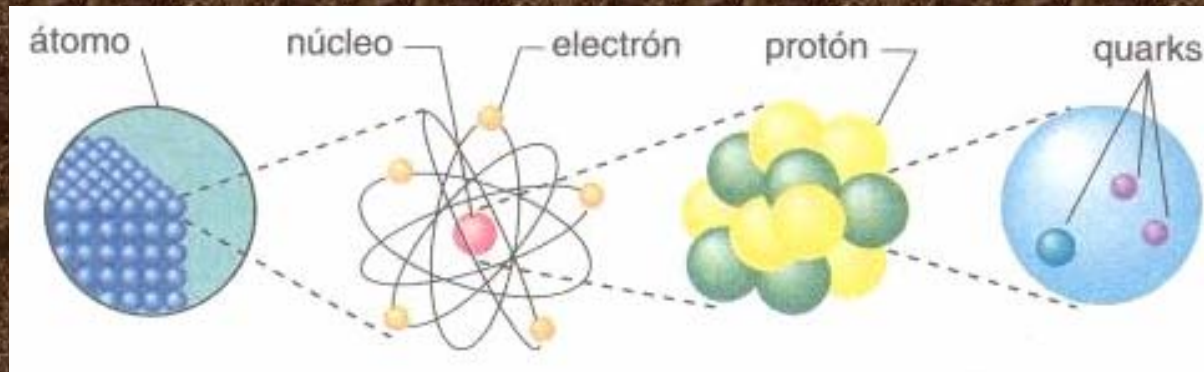


Las partículas elementales



Las partículas elementales

- Paradójicamente, la física de las partículas es una actividad a la vez enorme y discreta, imponente y mal conocida.
- Moviliza unos medios colosales pero no recibe grandes títulos de gloria. Menos, desde luego, que la conquista del espacio: cuando un astronauta pisó por primera vez el suelo lunar, todos los hombres pudieron «proyectarse» en su aventura, cualquiera que fuese su cultura y su latitud.

Las partículas elementales

- Es en cierta forma como si la humanidad entera, psicológicamente preparada por **Julio Verne** y por **Hergé** (*Impey Barbicane* y *Tintín*), hubiese dado esos mismos pasos sobre la luna.
- Pero si unos físicos detectasen mañana el famoso «**bosón de Higgs**» cuya existencia predicen casi todos los teóricos, ¿qué sucedería?

Las partículas elementales

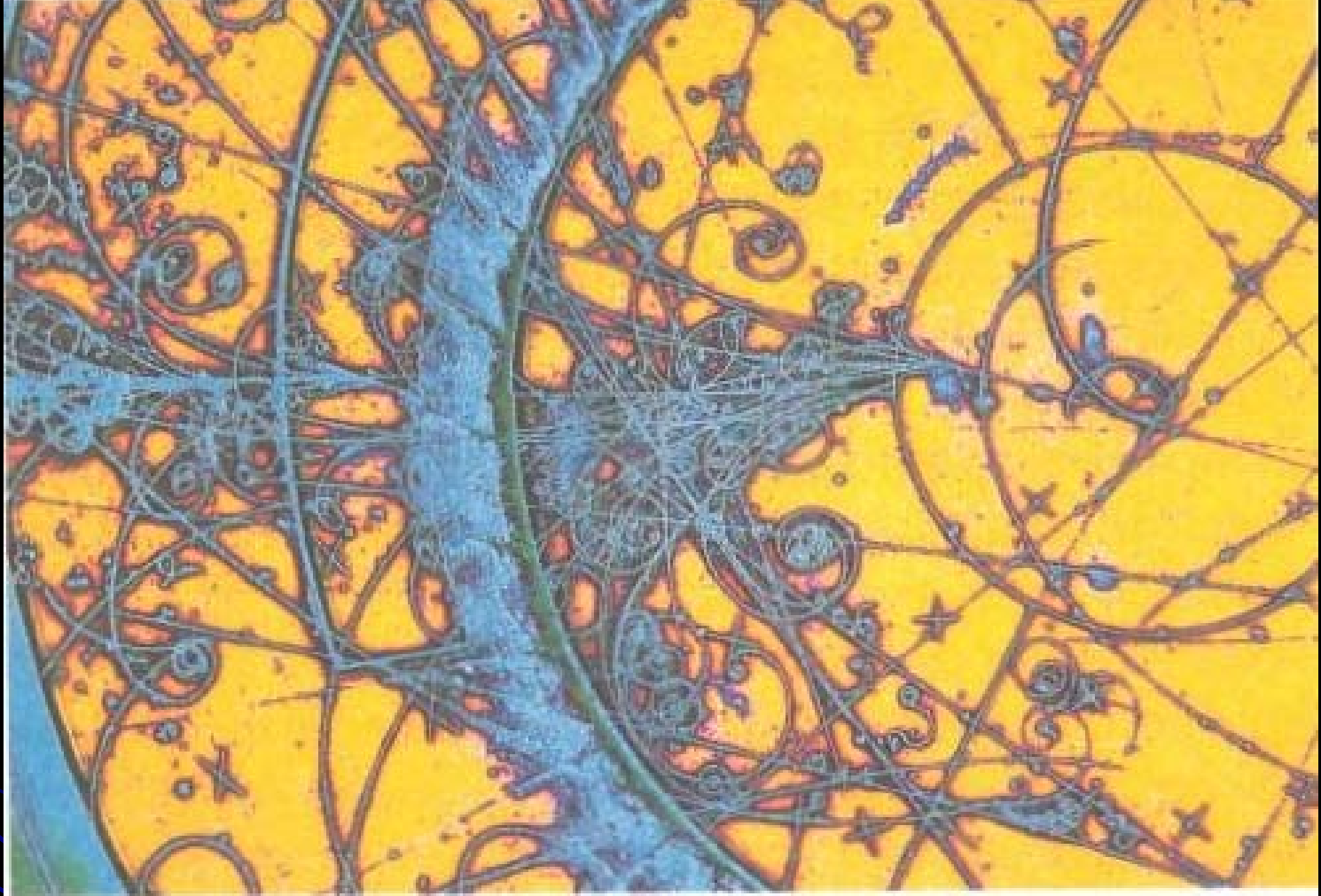
- Provocaría también por su parte un exaltado júbilo, pero esa embriaguez quedaría limitada a una comunidad de expertos.
- Por ello, si queremos que esa alegría, prometida para un momento inminente, sea una alegría compartida, conviene que las mentes estén preparadas.
- En definitiva, se trata de que todos nosotros nos volvamos contemporáneos de nosotros mismos.

Las partículas elementales

- Si alguien se pregunta qué es ese «**bosón de Higgs**» y qué interés se puede ofrecer, que sepa que no es el único.
- En eso coincide incluso con personas eminentes, ya que el propio ministro británico encargado de la ciencia, sir **William Waldegrave**, planteó esa pregunta a los científicos un día de primavera de **1993**.

Las partículas elementales

- Llegó incluso a prometer una botella de champán a quien consiguiera explicarle de forma comprensible el interés que tendría financiar la investigación de dicho **bosón**.
- El desafío es de altos vuelos, pero ¿por qué no intentar elevarnos todos juntos a su altura?



- **Foto de una cámara de burbujas:** La cámara de burbujas es un dispositivo de detección de las partículas. Cada uno de esos dos términos, cámara y burbujas, evoca el reposo y la siesta, pero son engañosos. Por el contrario, este detector pone de manifiesto los violentísimos arcanos de lo infinitamente pequeño. Por su pesado manejo ya no se utiliza hoy, pero desde su invención en 1953 permitió identificar numerosas partículas.

Las partículas elementales

- **La ciencia no es una actividad democrática.**
- Y por cierto tampoco tiene vocación de llegar a serlo: nunca se ha planteado la cuestión de votar a favor o en contra de la gravitación universal, y, en 1905, Einstein y su relatividad tuvieron razón contra la mayoría de los físicos.


Las partículas elementales

- Pero la ciencia, que no es democrática en su construcción, no deja de ser republicana en su espíritu: es un «asunto público».
- **Corresponde a quienes la viven, y viven de ella, explicarla, explicarla y volverla a explicar.**

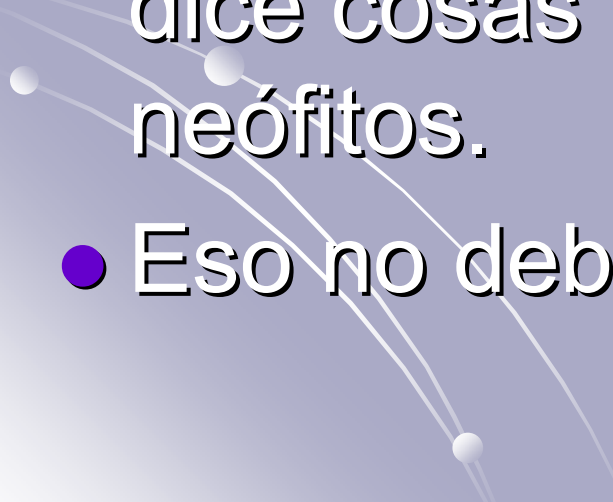
Las partículas elementales

- La física de las partículas es, por su objeto y sus metas, **una disciplina fronteriza**.
- En su expresión teórica, recurre a unos conceptos matemáticos muy elaborados, y bastante alejados de nuestras matemáticas de instituto; en su aspecto experimental, está al límite de las posibilidades tecnológicas del momento, hasta tal punto son gigantescos y sofisticados los medios que maneja. Las cosas están así: el mundo llamado de «**lo infinitamente pequeño**», de apariencia tan diáfana, reclama una física pesada.
- Ese es el precio que debemos pagar para poder seguir los pasos de lo real.

Las partículas elementales

- Esa pesadez experimental va a veces acompañada de una pesadez conceptual, aunque esta última no carezca de elegancia.
- 

Las partículas elementales

- Una página de artículo especializado puede resultar más ilegible que un galimatías, y cuando en un seminario un teórico se dirige a sus colegas, dice cosas incomprensibles para los neófitos.
 - Eso no debe desanimarnos.
- 

Las partículas elementales

- Al fin y al cabo, las matemáticas puras son todavía más difíciles, y también los mecanismos de la economía internacional, que incluyen directamente en nuestra vida diaria.

Las partículas elementales

- Si aquellos y aquellas que no “**están en el ajo**” leyeran esto, no entenderían íntegramente las palabras del físico mencionado antes, pero al reconocer el preludio de la melodía que toca, captarían *de qué* habla.
- Habrían dado lo que podríamos llamar un primer paso.

Las partículas elementales

- La física de las partículas es una disciplina reciente.
- A principios del siglo XX, sólo eran unas decenas de físicos en el mundo (sobre todo en Europa) lo que se interesaban por las partículas.

Las partículas elementales

- Hoy ya son más de diez mil los que construyen unas enormes máquinas, **los aceleradores.**
- En ellas hacen circular la materia a la velocidad de la luz, luego provocan colisiones entre partículas; aparecen otras nuevas partículas, que ellos identifican mediante inmensos detectores; luego intentan comprender lo que ha podido suceder.

Las partículas elementales

- Pero ¿a cuento de qué deberíamos, a remolque de esas gentes, interesarnos nosotros también por las partículas?
- A decir verdad, los argumentos son muchos.


Las partículas elementales

- En primer lugar, al igual que el agua y el vino, la flor y la nube, la piedra y la estrella, estamos al parecer hechos todos nosotros de partículas juguetonas, y habría que ser muy poco curioso para no querer saber nada de ellas; por otra parte, las máquinas que utilizan los físicos, tanto los aceleradores como los detectores con que están equipadas, son financiadas gracias a una parte de nuestros impuestos; y todos somos contribuyentes, de buen o de mal grado, luego sus maquinotas son también un poco nuestras.

Las partículas elementales

- Desde luego no se hacen sin nuestra contribución, por pasiva que ésta sea.
- He aquí al menos dos razones, una muy pura, y otra muy práctica, para que ejerzamos el derecho de crítica sobre las actividades y los descubrimientos de los físicos del abismo.

Las partículas elementales

- ¿Hace falta una tercera razón?
 - Nadie mejor situado que ellos, *a priori*, para decirnos “por donde empezar a trinchar el pollo”, y también para contarnos la historia del Universo.
- 

Las partículas elementales

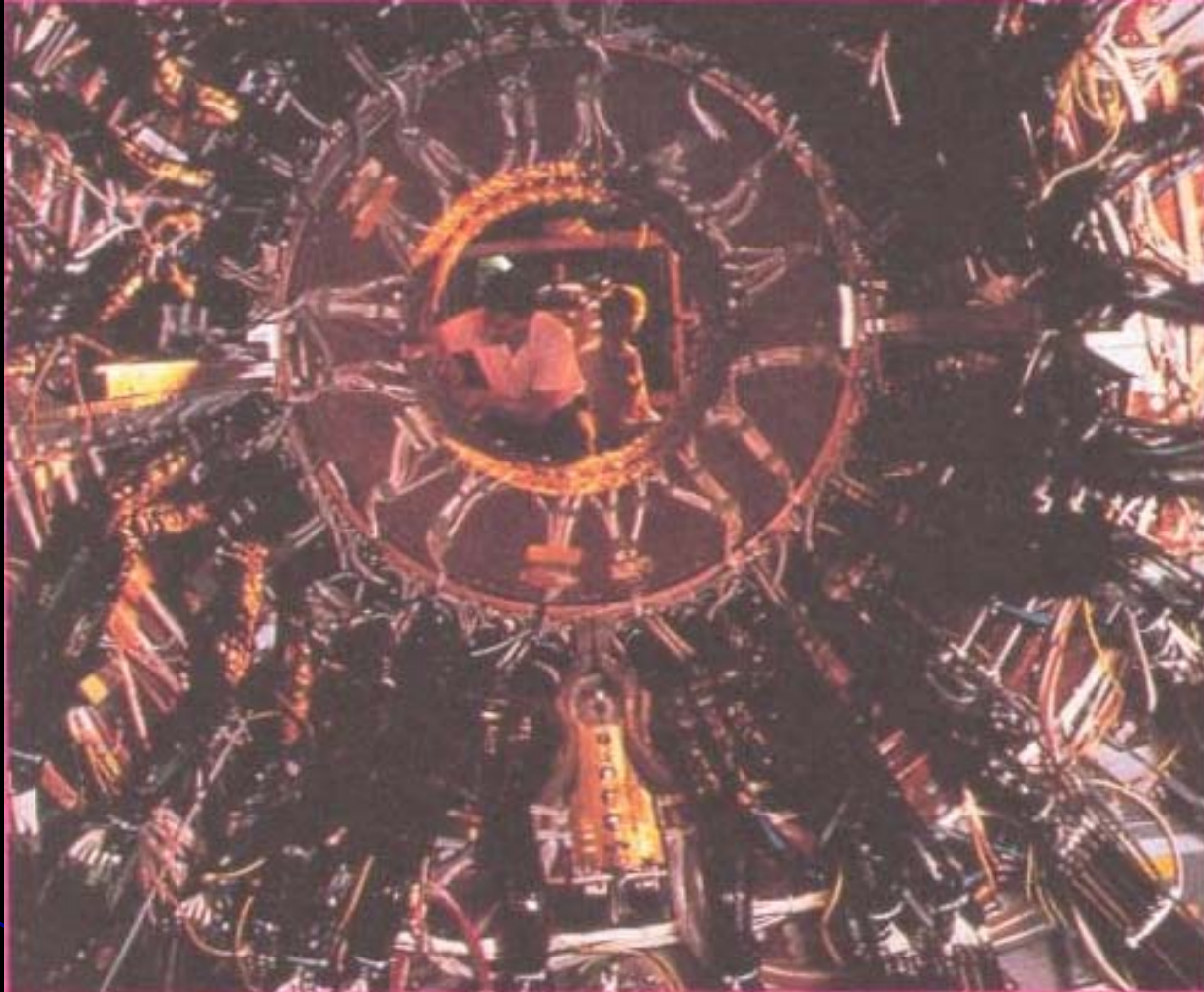
- La simplicidad de lo que sigue no debe servir de ilusión: el saber acumulado desde hace casi un siglo en esta disciplina no es fácilmente accesible.

Las partículas elementales

- Complejo, inmenso, profuso, árido, ocupa estantes y estantes en bibliotecas y laboratorios, oculto tras barricadas de encuadernaciones, o en algunos cerebros bien dotados.

Las partículas elementales

- Pero como si de la red de ferrocarriles se tratara, se pueden fácilmente identificar y destacar sus principales líneas.



- **Detector de la experiencia OPAL:** OPAL es una de las cuatro enormes experiencias instaladas alrededor del anillo LEP, el gran colisionador del CERN. Su detector permite estudiar los múltiples modos de desintegración de una de las partículas que mediatiza la interacción débil, el Z^0 , cuya duración de vida es muy corta (10-25 s).

Unos monstruos para unas ínfimas partículas

- El primer hecho práctico que se impone a cualquier visitante de un laboratorio de física de partículas es el gigantismo de las instalaciones: el *Large Electron Positron (LEP)*, que es el mayor acelerador del Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN) y del mundo (algunos le han puesto el apodo de «**Señor de los Anillos**»), mide 27 km de circunferencia; sus detectores también son inmensos: uno de ellos contiene más acero que la Torre Eiffel.

Unos monstruos para unas ínfimas partículas

- ¿No es eso paradójico?
- Si la vocación de la física de partículas es estudiar objetos minúsculos, ¿no sería de esperar que el tamaño de sus escalpelos disminuyese en proporción al tamaño de los objetos estudiados?

Unos monstruos para unas ínfimas partículas

- Ahora bien, lo que vemos es exactamente lo contrario.
- Para explorar el interior de la materia, los físicos disponen de energías muy elevadas, proporcionadas por unos microscopios monstruosos que son los aceleradores de partículas.
- ¿De dónde viene ese contraste de tamaño?

Unos monstruos para unas ínfimas partículas

- Para estudiar una partícula, hay que “iluminarla” de alguna forma, es decir, proyectar sobre ella un haz de... partículas (no necesariamente luminosas).
- Una experiencia de física de partículas consiste pues en primer lugar en enviar unas partículas «sonda» sobre unas partículas «blanco».

Unos monstruos para unas ínfimas partículas

- De acuerdo.
- ¿Pero por qué hacen falta unos grandes aceleradores para producir esas sondas?
- Para entenderlo, hay que recordar dos resultados ineludibles de la física.

Unos monstruos para unas ínfimas partículas

- Primero, una relación extraña, establecida en **1923** por **Louis de Broglie**, respecto a la **dualidad onda-corpúsculo**.
- Bajo ese término se oculta la idea de que a toda partícula va asociada una onda, lo cual hace que las partículas sean tan ambiguas como el **murciélago de La Fontaine**, que se presenta alternativamente como un pájaro o como un ratón, pero no es ni una cosa ni la otra.
- Las partículas, en sí mismas, se presentan, según el contexto de su observación, a veces como corpúsculos y a veces como ondas, pero no son ni ondas ni corpúsculos.

Unos monstruos para unas ínfimas partículas

- Entonces, ¿qué son, si su identidad es doble?
- Es sobre esta cuestión (y particularmente sobre el sentido que conviene darle aquí a la palabra «asociado») sobre la que se plantea desde hace setenta años el espinoso debate cuántico.
- Lo que Louis de Broglie estableció a ese propósito, es que la longitud de onda de la onda *asociada* a una partícula es tanto más corta cuanto más rápida es la partícula en cuestión.

Unos monstruos para unas ínfimas partículas

- En segundo lugar, una ley óptica, que hace que un fenómeno ondulatorio no interactúe sino con objeto de dimensión superior a su longitud de onda.
- Las olas del océano no se ven afectadas por la presencia de un nadador ya que éste es pequeño con relación a la distancia que separa dos olas sucesivas; en cambio, son perturbadas por la presencia de un gran navío.

Unos monstruos para unas ínfimas partículas

- Las olas «ven» a los trasatlánticos, no a los bañistas.
- En resumen, si la partícula que elegimos por blanco es pequeña, la partícula sonda deberá tener una longitud de onda pequeña.
- Si no, no sondeará nada.

Unos monstruos para unas ínfimas partículas

- Basta con articular estas dos leyes para obtener la respuesta que buscábamos: cuanto más pequeñas sean las estructuras que queremos estudiar, más pequeña debe ser también la longitud de onda de las partículas que las golpean; al ser esa longitud de onda tanto más pequeña cuanto más elevada es la energía de esas partículas, hay que disponer, para estudiar los objetos microscópicos, de unos aceleradores potentes (y por ende costosos) capaces de transmitir mucha energía a las partículas sonda.

Unos monstruos para unas ínfimas partículas

- De ahí que los físicos que desean observar unos fenómenos cada vez más tenues necesiten unas energías cada vez mayores.
- Es la dura ley del deporte cuántico.

Unos monstruos para unas ínfimas partículas

- Los aceleradores son unos microscopios gigantes.
- Cumplen el papel, respecto a lo infinitamente pequeño, que cumplen el anteojo de Galileo y demás telescopios respecto a lo infinitamente grande: permiten explorar lo que es invisible para el ojo humano.

Unos monstruos para unas ínfimas partículas

- Avancemos unas cifras.
- La unidad fetiche que utilizan los físicos de las partículas para apreciar una energía es el electrón-voltio (abreviado eV), y todos sus múltiplos: el keV (mil eV), el MeV (un millón de eV), el GeV (mil millones de eV), el TeV (un billón de eV),
...

Unos monstruos para unas ínfimas partículas

- Como casi lo indica su nombre, el electrón voltio es la energía que gana un **electrón** acelerado por una diferencia de potencial de 1 voltio (si el electrón está inicialmente en reposo, esta **aceleración** aumenta su velocidad a 600 km/s).
- 1 eV equivale a $1,6 \cdot 10^{-19}$ julios.

Unos monstruos para unas ínfimas partículas

- Lo que acabamos de explicar significa cuantitativamente que una partícula de unos cuantos keV otea el angstromio, o sea 10^{-10} m (el tamaño del átomo), que a los 100 MeV ya llega al fermio, o sea 10^{-15} m (el tamaño del **protón**), y que a los 100 GeV alcanza la milésima de fermio.
- Este último es el caso del LEP.

Por favor... ¡píntame una partícula!

- Hemos empezado a hablar de partículas sin decir lo que significa esa palabra.
- ¿Qué es exactamente una partícula?
- El concepto de partícula (o el de átomo, en el sentido etimológico del término) fue una idea filosófica antes de ser objeto de estudio de la física.

Por favor... ¡píntame una partícula!

- El átomo de los antiguos griegos ha experimentado a lo largo de los siglos las más extraordinarias metamorfosis, hasta instalarse finalmente en el formalismo matemático en el que está confinado hoy: ahora ha quedado asentado que las partículas no tienen mucho que ver con las bolitas por las que se las representa muchas veces.
- Y que seamos capaces de manipularlas no significa que sean fáciles de describir.

Por favor... ¡píntame una partícula!

- El marco formal dentro del cual se describen las partículas y sus interacciones es la **teoría cuántica de campos**.
- Pese a su nombre, esta teoría no tiene nada que ver con las técnicas agrícolas.

