



Die Asymmetrie, die das Universum verursacht

—

Die Sakharov Kriterien

Lara Bischof

Seminarfach Astronomie

Herr Riemer

Schuljahr 2023/2024

Abgabetermin: 28.02.2024

Abgabeort: Sekretariat GGB

Inhalt

1	Einleitung.....	2
2	Materie, Antimaterie und deren Wechselwirkung.....	3
2.1	Was ist Materie?.....	3
2.2	Was ist Antimaterie?.....	3
2.3	Annihilation.....	4
2.4	Paarbildung.....	5
3	Die Asymmetrie.....	6
3.1	Der Urknall und die anfängliche Symmetrie.....	6
3.2	Die Entdeckung und Begründung der Asymmetrie.....	7
4	Die Sakharov Kriterien.....	7
4.1	Verletzung der Baryonenzahlerhaltung.....	8
4.2	Verletzung der C und CP Symmetrie.....	8
4.2.1	Was bedeutet C Symmetrie?.....	8
4.2.2	Was bedeutet P Symmetrie?.....	9
4.2.3	Was bedeutet CP Symmetrie?.....	9
4.2.4	Verletzung der C Symmetrie.....	9
4.2.5	Verletzung der CP Symmetrie.....	11
4.3	Thermodynamisches Ungleichgewicht.....	12
5	Resumée und Ausblick.....	13
6	Anhang.....	15
6.1	Quellenverweise.....	15
6.2	Erklärungen.....	21

1 Einleitung

Wie konnte aus der anfänglichen Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie die Asymmetrie entstehen, welche unser Universum verursacht? Mit dieser Frage beschäftigen sich Wissenschaftler seit der Entdeckung der Antimaterie, konnten jedoch bis heute keine Lösung finden. Dennoch gibt es zahlreiche Theorien, wie diese Asymmetrie entstanden sein könnte.

Da es unmöglich ist, all diese Theorien mitsamt dem nötigen Grundwissen im Rahmen dieser Facharbeit zu präsentieren, habe ich mich dazu entschlossen, nur auf die drei allgemein anerkannten Kriterien einzugehen, welche laut verschiedenen Physikern, wie z.B. Andrei Sakharov, zwingend notwendig zur Entstehung der Asymmetrie sind. Hierfür gehe ich zunächst auf die physikalischen Grundlagen ein, die es zum Verstehen des Themas braucht. Im Folgenden betrachte ich die erste Sekunde nach dem Urknall genauer, da in dieser kurzen Zeitspanne aus der ursprünglichen Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie eine Asymmetrie mit Überhang zur Materie wurde. Bezüglich des Ablaufs des Urknalls befasse ich mich nur mit den Ereignissen, die für mein Thema relevant sind, weshalb ich z.B. nur auf die Entstehung der Baryonen eingehe und andere Teilchen wie die Elektronen vernachlässige. Abschließend gebe ich noch einen kurzen Ausblick, in dem ich mögliche Experimente präsentiere, die zu einer Antwort auf die Ausgangsfrage führen könnten und auf die aktuelle Forschung eingehe.

Die Tatsache, dass mein Thema eng mit Antimaterie verknüpft ist, macht einen Schülerversuch leider unmöglich, da es zur Erzeugung von Antimaterie große Teilchenbeschleuniger braucht. Somit beruht diese Facharbeit lediglich auf den wissenschaftlichen Informationen, welche ich mir durch die Ausleihe von Büchern sowie einer sorgfältigen Internetrecherche besorgt habe.

2 Materie, Antimaterie und deren Wechselwirkung

2.1 Was ist Materie?

Unter dem Begriff Materie fasst die Physik alles zusammen, was eine Masse aufweist und räumlichen Platz braucht. Somit sind auch alle Stoffe (chemische Elemente/Verbindungen), mit denen wir Menschen in unserem Alltag in Kontakt kommen, Teil der Materie. Diese aus Atomen bestehenden Stoffe setzen sich wiederum aus drei Teilchenarten zusammen: den positiv geladenen Protonen, den negativ geladenen Elektronen und den elektrisch neutralen Neutronen.

Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, besteht ein Atom aus dem Atomkern und der Atomhülle. Der Atomkern wiederum setzt sich aus Protonen und Neutronen zusammen und wird von der aus Elektronen bestehenden Atomhülle umgeben. Da es sich bei der Abbildung um die Darstellung eines Wasserstoffatoms handelt, weist der Atomkern nur ein Proton und ein Neutron

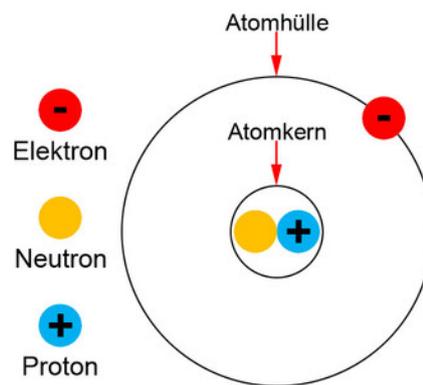


Abbildung 1: Schalenmodell Wasserstoff

auf, sowie nur ein Elektron in der Atomhülle. Die Anzahl der Protonen ist hierbei entscheidend, da sie definiert, um welches der 118 im Periodensystem der Elemente (PSE) aufgelisteten Elemente es sich bei einem Atom handelt. Dies liegt daran, dass die Anzahl an Elektronen unter Standardbedingungen immer der Anzahl der Protonen entspricht, wohingegen die Anzahl der Neutronen sogar innerhalb einer Atomgruppe variabel ist (Isotope).

2.2 Was ist Antimaterie?

Die Existenz von Antimaterie wurde lange angezweifelt, gilt jedoch in unserer heutigen Zeit als unumstritten, nicht zuletzt, da sie in Teilchenbeschleunigern wie dem LHC (Large Hadron Collider) hergestellt und nachgewiesen werden kann. Es stellte sich heraus, dass Antimaterie, welche aus Antiteilchen besteht, eine Art

Spiegelbild der uns bekannten Materie ist [26]. Der Aufbau, die Masse, der Spin¹ und die Lebensdauer von Antimaterie und Materie sind identisch, abgesehen davon, dass die Atomkerne von Anti-Atomen aus Antineutronen und Antiprotonen bestehen und die Atomhüllen aus Positronen, also den jeweiligen Antiteilchen eines normalen Atoms. Der einzige Unterschied zwischen Materie und Antimaterie besteht also in der jeweils umgekehrten Ladung [6].

Bis jetzt gibt es keinen Beweis für das natürliche Vorkommen von Anti-Atomen oder Anti-Molekülen in der Natur. Diese können lediglich in aufwändigen Experimenten in Teilchenbeschleunigern hergestellt werden. Leichte Antiteilchen wie Positronen wiederum sind in der Natur vorzufinden und entstehen beispielsweise beim Beta-Plus-Zerfall² [20].

2.3 Annihilation

Tritt ein Teilchen in Wechselwirkung mit seinem Antiteilchen, sprich treffen Materie und Antimaterie aufeinander, so vernichten sie sich gegenseitig. Bei diesem Annihilation (Paarvernichtung) genannten Prozess wird die gesamte als Masse gespeicherte Energie in Form von Eichbosonen³ (in den meisten Fällen Photonen⁴) freigesetzt [26] [5].

