

Un bestiario de hadrones exóticos

JFGH

Resumen

Traducción libre del artículo de CERN Courier homónimo.

1. Introducción

Patrick Koppenburg y Marco Pappagallo examinan y resumen los 23 hadrones exóticos descubiertos hasta ahora en el LHC[1].

Hasta ahora se han descubierto setenta y seis (76) nuevas partículas en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, Large Hadron Collider en inglés): el bosón de Higgs, 52 hadrones convencionales y un bestiario de 23 hadrones exóticos cuya estructura no se puede explicar de forma fiable, no es aún segura, ni predecir su existencia con modelos teóricos sencillos.

Los estados exóticos son variados y complejos, y muestran patrones poco discernibles a primera vista. Representan una fascinante historia de detectives: una búsqueda experimental para comprender la descendencia exótica de la interacción fuerte, que motiva escuelas de pensamiento rivales entre los teóricos.

Este aumento de nuevos hadrones ha sido uno de los resultados menos esperados del LHC (consulte la figura “Inesperado”). Con un aumento de diez veces en los datos del LHC de Alta Luminosidad (HL-LHC) en el horizonte, y es probable que también surjan nuevos estados en el experimento Belle II en Japón, el experimento BESIII en China, y tal vez en una factoría o acelerador supercharm-tau en el mismo país. En este caso, su historia está en su infancia, con giros y vueltas aún por venir.



Figura 1: Los 23 hadrones exóticos hallados hasta la fecha en el LHC (Large Hadron Collider). Veintitrés estados exóticos de quarks, con la composición teórica más probable que puede explicarlos. Hasta ahora se han descubierto en el LHC cinco pentaquarks y 18 tetraquarks. Cada uno contiene al menos un quark charm y una mezcla de quarks arriba (up, u), abajo (down, d) y extraños (strange, s). Las masas de quarks y hadrones se indican aquí por área, y los quarks y antiquarks se representan en blanco y negro, respectivamente. Créditos: CERN.

2. Bloques constituyentes de la materia

Así como las cargas eléctricas se organizan en los átomos neutros, las cargas de color que llevan a la interacción fuerte se organizan en estados compuestos incoloros. Por lo tanto, los quarks (q) y los gluones (g), como partículas fundamentales con carga de color, no pueden existir de forma independiente, sino sólo en estados compuestos de color neutro, llamados **hadrones**. Desde el descubrimiento del pión en 1947, una rica fenomenología de mesones (estados quark-quark, ó quark-antiquark más exactamente) y bariones (estados de tres quarks, pero más exóticos que los que conocemos del núcleo, protones y neutrones), inspiró el modelo de quarks y, finalmente, la teoría de la cromodinámica cuántica (QCD, Quantum Chromodynamics), que sirve como una descripción impecable de la interacción fuerte hasta el día de hoy.

Pero, ¿por qué la naturaleza no debería contener también combinaciones exóticas de colores neutros como tetraquarks ($qqqq$), pentaquarks ($qqqqq$), hexaquarks/sexaquarks ($qqqqqq$ o $qqqqqq$), hadrones híbridos (qqg o $qqgg$) y glueballs/glubolas/bolas de pegamento (gg ó ggg ó $gggg$ ó $ggggg$ ó...)?

La existencia de hadrones exóticos se debatió sin consenso durante décadas, y el interés creció a principios de la década de 2000, cuando se observaron nuevos estados con características inesperadas. En 2003, el experimento BaBar en SLAC descubrió el mesón $D_s^{*0}(2317)^+$, con una masa cercana a la suma de las masas de un mesón D y un kaón. Unos meses más tarde ese año, Belle descubrió el mesón $\chi_{c1}(3872)$, entonces llamado $X(3872)$ (ver panel “¿Qué hay en un nombre?”), con una masa cercana a la suma de las masas de un mesón D^0 y un mesón D^{*0} . Además de su sorprendente cercanía a los umbrales mesón-mesón, el “ancho” (o anchura de resonancia) de sus señales era mucho más estrecho de lo esperado. (Medidos en unidades de energía, dichas anchuras son recíprocos a la vida media de las partículas).

