture of charges by a magnetic field. Only the electric field is absent on an exceptionally large scale (although we'll see a couple of counterexamples in a while), as it arises from the interaction between two charges, an interaction that decreases as the square of the distance separating the charges, so all in all quite rapidly. The size of the magnetic field, on the other hand, is on the range of that of the current loop that gave rise to it. The higher the current and the larger the loop, the more powerful the field will be, and the further its reach.

Charged particles can be found everywhere and on every scale. It's interesting to know how they are produced in accelerators... or in nature.

7

How to generate charged particles



Remember that, in an atom, the electrons (charge $-$) are far removed from the nucleus (charge $+$). We like to give the image that if we enlarge the nucleus of an atom to the size of a soccer ball in the middle of the world's largest stadium, the electrons will be in the place of the spectator sitting in the last, furthest stand.¹⁷

An important consequence is that the Coulomb force that attracts the electron to the nucleus, due to their opposite signs of charge, is very weak. This force is sufficient to ensure, though, that atoms in nature are, in general, electrically neutral, as $+$ charges attract as many $-$ charges until their numbers equalize, and they neutralize each other. However, the weakness of this force means that the slightest friction or heating,¹⁸ simply by increasing thermal agitation, will cause electrons and nuclei to move faster and separate. The neutrality of the atom is broken, and we find ourselves in the presence of charged particles. The movements of the two types of charge are vastly different from each other, as electrons, being much lighter, move much faster than nuclei. The two types of charge then accumulate in separate places of the object in question, depending on its shape, atomic structure and conductive or insulating nature.

As you can see, charged particles are produced very easily, whether during our everyday activities or because of natural phenomena. In the case of accelerators, we apply the same principles of heating and friction to produce them, except that in this case we need to generate them in copious quantities and in a limited volume.

FROM HUMAN ACTIVITIES TO NATURAL PHENOMENA

It's really very easy to produce charged particles. In fact, each and every one of us regularly makes them every day. When we shuffle along, the friction of our shoes on the ground or carpet creates charges - electrons in this case - which, by repelling each other, spread all over the surface of our bodies. Shaking hands or kissing someone is enough to make these charges suddenly flow onto the other person, with the effect of an electric discharge that can be quite painful. Similarly, when we take off our sweater when we get home in the evening, the rubbing of the sweater against our body and then against our hair will cause charges

¹⁷ In reality, the electron is much farther away from the nucleus than this picture shows. The soccer ball has a radius in the order of 10 cm, and the radius of the largest stadiums in the world is no more than 200 m. The size of the stadium, then, is at most 2,000 times larger than that of the ball, while the size of the atom is 100,000 times larger than that of the nucleus.

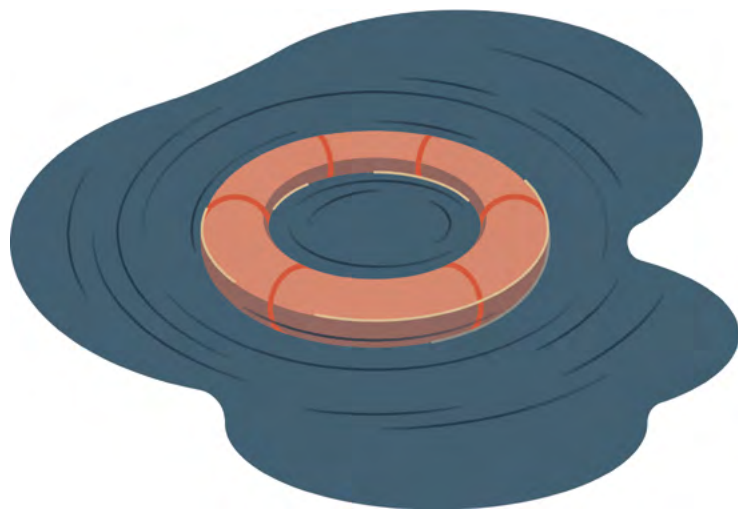
¹⁸ Rubbing and warming have the same effect. In winter, we rub our hands together to warm them up. The braking of the AVE (high-speed train) by friction of a brake pad on a wheel disc raises the temperature of the system up to 900°C.

to appear, in this case positive ions which, by repelling each other, will make the hair on our head stand on end. If we do it in front of a mirror in the dark, we can even see small flashes between our body and the sweater, accompanied by weak cracking noises, a sign of the neutralization of the charges of opposite signs, locally overcoming the insulating quality of the air.

The presence of these charged particles can be proved at leisure, simply by using a plastic ruler and small pieces of torn paper. By rubbing the ruler against a piece of clothing for half a minute, and then bringing it close to the pieces of paper on a table, the ruler will attract them and make them “dance”. It’s the negatively charged side of the ruler that, as it approaches the pieces of paper, pushes the paper’s electrons further away, revealing the positive ions that are then attracted to the ruler. This was a game often played by children before the advent of electronic games.

The phenomenon of static electricity has been well known since antiquity and was described by the famous mathematician Thales of Miletus 2600 years ago, based on experiments involving the rubbing of a piece of amber. Hence the words electricity and electron, which come from the ancient Greek word *ἤλεκτρον* for amber.

This phenomenon also occurs regularly in nature, albeit on a more spectacular scale. It’s the formation of lightning during thunderstorms. The thunderstorm itself is the result of a huge accumulation of energy,



water, heat and electricity, which is triggered when this accumulation reaches a threshold. That is why, in certain tropical countries where the summer climate is invariably hot and sunny, thunderstorms occur regularly, at the same time every day. They’re violent, short-lived phenomena, during which rain, wind and lightning are unleashed until the accumulated water, heat and electricity have dissipated. Thunderstorms usually take place in the late afternoon, after a very sunny day. The sun’s rays are poorly absorbed by the very transparent atmosphere. On the other hand, they are almost entirely absorbed at ground level. Here, almost all the light energy is transformed into heat energy. The ground is intensely heated, and its temperature rises steadily throughout the day. The layer of air in contact with the ground will be warmer than the upper layers, and its thermal agitation will therefore be greater, causing this layer of air to expand and swell. Its density, which indicates the quantity of matter in a given volume, will be lower than that of the upper layers. This layer of air will then rise sharply in the atmosphere (convection process).

This soaring is the result of Archimedes’ thrust, named after another ancient Greek scientist. He is well remembered for the legend of the bathtub and the expression “Eureka!”, meaning “I’ve found it! Legend has it that Archimedes of Syracuse was sitting in his bathtub one day, wondering why a piece of soap sinks at once to the bottom of the water, whereas a sponge can float indefinitely on the surface. He suddenly realized that the less dense objects float on top of the denser ones, as if the latter pushed them upwards. So happy was he with this discovery that, apparently, he got out of the bathtub, running naked through the city of Alexandria, shouting “Eureka! Eureka!”. Without going to such extremes, anyone can experience this in a swimming pool with a buoy. The buoy is filled with air, which is much less dense than water (much less mass than water in the same volume) and will float on its surface. Even if you decide to stand on the buoy, it will continue to float. If you want to force the buoy to the bottom of the pool, on the one hand you’ll have to use a certain amount of force to counter the strong thrust of the water, and on the other hand, as soon as you let go, the buoy will rise violently to the surface.

The rapid rise of the warmer layer of air will generate friction against the colder upper layers of air around it, and, in the same way as when you take off your sweater, will provoke the formation of charged particles, which in this case are carried rapidly towards the clouds. The rising air also cools with altitude, causing water vapour (transparent, invisible) to condense into droplets (more opaque, visible). The result is huge black clouds bursting with water and electricity, stretching over heights

In a
thunderstorm,
nature takes off
its sweater.

of more than 10 km.¹⁹ The negative charges accumulated at the bottom of the clouds will repel electrons at ground level, causing masses of positive charges to appear. We find ourselves in the same situation as previously discussed, with two plates containing many charges of opposite sign, separated by a dielectric medium,

as in a battery. Beyond a certain threshold, the insulating nature of the air is broken, or rather shattered, and the electrons in the clouds make their way to join the ions on the ground. This is lightning, an explosive phenomenon releasing colossal amounts of light, heat and noise, in what we call lightning bolt and thunder.²⁰

In a thunderstorm, nature takes off its sweater. Except that our sweater generates hundreds of volts at most, while nature's generates hundreds of millions of volts (for the record, the voltage of domestic electricity is 220 volts). On a human scale, these are tiny sparks just a few centimetres long, producing cracking sounds of 10 decibels, whereas on a natural scale, they are lightning bolts a few kilometres long, producing real detonations of 130 decibels.

THE PARTICLE SOURCE OF ACCELERATORS

We've just seen how easy it is to produce charged particles by heating. The problem is that, in an accelerator, we need to produce a great deal of them - millions or billions typically - in a space of just a few centimetres, in a stable and reliable way. Immediately afterwards, the particles must have an overall velocity in a certain direction; in other words, their velocities and directions must be as similar as possible. Any defects of these characteristics at the source will be difficult to correct later. Also, since electrons are much more mobile than ions, different techniques are used to produce these two types of particles.

