

Materia, antimateria y un desequilibrio sin resolver

QTC-014 · De los quarks a la consciencia

El universo, la vida y cómo llegamos a saberlo

Autor: Juan Segurola

Versión: v1.0 ES · 2 de septiembre de 2026

Perfil epistémico: Problema abierto

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

La antimateria no falta en la física. Se produce en aceleradores, aparece en desintegraciones radiactivas y rayos cósmicos y se usa en diagnóstico médico. El problema cosmológico es más estrecho y profundo: después de que materia y antimateria se aniquilaran casi por completo en el universo temprano, quedó aproximadamente un barión neto por cada 1.600 millones de fotones. La nucleosíntesis del Big Bang y el fondo cósmico de microondas coinciden en ese residuo, pero no identifican su causa. Este artículo sigue la lógica condicional propuesta por Sakharov, el descubrimiento de la violación CP y los procesos esfalerónicos electrodébiles capaces de crear, redistribuir o borrar asimetrías. Después compara mecanismos activos —desintegraciones de gran unificación, leptogénesis, bariogénesis electrodébil extendida y dinámica de Affleck–Dine— sin declarar ganador. El número pertenece a la cosmología de precisión; las partículas, escala, fuente CP e historia fuera del equilibrio que lo generaron siguen siendo un problema abierto.

En 60 segundos

Partículas y antipartículas se aniquilan en otras excitaciones; no desaparecen hacia la nada literal. En un plasma caliente casi simétrico, la aniquilación elimina pares emparejados y deja el pequeño exceso neto que ya existiera o se hubiera generado. La cosmología mide ese exceso como una relación bariones–fotones cercana a $6,1 \times 10^{-10}$, o un rendimiento normalizado por entropía próximo a $8,6 \times 10^{-11}$. Sakharov mostró que, dentro del marco térmico estándar compatible con CPT, una explicación dinámica necesita violación del número bariónico, violación C y CP y salida del equilibrio, o un fallo de los supuestos de ese argumento. Las interacciones débiles violan CP y los esfalerones electrodébiles violan B+L conservando B-L. Pero la fase CKM medida es demasiado débil y el Higgs de 125 GeV produce un cruce electrodébil suave, de modo que el Modelo Estándar mínimo no genera la asimetría observada. Varias extensiones reproducen el número final, pero ajustarlo no demuestra que existieran sus partículas o condiciones iniciales. Los experimentos prueban ingredientes —desintegración del protón, momentos dipolares, propiedades de neutrinos, nueva física de Higgs, neutrinos estériles u ondas gravitacionales— y no una máquina universal de bariogénesis.

Por qué importa esta pregunta

La pregunta materia–antimateria suele ampliarse hasta convertirse en «¿por qué existe algo en vez de nada?». La física se ha ganado una pregunta más concreta. Sabemos que el dominio observable

contiene un pequeño exceso bariónico neto y conocemos varios ingredientes necesarios para generarlo dinámicamente. No sabemos qué mecanismo actuó. Mantener esa frontera importa porque aniquilación no es creación desde la nada, violación CP no basta automáticamente y un candidato que reproduce la relación final todavía no ha reconstruido la historia. El problema abierto está estructurado experimentalmente, no resuelto metafísicamente.

1. El residuo, no una mitad desaparecida

La pregunta

Si materia y antimateria pueden crearse por pares, ¿por qué el universo actual no contiene mitad de cada una? No porque la antimateria sea ficticia ni porque la aniquilación borrara solo un lado. La aniquilación de pares conserva cualquier pequeño desequilibrio previo.

La antimateria es física de partículas ordinaria y repetidamente comprobada. Positrones y antiprotones se producen, detectan y almacenan; las antipartículas participan en desintegraciones y colisiones según leyes cuánticas medidas. El problema cósmico no es su ausencia en la naturaleza, sino el dominio abrumador de materia en el sector bariónico observable. [3,5]

Cuando una partícula encuentra su antipartícula, energía y momento conservados se redistribuyen en otras excitaciones, a menudo fotones o pares más ligeros. La aniquilación es conversión, no desaparición del contenido físico hacia la nada. Los productos pueden crear nuevos pares si tienen energía suficiente, y la reacción funciona en ambos sentidos en un plasma caliente en equilibrio. [3,8]