Por favor... ¡píntame una partícula!

- Mediante argumentos matemáticos, defiende la idea de que las partículas no son sino los diferentes estados de excitación de un campo, que a su vez no es una cosa «**real**», sino como mucho lo que los matemáticos llaman un **operador**.

Por favor... ¡píntame una partícula!

- Oyendo esto, un teórico ortodoxo se apresuraría a añadir que a toda partícula le corresponde «una representación irreductible del grupo de Lorentz inhomogéneo» (*sic*).
- Hermosa retórica, desde luego, pero permítasenos dudar de que pueda llenar de gozo a los más profanos.

Por favor... ¡píntame una partícula!

- Entonces, en términos sencillos, ¿qué es un **campo cuántico**?
- Es el objeto matemático que ha habido que inventar para describir las partículas.

Por favor... ¡píntame una partícula!

- Si estas últimas ya no se pueden representar mediante puntos o formas geométricas, es porque un campo cuántico no evoluciona en el espacio ordinario, sino en espacios abstractos que son una generalización del mismo.
- Un electrón, por ejemplo, es descrito por un campo cuántico electrónico que, como una onda clásica, se reparte por todo el espacio.

Por favor... ¡píntame una partícula!

- Tiene un valor en cada punto.
- Pero la analogía no acaba ahí, ya que su significado no es el de un campo clásico.

Por favor... ¡píntame una partícula!

- La mecánica cuántica interpreta un campo cuántico diciendo que la probabilidad de encontrar –durante una medición- un electrón en un punto determinado del espacio está ligada a la amplitud del campo en ese punto.
- El significado real de ese enunciado forma parte también del debate cuántico.

Por favor... ¡píntame una partícula!

- En virtud de otra ley cuántica, el **principio de Heisenberg**, cuanto más minúscula es la realidad, más rápida y móvil se vuelve. Ninguna mirada, ningún instrumento pueden ya captar su imagen: se vuelve imposible de representar.
- Aunque el propio **Principito [1]** lo pidiese con insistencia, nadie podría pintarle una partícula.

● **[1]** “Le Petit Prince”. Obra de Saint Exupery.

Por favor... ¡píntame una partícula!

- Deberá acostumbrarse, al igual que los físicos, a la impotencia de la imagen.
- Pues nuestra necesidad de ver, por irreprimible que sea, se encuentra aquí irremediablemente frustrada: no se pueden representar visualmente las partículas.

Por favor... ¡píntame una partícula!

- Pero, ¿tan lamentable es esa falta de claridad tangible?
- ¿Acaso no debemos más bien considerar que ese fin de la imagen abre las puertas de lo imaginario?
- Imaginario cuya legitimidad residiría en la propia ciencia, ya que ésta es impotente para mostrarnos verdaderamente las cosas.

Por favor... ¡píntame una partícula!

- ¿Podemos llegar a decir que una partícula no es una cosa?
- Quizá, pero eso no tendría ningún sentido: en efecto, ¿qué sería algo que no fuera una cosa?
- El propio diccionario nos dice que la palabra *cosa* no tiene contrario, o más bien, que sólo tiene uno, que es *nada*.

Por favor... ¡píntame una partícula!

- Ahora bien, una partícula es algo, no nada.
- Entonces digamos simplemente que una partícula no es una cosa ordinaria, que sería la visión en miniatura de los objetos de la vida corriente.
- Pero lo extraño hubiera sido más bien lo contrario.

Por favor... ¡píntame una partícula!

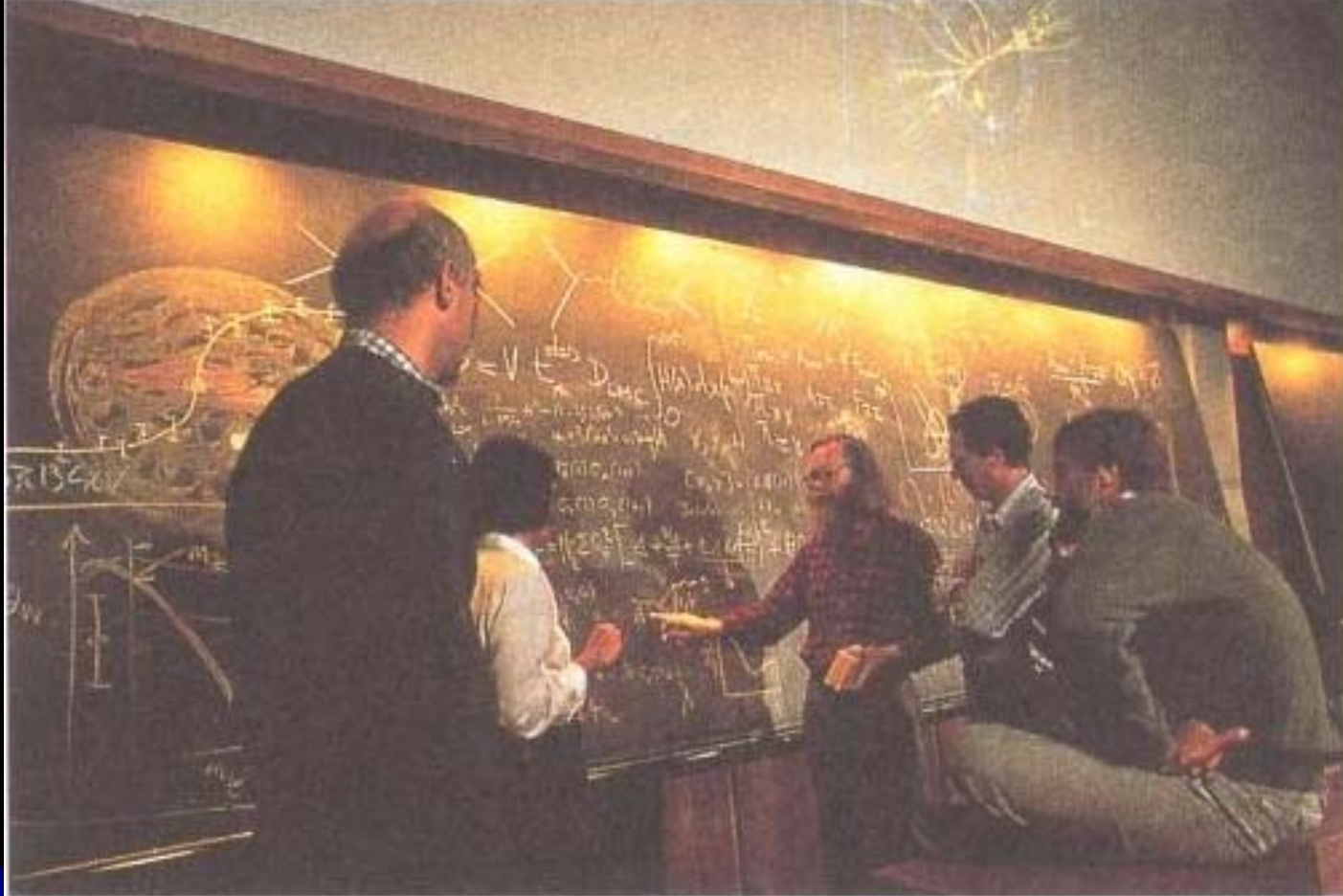
- En ese contexto, es difícil eludir una abstracción que paso a paso va llevando cada vez más lejos cualquier posible «existente básico».
- Aunque no desdeñen recurrir a cierta forma de intuición, los teóricos ya no son capaces de «ponerse en el lugar» de las cosas.
- Además, al contrario que sus predecesores, ya no se arriesgan a opinar sobre la naturaleza de la naturaleza.

Por favor... ¡píntame una partícula!

- Las partículas son todas invisibles tal cual. Sólo podemos ver las huellas que dejan en algunos materiales.
- Para compensar esa imposibilidad de ver, los físicos se ven obligados a añadirle al mundo de las apariencias un mundo de signos sacados del lenguaje matemático.

Por favor... ¡píntame una partícula!

- ¿Qué vínculo existe entre esos dos universos, el de los *perceptos* (los fenómenos) y el de los *conceptos* (el formalismo)?
- Siempre es fascinante interrogarse sobre la ontología de los objetos matemáticos que sirven para describir las observaciones: ¿a qué corresponden en la realidad?
- ¿Son entes reales o meros productos de nuestra mente?



- **Teóricos en acción:** Los físicos le añaden al mundo de las apariencias un mundo de signos, sacados del lenguaje matemático, y utilizan conceptos imposibles de encontrar en la experiencia corriente. ¿Captan los conceptos matemáticos lo real, o sólo lo transcriben? ¿Cuál es su verdadera correspondencia con la realidad? ¿Y cómo es que en física «funcionan» las matemáticas?

¿Qué es eso de una alta energía?

- A nuestra escala, cuando dos objetos (por ejemplo dos vasos) percuten, se hacen añicos.
- En el mundo de las partículas, las cosas suceden de forma diferente.
- No hay añicos.

¿Qué es eso de una alta energía?

- Una partícula no se rompe en el sentido en que entendemos normalmente esa palabra.
- El mismo concepto de pedazos de partículas no tiene por cierto ningún sentido, por ello la metáfora muchas veces citada de las muñecas rusas cuya sucesión simularía la estructura del mundo tiene sus límites.

¿Qué es eso de una alta energía?

- Es más bien la energía del choque la que acaba por transformarse en nuevas partículas, según la ecuación $E = mc^2$ que nos indica que la energía (E) es equivalente a la masa (m).
- En ese caso, $1 + 1$ partículas sí suman 2 partículas, pero esas 2 partículas son en general inestables: la energía que se llevan se vuelve a repartir entre masa (se crean nuevas partículas, por ejemplo 4 , 12 ó 35) y energía cinética (esas nuevas partículas están en movimiento).

¿Qué es eso de una alta energía?

- Ese proceso de «**redistribución**» se puede observar a condición de que sea lento (si dura más de 10^{-13} s).
- En el caso contrario, da la impresión de que es el choque mismo el que ha creado todas esas nuevas partículas: $1 + 1$ ya no suman **2**, sino **4**, **12** ó **35**.
- Sea como sea, la partícula sonda, lejos de ser simple espectadora del fenómeno que permite observar, contribuye a provocarlo.

¿Qué es eso de una alta energía?

- Algunas de las partículas creadas son partículas «**ordinarias**», tales como **protones, neutrones, electrones** u otros **neutrinos** (unas misteriosas partículas, omnipresentes en el Universo, pero muy discretas) que existen habitualmente en la naturaleza; otras sólo aparecen durante un corto instante.

¿Qué es eso de una alta energía?

- Inestables y fugitivas, se vuelven a transformar muy rápidamente, produciendo otras partículas que a menudo se transforman a su vez hasta que sólo quedan partículas estables.
- De ahí las espirales arborescentes y los haces ondulantes que ornán las cámaras de burbujas.

¿Qué es eso de una alta energía?

- Los fenómenos observados en los detectores de los físicos sólo se producen espontáneamente en las estrellas o en la radiación cósmica.
- Los aceleradores son simplemente un medio para fabricarlos o reproducirlos en la Tierra.

¿Qué es eso de una alta energía?

- Al no hallarse aquí espontáneamente la mayoría de las partículas estudiadas, para hacerlas aparecer hay que recrear las condiciones en las que están naturalmente presentes.
- Hay que atravesar el «**umbral de energía**» que las separa de su propia realidad, ya que una partícula sólo puede aparecer en el momento de una colisión si la energía es suficiente para que parte de esa energía se materialice en esa partícula.

¿Qué es eso de una alta energía?

- Las colisiones de partículas a alta energía reproducen las condiciones físicas que prevalecían en el Universo primordial: muy fuerte densidad y muy alta temperatura.
- Gracias a sus experiencias, los físicos simulan los tiempos remotos.

¿Qué es eso de una alta energía?

- El LEP, con sus **100 GeV**, nos transporta a unas fracciones de nanosegundo (**10^{-9} s**) del **big bang**, es decir a un ambiente mucho más frío (**10^{15} K [kelvin]**) de lo que fue en los primeros momentos (**10^{32} K**).

¿Qué es eso de una alta energía?

- Esto nos autoriza a decir que los aceleradores son máquinas para remontarse en el tiempo que ha transcurrido desde las primeras emanaciones del **big bang** (pero sólo en el tiempo cósmico, no en el de nuestra vivencia, no vayamos a entusiasmarnos).

¿Qué es eso de una alta energía?

- Pero ¿qué representan exactamente esas altas energías?
- ¿Son realmente tan enormes?
- Pongamos de nuevo por caso el **LEP**.

¿Qué es eso de una alta energía?

- Es un colisionador en el cual son acelerados unos haces de electrones y de positrones de **50 GeV**, o sea **50 mil millones de electrón-voltios**, lo cual es impresionante.
- ¿No serán los aceleradores unas bombas disfrazadas?

¿Qué es eso de una alta energía?

- Para saberlo, comparemos esos **50 GeV** con la energía de un objeto familiar, por ejemplo... un mosquito volando.
- Supongamos que el díptero en cuestión tenga la masa de **2 miligramos** y vuele a la velocidad de **1 metro/segundo** (mosquito no relativista ...).

¿Qué es eso de una alta energía?

- Quienes no sientan rechazo hacia las ecuaciones saben que su energía cinética, E_c , se obtiene mediante la ecuación $E_c = \frac{1}{2} mv^2$ (siendo m la masa, y v la velocidad), es decir, **1 microjulio**.
- Convertida en eV, alcanza los **6.250 GeV**, ¡es decir **125** veces más que un electrón del **LEP**!

¿Qué es eso de una alta energía?

- Ahora bien, cuando un electrón del LEP entra en colisión con un positrón de la misma energía, se crean otras numerosas partículas, que antes no estaban presentes.
- Pero entonces, ¿no podrían los mosquitos, mucho más energéticos, crear todavía más partículas por colisión?
- Y más aún: si los coches tienen más energía que los mosquitos, ¿no podríamos transformar las autopistas en colisionadores, cosa que por cierto son en ocasiones?

¿Qué es eso de una alta energía?

- Pues no, la colisión de dos mosquitos no produciría nada interesante, por la sencilla razón de que no es la energía la que cuenta sino la densidad de energía, es decir, la cantidad de energía por unidad de volumen.

¿Qué es eso de una alta energía?

- Ahora bien, el mosquito está constituido por un número asombroso de átomos y de moléculas que se reparten equitativamente su energía total, lo que significa que la energía contenida en cada constituyente es ridículamente débil.
- El electrón del LEP, por sí mismo, es casi puntual y su densidad de energía es inmensa.

¿Qué es eso de una alta energía?

- Así, lanzando las partículas unas contra otras, se obtiene durante unos breves instantes una enorme concentración de energía, suficiente para producir materia.
- Con dos mosquitos, no.
- Más que de física de altas energías, deberíamos hablar de **física de altas densidades de energía**.

¿Qué es eso de una alta energía?

- Volvamos a nuestra conversión de energía en materia, que durante un choque entre dos partículas produce otras múltiples partículas.
- En esas circunstancias, una propiedad de objetos (la velocidad de las partículas) se transforma a su vez en objetos (otras partículas); un tamaño físico se encarna físicamente.

¿Qué es eso de una alta energía?

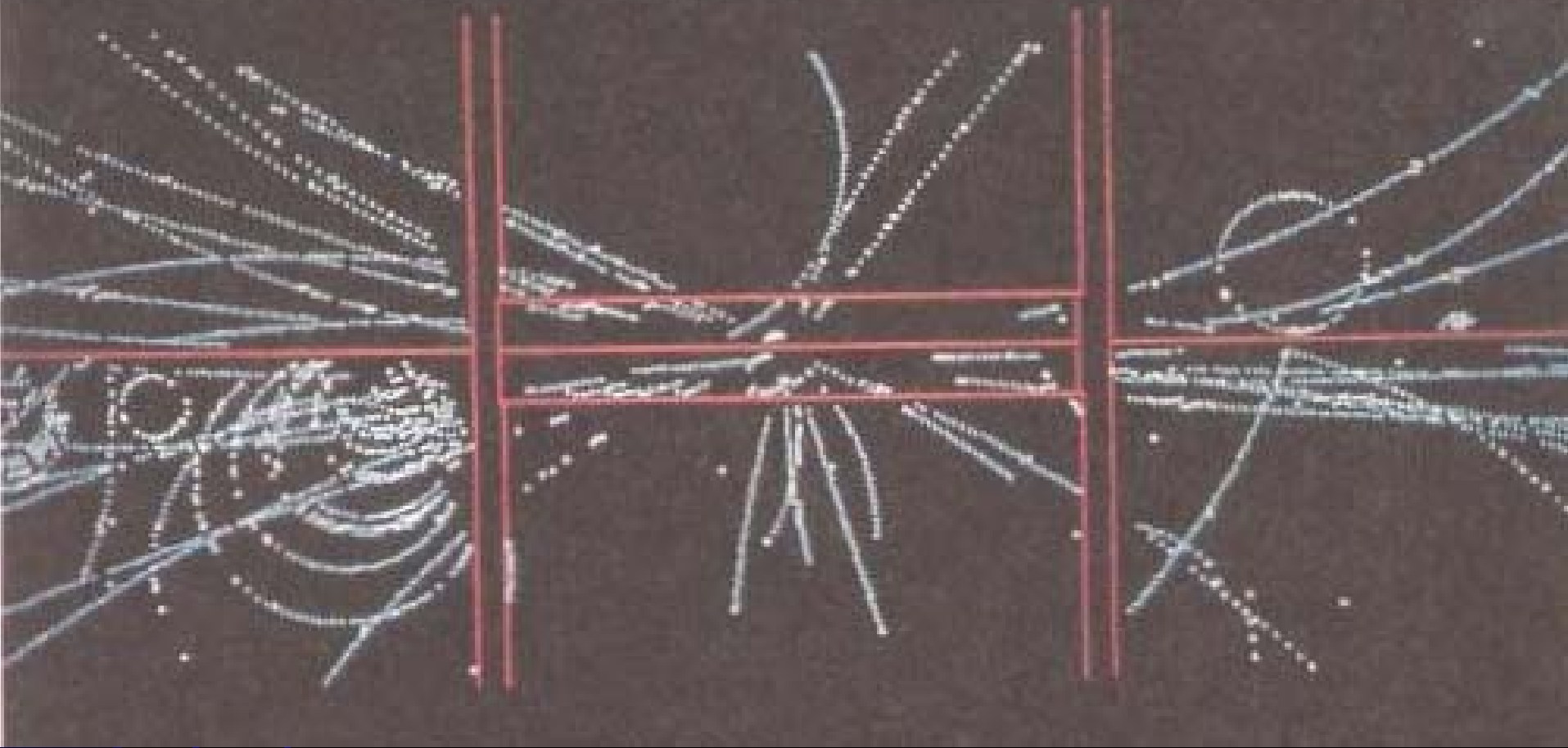
- Estamos ante una situación muy poco corriente en la vida ordinaria.
- Quienes duden de ello sólo tiene que imaginar un segundo qué cara pondrían si les anunciaran que una colisión entre **Antonio Banderas** y **Nicole Kidman** ¡ha dado lugar a dos bañistas y tres delfines!

¿Qué es eso de una alta energía?

- Resumiendo: a alta energía, las colisiones entre partículas provocan pequeñas génesis jaspeadas que hacen surgir del vacío miríadas de partículas.
- El mundo de lo infinitamente pequeño es pues un mundo abierto.

¿Qué es eso de una alta energía?

- Para visitarlo, basta con cruzar el umbral.
- Desde luego, como en todas partes, hay que llamar antes de entrar.
- Pero aquí, no es sólo por educación:
 $E = mc^2$ tiene sus imperativos.



- **Colisión frontal de partículas:** Con los choques recíprocos muy violentos que sufren en los colisionadores, las partículas se transforman en energía pura, volviendo a las condiciones de temperatura que reinaban en el Universo poco después del big bang. La «bola de fuego» que se forma así subsiste durante un corto instante, y luego la energía se transforma en nuevas formas de materia: aparecen nuevas partículas, como surgidas de la nada.

¿A cuánto va una partícula de alta energía?

Silencio, se rueda. Un electrón del LEP

- Las primeras generaciones de aceleradores, ya fuesen circulares o lineales, aceleraban un haz hasta que alcanzara la energía deseada y luego lo enviaban sobre un blanco fijo, constituido por hojas o bloques de materia cuyos núcleos atómicos o **nucleones** (protones o neutrones) interactuaban con los proyectiles incidentes.
- Los productos de la colisión eran analizados por unos detectores.

¿A cuánto va una partícula de alta energía?

- El balance energético de este tipo de reacciones no es ideal: todos sabemos que una colisión frontal entre dos coches en movimiento produce más daños que si la colisión se hace contra un coche parado.
- En efecto, en este último caso, gran parte de la energía cinética del coche incidente se transmite en forma cinética al coche inicialmente parado (que se ve propulsado por el choque).

¿A cuánto va una partícula de alta energía?

- En una situación análoga, en que son las partículas las que entran en colisión, la energía cinética no puede transformarse íntegramente en masa, ya que la ecuación $E = mc^2$ no actúa aquí a pleno rendimiento.
- La energía cinética residual comunicada a la partícula blanco representa una pérdida de energía.

¿A cuánto va una partícula de alta energía?

- Para mejorar las cosas desde ese punto de vista, hay que trabajar con un blanco que sea a su vez un haz que se propague en sentido contrario (ya no existe entonces distinción entre las partículas blanco y las partículas sonda).
- En ese caso, la energía transmitida a las partículas iniciales se transforma en masa con un máximo de eficacia.

¿A cuánto va una partícula de alta energía?

- Esta configuración, que ya se ha explorado con éxito, es la de los anillos de colisiones y los futuros **colisionadores lineales**, en que dos haces chocan frontalmente: toda la energía de los haces puede convertirse en masa.

¿A cuánto va una partícula de alta energía?

- Tomemos otra vez el ejemplo del **LEP**, donde los electrones de **50 GeV** entran en colisión con unos **positrones** de igual energía.
- La energía total disponible es de **100 GeV**.

¿A cuánto va una partícula de alta energía?

- Si quisiéramos disponer de la misma energía utilizable enviando un haz sobre un blanco fijo, ese haz tendría que tener una energía de **10 millones de GeV**, es decir, **200.000** veces más que en el **LEP**, cosa técnicamente impensable, al menos por el momento.



- **El LEP** es un colisionador circular de electrones y de positrones, situado bajo la cordillera del Jura en un túnel de 27 kilómetros de largo. Colocados a espacios regulares en toda la circunferencia, unos imanes guían las partículas dentro de la misma cámara de vacío: electrones y positrones tienen masas idénticas y cargas eléctricas opuestas, y siguen la misma órbita, pero en sentido contrario.



- **Acelerador de partículas del CERN** (Consejo Europeo de Investigación Nuclear), Suiza. Los grandes aceleradores de partículas permiten indagar en la estructura íntima de las partículas elementales.

¿A cuánto va una partícula de alta energía?