In the case of electrons, we try to extract them from a metal, which is an inexhaustible reserve of electrons. This is the electron gun technique: the metal takes sometimes the form of a filament through which a strong electric current is passed to heat it, or a small plate illuminated by a powerful laser beam. Through thermal agitation or collision with photons, electrons exit the metal and are accelerated forward by a posi-

tively charged electrode (metal plate) with a central aperture to let them through. The size and shape of the metal plate, the laser wavefront, the electrode and its aperture are crucial to achieving the desired intense and homogeneous initial electron beam.

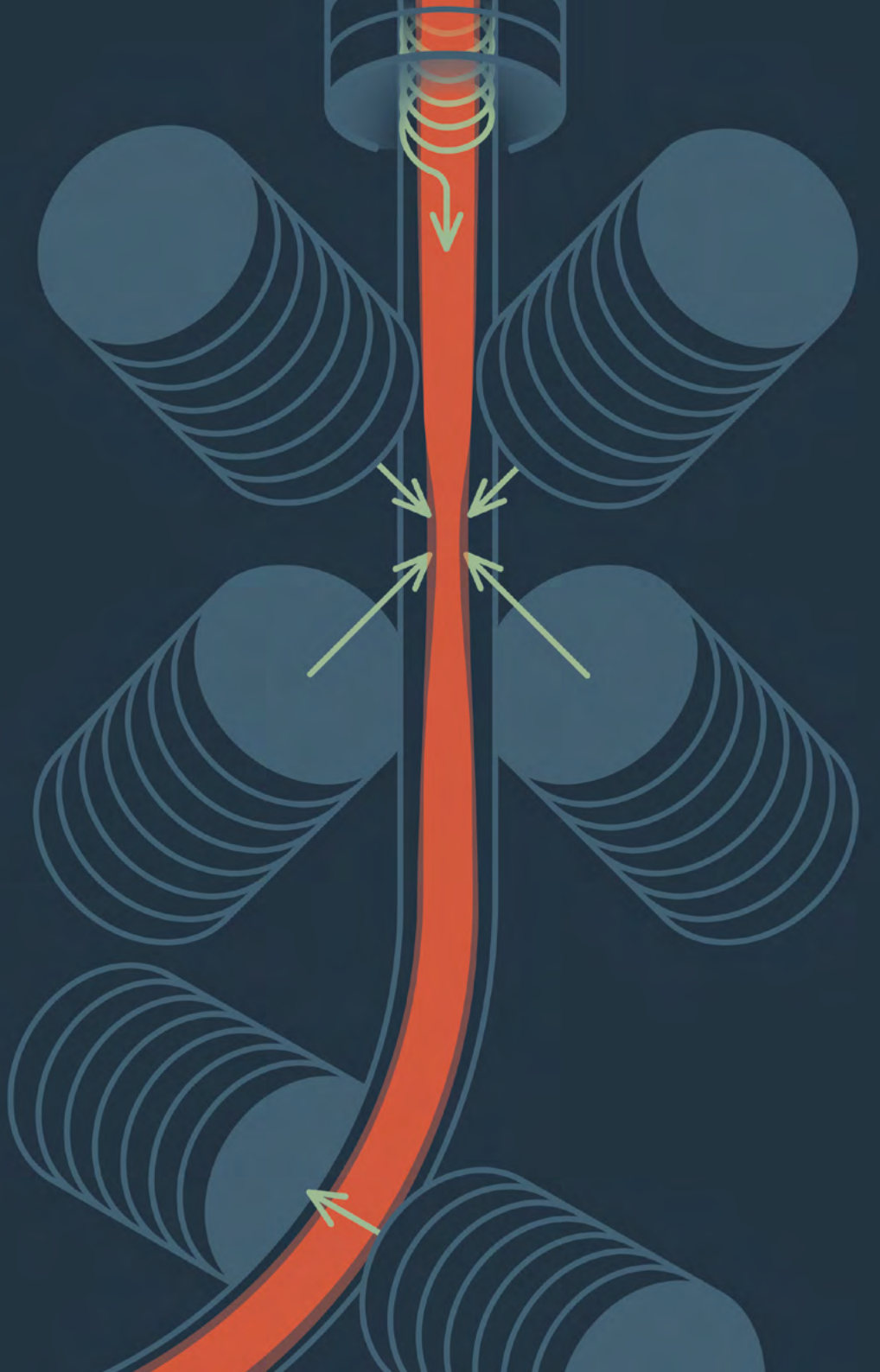
For the ions, we proceed in the same way as with a microwave oven. The oven is a cylindrical cavity, from which ions are extracted along the axis of the cylinder. Hence the process: a gas and an electromagnetic wave are injected in the oven. Under the effect of the wave's oscillating electric field, the atoms of the gas are heated, and they are dissociated in electrons and nuclei (ions). To produce a lot of ions, you need a lot of microwave power and a lot of gas. But that's not enough. Just as when you heat food in a microwave oven, when you're in too much of a hurry and push the heating power too hard, all the food will swell up until it explodes and sticks to the oven walls! It's the aforementioned thermal agitation that causes the volume of the heated bodies to swell, similar to the layers of air close to the heated ground before a thunderstorm. To prevent our ions from getting lost on the walls and remaining confined close to the axis of the source, you can now guess what needs to be done: we also need to apply an axial magnetic field using electric cables wound around the source, just like the magnetic field of the Earth, stars or galaxies... The (positive) ions are then extracted from the source by a succession of negatively charged electrodes, each with a central aperture to allow the ion beam to pass through. As with the aforementioned case of the electrons, the entire device - the electromagnetic wave, the magnetic field, the gas pressure, the electrode shapes, and voltages - must be carefully designed and adjusted to ensure that the beam is as intense, directional and homogeneous as possible.

¹⁹ These clouds are usually called cumulonimbus. (N. of the T.)

²⁰ According to NASA, 44±5 lightning strikes per second are produced all over the Earth. It is estimated that each of them measures, on average, about 5 km long by 0.01 m wide, discharging 0.1 GJ of energy (equal to what a 100 W light bulb consumes, if permanently on, in a month). The current of a lightning bolt is typically about 30 kA, its power can reach 1 TW and the temperature of the surrounding air reaches 20,000 °C (more than three times that of the Sun's surface). (N. of the T.)

8

Accelerator physics



We've seen all the physics involved in producing, focusing, guiding and accelerating particles. Let's follow now the particle beam as it travels along the accelerator and examine how the physics of such a beam is similar to or different from other physics, and how it fits into the landscape of physics in general. We'll find out that the "life" of such a beam has quite a lot in common with our own lives.

THE ACCELERATOR

To fully understand the many types of forces to which a particle beam is subjected on its journey, it's best to see the main types of technical equipment it will encounter along the accelerator. From what has been discussed so far, we know that these will be magnetic or electrical devices. But let's take a closer look at which configurations of these devices are used, without going into technical detail.

Let's start with the magnetic devices. The basic element is a solenoid, which is a coil on which electrical cables are wound. This solenoid will behave like a magnet, with a south pole and a north pole at either end, depending on the direction of the current flowing through said cables. The magnetic field generated will be directed from south to north inside the solenoid, and from north to south outside.

To deflect the beam, we use a magnetic dipole. This is a configuration in which two solenoids are aligned perpendicular to the beam, so that the beam passes through the space between them. The aim is to create as uniform a field as possible across the entire beam, so that all particles in it see the same field and rotate at the same angle.

To focus the beam, a solenoid arranged parallel to and encompassing the beam can be used directly, so that the beam passes along the axis of the solenoid. The beam is then forced to spiral around the axis of the solenoid. But this is not the best method.

More effective focusing can be achieved with a magnetic quadrupole. In this configuration, four solenoids are arranged around the beam, perpendicularly to its trajectory, with alternating north and south poles directed towards it. The beam is then focused in one plane, e.g. horizontal, and defocused in the perpendicular, e.g., vertical plane. By strategically placing a series of quadrupoles along the accelerator, to perform an appropriate series of focusing-defocusing operations, we can focus –or defocus– the beam very strongly. This is like the optical lenses in astronomical telescopes or camera lenses, where light undergoes a series of focusing and defocusing operations.

We also use magnetic multipoles based on the same principle, with 6, 8, 10 or 12 poles to focus the outer parts of the beam, more so than the parts close to its axis. The aim is to obtain a more uniform beam, given

that, otherwise, the beam is naturally denser in the centre than at the edges.

Note that all these multipolar configurations are designed so that the magnetic field at the centre of the beam is zero. This way, only the off-axis particles will experience a field that causes them to move towards or away from the axis. In other words, the beam as a whole is theoretically not deviated. However, a manufacturing or alignment fault of just a few micrometres (10^{-6} m) is enough to cause a dipolar field to appear on the axis, which deflects the entire beam. Small correcting magnetic dipoles must therefore be installed along the beam path to bring the beam axis back in line with the theoretical axis of the accelerator.