Poco después, en 2007, se observaron otros estados similares al charmonium y al bottomonium. La observación de Belle en 2007 del estado similar al charmonium cargado eléctricamente $Z(4430)^+$ (ahora llamado $T_{cc1}(4430)^+$) fue un pionero en la teorización de la existencia de exóticos QCD. Aunque estos estados exhibían los signos reveladores de ser excitaciones de un sistema encanto-antiencanto ($c\bar{c}$) (ver “Las nuevas partículas”), su carga eléctrica

neta indicaba un sistema que no podía estar compuesto únicamente por un par quark-antiquark, como lo hacen las partículas. Las antipartículas tienen cargas eléctricas opuestas. Debían estar presentes dos quarks adicionales.

3. Estados exóticos en el LHC

La puesta en marcha del LHC abrió el camino, con 23 nuevos hadrones exóticos observados hasta ahora (ver tabla “Los 23 hadrones exóticos descubiertos en el LHC”). La cosecha de nuevos estados comenzó en otoño de 2013 con el experimento CMS (Compact Muon Solenoid) en el LHC que informó la observación del estado $\chi_{c1}(4140)$ en el espectro de masas de la partícula llamada $J/\Psi\varphi$, en desintegraciones de tipo $B^+ \rightarrow J/\Psi\varphi K^+$, confirmando una pista del experimento CDF en Fermilab. Es probable que su contenido mínimo de quarks sea $ccss$, es decir, un tetraquark. CMS también informó evidencia de un estado con una masa mayor, observado por el experimento LHCb en el LHC en 2016 como $\chi_{c1}(4274)$, junto con dos estados más con energías (masas) de 4500 y 4700 MeV (megaelectrónvoltios).

3.1. ¿Qué hay en un nombre?

Como reflejo de su misterio, los primeros estados exóticos se denominaron X, Y y Z. Más tarde, la proliferación de estados exóticos requirió una ampliación del esquema de denominación de partículas. Los tetraquarks y pentaquarks manifiestamente exóticos ahora se denominan T y P , respectivamente, con un subíndice que enumera el contenido de los quarks inferior (b), charm (c) y extraño (s). Los estados exóticos similares al quarkonium siguen el esquema de nomenclatura de los mesones convencionales, donde el nombre está relacionado con el contenido del quark y la combinación de paridad de espín. Por ejemplo, Ψ denota un estado con al menos un par de quarks cc y $J^{PC} = 1^{--}$ (notación que indica momento angular, paridad y carga del estado cuántico de la partícula subatómica), y χ_{c1} denota un estado con al menos un par de quarks cc y $J^{PC} = 1^{++}$. Los números entre paréntesis se refieren a masas medidas aproximadas en MeV. Los hadrones exóticos se clasifican en mesones o bariones dependiendo de si tienen número bariónico cero o no.