- Volvamos entonces con nuestros electrones de **50 GeV** del **LEP**.
- La fórmula que hemos citado anteriormente $E_c = \frac{1}{2} mv^2$ nos proporciona su velocidad, con tal de que hagamos el pequeño esfuerzo de invertirla: $v = (2E/m)^{1/2}$, es decir en este caso **132.623.573 km/s**, lo que corresponde a ¡**442 veces la velocidad de la luz en el vacío!**
- Pero todos hemos oído decir en algún momento que esta última es imposible de superar.

¿A cuánto va una partícula de alta energía?

- ¿No habremos cometido un error de cálculo?
- No, es más bien nuestra fórmula la que deja de ser válida en cuanto la velocidad deja de ser desdeñable respecto a la de la luz.

¿A cuánto va una partícula de alta energía?

- Tenemos entonces que recurrir a los principios de la **relatividad**, que obligan a reemplazar la fórmula por otra, en que la velocidad de la luz aparece efectivamente como una velocidad insuperable para unas partículas de masa no nula.
- **No se puede adelantar a una partícula de luz**, nos dice Einstein, ni siquiera se la puede alcanzar.

¿A cuánto va una partícula de alta energía?

- Imposible correr más rápido que la luz, aun cuando su velocidad límite de **299.792.458 m/s** se alcance casi en los aceleradores de partículas ligeras (para ser exactos, haría falta una energía infinita para conseguirlo).

¿A cuánto va una partícula de alta energía?

- Podríamos creer que en un acelerador las partículas van cada vez más de prisa.
- A mayor energía, mayor velocidad, nos susurra nuestro sentido común newtoniano.

¿A cuánto va una partícula de alta energía?

- En realidad, los aceleradores «**aceleran casi a una velocidad constante**», es decir, que en el sentido newtoniano del término no aceleran realmente: comunican energía a las partículas, sin que su velocidad aumente notablemente, ya que –prácticamente– van ya casi tan rápido como la luz.

¿A cuánto va una partícula de alta energía?

- En definitiva, cuanto más energía se les da, menos eficazmente se les acelera.
- Y viva la paradoja, como ya dijo Zenón de Elea cinco siglos antes de Jesucristo.

¿A cuánto va una partícula de alta energía?

- Hablar de los griegos, ¿no es precisamente una buena forma de evocar los comienzos de la Física?
- De ellos nació en ellos la idea del átomo.

Cuatro son las interacciones

- Si la fruta cae, si nuestro cuerpo se sostiene, y también la mesa, si el filamento de la bombilla alumbra y si el sello húmedo se adhiere, es porque un juego de fuerzas asegura la cohesión de las cosas y organiza su movimiento.

Cuatro son las interacciones

- Para describir su pequeño mundo, la Física contemporánea hace intervenir cuatro interacciones consideradas fundamentales: **la gravitación**, por supuesto; la **interacción electromagnética**, que se encarga de la cohesión de la materia a nuestra escala; la **interacción débil**, que maneja ciertos procesos radiactivos, y finalmente la **interacción fuerte**, que acabamos de descubrir, y que une los constituyentes de los núcleos.

Cuatro son las interacciones

- En Física clásica, una fuerza entre dos partículas se transmite en el espacio por conducto de campos: un campo, engendrado por una partícula, se propaga y luego actúa sobre la otra partícula.

Cuatro son las interacciones

- La teoría cuántica de campos obliga a revisar ese concepto.
- Explica primero que para que haya interacción, tiene que haber intercambio de algo.
- Ese algo es un **cuanto de campo**, es decir una partícula característica de ese campo.

Cuatro son las interacciones

- De ahí que resulte que una interacción no se ejerza entre dos partículas sino por **intercambio** de una tercera que «**mediatiza**» la interacción.
- Propongamos una imagen (por supuesto falsa, pero no demasiado) de lo que eso significa.

Cuatro son las interacciones

- Imaginemos dos barcas a la deriva en un lago.
- El ocupante de cada una de las barcas carece de todo tipo de objeto que pudiese ayudarlo a dirigir su embarcación.
- En concreto, no tiene ni remos ni pagaya, y no se divisa a ningún guardacostas en el horizonte.

Cuatro son las interacciones

- Supongamos que las dos barcas se dirigen la una hacia la otra de forma que la colisión parece inevitable.
- ¿Inevitable? No del todo. Ya que si uno de los ocupantes dispone de un objeto macizo, por ejemplo un balón, y si lo lanza con suficiente fuerza al pasajero del otro barco, el cual se lo vuelve a lanzar y así sucesivamente, las dos embarcaciones se alejan entre sí.
- La sucesión de esos tiros ha creado una fuerza repulsiva que modifica las trayectorias.
- **Ha habido interacción.**

Cuatro son las interacciones

- En este asunto, el balón ha jugado el papel de «**mediador**» de la fuerza.
- El lenguaje de la teoría de campos prefiere decir que es el **bosón** de referencia de la interacción.
- Pensándolo bien, es precisamente el balón de baloncesto el que determina la dimensión de las canchas de baloncesto: ésta corresponde aproximadamente al alcance de un pase (teniendo en cuenta la resistencia del aire).

Cuatro son las interacciones

- Para ser más correcto, conviene situar ese resultado en el contexto cuántico, ya que vemos que existe un problema: el proceso de intercambio del balón no respeta la ley de la conservación de la energía.
- En efecto, la partícula que emite el balón conserva su energía al mismo tiempo que la transmite al balón que “sale” de ella.

Cuatro son las interacciones

- Dicho de otro modo, si la energía se conserva efectivamente, una partícula no debería poder desintegrarse en sí misma y en otra.

Cuatro son las interacciones

- En realidad, ese proceso es tolerado por la **mecánica cuántica**, pero a condición de que no lleve demasiado tiempo: el plazo acordado para restituir la energía “tomada” por el balón es tanto más corto cuanto más elevada es la masa de este último.
- Si es pasado, no tiene tiempo de llegar lejos, y el **alcance de la fuerza es corto**.

Cuatro son las interacciones

- Eso no es todo.
- La intensidad de una interacción se caracteriza por lo que llamamos una **constante de acoplamiento**, abreviada α (no tiene nada que ver con la partícula del mismo nombre).

Cuatro son las interacciones

- Es un número sin dimensiones (es decir, un número puro, que no tiene unidad) que mide la eficacia relativa de la interacción.
- Es tanto mayor cuanto más intensa es la fuerza en cuestión.

Cuatro son las interacciones

- Una última observación a propósito de las interacciones.
- Hemos dicho que son el origen de la cohesión de la materia, pero no es lo único que hacen: esas mismas fuerzas rigen también los procesos de transformación de las partículas en otras más ligeras.

Cuatro son las interacciones

- Cuando una partícula inestable se desintegra, es por efecto de una de las interacciones de las que hemos hablado.

Cuatro son las interacciones

- Cuanto mayor es la intensidad de la interacción que está en juego, más probable es la desintegración, y por tanto más corta es la duración de la partícula «víctima» de la interacción.
- Para presentarlas mejor, clasifiquemos las interacciones por orden de notoriedad decreciente.

La gravitación

- Cada vez que nos sentimos a gusto sentados, debemos agradecerérselo a la gravitación.
- Es ella la que nos mantiene en la silla.
- Más generalmente, rige numerosos aspectos de nuestra vida cotidiana, desde la caída de los cuerpos hasta el movimiento de los planetas.

La gravitación

- Sin embargo, su intensidad es incomparablemente más débil que la de las demás interacciones (su constante de acoplamiento es del orden de 10^{-38}), de tal forma que se la puede desdeñar respecto a las energías que entran en juego en la Física de las partículas.

La gravitación

- Harían falta unas energías cien mil billones de veces más fuertes que las del LEP para que la gravitación se hiciese comparable a la interacción electromagnética.

La gravitación

- Si dispusiéramos de partículas tan energéticas (10^{19} GeV), podríamos observar unos detalles de 10^{-33} cm (**longitud de Planck**), escala en que la gravitación se vuelve dominante.

La gravitación

- Todas las partículas son sensibles a la gravitación, incluidos los **fotones**, que sin embargo no tienen masa (los rayos luminosos son desviados por el Sol).

La gravitación

- **La interacción gravitatoria** es siempre atractiva y de alcance infinito (su fuerza decrece de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia).

La gravitación

- Acabamos de decir que, para que se manifieste, hacen falta unas condiciones excepcionales, como los primeros instantes del **big bang**, en que la densidad de energía era muy elevada, o bien (lo que viene a ser lo mismo) unas escalas muy pequeñas de longitud (**10^{-33} cm**).
- ¿Cómo es posible entonces que sea tan importante para nosotros?

La gravitación

- Se debe a que, al ser siempre atractiva, la fuerza gravitatoria es acumulativa: es proporcional al número de partículas en juego.
- De ahí que, aunque muy débil a escala de las partículas, esa fuerza se vuelva preponderante a escala macroscópica.

La gravitación

- Las interacciones electromagnéticas no tienen esa propiedad: no se acumulan tan eficazmente.
- Son a veces atractivas y a veces repulsivas (según el signo de las cargas presentes), de tal forma que la neutralidad eléctrica de la materia anula sus efectos a larga distancia.

La gravitación

- Un objeto compacto de masa débil está dominado por la interacción electromagnética.
- Por eso puede tener cualquier forma: mesa, botella, bicicleta...
- Pero cuando la cantidad de materia en juego rebasa cierto límite, las fuerzas de gravitación terminan prevaleciendo sobre las fuerzas eléctricas, y el objeto en cuestión **sólo puede existir en forma más o menos esférica.**

La gravitación

- Por eso los planetas y las estrellas sólo pueden ser redondos, mientras que los asteroides con menos de **300 km de radio** tienen todavía derecho a tener bollos y bultos.
- Lo lamentemos o no, no existe un Sol cúbico.

La gravitación

- Que haya tantos astros
orondos en el cielo es culpa
de la gravitación.
- El supuesto mediador de la
gravitación se llama el
gravitón.

La gravitación

- En tanto que balón con una fuerza de alcance infinita, tiene necesariamente una masa nula.
- Todavía no ha sido descubierto.
- Pero sus efectos son tan minúsculos, y tan numerosos los parásitos...

La interacción electromagnética

- Es la que mejor se comprende de las cuatro interacciones.
- Presenta ciertas analogías con la interacción gravitatoria, que al igual que ella tiene un alcance infinito.
- La teoría del electromagnetismo se llama **electrodinámica cuántica**.

La interacción electromagnética

- Comprobada con extraordinaria precisión, goza de toda la confianza de los físicos.
- Explica que la interacción electromagnética es el resultado del intercambio de **fotones virtuales**, imposibles de detectar como tales.

La interacción electromagnética

- Todas las partículas cargadas o provistas, como el neutrón, de un pequeño imán (un «**momento magnético**») están sometidas a su ley.

La interacción electromagnética

- Las fuerzas electromagnéticas pueden tener efectos muy sutiles.
- Por ejemplo, entre los átomos o las moléculas existen fuerzas que son en general atractivas, aunque se trate de cuerpos eléctricamente neutros.

La interacción electromagnética

- Esas fuerzas, llamadas de **Van der Waals**, son el resultado de la combinación de las atracciones y las repulsiones eléctricas, que no siempre se compensan exactamente.

La interacción electromagnética

- Anteriormente, la electricidad y el magnetismo estaban conceptualmente separados, y hacía falta una sarta de leyes para describir sus efectos.
- Pero sabemos desde el siglo XIX que el magnetismo es un efecto que proviene del movimiento de las cargas... eléctricas.

La interacción electromagnética

- Esta correspondencia hace, por ejemplo, que una brújula sea perturbada por los relámpagos de una tormenta.
- Maxwell pudo escribir la ecuación que resume la integridad de los fenómenos electromagnéticos prediciendo al mismo tiempo que la luz es una sacudida electromagnética.
- Esta ecuación sigue siendo hoy una maravilla de economía intelectual para quienes sólo tienen que aplicarla.

La interacción electromagnética

- La constante de acoplamiento del electromagnetismo α vale $1/137$.
- De forma general, una constante de acoplamiento mide la proporción en la que son modificados, debido a la interacción, los tamaños físicos.

La interacción electromagnética

- Comprobémoslo aquí, tomando por ejemplo una familia de partículas llamadas **piones**. Intuidos por primera vez en **1937** por un teórico japonés, **Hideki Yukawa**, para explicar la interacción nuclear, fueron detectados tras la Segunda Guerra Mundial en la **radiación cósmica**.

La interacción electromagnética

- La familia de los **piones** se compone de tres miembros (todos ellos inestables), correspondiendo cada uno de ellos a un estado de carga eléctrica.
- Son el π^+ , el π^- y el π^0 .
- Por lo demás, todas sus propiedades físicas son idénticas.

La interacción electromagnética

- Podría pensarse que la masa del π^+ (y del π^-) es rigurosamente igual a la del π^0 , pero eso sería olvidar que el π^+ lleva una carga que crea un campo eléctrico y que la energía propia de ese campo contribuye a su masa.
- Este efecto, de origen puramente electromagnético, no afecta al π^0 , ya que este último es eléctricamente neutro (no crea ningún campo eléctrico).

La interacción electromagnética

- La medida de las masas del π^+ y del π^0 es igual a $139,5 \text{ MeV}/c^2$ y $134,9 \text{ MeV}/c^2$ respectivamente.
- La diferencia relativa de estas masas.

$$\frac{139,5 - 134,9}{134,9} = 0,0341 = 4,67 \alpha$$

es del orden del tamaño de la constante de acoplamiento α .

La interacción electromagnética

- Dicho de otra forma, si un demonio pudiese «desenchufar» la interacción electromagnética apretando un botón, la masa de todos los **piones** se volvería inmediatamente idéntica.

La interacción electromagnética

- Como no existe un demonio de esos, la interacción electromagnética está constantemente «enchufada» y tiene como efecto aumentar la masa de los piones cargados, en proporción a su **constante de acoplamiento**.
- Aprovechemos este ejemplo para hacer una observación a propósito de la unidad con la que se mide la masa de una partícula.

La interacción electromagnética

- En virtud de la equivalencia de esta última con la energía ($E = mc^2$, una vez más), se la puede medir mediante una energía dividida por el cuadrado de la velocidad de la luz, por ejemplo MeV/c^2 , como acabamos de hacer respecto a los piones.
- Pero muy a menudo se la expresa directamente en unidad de energía (MeV), sin ocuparse de dividir por c^2 .

La interacción electromagnética

- No es por simple pereza, ya que ello equivale simplemente a tomar la celeridad de la luz como unidad de medida de las velocidades ($c = 1$), elección que no es nada estúpida cuando se trata de partículas.
- Expresada en esa unidad, toda velocidad de partícula es necesariamente inferior o igual a 1, ya que una partícula no puede ir más rápido que la luz.

La interacción fuerte

- La **constante de acoplamiento** de la interacción fuerte justifica por sí sola su robusta denominación.
- Es del orden de 1, lo cual significa que esa interacción modifica las propiedades de las partículas a un nivel comparable al valor que tendrían si no hubiese...
¡interacción fuerte!

La interacción fuerte

- Otra forma de darse cuenta de la intensidad de esta interacción es el tiempo sumamente corto que tarda en manifestarse: es del orden de 10^{-23} s, y a veces todavía más corto.

La interacción fuerte

- Es el tiempo que tardan, por ejemplo, algunas partículas inestables, las **resonancias** (tales como las partículas ρ , ω , Δ), para desintegrarse en otras partículas más ligeras.
- No se conocen en la naturaleza otros fenómenos tan presurosos como esos por consumarse.

La interacción fuerte

- Al ser muy corto el alcance de la interacción fuerte, alrededor de **un fermio**, sólo influye en las partículas que están en el interior del núcleo.
- Por eso esa fuerza es de una apariencia tan discreta a nuestra escala.
- De hecho, hubo que esperar al siglo XX para descubrirla.

La interacción fuerte

- Todas las partículas de materia no están sometidas a la interacción fuerte.
- Las que son sensibles a ella se llaman los **hadrones**, las otras se llaman **leptones**.
- Una partícula de materia no tiene otra alternativa que ser un hadrón o un leptón.

La interacción fuerte

- Hoy día se piensa que las interacciones entre nucleones son la manifestación de interacciones más fundamentales entre **cuarks**, las partículas que componen los **hadrones**.

La interacción fuerte

- Al igual que la carga eléctrica da origen a la fuerza eléctrica, la **carga de color** daría origen a esa **interacción fuerte**.
- Pero cuidado, decir que los **cuarks** llevan una carga de color no significa que sean realmente de colores verde, amarillo o rojo, como las bolas de billar.

La interacción fuerte

- Es simplemente una forma analógica de designar una especie de etiqueta que llevan, a la que se ha llamado «color» por razones que veremos más adelante.

La interacción fuerte

- La interacción fuerte es transmitida por unas partículas de interacción, los **gluones**, cuyo nombre proviene del hecho de que los **cuarks** permanecen «**pegados**» unos a otros cuando se les intenta separar.

La interacción fuerte

- Los cuarks no se pueden aislar en estado libre: permanecen «**confinados**» en el interior de los **hadrones**, lo cual le resta algo de sentido a la noción de alcance de las fuerzas.

La interacción fuerte

- La teoría de la interacción fuerte se llama **cromodinámica cuántica**, por alusión a la carga de color que evocábamos antes.
- Sus cálculos son sumamente complejos, en particular debido a la magnitud de la constante de acoplamiento.

La interacción fuerte

- Lo son algo menos con alta energía, ya que entonces la constante de acoplamiento disminuye (¡Ah, pero esa constante varía! Estos físicos...)
- Dichos cálculos requieren la ayuda de ordenadores muy potentes, tan potentes que a veces a uno le vienen ganas de pensar que la interacción fuerte es demasiado complicada para la mente humana.
- Y aunque no sea cierto, al menos desacompleja.

La interacción débil

- Se la presenta a menudo como la responsable de la **radiactividad β** , el fenómeno por el cual el neutrón se desintegra en un protón y otras partículas. Inicia las reacciones termonucleares que permiten a nuestro Sol (y a todas las estrellas) producir la energía que nos da vida, y ello durante mucho tiempo, precisamente porque **la interacción débil es ... débil.**

La interacción débil

- La constante de acoplamiento débil es unas diez mil veces menos elevada que la de la interacción electromagnética, de ahí su nombre.
- Al ser su alcance también muy corto (una milésima de fermio), es prácticamente una interacción de contacto, algo así como el pegamento.

La interacción débil

- Los tiempos característicos de esta interacción, necesarios para su plena manifestación, son mucho más largos que los de las interacciones electromagnéticas o fuertes: hacen falta unos **nanosegundos** para que el π^+ se desintegre por interacción débil, pero sólo **10^{-16} segundos** para que el π^0 haga lo mismo electromagnéticamente.

La interacción débil

- Esta diferencia hace que la **interacción débil** sea transmitida por unas partículas macizas (unas 80 veces más pesadas que el protón) que se llaman **los bosones** intermedarios: son los W^+ , W^- y Z^0 , descubiertas en el **CERN** en **1983**.

La interacción débil

- La existencia de esas tres partículas con una duración de vida muy corta (10^{-25} s en cuanto al Z^0) había sido anticipada unos años antes por una teoría audaz que unificaba las interacciones electromagnética y débil (de la misma manera que la unificación de la electricidad y el magnetismo había hecho necesaria la onda electromagnética).

La interacción débil

- Teoría audaz, ya que las interacciones débiles y las electromagnéticas son tan diferentes de las energías ordinarias que había que ser tremendamente optimista para esperar unificarlas.
- Y sin embargo, funcionó.

La interacción débil

- La teoría de la interacción electromagnética existe.
- Sus principios oficializan el matrimonio, en apariencia contra natura, de los **bosones intermedarios** de masa elevada y del **fotón**, que sin embargo no da la talla.

La interacción débil

- Fue perfectamente confirmada por la experiencia, al menos con la energía accesible en las máquinas más grandes (100 GeV).

La interacción débil

- A unas distancias del orden de los 10^{-18} metros, aquellas que son precisamente exploradas por el LEP, los efectos de las fuerzas electromagnética y débil son comparables.

La interacción débil

- Pero a baja energía la diferencia de masa entre el **fotón** y los **bosones intermedarios** es tal que no se pueden ni comparar las dos interacciones (cosa por cierto afortunada, ya que la teoría electrodébil no es nada simple.

La interacción débil

- Excéntrica por naturaleza, la interacción débil gusta de hacerse notar.
- Es así como se niega a obedecer a ciertas simetrías elementales que sus compañeras respetan escrupulosamente, por ejemplo la **simetría por paridad**.

La interacción débil

- Todos comprendemos bien que la imagen en un espejo de una experiencia de física no es idéntica a la propia experiencia: **la izquierda y la derecha están invertidas.**

La interacción débil

- Pero los físicos creyeron durante mucho tiempo que esa imagen correspondía también a una experiencia de física, realizable al igual que la otra en el laboratorio.

La interacción débil

- Dicho de otro modo, no se cambia el mundo contemplándolo en un espejo, ya que la física, según creían, no sabe distinguir la derecha de la izquierda (cosa que en sí no es muy grave, ya que no tiene que conducir).

La interacción débil

- Por ejemplo, si un haz láser se propaga hacia un espejo, perpendicularmente a su superficie, la imagen reflejo de ese haz representará un haz láser que se propaga en sentido inverso al del verdadero haz láser.

La interacción débil

- Para reproducir realmente esa imagen, basta con darle la vuelta al láser en el laboratorio y ya está hecho el truco.