Let's move on to the electrical devices. We know that the key role belongs to the cavities where an electromagnetic wave is trapped, whose electrical component will be used to accelerate the beam. This field must be perfectly aligned parallel to the beam to accelerate it. Any error will also deflect it, and we'll need to compensate for this deviation with stronger dipolar magnetic correctors. What's more, since this field is oscillating (being part of a wave), it constantly changes direction forwards and backwards at the frequency of the wave, i.e. a few million or billion times a second. It is therefore necessary to synchronize the oscillation and the beam, so that the latter always sees the field directed forward at an amplitude rigorously equal to that predicted theoretically.

This synchronization must in fact be even more sophisticated at the start of the acceleration process, when the particles have not yet reached a speed close to the speed of light (especially for ions, which are heavier than electrons and therefore take longer to reach higher speeds). At these moments, too, particles don't have all exactly the same speed. Faster particles get further and further ahead, while slower particles get slower and slower, causing the beam to elongate. It is therefore necessary to synchronize the arrival of the beam on the rising edge of the accelerating field, so that the fastest particles arriving first see a weaker field and those lagging see a stronger field. The leading particles will then move backwards in the beam and the trailing particles will move forwards, shortening the length of the beam. In other words, it is also necessary to apply longitudinal beam focusing.

For ions at the beginning of the accelerator, yet another problem is acute. At these low energies, the forces of repulsion between particles of the same charge are predominant, making quasi-permanent focusing imperative. The devices described above – cavities and electromagnets several tens of centimetres long, successively accelerating and focusing – are not suitable: the beam would have already exploded by the time it was accelerated. The only solution is to imagine a configuration where

focusing and acceleration take place almost centimetre by centimetre. This is made possible by the RFQ, or radiofrequency quadrupole cavity. It's a cavity in which an electromagnetic wave is trapped, fitted on the axis with four conductive bars finely machined to within a tenth of a millimetre in the three dimensions. The electrical component on the axis then passes successively from parallel to perpendicular to the beam over a length in the order of a centimetre.

All the devices described above will exert a wide variety of forces on the beam which, combined with the beam's internal (repulsive) forces, will make the study of particle motion particularly challenging. The result is the need for a whole field of physics, accelerator physics, with its own peculiarities and difficulties.

PARTICLE BEAM PHYSICS

Depending on the application, the beam leaving the accelerator must have precisely determined energy, intensity (number of particles), size and divergence (in the three directions of space). Sometimes we need a density profile that's sharper in the centre; other times, flatter across the entire width. These numerous parameters must also be controlled upstream, since the beginning, in the acceleration or guidance devices, to ensure a successful process. Particle losses must also be perfectly managed along the length of the accelerator, as they can cause damage to surrounding materials or make them dangerously radioactive. In sections where ultra-low-temperature superconducting devices are used, particle losses must be even more severely controlled. With the most energy-intense accelerators, the power of the beam can reach several megawatts (million watts) at these points, where a single lost watt can put ultra-cold refrigeration systems in jeopardy. Generally speaking, no more than one particle in a million can be lost.

It is therefore clear that the particle beam must be perfectly and precisely controlled, despite its internal forces, which can vary greatly from place to place. This calls for the use of numerous devices to apply external forces of truly diverse natures all along the accelerator. All of this gives the beam a behaviour that obeys complex physics, due primarily to the fact that particle motion cannot be understood in the 3D (three-dimensional) space in which we live, represented by the three positions in the horizontal, vertical and longitudinal directions. Beam behaviour must be studied in 6D phase space (six dimensions), which are the three positions in space plus the three angles characterizing the direction of motion.

Indeed, when solving the equation of motion of a particle subjected to a force that depends on the particle's position, we realize that there is

only a solution in 6D phase space. This is because the configuration of the forces exerted on the particles changes dramatically every few centimetres along the beam path. This is not the case in general dynamics problems, such as a particle in an electromagnetic field or a body in a gravitational field, where the configuration of the force fields is virtually the same throughout the space under consideration. So, in plasma physics or in astrophysics, we can make do with 3D space and time to describe the motion of bodies. In accelerator physics, 6D phase space and time are necessary to understand and describe beam behaviour.

Let's look at the movement of the particles in relation to the centre of the particle packet. The transverse and longitudinal focusing devices will pull the particles from the periphery towards the centre, inducing an

oscillatory motion of the particles around this centre. Let's now look at the motion of the centre of the packet relative to the axis of their theoretical path. As we saw earlier, the inevitable defects in the focusing devices will cause the centre of the packet to diverge far from the central axis, and such divergence must be rectified by the dipole correctors, which induces an oscillation

of the packet around the central axis. In short, in an accelerator, the particles oscillate permanently in 6D around the centre of the packet, which itself oscillates in 6D around the central axis following a different process. Add to this the fact that there are several billion particles in a packet, and that those at the periphery are just a few centimetres away from the technical devices surrounding them, which may, moreover, be superconducting, and you can see the degree of complexity of accelerator physics, which must nevertheless be mastered with the utmost precision.

As a result, an accelerator is not just a complex technological object, like a nuclear power plant, a rocket or an aircraft. It is also a physical object. To pilot an accelerator, some set of technical measurement and action instruments, however complete and complex, is not enough. An accelerator, even a the smallest one, can only be controlled by a theoretical model running in parallel on a computer, which describes the beam's physics in 6D space. To produce a beam with such and such parameters at a given position, the necessary measurements are taken on the beam to feed the physical model which, thanks to optimization by simulation, will dictate the proper actions to be taken to achieve the objectives set for the beam.

Beam behaviour must be studied in 6D phase space (six dimensions)



THE SIX PHYSICS

Described in this way, the study of particle beams in accelerators is as much a physical endeavour as an engineering one.

In terms of the very spirit of a science, "physics" is more readily used when there is a need for conceptualization and theorization to account for or interpret experimental results. The movement of celestial bodies can be explained by a gravitational force exerted between these bodies, even though they are not touching. We can only see and measure the effects of this force, but we can never touch its very essence. We can even replace it - in a more exact fashion - with the curvature of space-time, the nature of which we'll never be able to better appreciate either. The same can be said of quantum physics about the photoelectric effect, or of the atomic model about the chemical properties of elements. Physics produces concepts, models that don't (necessarily) have a concrete, real-world existence, but which explain and predict real-world phenomena with great precision.

In accelerators, this is what happens with the particle beam. The beam, according to the mathematical model used, "lives", evolves, in a 6D space, foreign to the 3D space where we live. It is impossible for the human mind to imagine itself in a 6D space. To work with it, accelerator theorists must constantly project it into different 2D or 3D subspaces.

Physics produces concepts, models that don't (necessarily) have a concrete, real-world existence, but which explain and predict real-world phenomena with great precision

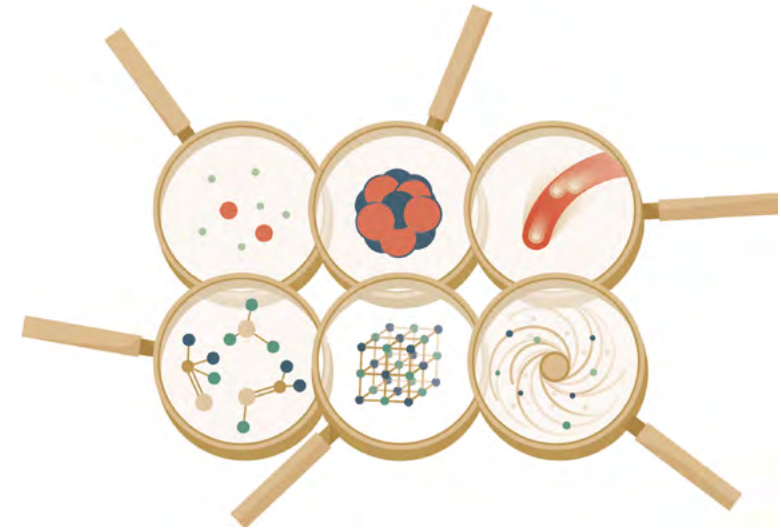
But these subspaces are not necessarily more real, since most of them must include at least one position and one angle. They are always phase spaces, a term used to differentiate them from real space – which has only positions. This is so arid that often professionals trained to work in these phase spaces are sometimes confused during their working debates.

In accelerators, beam physics works in the same way as other disciplines. That is to say: we do not see the phase space, nor can we measure it directly,

because what we know how to measure and what can be observed is the position of the particles. But understanding this phase space in detail, and calculating with its help, is the price to be paid to predict with maximum precision the positions of particles anywhere in real space.