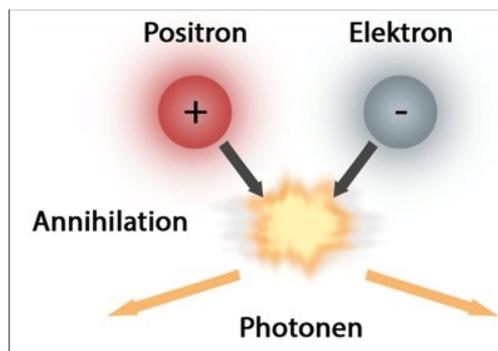


Abbildung 2: Annihilation eines Elektron-Positron-Paars

Der physikalische Zusammenhang dazu wird durch Einsteins Gleichung $E=mc^2$ beschrieben, mit welcher sich beispielsweise die Energie berechnen lässt, welche jedes Photon nach der Annihilation eines Elektrons mit seinem Antipartner, dem Positron, aufweist:

Da die Lichtgeschwindigkeit $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$ beträgt, ein Elektron die Masse $m_e=9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$ aufweist und die Masse des Positrons der Masse des Elektrons entspricht, so ergibt sich Folgendes für die Energie des Positron-Elektron-Paars:

¹ Eigendrehimpuls von Teilchen [18]

² Zerfall eines Protons in ein Neutron, wobei ein Positron und ein Elektron-Neutrino emittiert werden [2]

³ Teilchen, die die vier Grundkräfte übertragen [23]

⁴ Lichtteilchen

⁵ x meint das Multiplikationszeichen

$$E = (2 \times 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}) \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$E = 1,64 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$E = 1,022 \text{ MeV}$$

Diese Energie von $1,022 \text{ MeV}$ wird nun gleichmäßig auf die zwei entstehenden Photonen verteilt, weshalb die Energie eines jeden Photons $0,511 \text{ MeV}$ beträgt [30].

2.4 Paarbildung

Der Vorgang der Paarbildung ist ein der Annihilation entgegengesetzter Prozess und bewirkt die Erzeugung eines Teilchen-Antiteilchen-Paars.

So entsteht z.B. ein Elektron-Positron⁶-Paar, wenn ein energiereiches Photon in Wechselwirkung mit dem elektrischen Feld eines Atomkerns tritt. Dieser Vorgang kann jedoch nur dann stattfinden, wenn „die Energie des Photons die doppelte Ruheenergie des Elektrons [$2 m[\text{Elektron}]c^2 = 1,022$

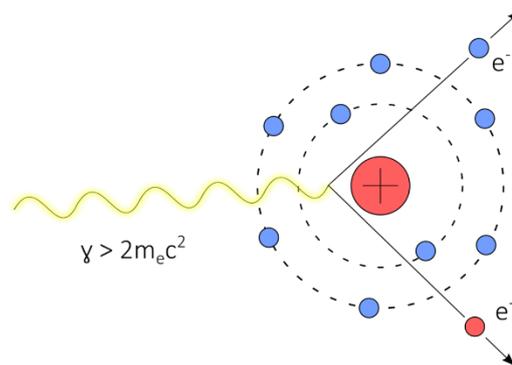


Abbildung 3: Erzeugung eines Elektron-Positron-Paars

$\text{MeV}]$ überschreitet“ [15]. Tritt nun ein Photon, das diese Bedingung erfüllt, in Wechselwirkung mit dem elektrischen Feld eines Atomkerns, so wird diese Energie von $1,022 \text{ MeV}$ vollständig für die Ruhemasse des Elektron-Positron-Paars aufgewendet und jeglicher Überschuss an Energie in die kinetische Energie des Elektron-Positron-Paares umgewandelt, wobei das Photon „vernichtet“ wird [4].

Neben der Umwandlung eines Photons in ein Elektron-Positron-Paar, können bei der Paarbildung auch ein Proton und ein Antiproton oder ein Quark⁷ und der dementsprechende Antiquark entstehen [15].

⁶ Antiteilchen zum Elektron (e^+)

⁷ Elementarteilchen

3 Die Asymmetrie

3.1 Der Urknall und die anfängliche Symmetrie

Vor etwa 13,8 Milliarden Jahren erschuf der Urknall Raum, Zeit und Materie. Wissenschaftler gehen davon aus, dass im Zuge des Urknalls gleiche Mengen an Materie und Antimaterie entstanden sind [19]. Doch wie genau können wir uns diesen Prozess vorstellen?