Al enfriarse el universo, una población casi simétrica de bariones y antibariones se aniquila hasta que la creación de pares deja de ser eficaz. El proceso elimina cantidades emparejadas de ambos lados. No puede generar por sí solo número bariónico neto; un exceso previo o producido dinámicamente permanece porque ya no quedan antipartículas que lo cancelen. [3]

El exceso superviviente es pequeño: la relación bariones–fotones es aproximadamente $6,1 \times 10^{-10}$, cerca de un barión neto por cada 1.600 millones de fotones. Respecto a la entropía, el rendimiento bariónico es unos $8,6 \times 10^{-11}$. Pequeño como fracción, suministró casi toda la materia ordinaria que después formó gas, estrellas, planetas y seres vivos. [1–3]

La nucleosíntesis del Big Bang y la estructura acústica del CMB infieren densidades bariónicas coherentes mediante épocas y físicas distintas. Su acuerdo fija la magnitud del residuo, no el mecanismo que lo produjo. La precisión del resultado no debe confundirse con conocimiento de la historia generadora. [1,2]

En qué punto estamos

El desequilibrio es un residuo de escala medida con precisión, no prueba de que la antimateria nunca existiera ni de que la aniquilación creara algo desde la nada. Sondas cósmicas independientes coinciden en el resto y callan sobre su causa. La siguiente tarea es observacional: establecer hasta dónde llega el dominio de materia y qué excluyen realmente las búsquedas de antimateria primordial.

2. Cómo sabemos que el dominio visible está dominado por materia

La pregunta

Un positrón en un detector es antimateria real, pero no implica una antiestrella cercana. Colisiones energéticas y procesos radiactivos producen antipartículas secundarias. Para identificar un dominio primordial de antimateria necesitamos pruebas que la materia ordinaria no pueda explicar produciendo antipartículas localmente.

El material muestreado directamente, las estrellas cercanas y el gas están dominados por materia. Los rayos cósmicos contienen positrones y antiprotones, pero colisiones ordinarias los producen como secundarios. Su existencia confirma la física de antimateria y deja abierta la composición primordial de fuentes lejanas salvo que se establezcan firmas más pesadas y limpias. [3,5]

Grandes dominios adyacentes de materia y antimateria se encontrarían en fronteras. En modelos simples, la aniquilación produciría rayos gamma difusos y alteraría la historia de ionización y temperatura visible en el CMB. La ausencia de señales esperadas restringe fuertemente un universo en mosaico dentro del volumen observable, dados los supuestos sobre mezcla y límites. [4]

No se ha confirmado antihelio ni un antinúcleo más pesado como detección primordial en rayos cósmicos. AMS-02 ha comunicado eventos candidatos de antihelio, pero su estado instrumental, fondo y origen siguen sin resolver. Un evento candidato no debe ascender silenciosamente a antiestrella o dominio primordial. [5,6]

La conclusión se limita deliberadamente al horizonte. La evidencia sostiene un universo observable abrumadoramente bariónico y restringe modelos sencillos de dominios de antimateria. No dice nada empírico sobre regiones causalmente inaccesibles más allá del horizonte, pues ninguna señal suya puede alcanzar las mediciones usadas. [3,4]

La materia oscura no es un depósito oculto de antimateria ordinaria. El material antibariónico interactuaría electromagnéticamente, participaría en nucleosíntesis y se aniquilaría en fronteras con materia. Esos comportamientos contradicen el componente dominante de materia oscura inferido gravitatoriamente. Compartir la palabra materia no vuelve intercambiables ambas categorías. [35]

En qué punto estamos

Los rayos cósmicos prueban que existen antipartículas; búsquedas de rayos gamma, CMB y antinúcleos restringen antimateria primordial a escalas mayores. La evidencia es fuerte dentro del dominio observable y silenciosa más allá del horizonte. Establecida la asimetría, no su causa, podemos preguntar qué tendría que lograr un mecanismo dinámico sin elegir todavía ninguno.