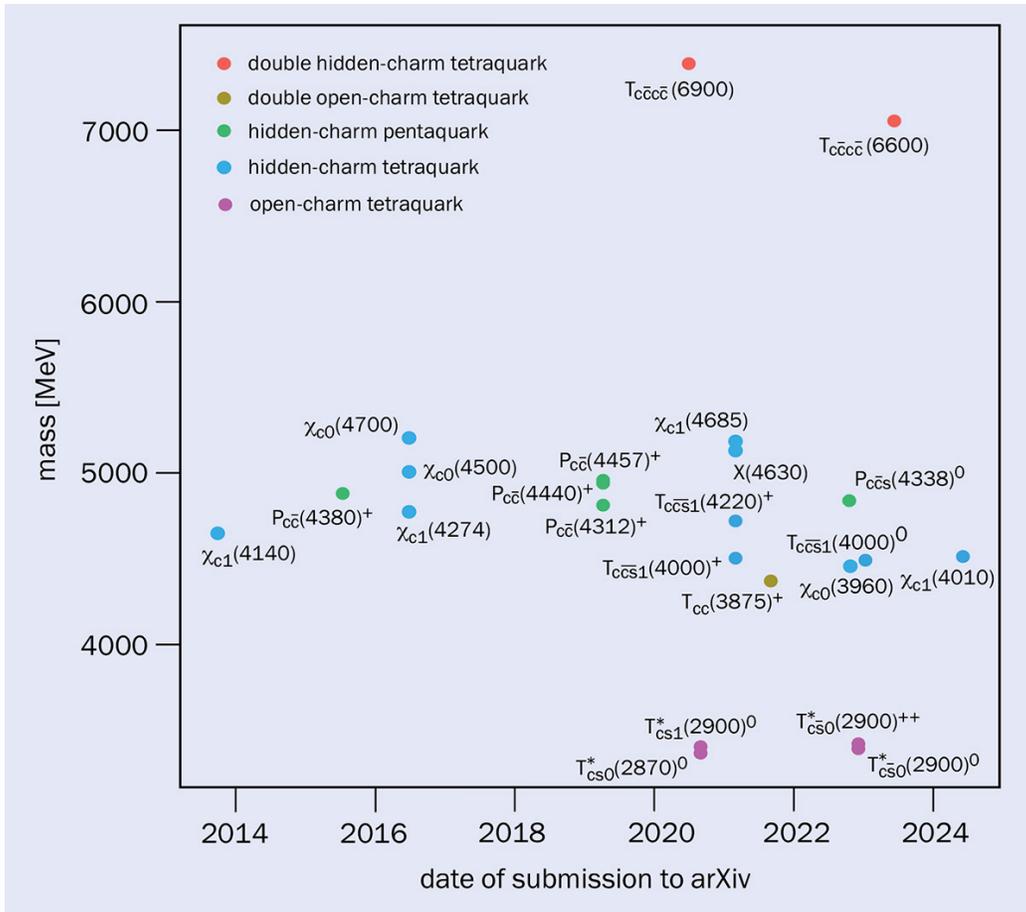


Figura 2: Los hadrones inesperados. Veintitrés hadrones exóticos inesperados han sido descubiertos en el LHC. Crédito de la figura: P. Koppenberg.

3.2. Análisis de datos

En un análisis de 2021 del mismo modo de desintegración $B^+ \rightarrow J/\Psi\varphi K^+$, incluidos los datos del LHC Run 2, el LHCb informó dos estados neutros más, $\chi_{c1}(4685)$ y $X(4630)$, que no corresponden a los estados cc esperados del modelo de quarks. El análisis también informó dos resonancias más observadas en el espectro de masas $J/\Psi K^+$, $T_{ccs1}(4000)^+$ y $T_{ccs1}(4220)^+$. Estos estados tipo charmonia, cargados de carga y extrañeza, son manifiestamente exóticos, con un contenido mínimo de quarks $ccus$.

Para $T_{ccs1}(4000)^+$, LHCb tenía datos suficientes para producir un diagrama de Argand con la firma distintiva de una resonancia (consulte la figura, “Resonancias redondas”). Un posible compañero de isospin, $T_{ccs1}(4000)^0$, se encontró más tarde en las desintegraciones de $B^0 \rightarrow J/\Psi\varphi K_s^0$, lo que aporta más evidencia de que se trata de una resonancia y no de una característica cinemática. (De acuerdo con una simetría aproximada de QCD, la interacción fuerte debería tratar un estado $ccus$ casi exactamente como un estado $ccds$, ya que los quarks arriba y abajo tienen las mismas cargas de color y masas similares). Otros tetraquarks similares a charmonium fueron vistos más tarde por LHCb en las desintegraciones $\chi_{c0}(3960) \rightarrow D_s^+ D_s^-$ y $\chi_{c1}(4010) \rightarrow D^{*+} D^-$.

4. Habemus pentaquarks!

Los primeros pentaquarks del mundo fueron descubiertos por el LHCb en 2015. Dos pentaquarks aparecieron en el espectro $J/\Psi p$ al estudiar las desintegraciones $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\Psi p K^-$: $P_{cc}(4380)^+$, una resonancia bastante amplia con un ancho de $200 MeV$, y $P_{cc}(4450)^+$, que es más estrecho a $40 MeV$. El modo de desintegración observado implicaba un contenido mínimo de quarks, excluyendo cualquier interpretación convencional.