Betrachten wir hierfür die erste Sekunde nach dem Urknall genauer. Anfangs entstanden aus der vorhandenen Energie durch Paarbildung Teilchen-Antiteilchen-Paare (u.a. Quark-Antiquark-Paare), die sich innerhalb kürzester Zeit sofort wieder vernichteten. Die aus dieser Annihilation hervorgehenden Photonen wiederum erschufen, insofern sie genügend Energie hatten, ebenfalls Teilchen-Antiteilchen-Paare. Dieser Prozess des Erschaffens und Vernichtens von Teilchen und Antiteilchen setzte sich fort, während sich das Universum ausbreitete. Mit fortschreitender Ausbreitung jedoch kühlte das Universum gleichzeitig immer weiter ab und „verlor“ dadurch an Energie, was dazu führte, dass auch die Photonen immer weniger Energie hatten und es somit zu dem Punkt kam, dass (auf Grund der zu niedrigen Energie der Photonen) keine weiteren Paarbildungen mehr möglich waren. Somit kam es im Anschluss zu einer großen Auslöschung, in der sich die vorhandene Materie und Antimaterie gegenseitig vernichteten und deren Resultat die kosmische Hintergrundstrahlung ist⁸ [31] [10].

Wenn nun aber gleiche Mengen von Materie und Antimaterie, z.B. Baryonen und Antibaryonen, vorliegen, müssten diese sich restlos ausgelöscht haben. Wie also kommt es, dass unser Universum existiert und es Galaxien, Sterne und uns Menschen gibt, während Antimaterie so gut wie verschwunden zu sein scheint?

⁸ Wichtig für die weitere Facharbeit (insbesondere die Baryonenzahl) ist, dass es bereits vor der großen Vernichtung kalt genug war, sodass sich jeweils drei Quarks zu einem Baryon bzw. drei Antiquarks zu einem Antibaryon zusammenfügen konnten [28].

3.2 Die Entdeckung und Begründung der Asymmetrie

In ersten Theorien gingen Wissenschaftler davon aus, dass die große Auslöschung nicht die gesamte Antimaterie vernichtet hat. Stattdessen habe sich ein Teil der Antimaterie von der Materie abgesondert und sei deshalb nicht vernichtet worden. Diese Antimaterie würde heutzutage in Form von Antigalaxien und Antisternen in weiter Entfernung existieren. Da Antimaterie ein Spiegelbild der uns bekannten Materie darstellt, wären wir nicht in der Lage, eine Antigalaxie von einer Galaxie zu unterscheiden. Jedoch müsste es an der Grenze zwischen Materie und Antimaterie dauerhaft zu Annihilationen kommen, deren Vorhandensein wir in der kosmischen Strahlung, welche auf unsere Erde trifft, erkennen würden. Da es bis heute allerdings keine Indizien für derartige Annihilationsprozesse im Universum gibt, wurde diese Theorie einer separaten, aus Antimaterie bestehenden Teilwelt verworfen [27].

Wenn es also zu keiner räumlichen Aufteilung von Materie und Antimaterie kam, so war die einzige andere Möglichkeit die, dass zu dem Zeitpunkt der großen Annihilation ein geringfügiger Überschuss an Materie existierte. Berechnungen zufolge handle es sich hierbei um einen Überschuss von einem Baryon auf eine Milliarde Baryon-Antibaryon-Paare ([B] S.29). Doch welche Prozesse innerhalb dieser ersten Sekunde des Universums führten dazu, dass aus einer Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie eine Asymmetrie zu Gunsten der Materie wurde?