La interacción débil

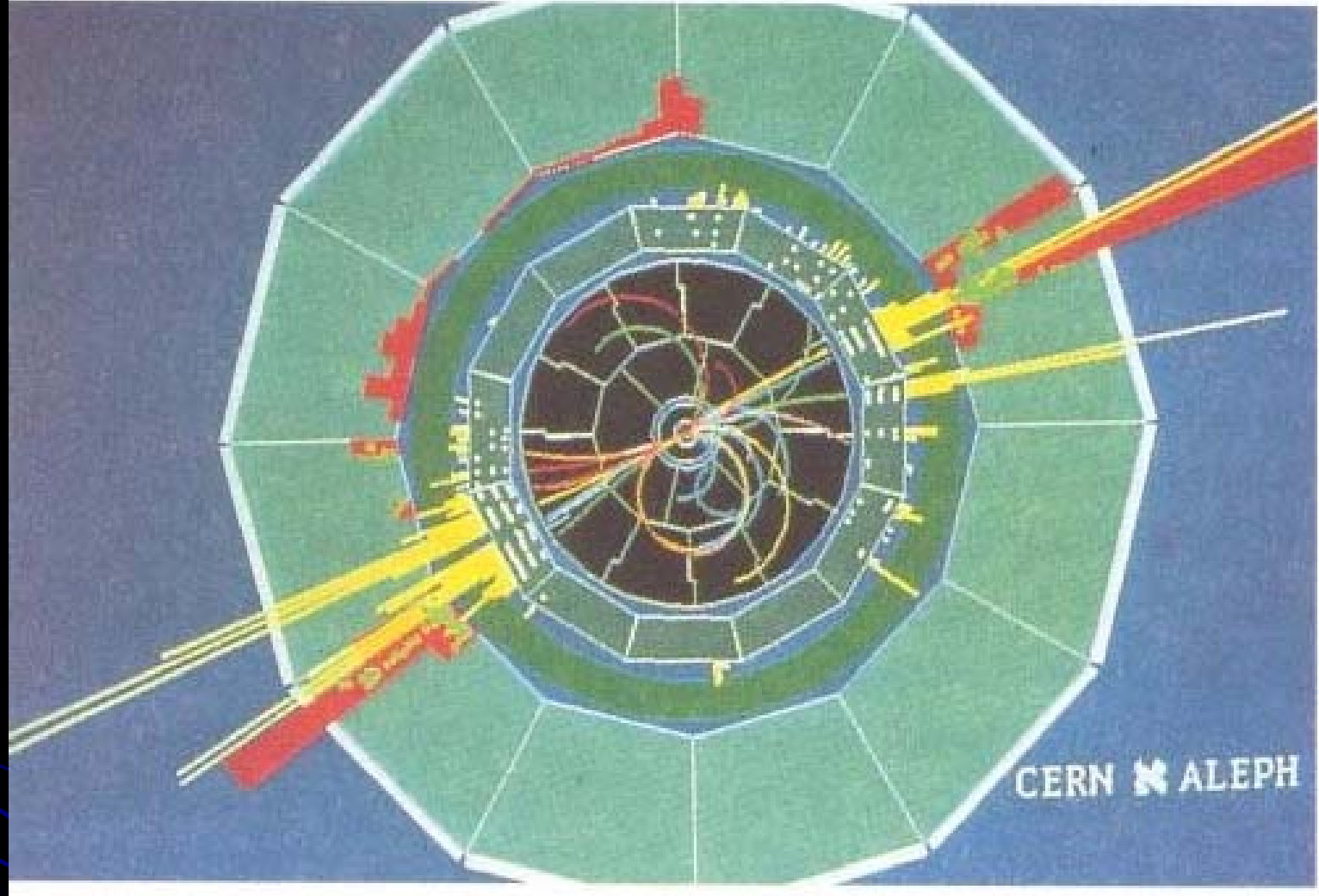
- Es esta invariabilidad de la física por reflexión en un espejo lo que los físicos llaman la **conservación de la paridad**.

La interacción débil

- Para su gran sorpresa, en **1957** descubrieron que esa regla no es respetada por la interacción débil.
- La imagen en un espejo de un proceso regido por esa interacción no se puede realizar tal cual en un laboratorio (o en la naturaleza).

La interacción débil

- Decimos que la interacción débil «viola la conservación de la paridad» o «rompe la simetría P »
- Veremos más adelante que hace otras cosas mucho peores.



- **Desintegración de un Z^0 :** El Z^0 puede desintegrarse de varias maneras, por ejemplo en un par formado por un quark y un antiquark. Ni el quark ni el antiquark son capaces de propagarse libremente en el vacío, por lo que cada uno de ellos produce un chorro de hadrones, del que se ven aquí las trazas. Las trayectorias menos curvadas (por el campo magnético) corresponden a los hadrones más energéticos.

La fuerza hace la unión

- El haber podido reducir la descripción del mundo físico conocido a un juego de fuerzas tan limitado (cuatro) es ya en sí una proeza.
- Pero los teóricos no quisieran detenerse ahí.

La fuerza hace la unión

- Como inspirados por Balzac, para quien «**la unidad es la más simple expresión del orden**», han soñado con unificar la descripción del Universo físico.
- Las constantes de acoplamiento de las cuatro interacciones varían según la energía aplicada, de tal manera que existe una escala de energía en la que se vuelven comparables.

La fuerza hace la unión

- De ahí la esperanza de que a partir de los principios que determinan la forma de actuar de esas fuerzas se pueda construir una teoría en la que cada una de ellas aparezca como una faceta de una fuerza única.

La fuerza hace la unión

- Sólo el futuro dirá si ese sueño es una promesa o una quimera (¡no unificaremos las fuerzas a la fuerza!).
- Mientras tanto, los físicos gastan mucha energía, y no sólo intelectual, para intentar alcanzarlo.

La fuerza hace la unión

- Esta búsqueda de unidad, incompleta, ha hecho germinar un número abismal de ideas de todo tipo, de las que muchas han pasado a la historia bajo el signo negativo.

La fuerza hace la unión

- Pero al mismo tiempo ha superado etapas decisivas, desde la manzana que le cayó en la cabeza a Newton hasta el descubrimiento reciente de los quarks, pasando por la relatividad de Einstein, que unifica las descripciones físicas del espacio y del tiempo, y también las de la energía y la masa.

La fuerza hace la unión

- El deseo de expresar de manera sintética las leyes fundamentales es un principio motor de la física (y de la ciencia en general), aunque no se haya visto sistemáticamente coronado por el éxito.

La fuerza hace la unión

- Pues no basta con ir a lo simple para llegar a lo verdadero.
- La luz, por sólo citarla a ella, no tiene la sencillez original que el lenguaje parece prestarle.
- No hay ninguna razón *a priori* para santificar la unión en sí.

La fuerza hace la unión

- Sin embargo, Galileo, Newton, Maxwell, Einstein, tenían el «furor de unificar».
- Hasta el punto de que no se podría concebir una física que no se apoyara en ese planteamiento, al menos en sus objetivos finales.
- Por otra parte, ¿qué podría decirse de una ciencia que sólo tratara lo particular y lo local?

La fuerza hace la unión

- Sólo hemos hablado de la **unificación electrodébil**, que fue una primera etapa decisiva, pero ahora son las cuatro interacciones las que han sido fundidas en un mismo molde teórico, sustentado en el **principio de la invariancia gauge**^[1].

-
- ^[1] Juego de palabras con la expresión francesa *invariante de **jaug***; **jaug** es en francés el indicador de nivel de aceite de los coches.

La fuerza hace la unión

- Esta denominación exige una advertencia a los fanáticos de la mecánica: decir de una teoría que es **invariante gauge** no significa que su nivel de aceite sea constante...

La fuerza hace la unión

- Veremos que en realidad la **invariancia gauge** propone una interpretación elegante y fecunda de las fuerzas de la naturaleza, y con ella es con la que cuentan los teóricos para unificar las cuatro interacciones.

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- La física cuántica ha modificado nuestro concepto de las partículas individuales.
- Pero eso no es todo: también ha revolucionado nuestra comprensión de los sistemas compuestos de un gran número de partículas idénticas.

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- Según la concepción clásica, la identidad de las moléculas de un gas, por ejemplo, no impide la identificación propia de cada molécula: se puede conocer lo que sucede con cada una de ellas siguiendo su trayectoria.
- Ahora bien, **la noción de trayectoria ya no tiene sentido en física cuántica.**

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- Ya no es posible, en un conjunto de partículas idénticas, seguirlas individualmente e identificar sus destinos particulares.
- Ya que el sistema sólo existe de forma colectiva, el conocimiento del estado global de un conjunto de partículas no permite atribuir un estado definido a cada partícula.
- Es en cierta forma como si todas las partículas a la vez ocupasen todos los estados individuales, de forma comunitaria e inseparable.

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- El formalismo cuántico distingue dos tipos de partículas (en sentido amplio: átomos, partículas compuestas, partículas elementales, ...) que describiremos de forma abusivamente antropocéntrica: por un lado las partículas más bien solitarias, que se llaman **fermiones**, y por otro las partículas sin mucha personalidad, ávidas de aglomeraciones, llamadas **bosones**.
- Toda partícula debe elegir su bando, definitivamente: es o bien un **fermión**, o bien un **bosón**.

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- Los **fermiones** son individualistas y asociales.
- **Obedecen al principio de exclusión de Pauli**, que al prohibir a dos fermiones idénticos que se encuentren en el mismo estado físico, los hace mutuamente impenetrables.
- Así pues, un estado colectivo de **fermiones** se construirá a partir de estados individuales todos distintos.

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- Los **bosones**, por el contrario, no son esquivos.
- Al no ser afectados por el principio de exclusión de Pauli, obedecen más bien a un **principio gregario**, y marcan su preferencia por los estados colectivos contruidos a partir de estados individuales idénticos.
- Ni se les ocurre intentar destacar.
- Prefieren estar juntos y hacer las mismas cosas.

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- Estos dos tipos de comportamiento se encuentran también en las propiedades de los sistemas macroscópicos.
- En un sistema de **fermiones**, todo sucede como si el carácter individualista de los constituyentes provocara en ellos una repulsión que se suma a las fuerzas físicas a las que ya están sometidos.

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- A la inversa, un sistema de **bosones** muestra una especie de atracción recíproca que le da una coherencia de conjunto.
- Tomemos el ejemplo del **helio 4** (cuyo núcleo contiene cuatro nucleones: dos protones y dos neutrones) que se vuelve líquido a una temperatura de **4,2 K** a presión ordinaria.

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- Si se reduce más su temperatura, su comportamiento cambia brutalmente a partir de los **2,172 K**.
- Por ejemplo, su viscosidad se vuelve nula.
- Atraviesa los capilares más finos y trepa alegremente por las paredes de un recipiente.
- Vaya, que no hay quien lo sujete.

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- Ello se debe a que los átomos del helio 4 son **bosones**.
- A muy baja temperatura, la agitación térmica se vuelve demasiado débil para ocultar la cohesión a la que aspiran.

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- Su gregarismo se vuelve manifiesto, su solidaridad se afirma por fin: vienen todos a ocupar el mismo estado de más baja energía.
- Debido a ello, las disipaciones de energía se ven obstaculizadas, ya que la velocidad de los átomos de helio ya no se puede aminorar individualmente por colisión con las paredes del tubo en que fluyen.

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- El flujo solidario corre sin resistencia alguna.
- Este fenómeno extraño se llama la **superfluidez**.
- Hemos tomado aquí el ejemplo de un bosón, el átomo de helio 4, que es un sistema compuesto.
- También podríamos haber tomado el ejemplo de los **fotones**, que también son **bosones**, pero elementales: cuando se agrupan, se crea el fenómeno **láser**, que es respecto a la luz lo que la **superfluidez** es respecto al helio líquido.

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- Entre los fermiones y los bosones hay otra diferencia: durante un proceso físico, sea el que sea, **la paridad del número de fermiones no puede cambiar.**
- Es decir que **el número de fermiones sólo se puede modificar de dos en dos:** un fermión sólo puede aparecer o desaparecer si aparece o desaparece otro.
- **Los bosones, en cambio, pueden aparecer o desaparecer en número cualquiera.**

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- Además, todos los **fermiones** conocidos **llevan cargas**, eléctricas u otras, mientras que ciertos **bosones** (el fotón o el π^0) carecen de carga alguna y sólo transportan cantidades dinámicas, tales como la energía o el impulso.
- La tendencia es pues la de atribuir a los fermiones una cualidad más «material» que a los bosones.

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- Desde luego, un fermión puede aparecer o desaparecer, pero nunca lo hace solo, y jamás sin dejar trazas (se lleva o transmite cargas).
- Un bosón, en cambio, puede salir de vacío o volver a él.
- Los fermiones son los únicos que tienen cierta permanencia.

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- Finalmente, dado que los fermiones obedecen al principio de exclusión de Pauli, la probabilidad de encontrar dos juntos, en el mismo sitio y en el mismo instante, es nula.
- Este resultado ilustra una característica que intuitivamente se espera de las partículas de materia, la impenetrabilidad mutua.

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- Esta propiedad explica la solidez y la estructura de los objetos macroscópicos.
- No afecta a los **bosones**, que sí tienen derecho a superponerse, y lo hacen en cuanto pueden (dos haces de luz, compuestos de fotones, pueden cruzarse sin problemas).
- Es también lo que permite obtener unas fuerzas de interacción aditivas.

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- Debido a esas diferencias consideramos hoy que los **fermiones** fundamentales son los «verdaderos» constituyentes de la materia, sus «ladrillos elementales».
- Son por un lado los **quarks** (fermiones sensibles a la interacción fuerte), por otro los **leptones fundamentales** (fermiones insensibles a la interacción fuerte).

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- Como hemos visto, las interacciones también se describen en términos de partículas, siendo éstas sus agentes de enlace.
- Estas partículas portadoras de fuerzas no son partículas de materia: son partículas de interacción.

Fermión o bosón: el reparto de papeles

- Se llaman **bosones fundamentales** los bosones que juegan el papel de mediadores de las cuatro interacciones que hemos presentado.
- Son: **el fotón**, los **bosones** llamados intermediarios para la interacción débil, los **gluones** (ocho) para la interacción fuerte entre los **quarks**, y el hipotético **gravitón**.
- En definitiva, estos **bosones** son los balones de los que hablábamos anteriormente, y los **fermiones** fundamentales son los posibles ocupantes de las barcas.

Antipartículas llovidas del cielo al salir del vacío

- Dirac fue un físico brillante pero poco locuaz.
- Hablaba tan poco que sus colegas de Cambridge le pusieron su nombre al cuanto (a la unidad) de flujo verbal: el dirac vale una palabra ... ¡al año!
- Es difícil, en efecto, ser menos prolijo.

Antipartículas llovidas del cielo al salir del vacío

- En **1927**, el mismo **Dirac** buscó la ecuación que fuese capaz de explicar el comportamiento de un electrón de alta energía.
- Encontró una, la que lleva precisamente su nombre, por vías simplemente matemáticas.

Antipartículas llovidas del cielo al salir del vacío

- Mostró que una solución de la ecuación corresponde al comportamiento efectivamente observado del electrón, con sus dos estados de espín posibles.
- ¿Qué es el espín?
- Es muy difícil hablar de tal concepto, típicamente cuántico, sin utilizar imágenes.

Antipartículas llovidas del cielo al salir del vacío

- Ahora bien, todas las imágenes cuánticas son falsas.
- ¿Qué hacer entonces?
- Quizá de vez en cuando no haya más remedio que aceptar los compromisos y proceder por metáforas: la más juiciosa consiste en decir que el espín corresponde a una rotación del electrón sobre sí mismo.

Antipartículas llovidas del cielo al salir del vacío

- Si se mide el espín, se advierte que sólo puede tener dos valores, como si el electrón fuese una peonza que sólo pudiese girar hacia la derecha o hacia la izquierda con una velocidad bien definida.
- No es posible ningún otro valor.
- En particular, no existe ningún electrón que no «gire»: eso correspondería a un valor nulo del espín.

Antipartículas llovidas del cielo al salir del vacío

- Pero eso no es todo.
- Dirac observa que debido a la simetría entre espacio y tiempo requerida por la relatividad su ecuación tiene otras soluciones, inevitables, de energía negativa.
- Clásicamente, no tienen sentido pues su presencia volvería a la materia intrínsecamente inestable: ésta podría «descender» hacia las energías negativas emitiendo haces crecientes de radiación.

Antipartículas llovidas del cielo al salir del vacío

- Entonces, para salvar su ecuación, por cierto excelente, **Dirac** da pruebas de una audacia extraordinaria: propone la idea de **antipartícula**, del positrón (e^+) en este caso, de la misma masa y de mismo espín que el electrón e^- , pero de carga opuesta.

Antipartículas llovidas del cielo al salir del vacío

- ¿Nos podemos imaginar cuál sería su alegría (¿callada?) cuando, en **1932**, **Anderson** identificó en la radiación cósmica a un gemelo del electrón, cargado positivamente?: ¡**el positrón que él había inventado existía realmente!**
- A la naturaleza parece gustarle la ecuación de **Dirac**, a menos que sea a la inversa.

Antipartículas llovidas del cielo al salir del vacío

- De forma general, la teoría cuántica relativista indica que a toda partícula le corresponde necesariamente una antipartícula, de carga opuesta, que es en cierta forma su simétrica.
- Eso dobla el número de los constituyentes fundamentales.

Antipartículas llovidas del cielo al salir del vacío

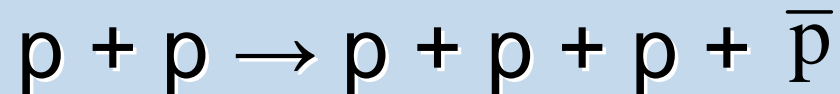
- Las antipartículas forman la antimateria, que puede ser creada al mismo tiempo que la materia, con tal de que se disponga de la energía suficiente.
- El **antiprotón**, de carga negativa, fue descubierto en **1955**.
- Para el **antineutrón** hubo que esperar un año más.

Antipartículas llovidas del cielo al salir del vacío

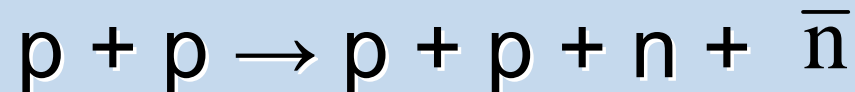
- La energía liberada durante una **colisión protón-protón** puede materializarse en un protón y un antiprotón (\bar{p}).
- Se habla entonces de **creación de par**.

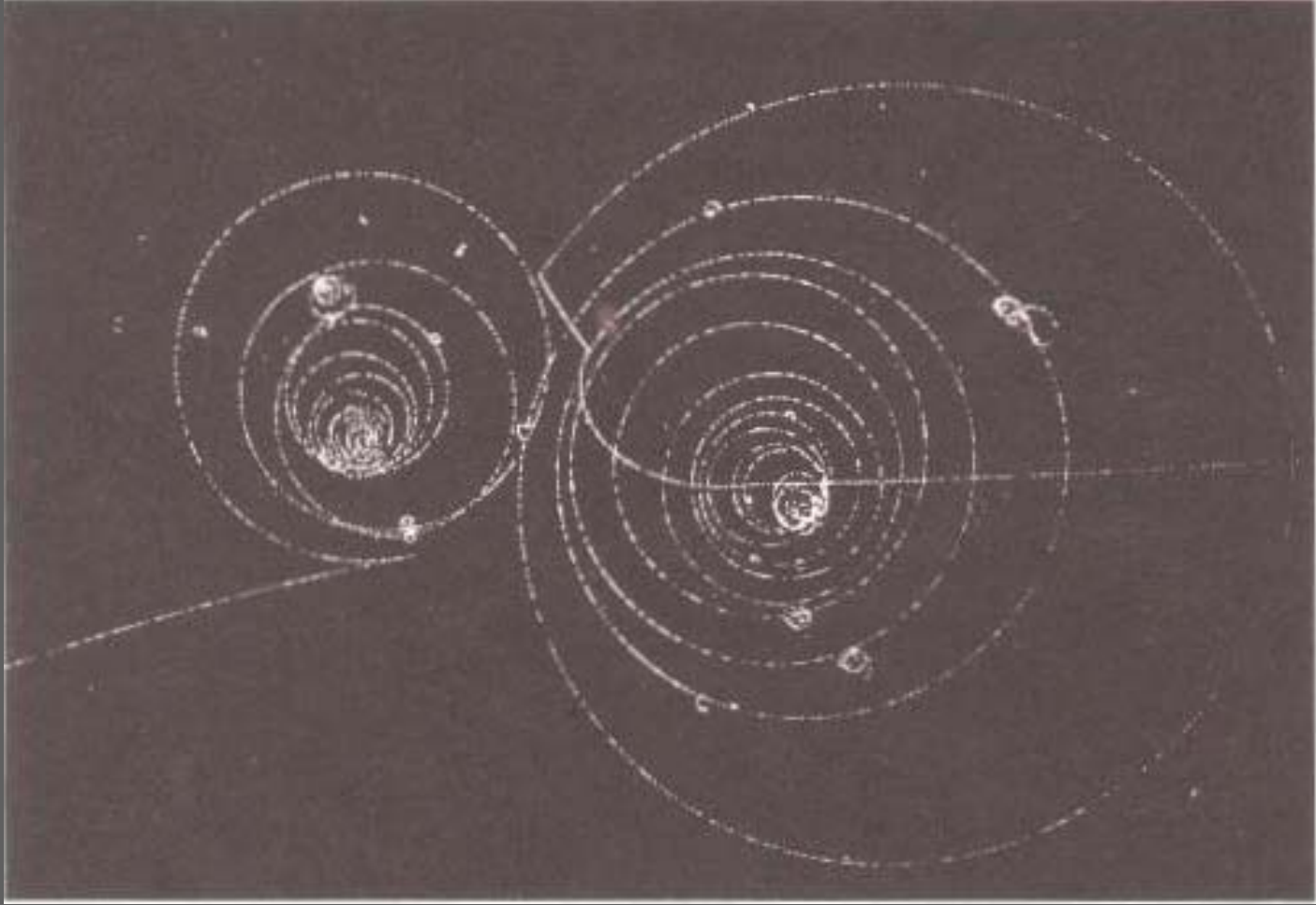
Antipartículas llovidas del cielo al salir del vacío

- Es así como los antiprotones pueden ser reproducidos por la reacción:



- En cuanto a los antineutrones (\bar{n}), puede hacerse gracias a:





- **Materia y antimateria:** Si se dispone de suficiente energía, se puede crear antimateria en laboratorio, e incluso acelerarla en los aceleradores de partículas, lo mismo que se hace con los positrones en el LEP. Al contacto con la materia, la antimateria se aniquila muy rápidamente.

El mar y el vacío

- **Dirac** toma nota del descubrimiento del positrón y propone una descripción totalmente nueva del vacío.
- Hasta entonces, se había representado el vacío como algo realmente huero: se imaginaba que un espacio del que se hubiera extraído toda forma de materia y de radiación no contenía absolutamente nada, y en particular nada de energía.