Estos estados estaban escondidos a plena vista: fueron descubiertos de forma independiente por varios físicos del LHCb, incluido un estudiante de verano del CERN. En un análisis de 2019 que utilizó más datos, el estado más pesado se identificó como la suma de dos pentaquarks superpuestos ahora llamados $P_{cc}(4440)^+$ y $P_{cc}(4457)^+$. También se observó otro estado estrecho con una masa de $4312 MeV$. El LHCb observó el primer pentaquark extraño

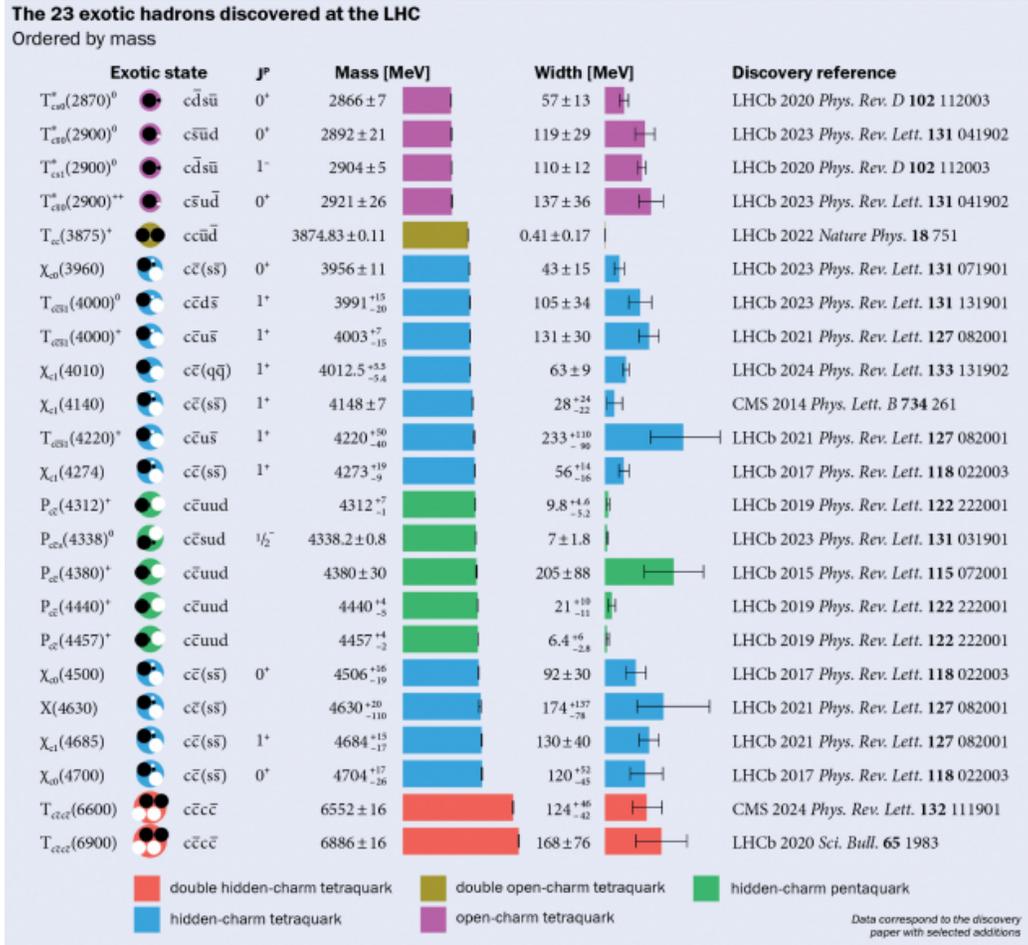


Figura 3: Tabla de los 23 hadrones exóticos conocidos, circa 2024, ordenados por masa (energía) creciente de su energía y anchura. Su composición más probable (estimada, hay inseguridad en algunos de estos estados), se indica tras su representación pictográfica. Se indica también la referencia principal donde se publica su descubrimiento.

en desintegraciones $B^- \rightarrow J/\Psi \Lambda p$ en 2022, con un contenido de quarks $ccuds$.

Siguieron otros hadrones manifiestamente exóticos, con dos hadrones exóticos $T_{ccc}(6000)$ $T_{ccc}(6900)$ observados por LHCb, CMS y ATLAS en el espectro J/Ψ J/Ψ . Pueden interpretarse como un tetraquark formado por dos quarks encantados y dos anti-encantados: un tetraquark completamente encantado. Cuando ambos mesones J/Ψ decaen en un par de muones, el estado final consta de cuatro muones, lo que permite a los experimentos LHCb, ATLAS y CMS estudiar el espectro final en múltiples regiones de aceptación y rangos de momento transversal. Estos estados no contienen ningún quark ligero, lo que facilita su estudio teórico y también implica un estado con cuatro quarks inferiores que podría ser de larga duración.