4 Die Sakharov Kriterien

Im Jahr 1967 postulierte der russische Physiker Andrei Sakharov drei Kriterien, welche das Universum erfüllt haben muss, damit sich die beobachtete Asymmetrie gebildet hat:

1. Verletzung der Baryonenzahlerhaltung
2. Verletzung der C und CP Symmetrie
3. Thermodynamisches Ungleichgewicht [7]

4.1 Verletzung der Baryonenzahlerhaltung

Die Baryonenzahl B ist eine physikalische Erhaltungsgröße, bei der die Baryonen per Definition $B=1$, die Antibaryonen $B=-1$ und alle anderen Teilchen und Antiteilchen $B=0$ zugeschrieben bekommen [8]. Wenn nun eine Reaktion erfolgt, an der Baryonen beteiligt sind, so muss auf der Eduktseite dieselbe Anzahl an Baryonen stehen wie auf der Produktseite. Betrachtet man z.B. ein freies (nicht an ein Proton gebundenes) und deshalb instabiles Neutron, so zerfällt dieses nach durchschnittlich einer Viertelstunde in ein Proton, wobei es ein Elektron und ein Antineutrino⁹ abgibt [14]. Somit haben wir auf der Eduktseite der Reaktion ein Neutron mit $B=1$ und auf der Produktseite ein Proton mit $B=1$ sowie ein Elektron und ein Antineutrino mit jeweils $B=0$, weshalb sowohl auf der Edukt- als auch auf der Produktseite $B=1$ steht und ein Gleichgewicht vorliegt. Um nun aber eine Asymmetrie im Universum entstehen zu lassen, müsste genau dieses Gleichgewicht gestört und dadurch ein Vorgang ermöglicht werden, bei dem auf der Produktseite mehr Baryonen entstehen als auf der Eduktseite an der Reaktion mitgewirkt haben. Ein Beispiel hierfür wäre der Zerfall eines Neutrons in zwei Protonen. Eine derartige Verletzung der Baryonenzahlerhaltung wurde bislang allerdings noch nicht in der Natur beobachtet, weshalb das erste Kriterium unerfüllt bleibt [17].

4.2 Verletzung der C und CP Symmetrie

4.2.1 Was bedeutet C Symmetrie?

C Symmetrie (charge, englisch für Ladung), auch Ladungskonjugation genannt, meint das Vertauschen von Teilchen mit ihren entsprechenden Antiteilchen. Bei diesem Vorgang ändert sich nur die Ladung der Teilchen nicht aber andere Erhaltungsgrößen wie die Masse oder der Spin [24]. Somit muss es z.B. zu jedem rechtshändigen (sich auf der Horizontalen gegen den Uhrzeigersinn drehenden) Teilchen auch ein rechtshändiges Antiteilchen geben und zu jedem Teilchen mit einer negativen Elementarladung auch ein Antiteilchen mit der entsprechenden positiven Elementarladung (vgl. Elektron/Positron). Des Weiteren besagt die C Symmetrie, dass sich Antimaterie genauso wie Materie verhält und sich eine

⁹ Neutrino: elektrisch neutrales und sehr leichtes Elementarteilchen [13]

Antimateriewelt deshalb identisch zu der uns bekannten Welt verhalten würde [27].

4.2.2 Was bedeutet P Symmetrie?

P Symmetrie (parity, englisch für Parität), auch Händigkeit [28] genannt, meint „das Verhalten eines physikalischen Systems gegenüber räumlichen Spiegelungen“ [16]. Im Zusammenhang mit Teilchen oder Antiteilchen ist hier vor allem der Spin von Bedeutung. Hat man z.B. ein linkshändiges (sich im Uhrzeigersinn drehendes) Teilchen, so dreht sich das Spiegelteilchen gegen den Uhrzeigersinn [32], unterliegt aber dennoch weiterhin denselben physikalischen Gesetzen und verhält sich genauso wie das Ausgangsteilchen ([A] S.91). Zur Erhaltung der P Symmetrie ist es somit notwendig, dass zu jedem rechtshändigen Teilchen auch ein linkshändiger Teilchenpartner existiert und andersherum. Gleiches gilt für Antiteilchen.