If particle beam science is indeed a physical science, then where should it be classified among the well-known fields of physics? We can consider classification according to the size of the objects studied, which also corresponds to the radii of action of the fundamental forces of physics. At the smallest scale, we find particle physics, or quantum physics, which is the domain of strong and weak forces. On a larger scale comes nuclear physics, still governed by the same forces, with the addition of the electromagnetic force that is beginning to make its presence felt. Here, we study the atomic nucleus, made up of the mentioned particles, but taken as a whole: its size, deformations and transformations. At the next higher scale comes the physics of the particle beams in accelerators, made up of the preceding nuclei, but studied here as a whole, where the electromagnetic force, both in and out of the beam, reigns supreme. On the same dimensional scale, but with more diverse objects, come atomic and molecular physics, where again the electromagnetic force governs above all. On a larger scale, we come to solid state physics and gas and plasma physics, where nuclei, atoms and molecules are more numerous. In addition to the electromagnetic force, we must consider collisions between these objects and the phenomenon of pressure. Finally, on the largest scale, we come to astrophysics, with all celestial bodies obeying all the above-mentioned forces, plus the force of gravitation, which plays the most vital role.

We have, then, gone through the six primary areas of physics.



ACCELERATOR PHYSICS, QUANTUM PHYSICS, AND ASTROPHYSICS

What is regrettable, however, is the lack of interaction between accelerator physics and other areas of physics, probably due to the small number of physicists working in this field. A larger and constructive contact between both sides would undoubtedly be desirable, given that there are many aspects in common between the different fields. Let's mention just two of them: phase space and the electromagnetic force.

Phase space is a concept used by many fields of dynamics, including analytical mechanics, Hamiltonian mechanics, chaos mechanics and quantum mechanics. When we look closely at these different fields, we see that there is classical physics on the one hand, and quantum physics on the other. In classical physics, real space and time are sufficient to describe the evolution of systems. The concept of phase space is not strictly necessary, but merely stands for a more practical mode of simplifying calculations in certain cases, such as oscillations, many-body systems and chaos. In other words, phase space is seen more as a computational device than an actual physical object. In quantum physics, on the other hand, the evolution of systems is necessarily described in phase space, to be able to account for observations in real space. For ex-

ample, the experience of an electron passing successively from the wave state to the particle state as it passes through two different macroscopic devices has been predicted very precisely by calculating the evolution of its wave function in phase space. Despite this, all quantum physicists have been saying for a hundred years that they just don't get it. One of the greatest theorists in quantum physics, Richard Feynman, once said: "I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics."²¹ And yet, in physics, when theory meets experiment for a given phenomenon, we have the right to jump for joy and proclaim that we've understood the phenomenon. This (rather unusual) distrust of quantum theory could probably be explained by reference to classical physics, where the evolution of a system can also be described in real space and not just in phase space, the latter being evoked only to facilitate calculations.

In these respects, accelerator physics, because of its intermediate position between classical and quantum physics, supplies a new way of looking at things conceptually. In accelerators, the evolution of the beam can only be understood and described in phase space, which can be projected onto real space at the points needed to examine its interaction with measuring or accelerating devices. Particle beam physicists work in phase space on a daily basis, i.e. they reflect and perform analytical and numerical calculations in phase space, while being constantly confronted with real space through all the material issues imposed by a real machine. As a result of this inescapable confrontation between the two spaces, and the constant back-and-forth between them, phase space has gotten the same status of reality as real space. Understanding the beam in phase space then proves sufficient for the mind. Further and deeper exchanges with quantum physics on this subject would be remarkably interesting.

From the infinitely small world of quantum physics, let's move on to the infinitely large world of astrophysics. This time, the phenomenon in common with accelerators is the action of electromagnetic forces on charged particles. A brief excursion into this field earlier in this text showed that the action of the magnetic field trapping charged particles on a very large-scale is the same as in accelerators on a smaller scale. We have also noted that, on the other hand, the accelerating action of the electric field has not been observed to any great extent, as a static electric field on an exceptionally large scale cannot develop too much, the one precursor to thunderstorms being the largest-scale field known to date. So, as in the accelerating cavities of accelerators, we must fixate our attention in the electric field of an electromagnetic wave.

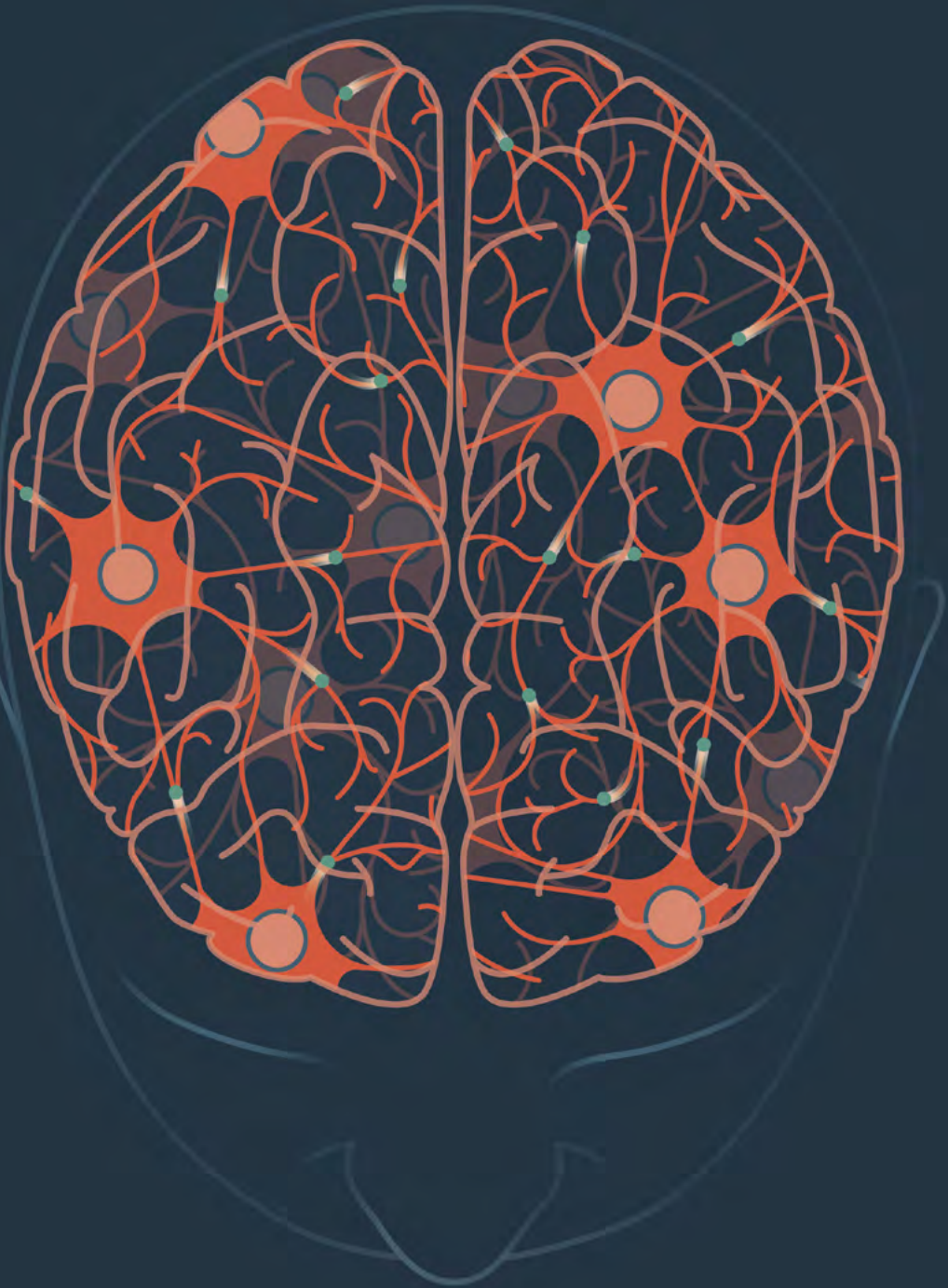
²¹ In Richard P. Feynman: «The Character of Physical Law». Messenger Lectures, University of Cornell, 1964 (N. of the T.)

This is what happens in what's been dubbed "the mystery of solar-coronal heating", that has kept generations of solar physicists busy for over 70 years. The corona is the upper atmosphere of the Sun that rises millions of kilometres from its surface, the part of the Sun that is best seen from Earth during a total eclipse. Spectral measurements of the light emitted by this medium have shown that the temperature there reaches millions of degrees, while on the solar surface it's less than 6,000 degrees. This is very surprising, as the heat source is thermonuclear reactions at the centre of the Sun, so the temperature is extremely high in the central parts, up to 16 million degrees, decreasing steadily away from this source towards the surface. What causes the temperature to rise so dramatically away from the surface? What is the (re)heating mechanism? It's as if you were lighting a fire for a barbecue and had to take a very tall ladder to cook the meat more efficiently ten metres above the fire. It's important, though, to understand that the corona is a plasma, i.e. a gas with free charged particles, and that its temperature is due to the thermal agitation of these particles. The faster the particles move, the hotter the plasma will be. Looking for the heating mechanism is like looking for the mechanism that accelerates these particles. Ask an accelerator physicist, and he'll tell you that you need an electric field (a component of an electromagnetic wave) to accelerate the particles, and a magnetic field to guide them towards this electric field.