4.1. Doblemente encantados

El LHCb descubrió en 2021 el primer mesón de doble encanto abierto del mundo: el $T_{cc}(3875)^*$. Con un encanto de dos, no se puede acomodar en el esquema qq convencional. Existe una similitud intrigante entre el mesón exótico $T_{cc}(3875)^+(ccud)$ y el mesón tipo charmonium (tipo cc) $\chi_{c1}(3872)$ descubierto por Belle en 2003, cuya naturaleza aún es controvertida. Ambos tienen masas similares y anchos notablemente estrechos. El jurado aún no ha decidido su interpretación (ver “Dentro de los pentaquarks y tetraquarks”, [3]).

El descubrimiento de un mesón $T_{cc}(3875)^+(ccud)$ implica también la existencia de un estado T_{bb} , con un contenido de quarks $bbud$, que debería ser estable salvo en lo que respecta a desintegraciones débiles. La observación del primer estado exótico longevo, con una distancia de vuelo considerable, es un objetivo intrigante para experimentos futuros. En el HL-LHC(High Luminosity-Large Hadron Collider), la búsqueda de mesones B^+c desplazados del punto de interacción podría arrojar la primera evidencia de un tetraquark T_{bb} , dado que las desintegraciones de hadrones de doble belleza en descomposición débil, como las partículas Ξ_{bbq} y T_{bb} , son sus únicas fuentes conocidas.

También hay otros estados exóticos predichos por QCD que todavía faltan en el zoológico de partículas, como los híbridos mesón-gluón y las bolas de pegamento. Los mesones híbridos podrían identificarse mediante números