3. La lógica condicional de Sakharov

La pregunta

¿Qué debe cambiar para que un plasma simétrico adquiera número bariónico neto duradero? La respuesta de Sakharov no fue una historia terminada, sino condiciones. Dependen de equilibrio térmico, CPT y cargas supuestas, lo que las convierte en lógica potente, no en mecanismo seleccionado por observación.

Dentro del marco caliente, expansivo y compatible con CPT, la bariogénesis dinámica exige violación del número bariónico, violación C y CP y salida del equilibrio térmico, o un fallo equivalente de los supuestos del argumento de equilibrio. La lista formula obstáculos que un modelo debe superar; no identifica cuándo ni cómo los superó la naturaleza. [7,8]

Las condiciones de Sakharov son así un diagnóstico, no prueba de que ocurriera un episodio concreto de bariogénesis. Un candidato puede cumplirlas de muchas formas y a escalas muy distintas, y seguir siendo incorrecto. A la inversa, condiciones iniciales alternativas o desviaciones de los supuestos estándar reorganizan los requisitos lógicos. [7,8]

La violación del número bariónico es necesaria porque un número neto exactamente conservado no puede evolucionar de cero a valor distinto de cero. El Modelo Estándar contiene procesos anómalos que violan B+L, mientras muchas extensiones añaden desintegraciones o interacciones que violan más directamente número bariónico o leptónico. Importa la combinación conservada. [7,8,15]

La violación C y CP impide que canales productores de materia y antimateria tengan tasas netas exactamente canceladas. Una asimetría CP microscópica es ingrediente necesario en la lógica estándar, pero su mera existencia no garantiza un efecto cósmico suficiente. Deben calcularse intensidad, reacciones participantes e historia térmica. [7–9]

El equilibrio térmico aporta el último obstáculo. Simetría CPT y balance detallado impiden que las reacciones construyan una asimetría neta persistente en equilibrio. Expansión, desintegraciones o transición de primer orden pueden impulsar la salida, pero cada candidato debe mostrar cuantitativamente que la generación supera el lavado y sobrevive a la evolución posterior. [7,8]

En qué punto estamos

Sakharov convirtió el misterio en tareas condicionales: cambiar número bariónico, distinguir materia y antimateria en tasas y escapar del equilibrio lo suficiente para conservar el resultado. Los requisitos organizan mecanismos, pero no los ordenan. La pregunta siguiente es si la violación CP débil y la dinámica electrodébil conocidas completan ya el trabajo. No lo hacen.

4. Una simetría rota que todavía no basta

La pregunta

La violación CP demuestra que las interacciones débiles distinguen materia de antimateria. ¿Por qué no resuelve la bariogénesis? Porque la pregunta es cuantitativa y térmica: ¿es la asimetría medida suficientemente fuerte, en reacciones fuera del equilibrio, para sobrevivir a todo lavado y producir el número cósmico?

En 1964, Christenson, Cronin, Fitch y Turlay observaron violación CP en desintegraciones de kaones neutros. El resultado estableció que la transformación combinada que intercambia partículas con antipartículas y refleja el espacio no es exacta en interacciones débiles. Aportó un ingrediente real de Sakharov, no un mecanismo cósmico completo. [9]

Kobayashi y Maskawa mostraron en 1973 que un sector de quarks con tres generaciones permite una fase irreducible que viola CP en la matriz de mezcla débil. Lo que empezó como estructura teórica pasó a formar parte del Modelo Estándar cuando se establecieron experimentalmente las familias requeridas y los fenómenos de cambio de sabor. [10]

Las mediciones de kaones y mesones B determinan hoy la descripción CKM como fuente observada dominante de violación CP en procesos débiles de cambio de sabor de quarks. El invariante de Jarlskog recoge su intensidad independiente de base. El acuerdo entre experimentos es un triunfo, pero la suficiencia cosmológica exige otro cálculo. [11–14]

A alta temperatura, transiciones electrodébiles no perturbativas asociadas a la anomalía violan $B+L$ conservando $B-L$. Su tasa térmica está establecida en cálculos del Modelo Estándar. Esos procesos esfalerónicos aportan dinámica que cambia número bariónico, pero su ley de conservación y lavado restringen qué asimetría puede persistir. [15–17]

La bariogénesis electrodébil mínima del Modelo Estándar falla cuantitativamente: la violación CP de CKM es demasiado débil y el Higgs de 125 GeV produce cruce suave, no transición fuerte de primer orden. El exceso observado exige una condición inicial asimétrica o física adicional, pero los datos no seleccionan un mecanismo único. [3,18–20]

En qué punto estamos

La física débil conocida aporta violación CP y esfalerones que cambian bariones, pero no suficiente asimetría en el entorno fuera del equilibrio requerido. El fallo es cuantitativo, no filosófico, y apunta más allá del Modelo Estándar mínimo sin nombrar ganador. Para comparar candidatos debemos entender los esfalerones como convertidores y borradores, además de posibles creadores.