Zur besseren Vorstellung der Spiegelung (Raumspiegelung entlang der Horizontalen) lässt sich ein simples Beispiel aus dem Alltag anführen. Denn beim Blick in den Spiegel wird die eigene, rechte Hand zur linken Hand des Spiegelbildes. Ohne den Spiegel jedoch können wir unsere rechte Hand nie so aussehen lassen wie unsere linke, selbst wenn wir sie in alle möglichen Richtungen wenden und sie aus verschiedenen Blickwinkeln betrachten [28].

4.2.3 Was bedeutet CP Symmetrie?

CP Symmetrie meint die Kombination von Ladungskonjugation und Parität. Somit liegt beim Anwenden der CP Symmetrie ein Spiegelbild vor, in dem die Materie durch Antimaterie ersetzt wird. Würde die CP Symmetrie auf unser Universum angewendet werden, so sähe das neue Universum genauso aus wie unser und würde sich auch ebenso verhalten [27].

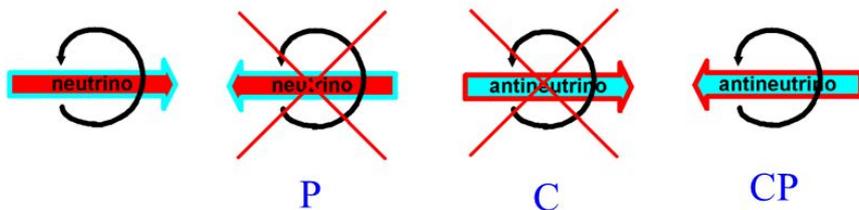
4.2.4 Verletzung der C Symmetrie

Eine Verletzung der C Symmetrie ist notwendig, damit Reaktionen, die mehr Baryonen als Antibaryonen erzeugen, nicht durch Umkehrreaktionen, bei denen mehr Antibaryonen als Baryonen entstehen, ausgeglichen werden [29].

Teilchen, die nach derzeitigem Wissensstand immer die C Symmetrie verletzen, sind Neutrinos und Antineutrinos. Dies liegt daran, dass alle Neutrinos, die bislang nachgewiesen werden konnten, linkshändig sind und alle Antineutrinos rechtshändig. Problematisch hieran ist, dass es, wenn die C Symmetrie erhalten

sein soll, auch linkshändige Antineutrinos sowie rechtshändige Neutrinos geben müsste, da die C Symmetrie vorschreibt, dass für jedes rechtshändige Teilchen auch ein rechtshändiges Antiteilchen existieren muss. Gleiches gilt für linkshändige Teilchen. Da die Wahrscheinlichkeit, dass rechtshändige Neutrinos und linkshändige Antineutrinos existieren und bisher nur noch nicht nachgewiesen werden konnten, sehr gering ist, gehen Wissenschaftler davon aus, dass hier eine Verletzung der C Symmetrie vorliegt ([A] S.91) ([1] S.14). Allerdings reicht die Anzahl der die C Symmetrie verletzenden Vorgänge bislang jedoch nicht aus, um die Asymmetrie zu erklären.

Neutrinos und Antineutrinos



Bei Neutrinos sind P und C „maximal verletzt“ aber die kombinierte PC Symmetrie ist erhalten:

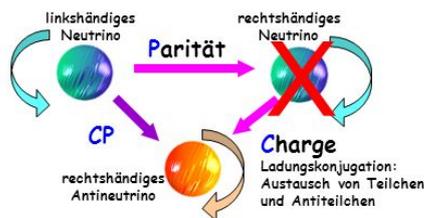


Abbildung 4: Neutrinos unter C, P und CP Symmetrie

Darüber hinaus verletzen Neutrinos allerdings auch die P Symmetrie, da hier gilt, dass es zu jedem linkshändigen Neutrino auch ein rechtshändiges geben müsste, was jedoch nicht der Fall ist. Kombiniert man hingegen C und P Symmetrie, so erfüllt das Neutrino alle Kriterien ([A] S.91).