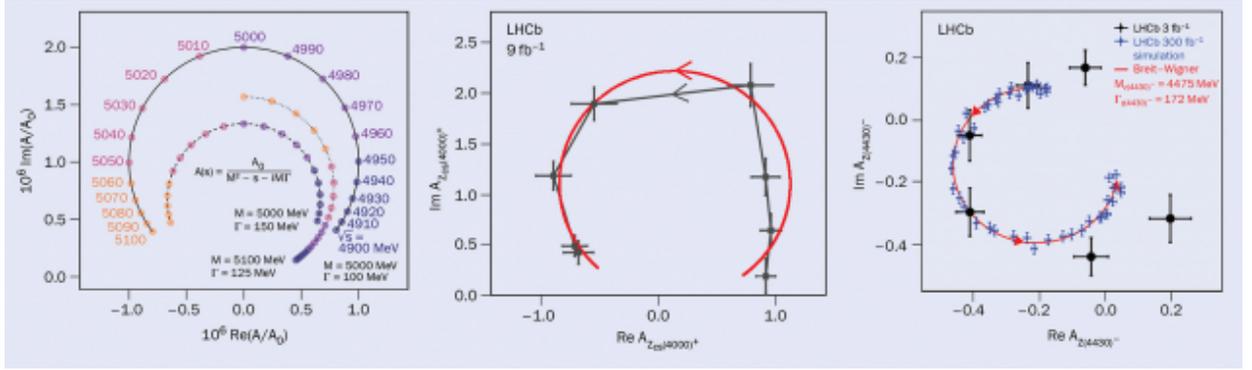


Figura 4: Round resonances (Resonancias redondas). Credits: M Rayner/LHCb Collab. 2021 Phys. Rev. Lett. 127 082001/arXiv:1812.07638. Es más probable que se creen partículas en colisiones cuando la energía del centro de masa coincide con su masa. Cuanto más larga sea la vida media de la nueva partícula, mayor será la incertidumbre sobre su tiempo de desintegración y, según el principio de incertidumbre de Heisenberg, menor será la incertidumbre sobre su energía. Estas partículas tienen picos estrechos en sus espectros de energía. Las partículas de rápida descomposición tienen picos amplios. La búsqueda de tales “resonancias” puede revelar nuevas partículas, pero los baches pueden ser engañosos. Un análisis más revelador ajusta las tasas de desintegración diferenciales para medir la amplitud cuántica compleja $A(s)$ que describe la producción de la partícula. A medida que aumenta la energía $\sqrt{s} = E$, la amplitud traza un círculo en sentido antihorario en el plano complejo, y la magnitud de la amplitud traza el pico resonante clásico observado en los espectros de energía (consulte la figura arriba a la izquierda). Demostrar este comportamiento, como lo hizo el LHCb en 2021 para el mesón $T_{ccs1}(4000)^+$ (arriba, centro) es un logro experimental significativo, que la colaboración también realizó en 2018 para el mesón $Z(4430)^+(T_{cc1}(4430)^+)$, descubierto por Belle en 2007 (puntos negros, arriba a la derecha). La medición del LHCb confirmó su carácter resonante y resolvió cualquier controversia sobre si se trataba de un verdadero estado exótico. La medición azul simulada ilustra la mejora que dichas mediciones pueden obtener con detectores mejorados y mayores estadísticas en el HL-LHC.

cuánticos exóticos de paridad de espín (J^P , en ocasiones J^{PC}) no permitidos en el esquema qq. Se podrían observar bolas de pegamento en colisiones de iones pesados enriquecidos con gluones. La colaboración BESIII, que es otro actor importante en la espectroscopía exótica, ha observado recientemente un candidato potencial.

Incluso se podrían haber observado hadrones exóticos en el sector de los quarks ligeros sin haber sido buscados. Los mesones escalares son demasiado numerosos para caber en el modelo de quarks convencional, y algunos de ellos, por ejemplo los mesones $f_0(980)$ y $a_0(980)$, podrían ser tetraquarks. También pueden existir pentaquarks ligeros exóticos. Hace veinte años, el barión θ^+ causó bastante revuelo, siendo aparentemente abiertamente exótico, con una extrañeza positiva y un contenido mínimo de quarks *uudds*. No menos de 10 experimentos diferentes presentaron evidencia de ello, incluidos varios que citan la importancia de 5σ , antes de que desapareciera en análisis ciegos de muestras de datos más grandes con una mejor sustracción de fondo (CERN Courier abril de 2004, p.29.[2]). Su historia es ahora material para los historiadores de la ciencia, pero su interpretación dio lugar a muchos artículos teóricos que todavía son útiles en la actualidad.

El desafío de comprender cómo se unen los quarks dentro de hadrones exóticos es la cuestión más pendiente en la espectroscopía de hadrones. Los modelos incluyen una nube de quarks y gluones ligeros unidos a un núcleo qq pesado mediante fuerzas tipo van-der-Waals (hadro-quarkonium); hadrones singletes de color unidos por fuerzas nucleares residuales (moléculas hadrónicas); y tetraquarks compactos $[qq][qq]$ y pentaquarks $[qq][qq]q$ compuestos de diquarks $[qq]$ y antidiquarks $\bar{q}\bar{q}$, que se hacen pasar por antiquarks y quarks, respectivamente.

Es posible que algunos hadrones exóticos también hayan sido malinterpretados como estados resonantes cuando en realidad son “cúspides umbrales”: mejoras causadas por la redispersión. Por ejemplo, el pentaquark $P_{cc}(4457)^+$ visto en las desintegraciones $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\Psi p K^-$ podría de hecho estar redispersándose entre los productos de desintegración D^0 y $\Lambda_c(2595)^+$ en $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c(2595)^+ D^0 K^-$ para intercambiar un quark encanto, y formando un sistema $J/\Psi p$. Esta hipótesis se puede probar buscando modos de desintegración adicionales y compañeros de isospín, o mediante análisis de amplitud detallados, un proceso que ya se ha completado para muchos de los estados

antes mencionados, pero aún no para todos.

Establecer la naturaleza de los hadrones exóticos será un desafío y todavía falta una organización integral de los hadrones exóticos en múltiplos de sabor. Establecer si los hadrones exóticos obedecen a las mismas simetrías de sabor que los hadrones convencionales será un paso importante hacia la comprensión de su composición.