As we've seen, the Sun's outer layers are host to huge, incessant vortices, i.e. loops of current generating ultra-powerful magnetic fields that can rise very high in the solar corona. So, there's no shortage of magnetic fields, but since a magnetic field can never accelerate particles, the difficulty lies in finding the electric field. Early on, solar physicist Hannes Alfvén found a type of electromagnetic wave specific to this environment, generated by the motion of charges swirling around magnetic field lines. These waves are created in the deep layers of the solar surface, emerge from it to the corona and rise into the upper atmosphere along the magnetic field lines, which themselves will attract the charged particles there to be accelerated by the electrical part of the waves. However, it took precise measurements by space probes, supported by numerical simulations on mainframe computers, to prove in recent years that Alfvén waves have enough energy to heat the solar corona up to millions of degrees. The principle of this mechanism is remarkably like the one used in the ion sources of the accelerators.

9

Accelerator physics and human nature



If it is conceivable, and understandable, that accelerator physics interacts with other fields of physics, it is rather unexpected to think that this physics can also refer to notions of human sciences. And yet, if we look closely at certain viewpoints, we can't help but notice it.

COOPERATION AND COMPETITION

An aspect that seems easy, and indeed little discussed in accelerator design, is the installation of focusing and correcting elements. This often takes place in transfer sections, whose function is to transfer the beam from one accelerating section to another. The question arises as to how many of these elements should be installed. The aim of the focusing elements is to achieve a specific beam size and divergence at certain points. In the simplest case, for example, this is achieved at the entrance to the next acceleration section, in both horizontal and vertical directions, i.e. four conditions. Intuitively, this means using at least four focusing elements. The aim of the correcting elements is to correct certain beam parameters at the points where they are measured. Intuitively, we feel we need at least as many correctors as there are measurements on the beam.

The principle seems simple at first: you need at least as many focusing and correcting elements as parameters to control. But thinking “at least” leads us to believe that we can also use “more”, and that “more” is “better”, safer, in case we need to do more things later. Now, mathematically, the question of the number of free variables versus the number of constraints, in other words, the balance between the number of unknowns versus the number of equations, is unambiguous, at least in the simple case of linear systems. When the number of variables equals the number of constraints, there is a unique solution (provided the constraints are not mutually contradictory, such as requiring the beam to be large and small in the same place). When the number of variables is smaller than the number of constraints, though, we can't fulfil all the constraints, but we can decide to fulfil them “as best we can”, and a minimisation process allows us to arrive at the “best” solution, which is unique. Finally, in the last case, where there are more variables than constraints, there are an infinite number of possible solutions, including the infinite number of solutions where the variables can contradict each other to infinity. For example, if two correctors, with values $+1$ and -1 , form a possible solution, $+2$ and -2 , or $+1000$ and -1000 , etc. are all possible solutions. The result is that when setting up the machine to realize the constraints, which is always done by numerical optimization, you need to be extremely lucky to find a setting where the requested solutions have reasonable finite values. In most cases, the values found are unacceptably large. To put it

another way, most of the time we find ourselves in situations of competition rather than cooperation between the elements to be solved.

To put it more concretely, an accelerator with more focusing elements or correctors than it needs is an unadjustable machine. We will very easily find solutions that literally explode the forces of these elements. One might think that the requested constraints are too difficult to achieve, when it is enough to deactivate the excess elements to find the solution. We must therefore consider using as many elements as constraints, or failing that, using fewer, which is counter-intuitive. This is the typical case where “more” is clearly worse than “less”. Yet this is a mistake that some young accelerator physicists routinely make, and sometimes even the not-so-young fall into this trap. And there are accelerators in service with this type of defect... To overcome this problem, we need to use a more “intelligent” mathematical method based on eigenvalue decomposition and choose the largest eigenvalues to prevent the elements from contradicting each other.

In human society, the same type of problem can occur, without there really being an intelligent way of dealing with it. This is the case with the various committees that are formed to discuss, give advice or take action on a given subject. When, for example, we want to form a council to discuss ethical or environmental issues, we need to ensure that questions of a scientific, philosophical, religious, sociological, psychological, medical or legal nature are also debated. It's clear that we need to invite at least one professional from each of these fields to take part in the discussion. Imagine that, to make sure we cover the subject properly, we decide to invite two professionals from each field; or, to reinforce a given field, we invite two professionals from that field. In this case, it

is not certain that the council or the field in question is really strengthened, as there is an increased risk that these people will spend more time contradicting each other than solving the problem. Council members should therefore be chosen very carefully and judiciously, so that they are not outnumbered and have the wisdom not to spend their time contradicting each other and concentrate instead on the task at hand.

If an accelerator with more adjustable components than necessary is an unadjustable accelerator, then a hu-

If an accelerator with more adjustable components than necessary is an unadjustable accelerator, then a human assembly with more personalities than necessary is an unmanageable assembly

man assembly with more personalities than necessary is an unmanageable assembly.

THE HUMAN BRAIN

Another type of problem can arise in the design of accelerator transfer sections when they are assigned many different and complex tasks. For example, a transfer section may be used not only to adapt the beam to the next accelerator section, but also to make measurements on the beam to compensate for the various defects seen upstream, to cut the beam into shorter sections, and so on. The transfer section would then need to be longer, and would take on greater importance, so more focusing and correction resources would be required to ensure proper beam transport within the section itself. It would thus become an accelerator section in its own right, with its own needs.

This type of behaviour is of course reflected in different organizations of human society. The most far-reaching organization, on a national scale, is the government. A government's mission is to organize activities to meet the many economic, social, defence and other needs of its citizens, and it is itself necessarily complex and multi-component, to such an extent that its own economic and social needs become, in



**It is in the human
being itself where
we find a case
of governance
whose own needs
dramatically outweigh
the needs which it is
supposed to serve**

turn, burdensome. Care must be taken, however, to limit the importance of a government's needs so that they do not become predominant over the needs of the nation.

But it is in the human being itself where we find a case of governance whose own needs dramatically outweigh the needs which it is supposed to serve. I'm speaking, of course, about the human brain. Let's not forget that, initially, the essential needs of the entire animal kingdom, of which we are a

part, are only three in number: to feed, to rest and to reproduce. These three needs are, however, complex enough, compared to those of plants, for example. So much so that there is a need for a central organ, the brain, to help meet them all. Certainly, animals at the top of the food chain have developed ever more elaborate brains to solve their foraging needs, which require complex planning and strategy. But in humans alone, for reasons beyond the scope of this discussion, the result is an extraordinary hypertrophy of the brain. As a result, this organ has generated its own needs which, over the course of time, have ended up far exceeding standard animal needs in volume and importance. Think of all the play and entertainment activities that drive the human species, which cannot be compared to those of any other animal species: literature, poetry, music, figurative art, the thirst for escape, and related activities such as theatre, cinema, musical and sports performances, the tourist industry and the gaming industry, have no other reason to exist than to "clear our heads"; in short, to satisfy the needs of the brain, which have no direct connection with the three primordial needs.

We don't just need to rest, we also need to travel, enjoy ourselves, cultivate ourselves. We don't just need to reproduce, but also to love, be affectionate and become close. We don't just need to feed ourselves; we need to develop our tastes and affirm our identity through culinary traditions. But, above all, we need to feed our brains, with understanding and knowledge. What sets man apart from other animals is certainly these imperative needs dictated by the brain, which are neither functional nor organic. Those who think that these are artifices created by our modern societies are simply wrong. We know that since the earliest times, when humans had barely anything to feed, clothe or shelter themselves, tens of thousands of years ago, the darkest caves were already lavishly decorated, the most frivolous ornaments already displayed, the

most subtle music already played, and the most distant lands already explored.

So, long before purely vital needs have been satisfied, our brains have already imposed their own needs on us. The same applies to essentially mental needs such as curiosity or the thirst for understanding. All these pages are dedicated to discussions on these latter needs, which drive all scientific research activities, whether in accelerators or in other fields. And CERN, to return to this organization mentioned in the first pages, is one of the symbols illustrating humankind's capacity to commit quite exceptional means, just to satisfy this need to understand, deeply rooted in our brains.

10

Accelerators, nature and society

Like the brain in relation to human needs, the particle accelerator, whose first mission was to support scientific research activities, has in turn become the object of such research, as the missions entrusted to it become more diverse and complex. From being a tool for physics, the accelerator has generated its own field of physics, particle beam physics, which fits remarkably well into the general landscape of this science. While having its own specificities, the physical phenomena at work in accelerators are the same as in the entire universe around us, on all scales of dimensions. That's why I've chosen to explain how accelerators work, not by analogies with other phenomena, but by examples of everyday phenomena where the same physical laws are rigorously at work. I also wanted to emphasize the pleasure that can be had in science when, by trying to understand a given phenomenon, you can understand many other phenomena in the process.

The fact that science can describe the huge diversity of nature with very few laws, also means that the objects generated by science will cover many areas of activity in human society. This inevitably raises a number of questions about the relationship between science and nature, on the one hand, and science and society, on the other.