El mar y el vacío

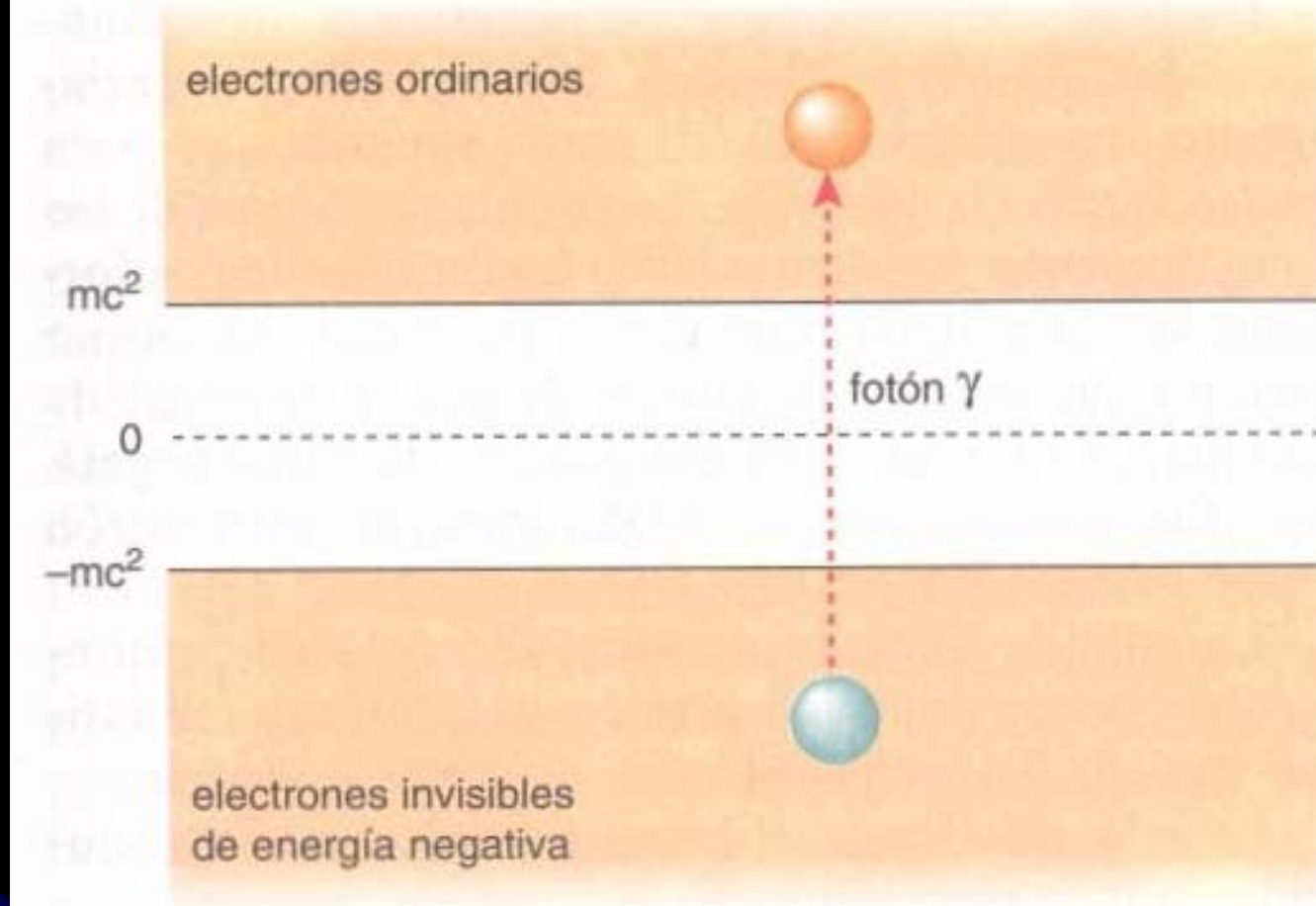
- Dirac se propuso darle al vacío cierta consistencia: emitió la hipótesis de que en el vacío todos los estados de energía negativa están llenos, es decir ocupados cada uno de ellos por un electrón, con lo que los electrones de energía positiva ya no pueden «caer» en él (debido al principio de Pauli).
- Todos esos estados de energía negativa forman el «**mar de Dirac**», tan lleno como un huevo pero absolutamente inobservable.

El mar y el vacío

- Pero si un electrón (invisible) del mar adquiere suficiente energía, bajo la influencia de un suceso cualquiera, abandona su estado de energía negativa, es decir que sale del mar y se sitúa en un estado de energía positiva.
- Se vuelve entonces observable bajo forma de electrón «normal».

El mar y el vacío

- El agujero que ha dejado en el mar se vuelve también observable, como una partícula de carga opuesta a la del electrón, ya que corresponde a la ausencia de un electrón.
- ¡Es el positrón!



- Creación de una partícula y de su antipartícula:** Los electrones «ordinarios» de masa m tienen siempre una energía positiva, superior a $m_e c^2$. Por debajo de ese valor se encuentra un intervalo de altura $2 m_e c^2$ hasta un mar infinito de electrones invisibles y de energía negativa. Un fotón γ puede elevar una de esas partículas de energía negativa por encima de $m_e c^2$. Se crea entonces un nuevo electrón, así como un «**agujero en el mar**» que se materializa en forma de positrón. Se ha creado un par **$e^+ - e^-$** .

El mar y el vacío

- Aunque hayamos tenido que abandonar esa manera de ver el vacío en beneficio de modelos más sofisticados, de todas formas el vacío de los físicos no volverá a ser jamás una pura nada, llena de ausencia.
- Es más bien una especie de prólogo de la materia, de depósito, de eco larvado.
- Manifiesta una estructura activa.

El mar y el vacío

- Por ejemplo, no puede responder a ciertas propiedades de **invariancia** que sí cumplen con las ecuaciones que rigen el comportamiento de la materia.
- Así es como los físicos creen hoy que está ocupado por el **campo de Higgs** (ahí tiene usted, señor Waldegrave...), campo al que estarían acopladas las partículas.
- Más exactamente, la masa de las partículas encontraría su fuente en ese acoplamiento.

El mar y el vacío

- Una última precisión, a propósito del espín.
- Existe una correlación extraña entre el valor del espín de una partícula y su forma de comportarse en sociedad, es decir entre sus semejantes.

El mar y el vacío

- Se puede, en efecto, demostrar que los **fermiones** (asociales) tienen necesariamente un espín **semi-entero** (es decir igual a un número impar dividido por dos), mientras que los **bosones** (gregarios) tienen un **espín entero**.
- Este criterio puede incluso servir, si se quiere, de definición de los fermiones y los bosones.

El vals de las etiquetas

- En virtud del principio según el cual «cada cosa pía por su compañía», algunas partículas son sus propias antipartículas, por ejemplo el **fotón** o el **pión neutro π^0** .
- Tales partículas se llaman: **estados propios de la conjugación de la carga.**

El vals de las etiquetas

- Puede extrañar que el neutrón, que es neutro también, no sea idéntico al antineutrón.
- Eso se debe a que las partículas transportan otras cargas además de la carga eléctrica.
- Estas «**cargas generalizadas**» son una especie de etiquetas, ligadas a la forma en que se comportan las partículas.

El vals de las etiquetas

- Permiten también clasificarlas en categorías diferentes.
- Algunas de esas etiquetas, la masa o la carga eléctrica, por ejemplo, nos resultan familiares; otras, como el **número bariónico**, el **isospín** o la **extrañeza**, son más misteriosas, ya que no son directamente perceptibles.

El vals de las etiquetas

- Las partículas, por sí mismas, pueden leerlas y actuar con «reconocimiento de causa».
- La percepción de las etiquetas está en función del bagaje sensorial de las partículas: todas no pueden verlas todas, su vista es selectiva.
- Los electrones, por ejemplo, no distinguen el color de los quarks.

El vals de las etiquetas

- Volvamos a nuestro neutrón.
- Como el protón, tiene un **número bariónico B** igual a **+1**.
- Su antipartícula, que es su simétrica, tiene un número bariónico opuesto, es decir, igual a **-1**.
- Conclusión: neutrón y antineutrón, que difieren al menos por un número cuántico, no son idénticos.

El vals de las etiquetas

- Este resultado no es puramente formal.
- Tiene consecuencias prácticas totalmente consecuentes: cuando un neutrón se encuentra con otro neutrón, asistimos a una colisión ordinaria, y cada uno de ellos vuelve a partir en una dirección diferente a su dirección incidente; pero cuando un neutrón se encuentra con un antineutrón, se aniquilan para formar por ejemplo dos fotones.
- ¡Convengamos en que no es lo mismo!

El vals de las etiquetas

- Las cargas generalizadas son número aditivos.
- La que es afectada a un sistema de partículas es simplemente la suma de las cargas individuales.

El vals de las etiquetas

- Esta suma puede conservarse o no en el momento de una interacción.
- Por ejemplo, **la carga eléctrica es conservada por todas las interacciones**, mientras que **la extrañeza es conservada por la interacción fuerte pero no por la interacción débil.**

El vals de las etiquetas

- Consideremos el proceso:



- Aunque respeta escrupulosamente la conservación de la carga eléctrica, nunca ha sido observado.
- Se cree que si está vedado, es porque no conserva el número bariónico:
($1 + 1 = 2$ al principio, $1 + 1 - 1 = 1$ al final)
- Y eso, la interacción fuerte no lo toleraría.

El vals de las etiquetas

- Lo que acabamos de decir ilustra un credo (¿o una receta *ad hoc*?) de los teóricos.
- Piensan que «todo lo que no está prohibido es obligatorio».
- Entonces, cuando un fenómeno posible *a priori* no se produce, dicen que es porque la naturaleza no lo quiere, y luego inventan una regla teórica que impide efectivamente que se produzca.

El vals de las etiquetas

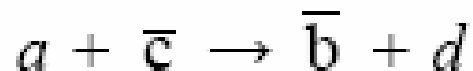
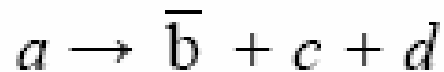
- Las más de las veces, es una **regla de selección** o de **conservación** de una nueva carga (el número bariónico en el caso que acabamos de ver).
- Sobre todo no les digamos que es una receta muy extraña.
- ¡Precisamente gracias a ella nació en la física de las partículas el concepto de **extrañeza!**

La simetría del cruzamiento

- Los físicos son gente con principios. Y hay uno que esgrimen con orgullo y seguridad: se trata de la **simetría de cruzamiento**.
- Consideremos una reacción conocida del tipo:
$$a + b \rightarrow c + d$$
- El principio en cuestión dice que cualquiera de esas partículas, a , b , c o d puede pasar del miembro de la izquierda al de la derecha a condición de que al mismo tiempo se la transforme en su antipartícula.
- Garantiza que las reacciones así obtenidas existen efectivamente.

La simetría del cruzamiento

- En otras palabras, los procesos:

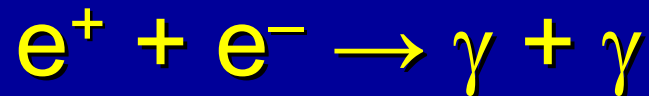


etc.

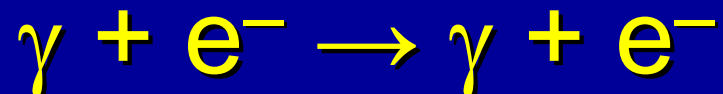
son posibles mientras lo sea la reacción inicial.

La simetría del cruzamiento

- Esta regla es sumamente poderosa. Tomemos el ejemplo de la aniquilación de un electrón y de un positrón en dos fotones γ :



- En virtud de nuestro principio y recordando que el fotón es su propia antipartícula, es el mismo proceso que la difusión de un fotón sobre un electrón (**efecto Compton**):



aunque en laboratorio estos dos fenómenos sean muy diferentes.

La simetría del cruzamiento

- Vemos aparecer aquí, al nivel más fundamental, una simetría que parece perfecta entre las propiedades de la materia y las de la antimateria.
- Sin embargo, se han detectado muy pocas antipartículas libres en el cosmos.
- ¿Cómo es que el Universo está constituido casi exclusivamente de materia y no también de antimateria en partes iguales?

La simetría del cruzamiento

- Hemos visto antes que la interacción débil no respeta la conservación de la paridad **P**.
- Peor aún, unos físicos demostraron en **1964** que rompe muy ligeramente la simetría materia-antimateria.
- ¿De qué se trata?

La simetría del cruzamiento

- En una reacción que haga intervenir partículas y antipartículas, se pueden reemplazar mentalmente las partículas por sus antipartículas y viceversa.
- Esta permutación de la materia y de la antimateria es la conjugación de carga, que se escribe **C**.

La simetría del cruzamiento

- Se pueden por supuesto aplicar las dos transformaciones **C** y **P** a un proceso determinado, es decir, cambiar primero las partículas en sus antipartículas (y recíprocamente), y luego mirar la imagen que se acaba de obtener en un espejo.

La simetría del cruzamiento

- Si el proceso resultante es tan probable como el proceso inicial, decimos que hay **invariancia CP**.
- Lo que se descubrió con estupefacción en **1964**, es que la interacción débil, incorregible, viola muy ligeramente esta simetría **CP**.
- Este fenómeno no es totalmente entendido por los teóricos.

La simetría del cruzamiento

- ¿Es gracias a él por lo que la materia ha podido predominar en el Universo?
- Quizás.
- Es en todo caso un hermoso problema de cosmología, no totalmente resuelto aún, aunque las ideas al respecto sean profusas.

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- En el centro del átomo, en el seno del núcleo, se vislumbra una zarabanda de protones y neutrones.
- Pegados entre sí por poderosas fuerzas, se agitan violentamente en todos los sentidos.
- En cada protón, en cada neutrón, hay otro baile: tres quarks, siempre tres, agitados por un movimiento formidablemente rápido.

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- Con unos choques de una violencia terrible, puede suceder que la energía de esos quarks se transforme en materia; surge entonces un par de partículas nuevas: un **quark** y un **antiquark**.
- A la inversa, cuando un **quark** y un **antiquark** se encuentran, se destruyen mutuamente y se vuelven a transformar en energía.

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- Y así sucesivamente: **quarks** y **antiquarks** aparecen, se encuentran, desaparecen durante unas fugitivas catástrofes que se repiten incesantemente.
- Curiosamente, en ese caos hormigueante reina cierto orden: en efecto, siempre hay, en cada protón, tres **quarks** más que **antiquarks**.

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- El protón, como hemos señalado, es un **hadrón**, es decir, una partícula sensible a la interacción fuerte.
- Se conocen hoy en día más de trescientos **cincuenta hadrones** (sólo damos una pequeña lista), casi todos ellos inestables.

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- Los **nucleones** y los **piones** forman parte de esa familia numerosa.
- El **electrón** y el **positrón** están excluidos de ella ya que no experimentan la interacción fuerte.

		Tipos		Nombre	Símbolo	Masa (en MeV)	Duración de vida	Carga eléctrica	Interacciones sufridas
Hadrones	Bariones (fermiones)	Nucleones	Protón	p	938	$>10^{30}$ años	+	todas	
			Neutrón	n	939,5	1000 s	0	Fdg	
		Hiperones (más pesados que el protón)	Lambda	Λ	1115	2.10^{-10} s	0	Fdg	
			Sigma	Σ^{\pm}	$\cong 1190$	$0,8.10^{-10}$ s	\pm	todas	
				Σ^0		$<5,2.10^{-10}$ s	0	Fdg	
			Xi	Ξ^0	1315	$2,9.10^{-10}$ s	0	Fdg	
				Ξ^{-}	1320	$1,6.10^{-10}$ s	—	todas	
			Omega	Ω	1672	$0,8.10^{-10}$ s	—	todas	
			Delta	Δ	1232	10^{-23} s	++		
		N Star	N^*	1470	—	+	todas		
		—	—	1520	—	—			
		-	—	—	—	---			
		Mesones (bosones)	Pión	π^{\pm}	139,5	$2,6.10^{-2}$ s	\pm	todas	
				π^0	135	$0,8.10^{-16}$ s	0	Fdg	
			Eta	η	549	10^{-18} s	0	Fdg	
Kaón	K^{\pm}		494	$1,2.10^{-8}$ s	\pm	todas			
	K^0			$0,8.10^{-10}$ s					
					$\acute{o} 5,2.10^{-8}$ s	0	Fdg		
Ro	ρ^{\pm}, ρ^0		776		$\pm, 0$	todas, Fdg			
Fi	φ^0		776		0	Fdg			
Omega	ω	783		0	Fdg				

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- La familia de los **hadrones** puede a su vez dividirse en dos subfamilias.
- Por un lado, los hadrones que son **fermiones**: se les llama **bariones**, su espín es semi-entero y su número bariónico es no nulo.

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- Por otro, los **hadrones** que son **bosones**: su espín es entero, y les llamamos **mesones**.
- Ejemplos: el **protón** y el **neutrón** son **bariones**; los **piones** son **mesones**.

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- La interacción fuerte no sabe distinguir entre un protón y un neutrón: en ambos casos, solo «ve» un nucleón.
- Protones y neutrones son –para ella– actores equivalentes.
- Asimismo, trata igualitariamente a los tres miembros de la familia de los piones, sea cual sea su carga eléctrica.

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- Para traducir esa característica, los teóricos consideran que el protón y el neutrón vistos por la interacción fuerte son dos estados particulares de un mismo ser, el nucleón.
- Más exactamente, dicen que el protón y el neutrón forman un «**doblete de isospín**».

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- Es su forma de hacer agrupaciones familiares.
- Sólo la interacción electromagnética es capaz de distinguir individualmente los miembros de estas familias, por su carga eléctrica.

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- Cuando la resolución alcanza 10^{-17} m (10 GeV), se distinguen claramente unos puntos duros en el interior de los hadrones (algo así como el punto duro, el núcleo, que Rutherford descubrió en el átomo): son los **quarks** que mencionábamos antes.
- Sabemos hoy que los bariones están formados por **tres quarks**, y que los **mesones** están formados por un par **quark-antiquark**.

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- Además de una carga eléctrica (que es fraccionaria, ya que han chocado), cada **quark** lleva una carga que le vuelve sensible a la interacción fuerte: como ya hemos dicho, se la llama metafóricamente **color**.
- Existen **tres colores** posibles: digamos rojo, verde y azul, con tal de seguir la analogía.

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- Sólo se observan las partículas que no tienen color.
- Por eso no se puede ver un quark aislado (llevaría un color bien definido).
- Es la superposición de los colores que llevan sus constituyentes la que hace que los hadrones sean blancos, es decir sin color (y por tanto observables), de la misma manera que los átomos son eléctricamente neutros.

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- Debido al intercambio incesante de **gluones**, que tienen color, el color de los **quarks** se modifica.
- Confinados en el interior de los **hadrones**, en perpetua interacción, los **quarks** practican con virtuosismo una especie de **celibato poligámico**: sólo tienen un color, pero no siempre el mismo.

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- Los **quarks** son **fermiones**, es decir, verdaderas partículas de materia.
- Su número es de **seis**.
- Se habla de **seis sabores**, que se designan por ***u*** (de *up* o arriba), ***d*** (*down* o abajo), ***s*** (*strange* o extraño), ***c*** (*charm* o encanto), ***b*** (*beauty* o belleza) y ***t*** (*top*).

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- Cuidado, ese término de sabor es engañoso: no significa que los quarks tengan como los manjares algún aroma o gusto.
- El sabor es simplemente la carga que permite precisar la **forma en que los quarks responden a la interacción débil**, al igual que lo hace el color con la interacción fuerte o la carga eléctrica con la interacción electromagnética.

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- La interacción débil vincula las partículas de cada **doblete**: el electrón con su neutrino, el quark *u* con su primo *d*.
- En particular, puede transformar un quark *u* en un quark *d*, y por tanto **cambiar el sabor** de los quarks.

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- Esta capacidad que tiene la interacción débil de modificar la carga que reconoce la distingue de la interacción electromagnética, que no cambia la carga eléctrica.
- La interacción fuerte, en sí misma, sólo es sensible al color, y no al sabor.

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- A partir de esos seis quarks es como se forman todos los hadrones.
- Por ejemplo, el **protón**, que es un barión, está formado por **dos quarks u y un quark d** ; el **neutrón**, por **dos quarks d y un quark u** ; el **pión π^+** , que es un mesón, está formado por **un quark d y un antiquark u** .

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- Los quarks b , c , s y t , al ser mucho más pesados que sus colegas u y d , se desintegran rápidamente en estos últimos.
- No se los encuentra, pues, en las estructuras estables conocidas.
- El único quark todavía no descubierto es el *top*, el compañero del quark b , pero se han podido recoger informaciones indirectas sobre él.

Barión o mesón: las dos formas de ser un saco de cuarks

- Su masa supuesta es del orden de 150 GeV (es decir, 150 veces la masa del protón), que llega casi al límite de las máquinas actualmente en funcionamiento.
- Pero los teóricos están seguros de su existencia: el *top* aparece en efecto como absolutamente necesario según su *modelo estándar*, que por cierto da unos resultados excelentes.
- Parece que se ha cumplido la expectativa de ser descubierto a partir de 1996 en el Fermilab, único laboratorio capaz de alcanzar el «nivel top».

Historias de familias

- A cada segundo, cada centímetro cuadrado de nuestra piel es atravesado por varios cientos de miles de partículas, sin que nosotros advirtamos nada.
- Son los neutrinos, que interactúan tan débilmente con la materia que haría falta un espesor de plomo de un año-luz para detener a la mitad de los que lo atravesaran.
- Se entiende que unos haces así sean difíciles de detectar.



- **Primeras experiencias con el neutrino en el CERN (1963):** Estas inscripciones figuraban en el blindaje de hormigón junto a la cámara de burbujas de líquidos pesados. Las experiencias que se realizaron allí confirmaron la existencia del neutrino asociado al muón, cosa que hizo correr mucha tinta, y también –al parecer– mucho champán. Este último tiene el mérito indiscutible de ser palpable, contrariamente a los neutrinos.

Historias de familias

- La existencia de los neutrinos había sido intuida en **1932**, para salvar el principio de la conservación de la energía que los fenómenos de desintegración β parecían no respetar.
- A **Pauli** le bastó con imaginar que una partícula invisible, el neutrino precisamente, se escapaba, llevándose la energía que faltaba, para volver a poner orden en las cosas.
- Debido a su colosal discreción, el neutrino sólo fue descubierto en **1953**.

Historias de familias

- Los neutrinos son fermiones, de carga eléctrica nula. Ingenuamente, uno se esperaría que los fermiones tuviesen una masa, ya que son verdaderas partículas de materia: en particular, son mutuamente impenetrables.
- Pero en el caso de los neutrinos la cuestión de su masa no está aún zanjada.
- Lo que es seguro es que si tienen una, es muy débil (menos de unos eV para el neutrino asociado al electrón, compárese con el 0,5 MeV del propio electrón).


Historias de familias

- ¿Pero tiene realmente una?
- Esta excelente pregunta tiene resonancias considerables en cosmología: al ser los neutrinos las partículas más numerosas del cosmos, el simple hecho de que tengan una masa influiría en el destino a largo plazo del Universo, controlado por la gravitación.

Historias de familias

- Estos pequeños entes discretos tienen pues seguramente algo que decir respecto a la cuestión de saber si el Universo es abierto o cerrado (incluso los domingos).
- ¿Su expansión proseguirá indefinidamente, o bien será seguida de una recontracción?
- Esto depende de la densidad media del Universo, según sea suficiente o no para «retener» el Universo por gravitación.

Historias de familias

- Pero volvamos a los asuntos familiares que anunciábamos.
 - Los fermiones son los constituyentes fundamentales de la materia.
- 

Historias de familias

- Por un lado están los que son sensibles a la interacción fuerte: son los seis quarks que entran en la composición de los hadrones y que acabamos de presentar.
- Por otro lado, están los fermiones que son insensibles a la interacción fuerte: los leptones, que son también seis: el electrón, sus dos primos más pesados (inestables) –el **muón** (descubierto en **1937**) y el **tau** (descubierto en **1975**)– y sus neutrinos asociados.

Historias de familias

- Seis quarks, seis leptones, es una equidad perfecta a partir de la cual se pueden formar tres familias estructuradas en dobletes.
- Esta clasificación no es arbitraria: se deriva de argumentos de simetría que no vamos a detallar aquí.
- Cada familia contiene un leptón cargado, por ejemplo el electrón, su neutrino asociado ν_e , y dos quarks (u y d).
- Y por supuesto las antipartículas correspondientes.