5. Esfalerones: crear, convertir o borrar

Las transiciones esfalerónicas electrodébiles violan número bariónico más leptónico, $B+L$, conservando su diferencia, $B-L$. La distinción es decisiva. Un proceso puede cambiar bariones y conservar una combinación concreta de cargas, por lo que origen y momento de toda asimetría inicial determinan qué permanece. [15–17]

Mientras son rápidos, los esfalerones pueden lavar una asimetría $B+L$ previa sin componente $B-L$ protegida. Generar temprano número bariónico no basta; un candidato debe seguir todo proceso capaz de reprocesar cargas antes del desacoplamiento. La supervivencia es propiedad de una red, no un acto único de creación. [15–17]

Las mismas reacciones convierten parte de una asimetría leptónica en número bariónico. Es el puente central de la leptogénesis: nueva dinámica del sector de neutrinos crea primero asimetrías de sabor o totales, y los esfalerones redistribuyen parte al sector bariónico antes de dejar de ser eficaces. [15–17,22,24]

La tasa esfalerónica cambia a través del cruce electrodébil y termina siendo demasiado lenta frente a expansión y otras dinámicas. El desacoplamiento conserva entonces la asimetría superviviente ante nuevo reprocesamiento. La conversión exacta depende del contenido de partículas y de las relaciones de equilibrio químico del modelo. [15–17]

Los esfalerones pueden ayudar a crear, convertir, redistribuir o borrar una asimetría. Llamarlos solo motor productor de bariones oculta su dependencia de $B-L$, fuentes CP, tasas y secuencia. Son microfísica establecida del Modelo Estándar que toda historia candidata debe usar o evitar con coherencia. [15,17,19]

En qué punto estamos

Los esfalerones son un puente condicional, no la causa ausente. Conservan B-L, lavan algunas historias cósmicas y convierten otras según red de cargas y momento. Por eso las propuestas viables difieren no solo en partículas añadidas, sino también en cuándo y en qué combinación conservada depositan primero la asimetría.

6. Mecanismos candidatos, no una historia resuelta

La pregunta

Varios mecanismos pueden ajustarse para dejar el rendimiento bariónico observado. Ese acuerdo es necesario y débil: un número no demuestra partícula pesada, población de neutrinos estériles, transición de primer orden ni condensado escalar. Cada candidato debe ganarse su historia mediante pruebas adicionales y distintivas.

La bariogénesis de gran unificación propone que partículas muy pesadas decaigan fuera del equilibrio por canales que violan número bariónico y CP. La escala suele superar la producción directa. La desintegración del protón ofrece una prueba importante y dependiente del modelo porque la misma estructura unificada conecta bariones inestables con interacciones generadoras de asimetría. [21,36]

La leptogénesis térmica usa desintegraciones fuera del equilibrio y con violación CP de neutrinos de Majorana pesados para crear asimetría leptónica. Los esfalerones convierten parte en bariones. El mecanismo conecta materia cósmica y generación de masa de neutrinos, pero su alta escala y estados pesados desconocidos dejan gran degeneración. [22,23,38]

La leptogénesis de oscilación a baja escala acerca los nuevos estados a posibles experimentos. Oscilaciones con violación CP de neutrinos estériles generan asimetrías de sabor antes del desacoplamiento esfalerónico. Las regiones viables se restringen con búsquedas de neutrinos y frontera de intensidad, pero ninguna historia de bariogénesis por neutrinos estériles está establecida. [24]