THE PRINCIPLE OF PARSIMONY

Describing the multiplicity of nature with very few laws has only been possible because one of the defining characteristics of scientific practice is precisely to look to describe the maximum number of natural phenomena with the minimum number of laws. In this case, we can even speak of a fierce determination to do just that. This is the principle of parsimony,²² tacitly accepted by all those involved in science: any new phenomenon observed must be explained primarily by the laws already known to all. Only when this is not feasible can we consider changing one of the existing laws or adding a new one. It can be said that the application of this simple principle of parsimony has been at the root of science's fantastic success in explaining natural phenomena. Just think: all the phenomena observed in nature, from the infinitely large to the infinitely small, are described with just four fundamental forces, namely the strong, weak, electromagnetic and gravitational forces. This raises an eminently epistemological question: is nature really governed by so few laws, or is it man who wants to describe it thus? From a distinct per-

²² The principle of parsimony is also known as Ockham's razor, because it was made popular by William of Ockham (circa 1284-1349), but its origins go back to the works of earlier philosophers, such as Peter Auriol (circa 1280-1322), Durand of Saint-Pourçain (circa 1270-1332), John Duns Scotus (1265-1308), Thomas Aquinas (circa 1225-1274) and even Aristotle (384-322 b.c.e.) (N. of the T.).

spective, we might ask how this principle of parsimony, which is a purely human invention, can be so remarkably applicable to nature. How did we come up with this principle? Is nature truly parsimonious? Is there any reason it should be?

These “philosophical” questions can probably be answered simply by looking at the “organic” side of things. The organ here is, once again, the human brain. A product of nature’s millions of years of evolution, the brain’s functioning must closely mirror that of nature. That the brain should be in tune with nature seems quite... natural. But let’s take a closer look. Having a finite size compared to the infinite universe, the need to understand imposed by the brain on humans can only be resolved by economizing, by minimizing the amount of information to be considered. To do this, we need to classify, categorize and conceptualize: three very similar actions that are at the root of scientific law-making. Three

actions that are unique to man, and which we have the greatest difficulty in injecting into artificial intelligence systems. Minimizing information not only makes it possible to understand more at lower cost, but also to transmit this information at lower cost, geographically between different populations, and temporally between successive generations (which contributes to the continuous improvement of human knowledge, and consequently to the greatness and power of man compared to other animal species). As far as nature is concerned, we

know that the transmission of information has a definite energy cost. For a phenomenon to be found at every point in the universe, on every scale of dimensions, the related information must also be transmitted to all these places and on all these scales, hence a colossal energy cost that must be minimized, by minimizing the amount of information to be transmitted. We might therefore conjecture that the number of large-scale laws must be limited. Brain and nature are both driven by the same concern for saving information to be stored and transmitted. In this way, both the human brain and humankind as a whole function in harmony with the natural world from which they originate. Overall, this is hardly surprising.

Just think: all the phenomena observed in nature, from the infinitely large to the infinitely small, are described with just four fundamental forces

THE ARTIFICIAL AND THE NATURAL

Yet another issue, this time of a societal nature, runs counter to this observation. Modern society is keen to distinguish between the artificial and the natural and has come to attribute a favourable qualitative judgment to the latter to the detriment of the former. Is this justified? At first glance, this distinction seems at least easy to implement. Anything manufactured or modified by man is considered artificial, not natural. Consider a particle accelerator. There are few manufactured objects so imposing in size and so complex in operation. As we’ve seen, it’s bigger and more complex than a nuclear power plant, or a rocket, or an airplane. So, it’s inevitably the most artificial object there is. But when you look at it in all its detail, from every angle, the accelerator runs strictly according to the laws of nature, which are the same everywhere around us and throughout the universe. We should remark this point: science has never yet invented any laws of its own. All the laws of physics are, without exception, laws of nature. Similarly, all the components of the accelerator are, without exception, made from natural materials and then shaped or changed by natural laws. Human beings are themselves, until proven otherwise, pure products of nature. So it’s hard to understand how a product of nature that modifies its natural environment through natural laws can be more unnatural, more artificial, than a bolt of lightning that electrifies the atmosphere, more than the atmosphere that generates a hurricane with the help of solar energy, or more than a quasar that illuminates the universe with its pulsations as it rapidly rotates on itself. Can we describe as unnatural a plant which, like all the plants in the world, uses sunlight to transform mineral elements into organic elements according to the laws of photosynthesis? Seen in this light, distinguishing between natural and artificial is indeed... artificial. It would only reveal the anthropocentric nature of humankind, who artificially exaggerates the consequences of its actions.

Mistrust of the artificial in general, and particularly science, is undoubtedly worsened by the realization that objects or procedures derived from science and technology, while providing effective solutions to the problems posed, can at the same time have harmful consequences. In fact, this is the famous side effect, which at worst hurts, and at best, displeases. Many human beings have been directly affected by industrial disasters. Nature, for its part, has been the victim of quite a few ecological catastrophes. But even for those untouched by

Science has never yet invented any laws of its own. All the laws of physics are, without exception, laws of nature

these misdeeds, science can be disappointing. This is the reaction of a child who has been promised a marvellous dream, only to wake up and find it's not all that wonderful. Scandalized because they feel betrayed, or at least annoyed when they discover that this is not yet the ideal world science said it would be, they will say to science: "Nah! I don't like it! There will always be side effects!" But then, is science the champion of side effects? Does the artificial generate more side effects than the natural? Let's take a look around us; what we see is far from conclusive. Potatoes are nutritious in their tubers, but toxic in their leaves; rhubarb may be eaten by the stem, but its leaves are highly poisonous. Fat and sugar supply the energy we need for our activities, while clogging up our blood vessels. Wild nature is a precious reservoir of mechanisms or substances from which we regularly draw to manufacture our medicines or high-tech objects. But contact with this same wilderness has just as regularly been the source of fearsome viral infections such as rabies, AIDS, Zika, Ebola, Chikungunya and COVID-19.

The list of natural products, whether of plant or animal origin, which are both beneficial on the one hand and harmful on the other, is certainly endless.

Life itself has its own side effects, which are sickness and death. The history of Buddhism tells us that its founder, Prince Siddhartha Gautama, deeply moved by the sight of these intrinsic sufferings of life, sickness and death, went off to meditate under the Bodhi tree²³ in order to find a way to avoid them.²⁴ It was only when he reached the stage of Buddha, the enlightened being, that he discovered that access to Nirvana, a kind of Nothingness, would enable him to escape the vicious circle of the Wheel of

Life itself has its own side effects, which are sickness and death

Reincarnations, i.e. the ineluctable rebirths to life, in order to no longer suffer the side-effects inherent in it.

Aversion to side effects is nothing new. One might even say that it is a constant feature of humanity. It's at the origin of Buddhism, and no

²³ A type of ficus (*Ficus religiosa*).

²⁴ The founding legend of Buddhism tells that Prince Siddhārtha Gautama, who until then had lived only in the delight of the royal palace, decided one day to discover the world and crossed the four gates that separated the school grounds from the outside. As he passed through the first door he heard crying and screaming, and he sent his servant to inquire about their origin. It was the wailing of a woman in labor and her newborn baby. At the second door he heard the moans and gasps of someone sick and writhing in pain. At the third door he heard the sobs and complaints of an old man in the twilight of his life. And finally, at the fourth door he heard the sorrow and grief of an entire family mourning the death of a loved one. The prince then concluded that life, from birth to death, is nothing but an ocean of tears, and decided to seek a remedy.

doubt of other religions too, even if not as explicitly. Indeed, for many religions, the quest for a kind of paradise is the main leitmotiv, and what is paradise if not a place devoid of side effects? In any case, Buddha and all his billions of disciples over the past 2,600 years found the side effects so unbearable that they decided to devote their lives to getting rid of them.

SIDE-EFFECT SYNDROME

All this to say that, in the world in which we live, side effects are certainly not avoidable and never have been.

This is simply due to the multi-component aspect of the Universe, which means that any phenomenon necessarily generates multiple consequences. Let's imagine that the Universe has a single component, which looks like water for example, but a particular kind of water that is perfectly homogeneous and cannot be broken down into other components. In such an environment, no phenomena can occur, and therefore no negative consequences either. Now let's imagine that there's a second component that looks like sand, but with grains perfectly identical to one another. In this two-component universe, only one type of phenomenon can occur, and that is the interaction between the two components. A drop of water moistening the sand, for example. And the only possible consequence is the absorption of the drop of water and the displacement of nearby grains of sand. That's all there is to it. But as soon as there's a third component, such as some kind of animal living in the sand, the situation becomes far more complex. The sand displaced by the water droplet may injure the animal, or the animal may absorb some of the water droplet and gain the strength to disturb the sand more than the water droplet would, or attack or mate with a fellow animal, et cetera. This is the famous three-body problem, well known in science for being far more complex than the two-body one. In a multi-component universe, any effect is bound to be multiple. From this point of view, Buddhism was right when it decreed that in Nothingness, which *a priori* has no components, there are no secondary effects, and this is still true up to two components. It's from three components upwards that secondary effects, also known as collateral damage, appear.