Historias de familias

- El resultado más notable del LEP ha sido mostrar, contando precisamente los modos de desintegración del bosón intermediario Z^0 , que sólo existen tres familias de leptones ligeros en el Universo, de acuerdo con las predicciones de la cosmología.
- Pero, ¿por qué tres familias?
- Pues hasta el momento no lo sabemos.

La simetría me fue explicada...

- Hoy en día conocemos varios cientos de partículas, elementales o no.
- Uno pensaría que un efectivo tan rico debe ser de una temible complejidad, imposible de entender.
- En realidad los comportamientos no son tan confusos como se podría pensar: las leyes y las regularidades abundan.
- El concepto que permite esa simplificación es el de simetría.

La simetría me fue explicada...

- Tomemos un solo ejemplo, el de la **electrodinámica cuántica**.
- Es la teoría que describe los fenómenos en que intervienen electrones, positrones y fotones.
- Sus ecuaciones tienen una propiedad que recuerda lo que ocurre cuando se quiere localizar un punto en la superficie de la Tierra: primero hay que definir un «punto cero», un origen, a partir del cual se medirán todas las posiciones.

La simetría me fue explicada...

- Los físicos deben hacer lo mismo con sus ecuaciones: están obligados a atribuir arbitrariamente una fase al campo que describe, por ejemplo, el electrón (un campo, al ser una función compleja, posee una amplitud y una fase).

La simetría me fue explicada...

- Pero al igual que los geógrafos quieren que la distancia entre dos ciudades no dependa de su elección del punto cero, los físicos desean que las predicciones de su teoría no dependan de la fase que han elegido arbitrariamente.

La simetría me fue explicada...

- Exigen lo que llaman una **invariancia gauge**.
- Pero si se conforman simplemente con describir unos electrones y unos positrones libres (sin interacción), sus deseos no se verán cumplidos: **¡los resultados de los cálculos dependen explícitamente de su elección!**
- ¿Qué hacer para anular esa fastidiosa dependencia?

La simetría me fue explicada...

- Basta con añadir en las ecuaciones un campo suplementario que se llama precisamente **campo gauge** (*Gauge Feld* en alemán).
- La palabra alemana **Gauge** designaba originalmente la herramienta con la que se controlaba la distancia entre los raíles del ferrocarril.
- En física, se utiliza más bien para impedir que las teorías descarrilen...

La simetría me fue explicada...

- Resulta (y ese es el milagro) que el campo gauge que aparece aquí no es sino... ¡el propio campo electromagnético!
- Sus cuantos no tienen masa: son los fotones.

La simetría me fue explicada...

- Hemos aquí frente a una interpretación inesperada del concepto de interacción: se le ha añadido «a mano» un campo, en este caso el campo electromagnético, con el fin de preservar la simetría de las ecuaciones que describen los electrones y los positrones y despojar sus predicciones de toda arbitrariedad; al hacerlo, descubrimos que hemos instalado una fuerza que acopla los electrones y los positrones, **¡que es precisamente la fuerza electromagnética!**

La simetría me fue explicada...

- Las partículas que mediatizan una interacción adquieren aquí un nuevo sentido: son los cuantos del campo de referencia (los bosones gauge) que ha sido introducido en las ecuaciones para que respeten cierta simetría.

La simetría me fue explicada...

- El principio de **invariancia gauge** es por tanto muy poderoso, y también muy elegante, ya que le reserva la mejor parte al concepto de simetría.
- Ha adquirido tal importancia en física que debemos, cuando menos, hacerle publicidad.
- Empecemos por darle una formulación analógica.

La simetría me fue explicada...

- Supongamos que vivimos en un pueblo donde la campana de la iglesia suena una vez –sólo una campanada– cada hora.
- Cada vez que el pueblo cambia a la hora de verano, todos debemos avanzar el reloj una hora.

La simetría me fue explicada...

- Los teóricos dirían que eso corresponde a una transformación gauge global, ya que todos cambiamos nuestros relojes el mismo número de horas y en el mismo momento.
- Eso no revoluciona nuestras costumbres: todos somos capaces de decir, después de ese cambio de hora, dentro de cuánto tiempo tendrá lugar la siguiente campanada.
- Y la vida sigue como antes.

La simetría me fue explicada...

- Imaginemos ahora que la campana de la iglesia es tan exacta que cada uno de nosotros la utiliza para poner su reloj en hora, sin ponerse de acuerdo con los demás.
- Cada uno elige, al oír la campanada, su propia convención.
- María pondrá su reloj a las diez, Pablo a las dieciséis horas.

La simetría me fue explicada...

- Es decir, que los relojes del pueblo ya no indicarán la misma hora.
- A pesar de ello, todos los habitantes del pueblo siguen siendo capaces de hacer predicciones justas respecto al momento en que sonará la campana.
- También en ese caso la vida continúa como antes, al menos mientras la gente no decida darse cita...

La simetría me fue explicada...

- Imaginemos en efecto que Pablo quiere ver a María para un asunto cualquiera (que no es de nuestra incumbencia).
- Si no quieren faltar a la cita, tendrán primero que sincronizar sus relojes, por ejemplo telefoneándose.

La simetría me fue explicada...

- Ese acuerdo, ese restablecimiento de una simetría sólo puede realizarse mediante una transmisión de mensaje, es decir una interacción.
- Es el ejemplo de nuestra cita, es el intercambio de una macedonia de frutas para dos el que hace simétricos los papeles del hombre y de la mujer: gracias a ello disfrutarán del mismo postre (¡qué bonito es el amor cuántico!).
- Al final, es exactamente eso lo que ha sucedido con nuestras ecuaciones de la electrodinámica cuántica.

La simetría me fue explicada...

- Para sincronizar las fases de los electrones y de los positrones, tiene que haber intercambio de fotones, lo cual permite a las partículas interactuar.
- Así, cuando dos electrones se encuentran, uno de ellos emite un fotón virtual que es absorbido por el segundo.
- Volvemos a encontrar aquí el proceso de intercambio transmisor de las fuerzas del que hablábamos al principio.

La simetría me fue explicada...

- Aunque no quede muy claro, lo que acabamos de demostrar es que una **invariancia gauge** local implica interacciones.
- Recíprocamente, podemos preguntarnos si todas las interacciones no corresponderán a simetrías locales.
- Ésa es la gran idea de los teóricos que intentan unificar las fuerzas de la naturaleza (excepto Rambo).

La simetría me fue explicada...

- Ya han podido extender esta noción de **simetría gauge** a las demás interacciones, pese a sus muy diferentes características, y construir gracias a ella una teoría coherente, *el modelo estándar*.
- Su procedimiento (si acaso se puede resumir) se desarrolla en dos etapas.

La simetría me fue explicada...

- Postulan primero la existencia de campos de materia sin interacción (nuestros positrones y electrones de antes), y luego suponen que obedecen a cierta simetría (en este caso la independencia respecto a la fase).
- Exigen luego que esa simetría sea local, lo cual les obliga a introducir unos **campos gauge** portadores de las interacciones (y por tanto a postular la existencia de nuevas partículas).

La simetría me fue explicada...

- Lo extraordinario de esto, no es sólo que la existencia de las interacciones se desprende de un principio de simetría, sino que la forma misma de las interacciones se ve sujeta a la simetría.
- Todo ocurre finalmente como si las relaciones entre los objetos se volvieran más importantes que los propios objetos.

La simetría me fue explicada...

- A partir de ahí, el juego de la gran unificación es sencillo, al menos en apariencia.
- Conociendo las características de una interacción, queda por adivinar la simetría que la sostiene.

La simetría me fue explicada...

- Una vez efectuado ese trabajo respecto a cada una de las cuatro interacciones conocidas, hay que construir una simetría más amplia que contenga cada una de las cuatro simetrías previamente identificadas.

La simetría me fue explicada...

- Al teórico que encuentre esa simetría lo único que le quedará por hacer es comprarse un esmoquin con vistas a un eventual viaje a Estocolmo.

La simetría me fue explicada...

- Desde luego mentimos al decir que ese juego es sencillo.
- Por el contrario, es de una extraordinaria dificultad, principalmente debido a la gravitación, que se aviene bastante mal con los principios de la física cuántica.

La simetría me fue explicada...

- Y no sólo eso: hemos hablado de la teoría electrodébil que unifica las interacciones electromagnética y débil.
- Su simetría, la simetría electrodébil, reúne, como su nombre indica, la simetría del electromagnetismo y la de la interacción débil.
- Impone cuatro bosones de gauge de masa nula.

La simetría me fue explicada...

- ¿Cómo es entonces que los tres mediadores de la interacción débil (W^+ , W^- y Z^0) tienen una masa, mientras que el mediador de la fuerza electromagnética, el fotón, no la tiene?

La simetría me fue explicada...

- Sólo se puede entender esta diferencia invocando una «**ruptura espontánea**» de la simetría electrodébil, especie de **pecado original** que pudo tener lugar en los albores del Universo.
- Esta ruptura sólo dejaría subsistir una simetría residual, la del electromagnetismo.

La simetría me fue explicada...

- Generalmente se atribuye a un mecanismo enigmático, el **mecanismo de Higgs**, por el cual se pretende interpretar el origen de las masas de las partículas.

La simetría me fue explicada...

- Consiste en introducir una nueva partícula, el **bosón de Higgs** precisamente, y en construir una interacción que provoque deliberadamente una ruptura de simetría.

La simetría me fue explicada...

- Entonces, los tres bosones intermedarios, que hasta entonces no tenían masa, adquieren una (la del fotón que sigue siendo nula); las dos interacciones están ahora diferenciadas y la física vuelve a ser la que conocemos.

La simetría me fue explicada...

- La teoría electrodébil, como sólo necesita que el **bosón de Higgs** exista, no dice nada de su masa, salvo que puede difícilmente exceder 1 TeV sin cuestionar todo el edificio.
- Es precisamente el ámbito de energía que cubrirán los futuros grandes colisionadores protón-protón actualmente en estudio (LHC del CERN de Ginebra, SSC de Dallas, en Texas).

La simetría me fue explicada...

- En cuanto al mecanismo de Higgs es introducido en el modelo estándar, éste se pone a funcionar como un reloj, hasta el punto de que se habían podido predecir las masas de bosones intermediarios mucho antes de su descubrimiento.

La simetría me fue explicada...

- Pese a ello, algunos juzgan la partícula de Higgs poco elegante y le reprochan su oportunismo.
- Falta pues asegurarse de que el mecanismo que ésta rubrica ha tenido efectivamente lugar, lo cual verificaría la piedra angular del modelo estándar, por otra parte tan extraordinario.

La simetría me fue explicada...

- Y he ahí, señor Waldegrve, por qué tanto físicos quisieran partir a la búsqueda del **bosón de Higgs**, inventado –¿es necesario decirlo?– por uno de sus compatriotas.
- Y ahora, ¿**champán para todos?**

El fin y los medios

- *El logro del siglo XX en la física de las partículas: un modelo estándar, hasta ahora en pleno acuerdo con las experiencias, pero cuya piedra angular sigue siendo hipotética.*
- *Dos de sus piezas clave faltan en el cuadro de trofeos de los colisionadores: el **quark top** y el **bosón de Higgs**.*

El fin y los medios

- *Los físicos sueñan con la unificación y con enormes máquinas.*
- *¿Dispondrán de medios acordes con sus ambiciones?*
- *Será sin duda a condición de que su búsqueda se viva de forma más colectiva.*
- *¿Alguna catedral se construyó para uso exclusivo de sus preladados?*



- **La sala de control del LEP:** Foto tomada el 14 de julio de 1989, día simbólico en que se consiguió la primera revolución de los haces alrededor del anillo. El único físico que lleva corbata es **Carlo Rubbia**, actual director del CERN, «descubridor» en 1983 de los bosones intermedarios y gracias a ello premio Nobel. ¿Quién puede decir cuántos días apasionantes como ése nos reserva el futuro? ¿Construiremos en las próximas décadas muchas máquinas más grandes que el LEP?

La física de partículas hoy

- Hablar de la física de las partículas hoy es considerar su situación actual, discernir las amenazas que su gigantismo hace pesar sobre ella, y vislumbrar las condiciones que augura su futuro.
- Comencemos por señalar el lugar que ocupa en el panorama científico contemporáneo.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- Al finalizar la Segunda Guerra Mundial, la física de las partículas fue considerada la reina de las ciencias.
- Era la hija mayor de la flamante física nuclear, que había desentrañado los secretos del núcleo atómico con la trágica eficacia que conocemos.
- Su excelente aura determinó en gran parte la actitud de los físicos y de los políticos respecto a ella.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- Siendo su objetivo alcanzar lo fundamental y producir junto con la astrofísica una cosmología general, poseía un capital de seducción indiscutible que la protegía de los azares de la economía.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- Al igual que el deporte de alto nivel, sirvió incluso de escenario para una competición internacional, librada como cualquier guerra fría, en el terreno de los símbolos.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- Bastaba con que un país o un bloque de países se lanzase a la construcción de una enorme máquina para que sus rivales aumentaran el envite, algo así como en el póquer, fuese o no un farol.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- Desde hace unos años, la situación ha cambiado: regularmente, la física de partículas es duramente atacada.
- Antaño *Prima donna* saciada de créditos y aureolada de prestigio, hoy cae en la sospecha de haber gozado de una cotización artificialmente abultada.
- Enfrentada a la competencia directa de las demás disciplinas, ahora debe argumentar y defenderse.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- Y es que en este nuevo siglo ya no creemos en una clasificación de las ciencias por casillas sucesivas, como en tiempos de Auguste Comte.
- Pocos pretenden ya que se pueda comprender todo cuanto respecta al mundo que nos rodea mediante el estudio exclusivo de lo infinitamente pequeño.
- *More is different*, se suele proclamar hoy.
- Lo macroscópico no es una extrapolación fácil de lo microscópico, y lo complejo no es una acumulación de cosas sencillas.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- El acercamiento «construccionista» (y cartesiano) que consiste en querer comprender cualquier nivel de estructura estudiando la más fina de sus estructuras subyacentes (la célula a partir de las moléculas, el átomo a partir de los quarks...) no funciona.
- Poco les importa a los biólogos, en la práctica de su oficio, saber si los protones contienen quarks o gluones.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- En cambio, necesitan forjar conceptos que no tienen su contrapartida en física.
- Esta imposibilidad de construir todas las disciplinas científicas a partir de una sola (que se convertiría así en la fundamental) restituye cierta autonomía a cada una de ellas.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- Pero, a la inversa, un estudio exclusivo de los sistemas macroscópicos no habría permitido aislar los constituyentes fundamentales de la materia, como ha podido hacerlo la física de las partículas.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- Esto se entiende bien con la ayuda de una analogía: imaginemos a un extraterrestre, con una inteligencia comparable a la nuestra, que sólo conozca el mundo de los humanos mediante la observación de las multitudes, las que asisten a los conciertos de los Rolling Stones o celebran la fiesta nacional.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- Si el personaje verdoso en cuestión es realmente muy dotado, se volverá capaz de explicar algunos de los fenómenos que agitan a esas multitudes, por ejemplo su movilidad, los lugares y las circunstancias en que se forman.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- Si prosigue con empeño sus investigaciones, puede descubrir que nuestras aglomeraciones están formadas por individuos yuxtapuestos.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- Pero si sólo dispone de las leyes que haya deducido de la observación de las masas, no podrá desde luego entender el lenguaje que utilizan dos seres humanos para comunicarse; para eso tendría que encontrárselos aisladamente.
- Ahora bien, en la medida en que se pueda utilizar esa metáfora, las partículas son respecto a la materia lo que los individuos son respecto a la multitud.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- A partir de ahora asistimos más bien a algo parecido a una lucha por el poder entre disciplinas hegemónicas.
- La física de las partículas, como todos los demás sectores de la física, está atrapada en la refriega.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- Aunque siga siendo la mejor situada para revelar el fondo de la realidad, no puede invocar ninguna superioridad jerárquica sin que inmediatamente se la señale con el dedo.
- Parece que se ha acabado el tiempo de la arrogancia aristocrática, cuando podía planear tranquilamente, despreocupada y prioritaria, en el empíreo de las ideas puras.
- Hoy ya es imposible medir la prioridad de una actividad de investigación sólo con la medida del número de GeV que utiliza.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- Otras disciplinas menos cósmicas y más «terrestres» se han despertado últimamente (sobre todo la informática, la ciencia de los materiales, la climatología, la biología); acaparan el primer plano y relegan a la sombra a la física de las partículas.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- Hemos de decir que esta última es la víctima de sus propios éxitos.
- Hace más de veinte años que lo esencial del trabajo de los físicos consiste en someter a prueba el modelo estándar, al que todavía no se le han detectado fallos: todas sus predicciones se han revelado exactas en cuanto a las energías accesibles hoy día.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- No ha habido ni escándalo, ni revolución, ni sorpresa; ni una noticia sensacional que anunciar en los veinte últimos años en ese campo.
- Al menos nada que pueda transmitir una fiebre duradera a la comunidad de los investigadores.
- Y algunos echan de menos la efervescencia que acompañó a la lenta génesis de la física cuántica en la primera mitad del siglo XX.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- El modelo estándar se vuelve menos excitante a medida que se vuelve más estándar (¿no es acaso «estándar» una expresión peyorativa?).
- El entusiasmo se ha ido apagando, como si esa física hubiese alcanzado la edad de la suprema madurez.
- ¿Está quizá viviendo su apogeo?

Una brillante supremacía controvertida hoy

- El modelo estándar (que es en realidad mucho más que un modelo), ¿es acaso la teoría definitiva de las interacciones fundamentales con baja energía, al igual que la física newtoniana es la teoría adecuada de la mecánica mientras las velocidades sean pequeñas con relación a la de la luz?

Una brillante supremacía controvertida hoy

- Algunos lo creen y lo dicen, pero eso está todavía por comprobar.
- Lo que es seguro es que una teoría que funciona demasiado bien, es como un tren que llega a su hora, nunca saldrá en la primera plana de los periódicos, por rara o valiosa que sea la belleza de dicho tren o de dicha teoría.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- Los éxitos obtenidos en el LEP por el modelo estándar representan pues un paralogismo singular: son un triunfo, pero también una calamidad.
- Cuando no aparece ningún fallo, ¿en qué sentido hay que modificar la teoría para mejorarla?
- Todo iría mejor si el modelo estándar no tuviese ningún defecto intrínseco; entonces se podría extrapolar a otras energías más elevadas, universalizarlo.

Una brillante supremacía controvertida hoy

- Ahora bien, el modelo estándar no es la teoría definitiva, los teóricos están convencidos de ello y lo proclaman a voz en cuello: no explica el valor de las masas de partículas, y contiene demasiados parámetros arbitrarios.
- Esto basta para justificar su deseo de explorar más allá.
- Pero desde el punto de vista diplomático, es muy comprensible que su causa no sea ideal: no es fácil reclamar una nueva máquina cuando aquella de que se dispone sólo demuestra los méritos de la teoría, ocultando sus vicios.

Amenazas para los grandes instrumentos

- Hay que añadir a esto los reproches recurrentes que se le hacen a la física de las partículas, y el primero de ellos, desde luego, la desmesura de sus instrumentos... de medida.
- Algunos historiadores creen haber observado que el gigantismo es el estadio último y decadente de todo desarrollo.

Amenazas para los grandes instrumentos

- Toda desmedida coincidiría con el inicio de un crepúsculo: cuando algo no se sabe hacer mejor, se hace más grande.
- Y citan el ejemplo de las grandes pirámides de Egipto que marcaron el fin de las grandes dinastías.

Amenazas para los grandes instrumentos

- Por justificado que esté en la historia de las civilizaciones, este reproche carece de fuerza cuando se trata de la física.
- No es desde luego por falta de inventiva de los físicos, si siendo lo que son las leyes cuánticas, necesitan efectivamente energías elevadas para observar los fenómenos microscópicos.

Amenazas para los grandes instrumentos

- ¡No se les puede reprochar a los investigadores que sean gente curiosa!
- Tampoco es culpa suya si algunas partículas tienen una masa elevada y si, para estudiarlas, hay que disponer de energías que correspondan a su umbral de creación.

Amenazas para los grandes instrumentos

- ¿A quién se le podría reprochar que el Z^0 sea 180.000 veces más pesado que el electrón?
- Lo que hay que tener en cuenta más bien es que gracias al esfuerzo de los físicos el costo del GeV ha disminuido considerablemente.

Amenazas para los grandes instrumentos

- La cuestión que se plantea, eso sí, es saber si podremos mantener durante mucho tiempo esta carrera de altas energías.
- El aumento de las posibilidades de las máquinas en energía ha seguido hasta ahora un crecimiento exponencial.
- ¿Podrá mantenerse un ritmo así en el futuro?

Amenazas para los grandes instrumentos

- Actualmente dos grandes proyectos están a la orden del día: el LHC, que sería construido en el CERN en el mismo túnel que el LEP (27 km), y el SSC norteamericano, mayor (80 km) y más costoso (abandonada por decisión del Congreso).
- Estas dos máquinas son colisionadores protón-protón, con imanes superconductores, de 14 y 40 TeV, respectivamente.

Amenazas para los grandes instrumentos

- Ambas tienen por objetivo encontrar la clave del mecanismo de creación de las masas de las partículas, de la que los físicos piensan que actúa entre 100 eV y 1 TeV.

Amenazas para los grandes instrumentos

- Normalmente se admite que la energía de esas máquinas sería suficiente para confirmar, gracias al descubrimiento del **bosón de Higgs**, la validez del modelo estándar, o cuando menos para indicar los caminos de una nueva física.

Amenazas para los grandes instrumentos

- Se trata en suma de saber si nuestra teoría de las interacciones está concluida o no respecto a las energías «débiles» (hasta unos centenares de GeV).

Amenazas para los grandes instrumentos

- También se prevé la construcción de un colisionador lineal electrón-positrón con energías del orden de los 500 GeV.
- Ya que los protones tienen un defecto: la energía en juego durante sus colisiones mutuas es de un orden de tamaño inferior a la energía de los propios protones, la cual deben repartir entre sus quarks y sus gluones.

Amenazas para los grandes instrumentos

- Los electrones y los positrones, al no tener una subestructura conocida, no presentan esa desventaja propia de las partículas compuestas.

Amenazas para los grandes instrumentos

- Sus colisiones son intrínsecamente más simples y más limpias que las de los protones: más allá de la patentización de un nuevo fenómeno, permiten estudiarlo sistemáticamente (los protones hacen la exploración de un ámbito de energía, y los electrones realizan su cartografía detallada).

Amenazas para los grandes instrumentos

- Pero antes de que una máquina así sea posible, será necesario que el potente esfuerzo de investigación actualmente llevado a cabo haya dado todos sus frutos, especialmente en el ámbito de los campos eléctricos intensos capaces de acelerar los electrones: si no queremos que ese acelerador lineal tenga una longitud que pueda medirse en cientos de kilómetros, tendremos que ser capaces de transferir a los electrones varias decenas de MeV por metro de máquina.