La bariogénesis electrodébil extendida añade nueva violación CP y una transición fuerte de primer orden ausente del Modelo Estándar mínimo. Precisión de Higgs, colisionadores y límites dipolares prueban partículas y fases; un fondo de ondas gravitacionales podría probar la transición. Ninguna señal aislada demuestra producción bariónica. [19,20,27,32–34]

La bariogénesis de Affleck–Dine usa campos escalares coherentes con carga bariónica o leptónica, a menudo en marcos supersimétricos, para generar gran asimetría. Como otros candidatos, ajusta el rendimiento final con muchas elecciones. Reproducir esta es condición de coherencia, no prueba de que existieran campo, potencial, historia de desintegración o condensado inicial propuestos. [3,8,25,26]

En qué punto estamos

Cada candidato coloca los ingredientes ausentes en otro lugar: desintegraciones unificadas, neutrinos pesados u oscilantes, transición electrodébil extendida o condensado escalar cargado. Todos son restringibles experimentalmente y ninguno está establecido. El progreso exige mapear experimentos a ingredientes, para que un descubrimiento estreche mecanismos en lugar de anunciarse como solución automática.

7. Lo que los experimentos pueden decidir realmente

Observar desintegración del protón u oscilación neutrón–antineutrón establecería violación del número bariónico, un ingrediente central de Sakharov. Sería transformador, pero no identificaría por sí solo la fuente CP, la salida térmica relevante del equilibrio ni qué red de reacciones tempranas generó el rendimiento medido. [29,30]

Los momentos dipolares eléctricos prueban nuevas fases CP; las oscilaciones, violación CP leptónica; la doble beta sin neutrinos, carácter de Majorana; las búsquedas estériles, estados de baja escala; Higgs y colisionadores, sectores electrodébiles extendidos. Los observables restringen familias y combinaciones de parámetros distintas, no un mecanismo universal. [27–33]

Un fondo estocástico de ondas gravitacionales compatible con transición electrodébil de primer orden respaldaría un ingrediente ausente de la bariogénesis mínima. No mostraría que la transición produjo bariones ni identificaría la violación CP necesaria. Un fondo diagnostica dinámica cósmica dejando incompleta la historia de generación de carga. [34]

El programa experimental es una matriz, no un detector decisivo. Una señal de desintegración favorece ciertas unificaciones; un EDM restringe fases; resultados de neutrinos remodelan leptogénesis; colisionadores y ondas prueban potenciales térmicos. Combinarlos elimina grandes regiones candidatas antes de seleccionar un mecanismo único. [27–34]

Los resultados nulos también tienen implicaciones desiguales. Límites mayores a la vida del protón no eliminan directamente leptogénesis de baja escala, y mejores límites al EDM electrónico no prueban todo Affleck–Dine. Los informes honestos especifican qué ingrediente, escala y espacio paramétrico cambió, distinguiendo evidencia contra un modelo de evidencia contra toda bariogénesis. [29–34]

En qué punto estamos

Los experimentos pueden establecer ingredientes y eliminar espacio paramétrico mucho antes de reconstruir el suceso cósmico completo. No es debilidad: transforma un misterio de origen en preguntas enlazadas y refutables. El balance final debe mantener dos columnas separadas: magnitud y dominio de la asimetría conocidos, y partículas, escala y secuencia desconocidas.

8. El número que conocemos y la causa que no

La magnitud de la asimetría bariónica y el dominio de materia del universo observable están establecidos. Escala generadora, partículas nuevas, fuente CP, dinámica fuera del equilibrio y posible conexión con masa de neutrinos siguen abiertos. Varios mecanismos activos satisfacen la lógica general y la evidencia no discrimina decisivamente entre ellos. [3,8,19,23–25,37,38]

La bariogénesis intenta explicar físicamente cómo un universo en evolución adquirió o conservó un desequilibrio materia–antimateria. No explica por qué existe un universo, por qué existen campos o leyes ni por qué el marco inicial es posible. Esas preguntas pueden ser legítimas, pero añadir una desintegración con violación CP no las resuelve. [3,37]

La precisión de la asimetría sigue siendo un ancla científica. Datos de BBN y CMB refinan η e Y_B , prueban radiación extra o liberación de entropía y exponen incoherencias. Un número revisado

remodelaría el espacio viable, pero un resultado más preciso por sí solo seguiría sin identificar qué historia candidata lo produjo. [1–3]