In our multi-component Universe, any phenomenon, artificial or natural, which has a beneficial (or harmful) effect on a given subject, will, directly or indirectly, without exception, have a greater or lesser harmful (or beneficial) effect on that subject. Fire and knives, which help us

What is paradise if not a place devoid of side effects?

It's from three components upwards that secondary effects, also known as collateral damage, appear

hot core is at the origin of the magnetic shield that has protected the appearance and development of life. However, this hot core is also the source of the liquid magma on which the rigid tectonic plates float, and which, when they separate or collide, gives rise to the volcanoes and earthquakes that destroy life.

Often, too, a major event can generate cascading effects that are alternately good and bad for the same subject. In this case, there is not just one side effect of a primary effect, but a series of side effects leading to other side effects. Let's take as an example a pandemic affecting the human race on a planetary scale, as COVID-19 did. There's no doubt that this pandemic had a very serious impact on human health. To stop

prepare our food, can also hurt us. Rain brings the water, essential to the survival of ants or snails, drowns them at the same time. The same can be said of wind in relation to trees, or of oxygen and sunlight, in relation to living beings or inert components. In short, anything to anything is the same. In our discussion of the physical phenomena at work in accelerators, we saw that the Earth's



the spread of the pandemic, containment measures were imposed, prohibiting the departure and movement of people, bringing most human activities to a halt across entire regions. This was particularly beneficial for nature, which was able to function without the human pressures, just like a few hundred years ago, and in turn for human health. We can cite a drastic reduction in respiratory illnesses following a sharp drop in air pollution. But this also led to exceptional pollen production by all plants in spring, making this COVID-19 year the worst ever for pollen allergies since these types of allergies have been studied. At the same time, nature has suffered worldwide pollution from the products used to counter COVID-19 (masks, visors, gloves, gowns, hydro-alcoholic gel, and so on), which quite resembles an ecological disaster. On the other hand, from an economic point of view, containment has led to colossal losses for many of society's business sectors, seriously affecting the health of the personnel in those industries. Some sectors, however, gathered exceptional profits, such as mass retailing, online sales and IT products. The insurance sector, too, reaped extraordinary profits, due to the equally extraordinary reduction in accidents linked to human activities, with road accidents in the lead. It is worth noting that fewer accidents also means health benefits.

For health, economy and nature alike, COVID-19 has been both a disaster and a boon. The greater the scale of a phenomenon, the greater the consequences, and the more numerous they are. This is what happens when a paving stone is thrown into a pond. The larger the cobble, the more water is splashed, which in turn produces more splashes. The bigger the spray, the more sprays it generates.

This observation helps us to understand why science and the artificial are perceived as the exclusive source of side effects. This is because science studies only existing phenomena, in the sense that they produce observable and measurable effects on us, our environment and our Universe. As these effects are always multiple (no phenomenon is known to have a single effect), so are their consequences. Whether these consequences are desirable or undesirable, they will anyway be brought to light by science. Artificial products, manufactured by man based on scientific knowledge, will only be made to produce a given effect, and will be more repeatedly fabricated the greater and more visible the effect. As effects are necessarily multiple, it should be noted that there is a primary effect, which is the one targeted, and a multitude of secondary effects of greater or lesser importance, which may benefit or inhibit other phenomena. Science and the artificial therefore deal exclusively with concepts and objects that have very material, very visible effects, which makes the secondary effects noticeably clear, very conspicuous.

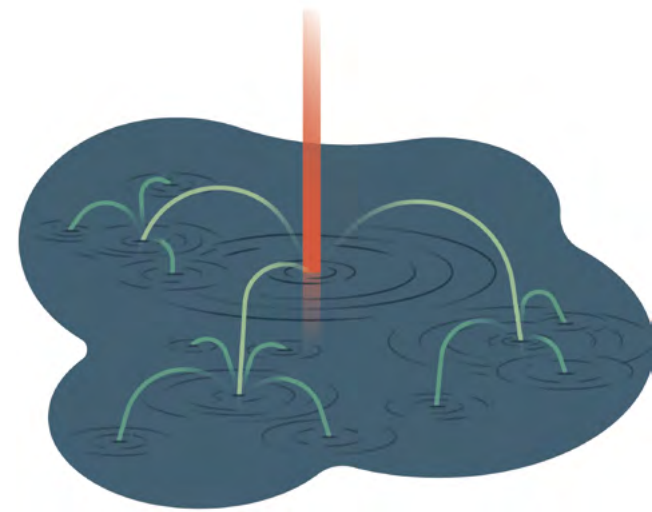
The bigger the spray, the more sprays it generates

Other forms of human knowledge, such as the arts, philosophy, religion, the paranormal, etc., deal with subjects that are essentially linked to the spirit, the imaginary, the psyche, which do not generate material effects in an immediate or direct fashion. The primary and secondary effects are therefore confined to the mind, which makes them

much less visible in general. However, when these forms of knowledge do reach the mind on a large scale, the secondary effects – undesirable to begin with – are equally important. Human history is covered by painful traces of massacres or armed conflicts on a planetary scale, triggered by economic or religious doctrines that were initially conceived for the happiness of humankind.

This rapid analysis shows the links between science, the natural and the artificial, as well as the primary and secondary effects generated by the latter. Science models the natural and guides the artificial. More than any other form of knowledge, science can study in detail and depth the primary and secondary effects of both and compare them quantitatively, to determine which effect is the most prevailing. A drug's primary effect is to eradicate a malicious microbe, and its secondary effect is to impair certain bodily functions. The primary effect of a malicious microbe is to deteriorate certain functions, and its secondary effect is to awaken the body's defence function. To decide which of the two to choose, we need to understand how they work and quantify their effects, to estimate precisely the dominant effect that results.

“Quantify” should be the key word to keep in mind in this discussion about side effects. The whole problem with non-scientific forms of knowledge is that they are based on the qualitative, not the quantitative. As a result, when we think of side effects, we think of them as such, without any awareness of their relative importance, of the quantitative aspects. In practice, this leads to the proscription of anything that might cause side effects. Taken to the extreme, this behaviour leads to the unbearable realization that everything has its secondary and undesirable aspects, and then to the conclusion that the world in which we live is unlivable and that the quest for a certain paradise is the only possible salvation. But ignoring numbers, ignoring the relative importance between 10 and 100,000, leads inexorably to senseless behaviour. It's as if a person is afraid of something falling on them and takes as many precautions to avoid a leaf falling from a tree as they do to avoid an airplane falling on their head. It's this lack of understanding of the numbers that leads some people to refuse a vaccination that can save their lives in



90 % of the cases but has side-effects in one case in a million. And what's even more drastic, and yet quite widespread: some people don't feel the difference between 0 (zero) and 10,000, such as those who no longer want to eat meat, fish or some other food, after knowing that massive consumption of these foods is potentially carcinogenic. No, we need to go beyond the qualitative aspect and consider the quantitative aspect, which is essential to judge whether a side effect is harmful or not.

Only science, with its equations and numbers, knows precisely how to quantify the relative importance of phenomena in relation to each other. We'll then realize that the world we live in is perfectly liveable, despite all its side effects. At least, that's what life shows us. Life that grows on the slopes of volcanoes, shaped by lava that is destructive in the short term but nourishing in the longer one. Or, more generally, that which thrives all over the Earth, despite the large-scale natural disasters that regularly occur.

Science in general, and accelerators in particular, can help us understand and quantify. Consciousness can then choose accordingly. Choose consciously.

“Quantify” should be the key word to keep in mind in this discussion about side effects

11

Accelerators, Humankind and the Universe

We saw together that (i) the laws of accelerators physics or the laws of physics, of science in general, help us understand many of nature's phenomena in an extremely precise, permanent and universal way, and that (ii) this was to meet the need for understanding that is dictated by the human brain.

These two aspects really undermine the widely held view that science is (i) about explaining only the "how" of things, and not the "why", and (ii) about studying the matter, not the spirit. It's worth taking a closer look at these two aspects.

THE HOW AND THE WHY

Since the first major advances in scientific knowledge a few hundred years ago, it has been quite common among literary scholars, philosophers and theologians to confine the role of science to the study of the "how" of the Universe, rather than its "why". So much so, in fact, that this has become a well-established truth in collective understanding. However, in view of the scientific knowledge just discussed, it's hard to see the basis for this point of view. Let's take a look at a phenomenon specified earlier in this text, the rotational motion of charged particles around a magnetic field line. A possible "how" question on this subject would be "How do you make particles rotate on a circle?". This is clearly not a question for physics, but for technology. The latter will show how to generate a magnetic field with a permanent magnet or an electromagnet of such and such strength, and how to launch particles of such and such speed, at such and such an angle, and so on. Another possible question could be "How do charged particles revolve around a magnetic field?" Answering this question is a matter for measurement techniques, which involve measuring the strength of the magnetic field, the speed of the particles, the radius of the circle of rotation, and other parameters. Similarly, if we want to answer the question "How do objects fall towards the ground?", we need to measure their trajectory and velocity as they fall.