Amenazas para los grandes instrumentos

- La física de las partículas sólo podrá progresar si recurrimos a la experiencia, es decir, en este caso, a la física pesada, ya se haga ésta con aceleradores o sin aceleradores (la muy prometedora astrofísica de las partículas utiliza el propio Universo como laboratorio).
- Si las partículas no lo hicieran en los colisionadores, ¡serían los propios físicos los que tendrían que darle vueltas y más vueltas!

Amenazas para los grandes instrumentos

- Sin pruebas experimentales de sus ideas, no podrían ir más allá de las conjeturas, elegantes, desde luego, pero virtualmente delirantes.
- Sabemos que sin investigación fundamental organizada, el conocimiento se bloquea, o desvaría.

Amenazas para los grandes instrumentos

- Lo mismo que la bicicleta que se cae cuando uno deja de pedalear, la física de las partículas sólo avanza si es activada.

Amenazas para los grandes instrumentos

- Es vital para la comunidad de los físicos que algunos proyectos la mantengan en tensión y le abran un horizonte.
- Y no son otros sino los grandes aceleradores los que han marcado su movimiento desde el final de la Segunda Guerra Mundial.

Amenazas para los grandes instrumentos

- Estos grandes instrumentos han cambiado radicalmente la faz de la ciencia.
- Antaño individualista, tiende hoy a valorar el trabajo en equipo y las colaboraciones internacionales; exige una programación plurianual, una coordinación exacta y la creación de instituciones nuevas, cosas todas ellas que habrían molestado prodigiosamente a pensadores tales como Einstein, pero que hoy son inevitables.
- ¿Acaso la ciencia está dejando de ser una aventura filosófica para convertirse en un asunto de potencial?

Amenazas para los grandes instrumentos

- La que se practica en los grandes laboratorios no es, desde luego, exclusivamente una actividad cerebral.
- También se ha convertido en una cuestión de organización cuya práctica exige un comportamiento similar al que se atribuye a los empresarios.
- Los líderes que elige tienen un perfil radicalmente diferente al de los padres fundadores de la mecánica cuántica, que trabajaban solos o en pequeños grupos.

Amenazas para los grandes instrumentos

- Ahora se anuncia que las experiencias de principios del siglo XXI, tanto en el LCH como en el SSC, agruparán cada una de ellas a más de un millar de físicos, procedentes de un centenar de institutos diferentes.
- Uno se imagina mal al taciturno Dirac a la cabeza de esos ejércitos.

Amenazas para los grandes instrumentos

- Pero la comunidad de los físicos –es un hecho– se ha adaptado muy bien a esa nueva manera de practicar la física, aunque sea sin duda mediante un proceso de selección natural.
- Sin caer en un lirismo exagerado, puede decirse que la ciencia ha realizado aquí su más alta misión: la de unir a los hombres.
- El caso de la física de las partículas es incluso ejemplar: no abundan tanto los lugares donde trabajen juntas, alrededor de la misma idea, personas de nacionalidades tan distintas.

Amenazas para los grandes instrumentos

- Aunque el poder federativo de los grandes proyectos no llega a suprimir las fronteras, permite muchas veces olvidarlas.
- Dicho esto, habría que ser muy miope para no discernir algunos problemas que plantea esta forma de trabajar.
- La dimensión de los proyectos tiene consecuencias importantes en la vida cotidiana de los científicos, en la enseñanza y en el propio futuro de las ciencias.
- ¿A qué se parecerán los laboratorios del siglo XXI?

Amenazas para los grandes instrumentos

- Detrás de esa pregunta surgen más, una tras otra.
- ¿Son los grandes instrumentos unas buenas herramientas para formar a los jóvenes investigadores?
- ¿Pueden estos últimos colaborar de forma creativa en empresas de tal envergadura?

Amenazas para los grandes instrumentos

- ¿Cómo compaginar los largos plazos de construcción de esas máquinas con la carrera de quienes participan en ello?
- Cuando una experiencia necesita los esfuerzos conjugados de varios cientos de físicos, ¿según qué criterios evaluar los méritos de cada uno de ellos?
- ¿Y cómo, en esos contextos tan pesados, conservar el frescor mental y el sentido de la iniciativa?

Los tiempos cambian

- Las dificultades con que se topan los físicos norteamericanos para obtener la financiación del SSC son un síntoma de que los tiempos han cambiado mucho.
- La crisis económica se ha instalado, reduciendo los presupuestos de los Estados y modificando sus prioridades.

Los tiempos cambian

- Al darse cuenta de que no se puede hacer todo, ni financiar todo, los poderes públicos se lo piensan dos veces, e incluso más, antes de negar o aceptar los compromisos que les reclaman los científicos.
- El ritmo de los grandes proyectos disminuye.
- Cada paso exige más tiempo, prueba de la verdad tautológica según la cual es difícil acelerar en tiempos de recesión.

Los tiempos cambian

- La coyuntura favorable de los «Treinta Años Gloriosos» la hemos dejado atrás, y la ciencia llamada «pura» resulta penalizada.
- Se le exige que domine su propio dominio.
- Sus grandes proyectos son duramente discutidos, defendidos de forma contradictoria y apasionada.

Los tiempos cambian

- Ninguno de ellos es aceptado ya por las buenas.
- Y es que se han convertido ya no sólo en desafíos científicos y técnicos, sino también en apuestas políticas y estratégicas.

Los tiempos cambian

- Antes el Estado dejaba que se hicieran las investigaciones, ahora él las encarga.
- Hemos de convenir que no es lo mismo.
- Principalmente, los factores que determinan el desarrollo de la ciencia y sus orientaciones escapan en gran parte a quienes la hacen y la viven.
- Y la investigación se ve restringida, ya no por los inquisidores, sino por los ministros de Economía y Hacienda.

Los tiempos cambian

- Hay que añadir a esto la crisis de la investigación gratuita (pero costosa) y desinteresada.
- Desde luego esa crisis no es una novedad.
- La física nunca ha ocupado el Parnaso y la imagen ideal de una investigación pura, resultado de una concepción immaculada, es esencialmente quimérica e ingenua.

Los tiempos cambian

- Lejos de ser un enclave de armonía y de transparencia dedicado al culto exclusivo del espíritu, la ciencia está atrapada en todos los sistemas: políticos, financieros, estratégicos, que se entrelazan en la sociedad.
- Esto es todavía más evidente en cuanto a la ciencia pesada, que debido a la organización que implica, sólo es viable si se adoptan resoluciones explícitas a su favor y si se le conceden medios importantes.

Los tiempos cambian

- Pensemos en Cristóbal Colón.
- Ya en su tiempo se dedicaba a la ciencia pesada: sus carabelas sólo pudieron partir a descubrir el mundo gracias al apoyo del Estado.
- Su aventura mezclaba inseparablemente ambición, ser de conocimientos, apetito de riqueza y sueños de gloria, cosas todas necesarias hoy también para lanzar grandes proyectos.

Los tiempos cambian

- El conocimiento del mundo siempre ha sido movido por un gran abanico de motivaciones, y en todos los tiempos ha necesitado la generosidad del soberano.
- No existe curiosidad sin costo, ni espíritu conquistador sin agitación de la libido.

Los tiempos cambian

- Lo que ha cambiado es que hoy más que nunca conviene ser eficaz y rentable.
- Por ello las investigaciones declaradas sin utilidad inmediata tienen dificultades para justificar su pretensión, en tanto en cuanto lo que más se les cuestiona es su utilidad inmediata.
- ¿Para qué sirves?, se les pregunta sin cesar, olvidando que no forzosamente hay una razón en todo lo que comporta una posibilidad de grandeza.

Los tiempos cambian

- Es algo así como si a los poetas se les propusiera disertar sobre la utilidad de las estrellas, de los colores del cielo de abril o de la melancolía de las damiselas.
- Prestándose al juego, los agentes de esas investigaciones tratan de mostrar que también son útiles para la sociedad, que entablan contactos fructíferos con la industria, que tienen consecuencias tecnológicas impresionantes.
- Tienen ejemplos que citar, como el de los detectores de **Georges Charpak**, cuyos principios sirven hoy en medicina y en biología.

Los tiempos cambian

- Pero hay que decir que en general la prueba es difícil de administrar a quienes anteponen el aspecto financiero de las cosas.
- ¿Significa eso que la física de las partículas está a merced de una supresión presupuestaria?
- ¿Se habrá pasado de moda la búsqueda de lo infinitamente pequeño?

Los tiempos cambian

- Algunos lo dicen, sin duda equivocadamente.
- Pero lo que sí hay que saber es hasta dónde conviene financiar esos grandes equipamientos.
- Y eso nos enfrenta a la cuestión de nuestros deseos, nuestros anhelos y nuestros medios.

Los tiempos cambian

- Cuestión candente, y no sólo de actualidad, ya que el hecho de tener un enfoque estructurado y racional hacia el saber o el conocimiento revela elecciones conscientes, y no automatismos.
- Es simplemente un acto de envergadura metafísica.
- Ya que al inicio de la ciencia, por mucho que se diga, siempre hay una pulsión, un credo, una voluntad, que no son reductibles a la propia ciencia.

Los tiempos cambian

- Ni el espíritu de conquista ni el deseo de entender figuran, que sepamos, en la lista de las leyes físicas, y la fe en la ciencia es, ante todo y siempre, una fe.
- Por ejemplo, pensar (como muchos físicos) que existe en las profundidades de la materia una verdad oculta como un tesoro, esperando al explorador que la exhiba como a una diosa imperecedera, es adherirse a un credo, no a un hecho científico.

Los tiempos cambian

- He ahí un palmo de narices con que, de paso, la moribunda metafísica deja a la dinámica física.
- Por más que esta última se haya presentado frecuentemente como el exorcismo de la metafísica, no se ha desprendido totalmente de ella, ¿ya no se puede probar por medio de la física que haya que financiar una investigación fundamental para la física!

Los tiempos cambian

- ¿Qué supremacía puede reivindicar la física, si no lleva en sí misma su propia legitimidad?
- Sus ecuaciones no dicen nada sobre el porcentaje del PIB que conviene reservarle.

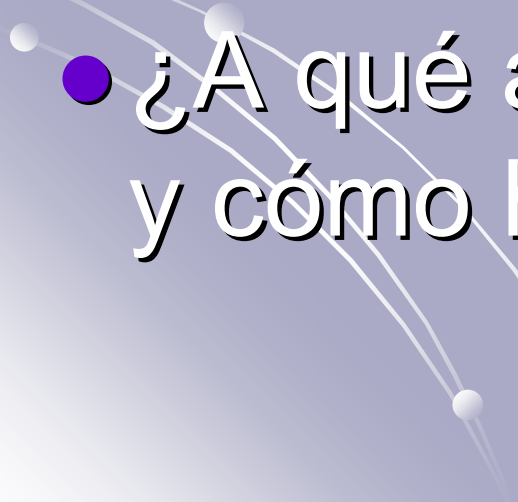
Los tiempos cambian

- Por tanto, aunque sea razonable practicar la física, hay que reconocer que lo es según criterios que no tienen nada que ver con la propia física.
- En tanto que actividad intelectual y social, ésta encuentra su legitimidad fuera de su propio acervo: es lo que podríamos llamar un **teorema de Gödel** de la física.

Los tiempos cambian

- Si se decide practicar la física, no es porque sea algo que se imponga a nosotros, sino porque le reconocemos un sentido y un valor a tal actividad.
- Por eso las únicas preguntas verdaderas que se nos plantean son: ¿queremos practicar la física?
- Y ¿qué sentido tiene ello para nosotros?

Pensar en la ciencia

- Los físicos sueñan con la unificación.
 - ¿Cuál es el sentido de su búsqueda?
 - ¿A qué aspira ésta exactamente, y cómo hacer para compartirla?
- 

La utopía del todo

- Partamos de una observación.
- A finales del siglo XIX, lord Kelvin, científico eminente, decía que sentía de antemano compasión por los futuros físicos.
- La física, según él, había llegado a sus fines, y por tanto a su fin, y ya no tendrían nada interesante que estudiar.
- Hemos visto en la primera parte hasta qué punto se equivocaba.

La utopía del todo

- Algo más tarde, a finales de los años veinte, Max Born, eminente físico también, contaba a quien quisiera oírle que «**la física se terminaría en seis meses**».
- Sabemos lo que ha pasado.

La utopía del todo

- Y resulta que hoy se habla del fin inminente de la física teórica: estando la gran unificación de las interacciones (según parece) a punto de realizarse, a los teóricos no les quedaría más que declararse en paro técnico.
- Paralelamente, se habla de otro presunto fin, ¡ni más ni menos que el de la Historia!

La utopía del todo

- La trampa en que había caído Kelvin era al parecer de las de reactivación rápida, sobre todo a fin de siglo.
- La idea de desenlace es decididamente un virus del pensamiento, contra el que no existe vacuna conocida.
- Sin embargo, la lista de los problemas que siguen planteándoseles a los físicos es bastante larga, tan larga que cualquier acercamiento a una gran certidumbre no sería más que lo que **Edgar Morin** llama un «embarazo psicológico».

La utopía del todo

- Además, aunque todo pareciese indicar que la física ha llegado al final de su recorrido, no tendría medios para decirlo ella misma: pararse no quiere decir haber llegado, eso lo saben bien los alpinistas.
- Desconfiemos pues del culto al punto final y cuidémonos de no ser presuntuosos.

La utopía del todo

- Jamás estarán los físicos definitivamente a salvo de una nueva crisis, análoga a la que los sacudió a principios del siglo XX: un hecho inesperado, una nueva experiencia, una mayor precisión en las medidas podrían revelar fallos en lo que hoy consideran perfecto, y reactivar la marcha de la ciencia.
- Hilar fino no significa forzosamente el fin del hilo.

La utopía del todo

- Volvamos a la unidad.
- Los temas subyacentes en las teorías unitarias siguen siendo cercanos a los que animaban las discusiones de los filósofos griegos, a quienes la tensión entre lo **Uno y lo Múltiple** sirvió de guía: nuestros sentidos nos reflejan un mundo constituido por una infinita variedad de cosas y de fenómenos, pero para entenderlo debemos introducir en él algún tipo de orden, es decir, una apariencia de unidad.
- De ahí la creencia de que existe un principio fundamental, y al mismo tiempo la dificultad de extraer de él la infinita variedad de las cosas.

La utopía del todo

- Muchos pensadores se han inclinado hacia el **monismo**, es decir, la explicación de los fenómenos a partir de un solo principio.
- La propia ciencia ha intentado siempre avanzar uniendo entre sí fenómenos aparentemente no vinculados.

La utopía del todo

- Comprender el mundo, para un científico, es describirlo mediante un pequeño número de leyes, es reducir la diversidad de los fenómenos y las apariencias a las combinaciones múltiples de algunos elementos simples, es reducir las innumerables fuerzas que se manifiestan en el Universo al juego complejo de unas cuantas fuerzas básicas.

La utopía del todo

- En el siglo XVII, continuando los trabajos de Galileo, Newton propone explicar con una misma ley la caída de las manzanas del vergel del vecino y el movimiento lejano de los planetas.
- Reúne así en una explicación común dos mundos hasta entonces separados por tradiciones mitológicas, religiosas y filosóficas: el cielo y la Tierra.

La utopía del todo

- Este esfuerzo de síntesis es un esfuerzo metafísico, que responde a una necesidad del espíritu, sin duda irreprimible: la de unificar y enlazar.
- Quizá sea engañosa, ya que la esperanza no sirve como prueba.
- Podría ser que a pesar de nuestra vigilancia, ese esfuerzo nos hiciese pasar por alto, insospechadamente, otra tendencia del Universo: aquella, irreductible e insumisa, que lo volvería refractario a todo orden y a toda ley, que lo confundiría imprevisiblemente.

La utopía del todo

- Esa tendencia, que Platón llamaba «causalidad errante», es quizás tenida en cuenta por el Universo.
- Ese Uno que ansiamos encontrar, ¿no será tal vez una engañosa comodidad?

La utopía del todo

- Vemos que la cuestión de la unidad en física, más allá de las dificultades técnicas, acarrea muchas otras, de naturaleza más filosófica.
- La diversidad de los fenómenos, la riqueza de lo real, la infinita variedad de los detalles, toda esa exuberancia del mundo sensible, ¿no ocultará alguna simplicidad?
- ¿Podríamos acaso ajustarle, por vía del intelecto, algún fondo simplificador?

La utopía del todo

- ¿Sabremos fisionar el núcleo de las contingencias y las particularidades?
- ¿Está el mundo realmente hecho para desembocar en una bella teoría, única y bien hilada?
- ¿Cómo podríamos estar seguros, si tuviéramos una teoría así, de que no se deja nada olvidado en el camino?

La utopía del todo

- Los excesos del reduccionismo han mostrado que se puede muy bien mutilar la realidad al querer unificarla demasiado.
- La idea de un saber absoluto sólo tiene sentido si lo absoluto es del orden del saber, cosa que no está garantizada: ¿quién dice que esa unidad que encontraríamos no tendría apéndices, y que el espíritu humano no está condenado a aprehender parcialmente la realidad?
- Podría ser que una teoría unificada fuese algo así como el **Mesías**: destinada sobre todo a ser esperada.

La utopía del todo

- Hay pues que ponerles cierta sordina a los discursos grandilocuentes que se oyen aquí y allá sobre una inminente «teoría del Todo».

La utopía del todo

- En primer lugar, porque queda todavía mucho camino de descubrimientos por recorrer entre la física de los 100 GeV (la del LEP) y la de los primerísimos instantes del Universo (10^{19} GeV), cuando la gravitación y el electromagnetismo todavía pugnaban por abrirse paso.

La utopía del todo

- Dijesen lo que dijesen lord Kelvin y Max Born, hay en este desafío intelectual materia para excitar a generaciones enteras de investigadores, y numerosas revoluciones en perspectiva.

La utopía del todo

- Por otra parte, una **teoría del Todo** no nos permitiría tampoco codearnos con la omnisciencia.
- Una visión pretendidamente integral del mundo no sería *ipso facto* integrista, ya que no nos permitiría calcularlo todo: sus ecuaciones serían tan complejas que serían imposibles de resolver, salvo en casos idealmente simples.

La utopía del todo

- El diablo (que no hay que olvidar nunca) merodea seguramente en torno a los detalles.
- Y a propósito, ¿cómo se comprueban unas ecuaciones que no se saben resolver?

La utopía del todo

- Tras esa denominación de **teoría del Todo**, hay un abuso de lenguaje.
- Es ilegítimo concebir un objeto al que llamaríamos **Todo** y que no englobase el movimiento del pensamiento que lo concibe.
- Ese concepto es pues una paradoja, como ya sabemos, al menos desde Gödel.

La utopía del todo

- Una **teoría del Todo** digna de ese nombre debería poder hablarnos de la conciencia y de la vida, cosa que no hacen las teorías físicas más avanzadas.

La utopía del todo

- Y si algún día lo consiguieran, no por ello quedarían limpias del reproche iracundo que Nietzsche les hacía en *El Gay saber* a aquellos que pretendían explicar la existencia únicamente mediante las ideas físicas:

La utopía del todo

- *Hay ante todo que negarse a toda costa a privar a la existencia de su carácter protéico; el buen gusto lo exige, señores míos, ¡respeto a todo aquello que cae más allá de nuestro horizonte!*

La utopía del todo

- *Que sólo sea correcta una interpretación del mundo que les dé la razón a ustedes, una interpretación que autorice a investigar y a proseguir unos trabajos en el sentido que ustedes llaman científico, que sólo sea correcta una interpretación del mundo que permita únicamente contar, calcular, pesar, ver y tocar, no es sino torpeza e ingenuidad, por no decir demencia e idiotez.*

La utopía del todo

- *¿No es acaso más probable que lo primero, y quizá lo único, de la existencia que podemos alcanzar, sea lo más superficial, lo más exterior, lo más aparente?*

La utopía del todo

- *¿Solamente su epidermis?*
- *¿Sus manifestaciones concretas?*
- *Una interpretación «científica» del mundo, tal y como ustedes la entienden, señores míos, podría ser una de las más necias y estúpidas de todas cuantas son posibles.*

La utopía del todo

- Pero, unificar las cuatro interacciones fundamentales es una hermosa esperanza, un gran sueño, y hay que presentar esa esperanza con la consideración que se merece.
- Recientemente los teóricos han realizado inmensos progresos, aunque la gravitación siga siendo imposible de formular en un campo cuántico.

La utopía del todo

- Al igual que los paleontólogos, que a partir de un diente reconstituyen un esqueleto, están por el momento considerando las colosales energías de los primerísimos instantes del Universo, cuando tres de esas cuatro fuerzas eran una sola.

La utopía del todo

- Como cualquier poesía de los comienzos, sus especulaciones nos hacen sucumbir a una fascinación turbia: la de las brumas de la aurora, y el siempre recurrente problema de qué fue primero, el huevo o la gallina, vuelve a mofarse de nosotros.

La ciencia no es técnica

- Puede temerse que la voluntad de obtener siempre mejores resultados experimentales termine por apagar la dimensión reflexiva del oficio de físico.
- Ser científico no es sólo jugar con grandes instrumentos y aplaudir una línea de presupuestos.

La ciencia no es técnica

- Es también reflexionar, meditar los conceptos, crear otros nuevos, captar su alcance, considerar su sentido. No basta pues con haber convertido una ciencia en predictiva para agotar su contenido.
- En *Prédire n'est pas expliquer*, René Thom lo dice con palabras que arrancarán alguna mueca:

La ciencia no es técnica

- *Si reducimos la ciencia a un mero conjunto de recetas que funcionan, no estaremos en una situación intelectualmente superior a la de la rata que sabe que si aprieta una palanca, la comida caerá en su comedero.*
- *La teoría pragmatista de la ciencia nos reduce a la situación de la rata en su jaula.*

La ciencia no es técnica

- Demasiadas veces hemos descuidado pensar la ciencia con el pretexto de que «**ya es bastante difícil hacerla avanzar**».
- Las consecuencias de ese abandono son graves, tan pesadas como la ciencia del mismo nombre: el día en que haya perdido todo contacto con sus raíces especulativas y filosóficas, estará, si no completamente agotada, al menos definitivamente separada de la tradición que la ha hecho avanzar hasta el nivel actual; sólo el pensamiento tecnocrático invadirá como un gas todo el pensamiento sabio, y se acabará el auténtico espíritu científico.

La ciencia no es técnica

- Nuestras sociedades, colmadas ya de técnicas, emiten una señal inquietante: el público en general ya no discierne entre la ciencia, cuyo objetivo es el conocimiento, y las aplicaciones derivadas de ella.
- La ciencia ya no se identifica primero como una fuente de conocimientos, ni siquiera como una de las grandes etapas en que el intelecto agudiza su forma y su técnica.
- Se la confunde con el conjunto de sus consecuencias prácticas.

La ciencia no es técnica

- Paralelamente a la física pesada, hemos entonces de volver a una reflexión ambiciosa sobre los fundamentos de la física y el significado que tiene para nosotros.
- No basta con decir cómo esperamos descubrir el **bosón de Higgs**, sino saber por qué esa investigación tiene un significado para nosotros.