5. Predicciones efectivas y desafíos futuros

La dinámica de los quarks y gluones se puede describir de forma perturbativa en procesos duros gracias a la pequeñez de la constante de acoplamiento fuerte en distancias cortas, pero el espectro de hadrones estables se ve afectado por efectos no perturbativos y no se puede calcular a partir de la teoría fundamental. Aunque la red QCD intenta esto discretizando el espacio-tiempo en una red cúbica (es la llamada Lattice QCD), los resultados requieren mucho tiempo y su precisión está limitada por el poder computacional. Las predicciones se basan en métodos analíticos aproximados, como las teorías de campo efectivas.

El desafío de comprender cómo se unen los quarks dentro de hadrones exóticos es la cuestión más pendiente en la espectroscopía de hadrones. Por lo tanto, la física de hadrones se basa en datos empíricos, y la espectroscopía de hadrones desempeña un papel fundamental en la prueba de las predicciones de la QCD reticular, que es en sí misma una herramienta cada vez más importante en la física electrodébil de precisión y en la búsqueda de física más allá del modelo estándar.

Al igual que Mendeliev y Gell-Mann, estamos al comienzo de un nuevo campo, en la etapa de taxonomía, descubriendo, estudiando y clasificando hadrones exóticos. El desafío más profundo es explicarlos y anticiparlos. Aunque los principios subyacentes se conocen plenamente, todavía estamos lejos de poder desarrollar la química de la cromodinámica cuántica.

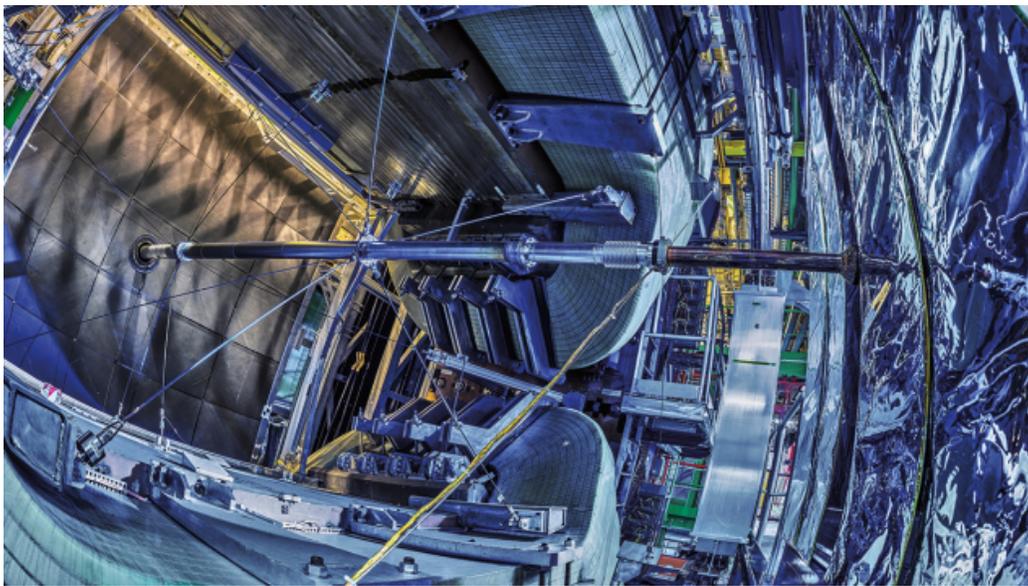


Figura 5: Enhebrando la aguja: El experimento LHCb en el CERN provocó un renacimiento en la física del encanto con dos mediciones intrigantes que desafían a los teóricos a mejorar la precisión de sus predicciones. Crédito: M Brice y J Ordan/CERN-PHOTO-201812-329-18.

Referencias

- [1] Patrick Koppenburg (Nikhef) and Marco Pappagallo (INFN Bari and the University of Bari), *A bestiary of exotic hadrons*, Cern Courier, 20 November 2024. URL: <https://cerncourier.com/a/a-bestiary-of-exotic-hadrons/>
- [2] Volker Burkert, *The challenge of the pentaquarks*, Cern Courier, 31 March 2004. URL: <https://cerncourier.com/a/the-challenge-of-the-pentaquarks/>
- [3] Marek Karliner (Tel Aviv University) and Jonathan L. Rosner (University of Chicago), *Inside pentaquarks and tetraquarks*, Cern Courier, 20 November 2024. URL: <https://cerncourier.com/a/inside-pentaquarks-and-tetraquarks/>