Technology derives from science and at the same time inspires it, but it's not quite science. The main aim of science has never been to study the "how" of things, but rather to explain, and help us understand, why things happen in one way and not another. And the "reason" or "cause" is directly linked to the "why". Why do particles go round and round instead of in a straight line? Because they meet a magnetic field. Why do objects with a mass fall and can't stay suspended in the air? Because they're subject to a gravitational field. Once physics has answered these "whys" - which means conjecturing and then proving the existence of a magnetic or gravitational field, and finally explaining the characteristics of these fields - the role of physics is essentially over. In other words,

explaining the “why” of things in the universe is the one and only role of science.

It is therefore not easy to understand how (or why) widely held belief comes to assign to science the role of studying the “how” and not the “why”. One first explanation would be the confusion between technology and science, two fields that are close and in continuity with each other. Another explanation would be the fact that the same word “reason”

(or “cause”) can invoke two radically opposed meanings. For some, the reason for a given phenomenon stems from a design, an intended goal, which only makes sense once the phenomenon has been realized. The cause of a phenomenon is therefore posterior to it. Why do I stay home and work on my lessons instead of going for a walk? Because I want to obtain my high school diploma at the end of the year. This is a very anthropocentric point of view, modelled on human behaviour, which undertakes any action with a given goal in mind. It’s as if, in order to explain

natural phenomena, we begin by personifying nature and lending it a given purpose. The difficulty with this approach is undoubtedly that of attributing a given intention to a given phenomenon. The many Greco-Roman stories, in which we often see antagonistic heroes lending contradictory treats to their respective gods before each of their campaigns, are there to remind us of this. Scientists, on the other hand, have taken the exact opposite approach, looking to explain an objective nature that is supposedly devoid of any design, and which could even take place in the absence of man. From a scientific point of view, the cause of a phenomenon necessarily precedes it. The cause precedes the effect, and the same cause will unrelentlessly lead to the same effect. Why are atoms electrically neutral? Because particles of opposite signs attract and neutralize each other. Why do children resemble both their parents? Because they carry the genes of both. We don’t know whether the Universe has a design or not, but it just so happens that the approach to understanding it that assumes that it has none is one that continually leads to successes as numerous as they are remarkable.

The lesson to be drawn from this discussion is that science is concerned solely with studying the “why” of phenomena in the Universe, but that the reasons for the “why” must necessarily precede these phenomena.

Explaining the “why” of things in the universe is the one and only role of science

MATTER AND SPIRIT

Another view that seems to be well established in human society is that science is concerned only with the material world and not the spiritual world. Yet, as discussed above, science looks to understand the workings of the Universe and the objects within it, driven by the human brain’s pressing need to understand. And, when talking about understanding and the brain, it’s hardly reasonable to think that we have left the spiritual aspect out of the equation. We readily admit that it was only to satisfy compelling spiritual needs that individuals were able, 50,000 years ago, to brave the cold, darkness and danger of hard-to-reach caves to create magnificent paintings. It is in the tradition of these prehistoric artist-painters that CERN and the other major accelerator centres are today assembling a considerable human and financial budget, just to satisfy a spiritual need, which is the thirst for understanding, the thirst for knowledge driven by the human brain.

Not only is the motivation spiritual; the objects of study themselves in accelerator physics, or science in general, are for the most part purely spiritual. These include the four fundamental forces, 6D phase space, the curvature of spacetime, the evolution of species, the inheritance of life, et cetera. They’re all invisible, impalpable things that we don’t even hope to materialize one day, that we don’t even try to. They’re anything but material. As pointed out earlier for the electric and magnetic fields, they are first principles, first hypotheses, which are neither demonstrable nor definable, but which can explain all observed phenomena. They are, in fact, pure constructs of the human mind. Without these constructs, the mind is subject to a kind of dull anguish in the face of Nature’s complex performance. With them, the mind is reassured, appeased, because it can understand the “why” of the phenomena happening around it. With concepts invented from scratch, scientists have built a model in which observed things and phenomena have an explanation, a model in which the observable Universe becomes intelligible.

As the brain has grown disproportionately large, it has acquired consciousness (of itself and the world around it), which in turn affects it with anguish (at the complexity of this world), a feeling that must be calmed at all costs by building spiritual constructs (capable of explaining this world). Typi-

With concepts invented from scratch, scientists have built a model in which observed things and phenomena have an explanation, a model in which the observable Universe becomes intelligible



cally, human beings ask themselves “Why are they here, where did they come from, and where are they going?” when they are aware of themselves, and “Why is the Universe here, what was its previous state, and what state will it evolve towards?” when they are aware of the Universe around them.

This last thought allows us to give a common characteristic to all human thought systems, including science, and thus to compare scientific thought even more concretely, and in greater detail, to other human thought systems. If we consider that every major system of thought seeks to answer the existential questions set out above by putting forward the first principle or principles that are neither demonstrable nor definable, but which can explain all observed phenomena, then those of science are the fundamental scientific laws. For psychoanalysis, these may be the unconscious and the pleasure-displeasure mechanisms; for philosophy, they may be truth, the soul, ethics, morality, and others, depending on the school of thought. It is, however, in religious thought that the notion of first principle is most clearly stated. Religious thought is therefore the most directly comparable to scientific thought. According to both monotheistic and polytheistic religions, it is God, or the various Gods, who are the first causes, of which all other phenomena in the Universe

are the effects. Polytheistic religions admit many different first principles, without any limitation in number, and without excluding the fact that they may also be the effects of other first principles. Monotheistic religions are based on two other assumptions: that the first principle is unique, and that there is no other cause of which it is the effect. From this point of view, science takes an intermediate position. It admits multiple first principles but seeks to keep their number to a minimum (the principle of parsimony discussed above) and does not rule out the possibility that actual first principles may be the effect of other, even earlier, principles.

However, science does not have the same objects of study as other forms of thought, and this is perhaps why it is accused of materialism. Indeed, although its motivation and objects of study are unquestionably spiritual in nature, science is exclusively interested in principles or objects which can exert an effect, or which potentially can, one day or another, interact with the universe observable by humans. Remember, any scientific law only becomes such when it is verified by experiment. As a result, science cannot be interested in a subject for which it is not yet clear how it can be put to experiment, because of its lack of interaction with our Universe.

We can then deduce that, to the many questions of the kind “Can science study the question of the existence of God?”, “Can science study what happens after death?”, “Can science study universes parallel to ours?”, or more generally “Can science study this or that entity?”, the answer will always be extremely clear. It’s clearly “YES” if the entity in question is already interacting or may one day interact with our Universe, and clearly “NO” if we don’t yet know how it will interact with our Universe.

Science is exclusively interested in principles or objects which can exert an effect, or which potentially can, one day or another, interact with the universe observable by humans

EPILOGUE

This is how accelerator physics fits into the landscape of physics in general, which in turn fits into the framework of fundamental science. Like other major systems of thought, scientific thought is embedded in the maze of the human brain. Like those systems, scientific thought is motivated by the brain itself – in other words, it is deeply spiritual, dealing with essentially spiritual subjects. Science, for its part, can boast many successes, each more resounding than the last, in modelling the Universe, and thus understanding it. But, it should be stressed, this has been achieved in the presence of a double paradox: it is only by dealing with a Universe devoid of any intentionality, as opposed to the human brain – which is permanently endowed with intentions –, that the Universe can be made intelligible, but on the additional condition of restricting ourselves to the Universe with which the brain can interact.

Accelerators are used to understand, analyse, cut, produce, engrave, manufacture or heal, on scales spanning 14 orders of magnitude, with extreme precision and reliability. This has only been possible thanks, among other things, to the development of accelerator physics, which manipulates abstract theoretical tools based on the fundamental concepts of physics in general. As a tangible link between the most concrete activities of society and the most emblematic methods of the scientific mind, accelerator physics is a valuable starting point for exploring the contributions of physics to the description of the observable Universe, as well as the complex relationship between science and society. The very tangible nature of this physics also enables us to address the deeper, more spiritual questions that human beings ask themselves about the Universe, and their place in it, with a concrete, direct perspective.

The history of accelerators has yet to be written. The demand for particle beams with ever-increasing energy, power, precision and reliability is relentless. The search for new, more efficient acceleration and focusing mechanisms promises accelerators that will be hundreds of times more compact than the current ones. Such search is based on the study of microscopic accelerating cavities generated in plasmas by laser or particle beams. We are willing to bet that this field still holds a lot of pleasant surprises in store for us, and that accelerator physics will continue to make satisfactory progress in this feat of accounting for the concrete world of reality via the abstract world of theory.

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to warmly thank Claire Antoine, Manuel Durand-Barthez, Angèle Sene and Didier Uriot for their reviews and enriching discussions. And especially Angèle Sene, for her consistent support at all levels. This book project has been supported by the CEA-IRFU (Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives-Institut de Recherche sur les Lois Fondamentales de l'Univers) and the network of laboratories of excellence P2IO (Physique des 2 Infinis et des Origines) of the Université Paris-Saclay.