Una explicación satisfactoria debe conectar observables adicionales al mismo mecanismo: vida del protón, patrón de masas de neutrinos, EDM, sector escalar nuevo, estado estéril o espectro de ondas gravitacionales. Cuanto más distintiva y sobrerrestringida sea la red, menos libertad queda para ajustar el número final sin recuperar historia real. [3,37]

Por ahora, la conclusión tiene confianza asimétrica. Conocemos extraordinariamente bien el residuo y sabemos que la bariogénesis electrodébil mínima es insuficiente. Ignoramos si la respuesta está en unificación, neutrinos, física de Higgs extendida, condensados escalares, condición inicial u otro mecanismo todavía no propuesto. [3,8,37,38]

En qué punto estamos

Un barión neto por unos 1.600 millones de fotones es un resultado de precisión cuya historia causal desconocemos. Condiciones de Sakharov y restricciones experimentales organizan la búsqueda; ningún candidato ha ganado rango de historia cósmica. El final honesto no es «la antimateria desapareció», sino algo más preciso: el residuo está medido y su origen permanece abierto.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- El dominio bariónico observable está abrumadoramente dominado por materia, aunque la antimateria se produce y detecta localmente.
- Las mediciones de BBN y CMB fijan coherentemente una relación bariones–fotones cercana a $6,1 \times 10^{-10}$.
- La violación CP conocida y los esfalerones son reales, pero la bariogénesis electrodébil mínima resulta cuantitativamente insuficiente.

Lo que todavía no sabemos

- La evidencia actual no ha seleccionado escala generadora, contenido de partículas, fuente CP ni historia fuera del equilibrio.
- Los candidatos de antihelio de AMS-02 no han establecido una población primordial de antimateria.
- La relación, si existe, entre bariogénesis, masa de neutrinos, unificación y nueva física de Higgs sigue sin resolver.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Desintegración del protón, oscilación neutrón–antineutrón u otra señal de violación bariónica establecería un ingrediente y remodelaría candidatos.
- Una red correlacionada de nueva violación CP, estados de partículas y evidencia de transición térmica podría identificar un mecanismo.
- Antinúcleos primordiales confirmados o señales de dominios de aniquilación revisarían el alcance espacial inferido del dominio de materia.

Si solo recuerdas una cosa

Conocemos con precisión el pequeño exceso bariónico; no sabemos qué partículas, fuente CP, escala e historia fuera del equilibrio lo generaron.

Artículos relacionados

- QTC-012 — ¿Qué queremos decir realmente cuando hablamos del Big Bang?
- QTC-013 — Antes de los átomos

Referencias

- [1] Planck Collaboration. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics* 641, A6 (2020). DOI 10.1051/0004-6361/201833910. <https://arxiv.org/abs/1807.06209>
- [2] B. D. Fields; P. Molaro; S. Sarkar / Particle Data Group. Big Bang Nucleosynthesis. Review of Particle Physics, section 24 (2024). DOI 10.1103/PhysRevD.110.030001. <https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/rpp2024-rev-bbang-nucleosynthesis.pdf>
- [3] Laurent Canetti; Marco Drewes; Mikhail Shaposhnikov. Matter and Antimatter in the Universe. *New Journal of Physics* 14, 095012 (2012). DOI 10.1088/1367-2630/14/9/095012. <https://arxiv.org/abs/1204.4186>
- [4] A. G. Cohen; A. De Rújula; S. L. Glashow. A Matter-Antimatter Universe? *Astrophysical Journal* 495, 539-549 (1998). DOI 10.1086/305328. <https://arxiv.org/abs/astro-ph/9707087>
- [5] J. Alvarez-Muñiz; Z. Cao; U. F. Katz; P. Mertsch; C. Spiering / Particle Data Group. Cosmic Rays. Review of Particle Physics, section 30 (2024). DOI 10.1103/PhysRevD.110.030001. <https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/rpp2024-rev-cosmic-rays.pdf>
- [6] J. Alcaraz et al. (AMS Collaboration). Search for antihelium in cosmic rays. *Physics Letters B* 461, 387-396 (1999). DOI 10.1016/S0370-2693(99)00874-6. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269399008746>
- [7] A. D. Sakharov. Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe. *JETP Letters* 5, 24-27 (1967). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1967JETPL...5...24S/abstract>
- [8] Antonio Riotto; Mark Trodden. Recent progress in baryogenesis. *Annual Review of Nuclear and Particle Science* 49, 35-75 (1999). DOI 10.1146/annurev.nucl.49.1.35. <https://arxiv.org/abs/hep-ph/9901362>
- [9] J. H. Christenson; J. W. Cronin; V. L. Fitch; R. Turlay. Evidence for the 2-pion decay of the K2(0) meson. *Physical Review Letters* 13, 138-140 (1964). DOI 10.1103/PhysRevLett.13.138. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.138>
- [10] Makoto Kobayashi; Toshihide Maskawa. CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction. *Progress of Theoretical Physics* 49, 652-657 (1973). DOI 10.1143/PTP.49.652. <https://doi.org/10.1143/PTP.49.652>
- [11] C. Jarlskog. Commutator of the quark mass matrices in the standard electroweak model and a measure of maximal CP nonconservation. *Physical Review Letters* 55, 1039-1042 (1985). DOI 10.1103/PhysRevLett.55.1039. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.1039>