La ciencia no es técnica

- La amplitud de los proyectos experimentales no debe condenarnos a un activismo febril, poco fecundo en el plano intelectual.
- Por supuesto, eso es más fácil de escribir que de hacer, ya que «no se consigue avance, ni reputación, ni premio Nobel, estancándose», observaba **Simone Weil** en su libro *Sur la science*.
- Pero recordemos el terrible retrato del científico que esbozaba **José Ortega y Gasset** (ya en 1930) en *La rebelión de las masas*:

La ciencia no es técnica

- *Es un hombre que, de todo lo que hay que saber para ser un personaje discreto, conoce sólo una ciencia determinada, y aun de esa ciencia sólo conoce bien la pequeña porción en que él es activo investigador.*

La ciencia no es técnica

- *Llega a proclamar como una virtud el no enterarse de cuanto quede fuera del angosto paisaje que especialmente cultiva y llama “dilettantismo” a la curiosidad por el conjunto del saber.*

La ciencia no es técnica

- *El caso es que, recluido en la estrechez de su campo visual, consigue, en efecto, descubrir nuevos hechos y hacer avanzar su ciencia, que él apenas conoce, y con ella la enciclopedia del pensamiento, que concienzudamente desconoce.*

La ciencia no es técnica

- Esta caricatura es evidentemente falsa en general.
- Pero debemos cuidar de que no deje nunca de ser exagerada.
- Ya que la parcelación del saber, cada vez mayor, dificulta todavía más la integración de la ciencia en el seno de la sociedad.

La ciencia no es técnica

- Cuidémonos de que, atomizada, dando la espalda al humanismo, la ciencia se convierta en una acumulación de recetas para uso de especialistas monocromáticos, incapaces de proyectarse más allá de la competencia estrecha que les sirve de definición.

Los vínculos con el mundo

- Entre los pecados que quisiéramos hacerle confesar a la física de las altas energías, está el de haber acumulado una inmensa cantidad de datos, tan profusa y disparatadamente que sería casi imposible asimilarla e integrarla en una síntesis coherente.

Los vínculos con el mundo

- A este pecado mortal (a largo plazo), René Thom lo llama «el hegemonismo de la fenomenología».
- Siendo escasísimos los espíritus que serían capaces de entender algo en ese magma de resultados, el peligro estribaría en que la acumulación primase sobre la reflexión, amputándole a la ciencia una parte de su trascendencia.

Los vínculos con el mundo

- ¿Es correcta esa pavorosa perspectiva?
- No, ya que la crítica subyacente es refutada por la propia existencia del modelo estándar, que precisamente tiene el mérito de integrar todos los datos recogidos hasta la fecha.
- Ya que el trabajo científico ha dado –en este caso– sus frutos, la acusación de pecar por «acumulación destemplada» no viene mucho a cuento.

Los vínculos con el mundo

- Paralelamente a esa crítica, lamentamos muchas veces que la física moderna recurra a conceptos tan alejados de la experiencia corriente que llegamos a perder toda intuición sensible, e incluso todo contacto.

Los vínculos con el mundo

René Thom escribe en *Prédire n'est pas expliquer*:

- *En tiempos de Arquímedes, cada quien podía, en su bañera, comprobar la validez de su principio.*
- *Hoy día ya no estamos en el punto de poder proceder a esa comprobación mediante la experiencia inmediata, ni siquiera mediante una reflexión elaborada a partir de una experiencia de cierta riqueza.*

Los vínculos con el mundo

- *Todo va demasiado lejos, todo es demasiado refinado.*
- *Y pienso que esa elaboración conduce sin embargo a cierto alejamiento del mundo tal y como lo conocemos en los inmediatos.*
- *Es sin lugar a dudas preocupante.*

Los vínculos con el mundo

- Existe efectivamente una aparente extrañeza de la ciencia respecto al lenguaje ordinario y la experiencia vivencial de los hombres.
- Pero hay que aceptar esa situación, dando muestras de fatalismo, y quizá también manifestar nuestra admiración.
- ¿No es acaso esa complejidad el eco de los innumerables ¡eureka! proferidos por los físicos después de Arquímedes?

Los vínculos con el mundo

- ¿Por qué no ver en ello una conquista, más que una idea preconcebida?
- La extensión de la física hacia dimensiones muy distantes de nosotros en el espacio y en el tiempo merece ser considerada como una victoria del espíritu.

Los vínculos con el mundo

- Mejor aún: va en el mismo sentido que el movimiento científico que rechaza cada vez más allá las fronteras del mundo que somos capaces de describir.
- No hay nada grave en eso, más bien al contrario.
- Salvo, evidentemente, para los divulgadores...

Los vínculos con el mundo

- Es pues exagerado decir que la física del siglo XX ha roto sus vínculos con el mundo: simplemente los ha tensado para que vibren.
- Pero, ciertamente hay que saber escuchar sus cantos y discernir sus murmullos.

Los vínculos con el mundo

- Hemos de reconocer que los físicos han dado muestras de pereza y negligencia: dedicados casi exclusivamente al aspecto operativo de su disciplina, delectándose con la informática y olvidando interrogarse sobre el problema de los orígenes de la física y de las consecuencias que acarrea, han pasado por alto el darla a conocer al conjunto de la sociedad.

Los vínculos con el mundo

- La física merece algo mejor que ese juicio extasiado que emitimos sobre sus consecuencias tecnológicas.
- ¿Acaso no es también portadora, como la ciencia en general, de una ética del conocimiento, insuficientemente señalada?
- De entre todas las esferas del saber o del poder, son pocas las que como ella confiesan periódicamente: «Estaba equivocada».

Los vínculos con el mundo

- Para colmo, la física ha dado a veces la impresión de ser un asunto muy poco intelectual, lo cual ha reforzado mucho las tesis de quienes, confundiendo ciencia y tecnología, se niegan a reconocerle al saber científico un lugar preeminente en la cultura.

Los vínculos con el mundo

- Los físicos no le han explicado al público en su momento el contenido, la riqueza y la belleza intrínseca de la ciencia, ni sus implicaciones filosóficas.
- Sólo los resultados más recientes son interesantes: la mecánica cuántica, que tiene edad para ser abuela, sigue pendiente de su noviazgo con la cultura general.

Los vínculos con el mundo

- Se ha vuelto urgente demostrar que en su conjunto la física es un verdadero germen de cultura, que hemos de describir y explicar más.
- Desde luego, esa tarea no es nada sencilla, y se le pueden encontrar excusas al retraso de los físicos en ese campo.

Los vínculos con el mundo

- La primera es que la física moderna no es transcribible e *in extenso* en el lenguaje corriente, ya que los conceptos familiares ya no son válidos.
- Hay que tener una gran capacidad de inventiva para conseguir explicar sus teorías de forma comprensible para todos.

Los vínculos con el mundo

- Es de lamentar que esa cualidad no haya sido suficientemente apreciada en el seno de la comunidad científica.
- A veces ha sido incluso denigrada en nombre de una reacción tipo «**torre de marfil**», según la cual la admiración debería empezar donde termina la comprensión.

Los vínculos con el mundo

- La segunda dificultad estriba en los reproches que se han venido haciendo a los científicos que hablan de la ciencia al público en general; por ejemplo, divulgar un saber que ellos mismos no han elaborado, y del que sólo son los expertos o los depositarios.
- Quienes hablan de la ciencia, es un hecho, no son forzosamente los mismos que la hacen avanzar.
- ¿Pero no es esa apropiación del saber característica del conjunto de los científicos?

Los vínculos con el mundo

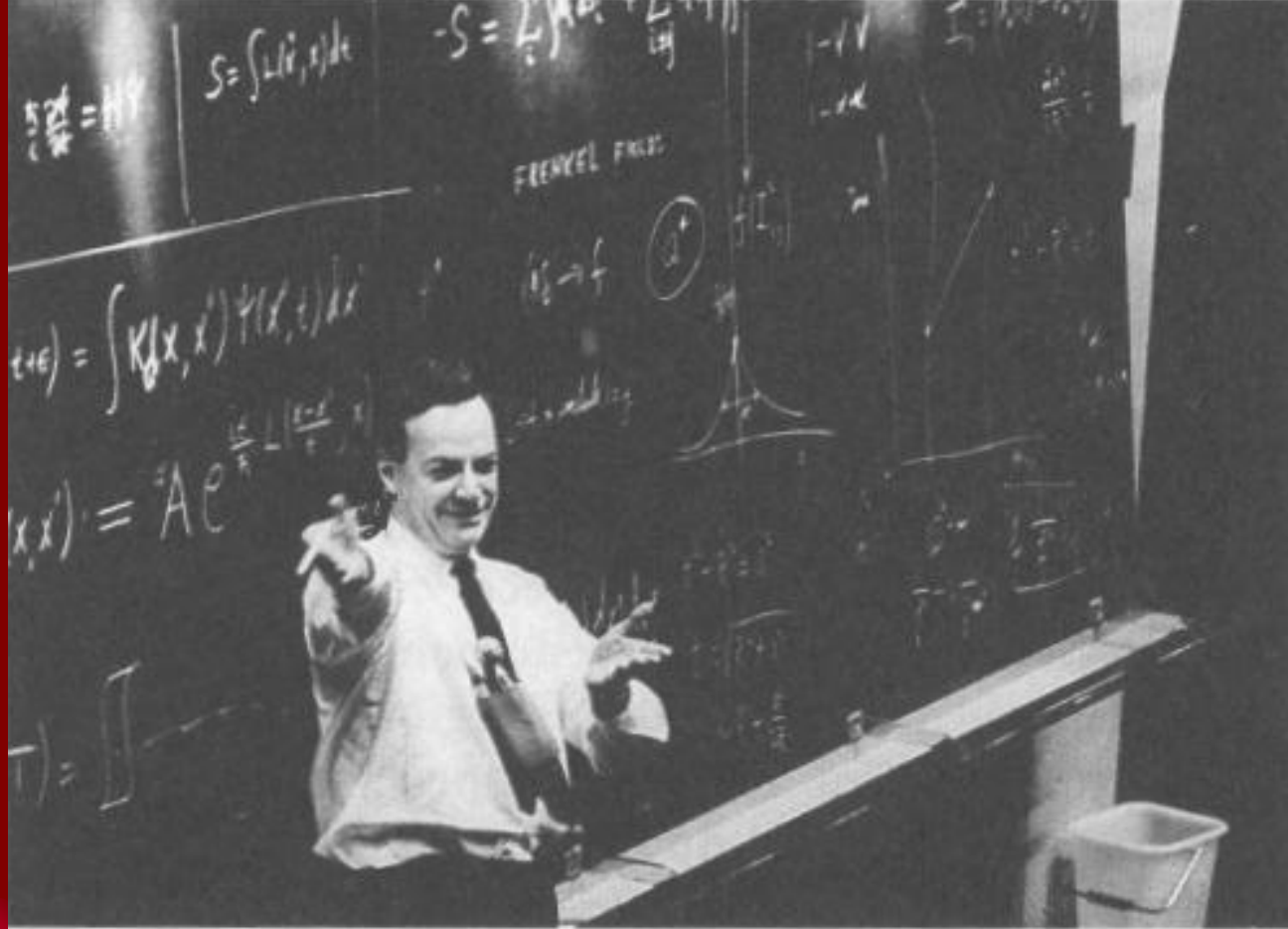
- La ecuación de Dirac, que ya hemos mencionado, ¿no pertenece acaso (al igual que la totalidad de la ciencia) a todos aquellos que han hecho por sí mismos el esfuerzo de comprenderla?
- Es cierto que por unos injustos mecanismos de transferencia, quienes exponen la ciencia terminan por encarnar aquello de lo que hablan a los ojos del público.
- Ese fenómeno de personalización, al parecer inevitable, crea una ambigüedad muy real, pero inherente a la comunicación.

Los vínculos con el mundo

- Será pues difícil suprimirla.
- Lo que hoy se hace evidente es que la sociedad necesita conocer mejor la ciencia, sus métodos y su contenido.
- La cuestión que se le plantea ahora a la comunidad científica es saber si acepta o no hablar de sí misma de cara al exterior.

Los vínculos con el mundo

- ¿Está dispuesta a que algunos de sus miembros se conviertan en mensajeros fuera de su territorio?
- Otra cosa (pero que quizá sea la misma) que se les achaca a los científicos que entran en contacto con el público es la de evitar así, por elusión, el juicio de sus pares, y gozar de criterios de apreciación menos rigurosos, o de naturaleza muy distinta.
- Este reproche, por supuesto, es fundado, pero quizá no sea tan grave.



- **Abstracción y comunicación:** La física de las partículas es de lo más abstracto, lo cual no es óbice para que algunos físicos lleguen a hablar de ella con las manos. Aquí, el inolvidable Richard Feynman, pedagogo sin par, padre de la electrodinámica cuántica y gracias a ello premio Nobel, imparte una conferencia en el gran anfiteatro del CERN en 1965.

Los vínculos con el mundo

- *Last but not least:* hasta hace muy poco, los medios de comunicación no se habían mostrado muy cooperantes.
- Es cierto que están sometidos a unas exigencias, unos modos de funcionamiento y unos métodos que no son los mismos que los de la ciencia.
- Pero algún día habrá que organizar entre la ciencia y la sociedad un gran encuentro, o muchos pequeños.

Los vínculos con el mundo

- Una crisis afecta al proyecto científico moderno en sus fundamentos, como si nuestras sociedades fuesen víctimas del mismo desencanto que Fausto.
- En el preciso momento en que triunfa, la ciencia se ve enfrentada al problema de su significado.
- Esta interrogación se transforma muchas veces en una crítica a la ciencia.

Los vínculos con el mundo

- Evidentemente, ese fenómeno no es ninguna candente novedad: más de tres siglos antes de Jesucristo, en China, un libro taoísta proclamaba ya:
- «Es el amor a la ciencia el que ha esparcido el desorden en el mundo.»
- El hombre no cambia ni se inventa otros miedos distintos.
- Pero eso no es una razón para tolerar que el sentido del proyecto científico siga siendo considerado por la conciencia colectiva como algo que le es exterior.

Los vínculos con el mundo

- Aunque la ignorancia juegue a veces un papel determinante en las reacciones anticientíficas, éstas no siempre son ingenuas.
- Si el hombre no acepta ya la ciencia, es quizá porque no forma parte de la cultura.
- La ciencia se halla simplemente ante un problema de integración.

Para concluir

- Después de un siglo de progresos sin precedente de la física, nuestros contemporáneos siguen ignorando sus más bellos resultados, a la par que aumenta el número de quienes consultan a astrólogos y videntes, dejando en sus oficinas unas sumas que bastarían para financiar –por ejemplo– el LHC.

Para concluir

- Esto es algo parecido a un fracaso para los físicos, pero afortunadamente puede ser superado, cosa que debería estimularles.
- Para que la física se convierta en objeto – o más bien sujeto– de cultura, tiene que mostrarse, exhibirse, explicarse, y sobre todo demostrar su capacidad de alimentar el intelecto tanto como la imaginación.

Para concluir

- No es necesario para ello que se revista de esoterismo o apele a lo paranormal, ya que, en su expresión ortodoxa, ya está dando lugar a los mayores asombros. la palabra griega *theoreîn*, origen de «teoría», significa precisamente contemplar, meditar y, también, viajar.

Para concluir

- De hecho, la física nos transporta, como turistas desorientados y azorados, a unos mundos extraños donde nuestros sentidos y nuestras intuiciones, arrebatados por el vértigo, pierden sus referencias.
- Por poco que se amenice este viaje con un poco de escenificación, se vuelve una aventura intensa, fascinante y llena de sorpresas.
- Y además, a falta de transmitir un saber, se puede al menos transmitir una pasión.

Para concluir

- El futuro pertenecerá a los pedagogos sagaces y entusiastas que sepan convertir la ciencia en un juego de sociedad.
- ¿Para cuándo las quinielas sobre la masa del **bosón de Higgs**?

Para concluir

- ***Las verdaderas partículas de materia son los fermiones fundamentales:***
- *Las que son insensibles a la interacción fuerte son los leptones.*
- *Conocemos seis de ellos, tres cargados y tres neutros (los neutrinos).*
- *Las que son sensibles a la interacción fuerte son los quarks, también en número de seis.*

Para concluir

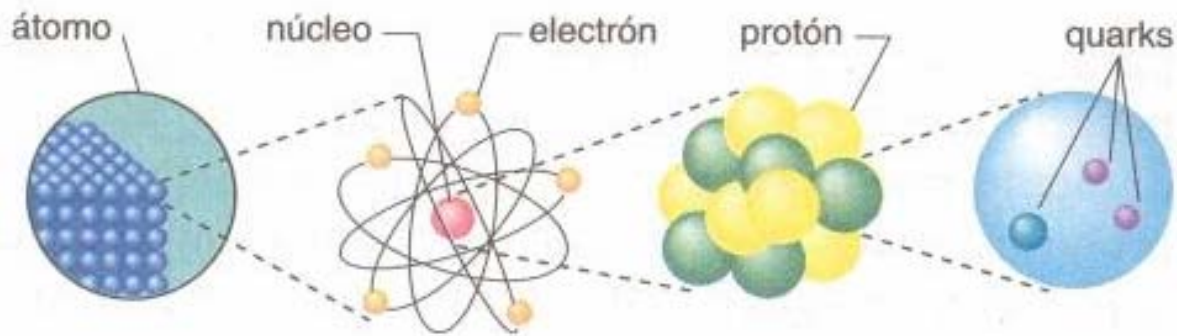
- *Mediante argumentos de simetría, el modelo estándar reagrupa estos **doce fermiones en tres familias**, que contienen cada una dos leptones, uno cargado y otro neutro, y dos quarks.*

Para concluir

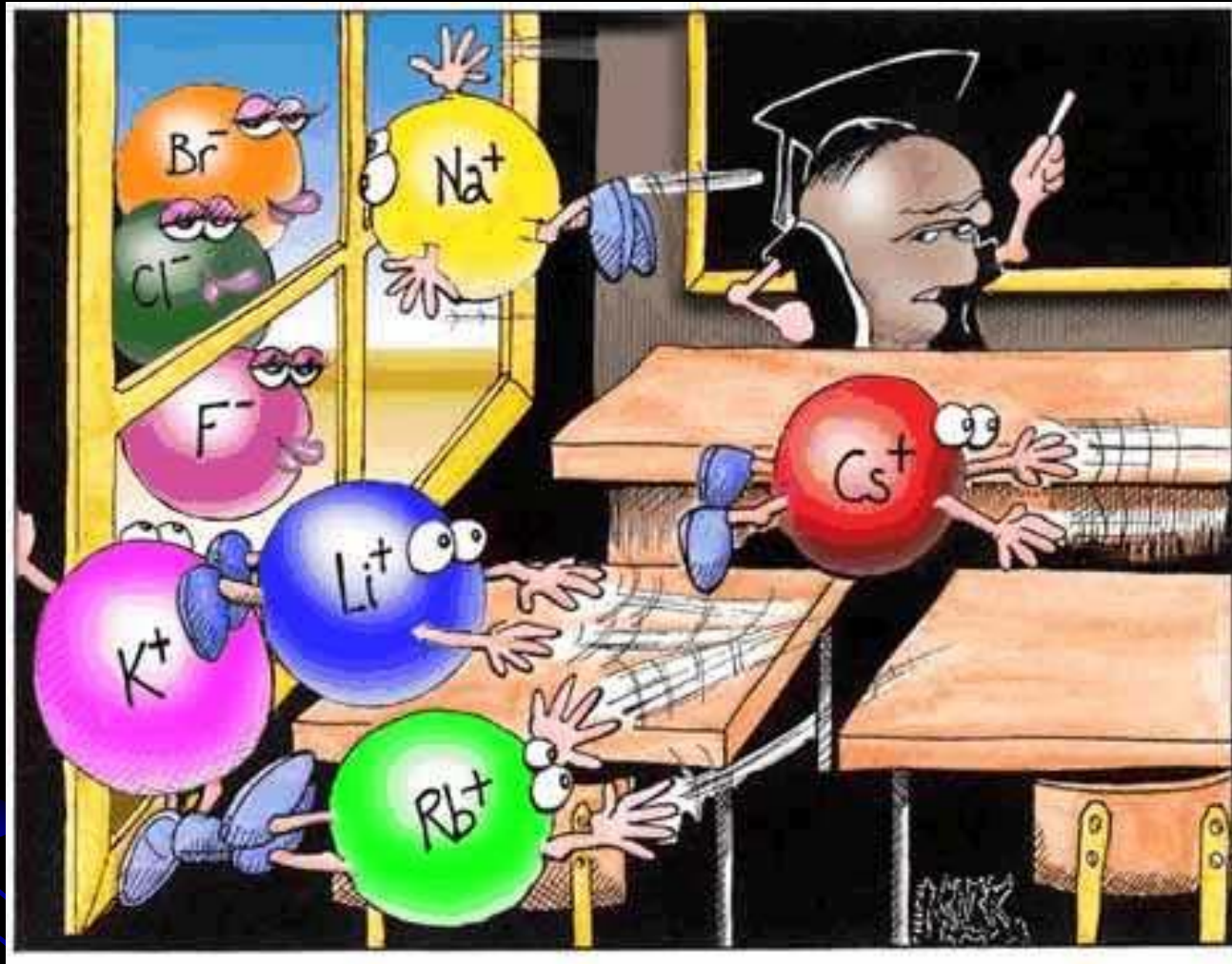
- *A cada uno de ellos hay que añadirle su antipartícula, de carga opuesta.*
- *Los bosones fundamentales son las partículas que mediatizan las cuatro interacciones conocidas hoy.*

Para concluir

- *No tienen el mismo comportamiento que las partículas de materia.*
- *Finalmente, el hipotético **bosón de Higgs**, fracturador enigmático de la **simetría electrodébil**, ronda los sueños de los físicos.*



		leptones pueden desplazarse libremente		quarks prisioneros de partículas más grandes (hadrones), no se observan individualmente	
fermiones	1ª familia	electrón bien conocido por el lector; su carga es -1	neutrino de electrón sin carga eléctrica y discreto por naturaleza	quark d su carga eléctrica es $-\frac{1}{3}$; el protón contiene uno y el neutrón dos	quark u su carga eléctrica es $+\frac{2}{3}$; el protón contiene dos y el neutrón uno
	2ª familia	muón como el electrón, pero 200 veces más pesado	neutrino del muón	quark s 20 veces más pesado que el quark d	quark c 375 veces más pesado que el quark u
	3ª familia	tau como el electrón, pero 3.500 veces más pesado	neutrino del tau	quark b todavía más pesado	quark t todavía no se ha observado, pero no debería tardar
bosones fundamentales que permiten la transmisión de las fuerzas		fotón (fuerza electromagnética) 		8 gluones (interacción fuerte) 	
				bosones intermedarios W⁺, W⁻, Z⁰ (interacción débil) 	
bosón de Higgs				responsable de la "ruptura de simetría electrodébil" ¡SE BUSCA!	



- “Tal vez alguno de ustedes, caballeros, pueda decirme que es lo que hay en la parte exterior de la ventana que lo hace tan atractivo”