- [12] B. Aubert et al. (BABAR Collaboration). Observation of CP violation in the B₀ meson system. *Physical Review Letters* 87, 091801 (2001). DOI 10.1103/PhysRevLett.87.091801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.091801>
- [13] K. Abe et al. (Belle Collaboration). Observation of large CP violation in the neutral B meson system. *Physical Review Letters* 87, 091802 (2001). DOI 10.1103/PhysRevLett.87.091802. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.091802>
- [14] A. Ceccucci; Z. Ligeti; Y. Sakai / Particle Data Group. CKM Quark-Mixing Matrix. Review of Particle Physics, section 12 (2024). DOI 10.1103/PhysRevD.110.030001. <https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/rpp2024-rev-ckm-matrix.pdf>
- [15] G. 't Hooft. Symmetry Breaking through Bell-Jackiw Anomalies. *Physical Review Letters* 37, 8-11 (1976). DOI 10.1103/PhysRevLett.37.8. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.37.8>
- [16] V. A. Kuzmin; V. A. Rubakov; M. E. Shaposhnikov. On anomalous electroweak baryon-number non-conservation in the early universe. *Physics Letters B* 155, 36-42 (1985). DOI 10.1016/0370-2693(85)91028-7. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(85\)91028-7](https://doi.org/10.1016/0370-2693(85)91028-7)
- [17] Michela D'Onofrio; Kari Rummukainen; Anders Tranberg. Sphaleron Rate in the Minimal Standard Model. *Physical Review Letters* 113, 141602 (2014). DOI 10.1103/PhysRevLett.113.141602. <https://arxiv.org/abs/1404.3565>
- [18] M. B. Gavela; P. Hernandez; J. Orloff; O. Pène; C. Quimbay. Standard model CP-violation and baryon asymmetry (II). Finite temperature. *Nuclear Physics B* 430, 382-426 (1994). DOI 10.1016/0550-3213(94)00410-2. <https://arxiv.org/abs/hep-ph/9406289>
- [19] David E. Morrissey; Michael J. Ramsey-Musolf. Electroweak baryogenesis. *New Journal of Physics* 14, 125003 (2012). DOI 10.1088/1367-2630/14/12/125003. <https://arxiv.org/abs/1206.2942>
- [20] Michela D'Onofrio; Kari Rummukainen. Standard model cross-over on the lattice. *Physical Review D* 93, 025003 (2016). DOI 10.1103/PhysRevD.93.025003. <https://arxiv.org/abs/1508.07161>
- [21] Motohiko Yoshimura. Unified Gauge Theories and the Baryon Number of the Universe. *Physical Review Letters* 41, 281-284; erratum 42, 746 (1978). DOI 10.1103/PhysRevLett.41.281. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.41.281>
- [22] M. Fukugita; T. Yanagida. Baryogenesis Without Grand Unification. *Physics Letters B* 174, 45-47 (1986). DOI 10.1016/0370-2693(86)91126-3. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(86\)91126-3](https://doi.org/10.1016/0370-2693(86)91126-3)
- [23] W. Buchmüller; R. D. Peccei; T. Yanagida. Leptogenesis as the origin of matter. *Annual Review of Nuclear and Particle Science* 55, 311-355 (2005). DOI 10.1146/annurev.nucl.55.090704.151558. <https://arxiv.org/abs/hep-ph/0502169>
- [24] E. Kh. Akhmedov; V. A. Rubakov; A. Yu. Smirnov. Baryogenesis via Neutrino Oscillations. *Physical Review Letters* 81, 1359-1362 (1998). DOI 10.1103/PhysRevLett.81.1359. <https://arxiv.org/abs/hep-ph/9803255>
- [25] Ian Affleck; Michael Dine. A New Mechanism for Baryogenesis. *Nuclear Physics B* 249, 361-380 (1985). DOI 10.1016/0550-3213(85)90021-5. [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(85\)90021-5](https://doi.org/10.1016/0550-3213(85)90021-5)
- [26] Michael Dine; Alexander Kusenko. Origin of the matter-antimatter asymmetry. *Reviews of Modern Physics* 76, 1-30 (2003). DOI 10.1103/RevModPhys.76.1. <https://arxiv.org/abs/hep-ph/0303065>

- [27] ACME Collaboration. Improved limit on the electric dipole moment of the electron. *Nature* 562, 355-360 (2018). DOI 10.1038/s41586-018-0599-8. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0599-8>
- [28] The T2K Collaboration. Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations. *Nature* 580, 339-344 (2020). DOI 10.1038/s41586-020-2177-0. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2177-0>
- [29] A. Takenaka et al. (Super-Kamiokande Collaboration). Search for proton decay via $p \rightarrow e^+ \pi^0$ and $p \rightarrow \mu^+ \pi^0$ with an enlarged fiducial volume in Super-Kamiokande I-IV. *Physical Review D* 102, 112011 (2020). DOI 10.1103/PhysRevD.102.112011. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.112011>
- [30] K. Abe et al. (Super-Kamiokande Collaboration). Neutron-antineutron oscillation search using a 0.37 megaton-years exposure of Super-Kamiokande. *Physical Review D* 103, 012008 (2021). DOI 10.1103/PhysRevD.103.012008. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.012008>
- [31] S. Abe et al. (KamLAND-Zen Collaboration). Search for the Majorana Nature of Neutrinos in the Inverted Mass Ordering Region with KamLAND-Zen. *Physical Review Letters* 130, 051801 (2023). DOI 10.1103/PhysRevLett.130.051801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.051801>
- [32] G. Aad et al. (ATLAS Collaboration). Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Physics Letters B* 716, 1-29 (2012). DOI 10.1016/j.physletb.2012.08.020. <https://arxiv.org/abs/1207.7214>
- [33] S. Chatrchyan et al. (CMS Collaboration). Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Physics Letters B* 716, 30-61 (2012). DOI 10.1016/j.physletb.2012.08.021. <https://arxiv.org/abs/1207.7235>
- [34] David J. Weir. Gravitational waves from a first-order electroweak phase transition: a brief review. *Philosophical Transactions A* 376, 20170126 (2018). DOI 10.1098/rsta.2017.0126. <https://arxiv.org/abs/1705.01783>
- [35] L. Baudis; S. Profumo / Particle Data Group. Dark Matter. *Review of Particle Physics*, section 27 (2024). DOI 10.1103/PhysRevD.110.030001. <https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/rpp2024-rev-dark-matter.pdf>
- [36] A. Hebecker; J. Hisano; N. Nagata / Particle Data Group. Grand Unified Theories. *Review of Particle Physics*, section 93 (2024). DOI 10.1103/PhysRevD.110.030001. <https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/rpp2024-rev-guts.pdf>
- [37] James M. Cline. Baryogenesis. *Les Houches lecture review* (2006). <https://arxiv.org/abs/hep-ph/0609145>
- [38] Sacha Davidson; Enrico Nardi; Yosef Nir. Leptogenesis. *Physics Reports* 466, 105-177 (2008). DOI 10.1016/j.physrep.2008.06.002. <https://arxiv.org/abs/0802.2962>