4.2.5 Verletzung der CP Symmetrie

Eine Verletzung der CP Symmetrie ist notwendig, damit eine Reaktion mehr Materie als Antimaterie erschafft ([1] S.20).

Doch bei welchen Teilchen ist die Suche nach einer CP Verletzung erfolgsversprechend?

1964 kamen die amerikanischen Physiker [James Cronin](#), James Christenson, René Turlay und [Val Fitch](#) zu dem Schluss, dass man ein Teilchen untersuchen müsse, das sich aus einem Materieteil und einem Antimaterieteil zusammensetzt [32]. Somit boten sich die K-Mesonen¹⁰ (Kaonen) an, da diese sowohl aus einem Quark als auch aus einem Antiquark bestehen [11] und tatsächlich konnten die Physiker in einem Experiment zur Betrachtung des Zerfalls neutraler Kaonen (K^0) eine geringe Verletzung der CP Symmetrie nachweisen [9]. Wie jedoch ist dies möglich?

Neutrale Kaonen setzen sich aus einem Down-Quark und einem Antistrange-Quark zusammen, das neutrale Antikaon hingegen aus einem Antidown-Quark und einem Strange-Quark [11]. Das besondere an diesen Teilchen ist, dass sie ständig ineinander übergehen, also ein Kaon zu einem Antikaon wird und umgekehrt (Oszillation) [33]. Diese Oszillation wiederum führt dazu, dass die neutralen Kaonen eine unterschiedliche Lebensdauer aufweisen, welche sich um den Faktor 600 unterscheidet, und zusätzlich je nach Lebensdauer auf zwei verschiedene Weisen zerfallen [32]. Der eine Zerfallskanal weist als Endzustand zwei Pionen¹¹ mit dem CP Eigenwert +1 auf, der andere Zerfallskanal hingegen drei Pionen, was dem CP Eigenwert von -1 entspricht. Wenn man diese CP Eigenwerte mit denen der Kaonen vergleicht, so kann man voraussagen, welches Kaon wie zerfällt. Wie jedoch sehen die CP-Eigenzustände der langlebigen (K_L^0)¹² bzw. kurzlebigen (K_S^0)¹³ Kaonen aus?

$$1) \quad CP |\bar{d} K_L^0\rangle = -|\bar{d} K_L^0\rangle$$

$$2) \quad CP |\bar{d} K_S^0\rangle = +|\bar{d} K_S^0\rangle$$

¹⁰ Meson: Teilchen, das sich aus einem Quark und einem Antiquark zusammensetzt [12]

¹¹ π -Meson

¹² L steht für „long-lived“ (langlebig)

¹³ S steht für „short-lived“ (kurzlebig)

Somit ergibt sich, wenn man die CP Eigenwerte der Pionen und Kaonen betrachtet, dass langlebige Kaonen, falls die CP Symmetrie erhalten bleibt, nur in drei Pionen zerfallen können und kurzlebige nur in zwei [9].

Um nun in einem Experiment zu überprüfen, ob die CP Symmetrie verletzt wird, haben die vier Physiker am Brookhaven National Laboratory [9] neutrale Kaonen erzeugt und deren Zerfall mit Hilfe eines Detektors nachvollzogen. Damit ein eindeutiges Ergebnis herauskommt, wurde hierbei nur der Zerfall der langlebigen Kaonen untersucht. Dies wurde dadurch erreicht, dass der Detektor so weit von der Erzeugungsquelle weggestellt wurde, dass nur die langlebigen Kaonen ihn erreichen konnten, weil die kurzlebigen bereits vor dem Erreichen in Pionen zerfallen waren. Der beobachtete Zerfall ergab, dass die langlebigen Kaonen, welche eigentlich nur in drei Pionen zerfallen dürften, in 0,2% der Fälle in zwei Pionen zerfallen sind, weshalb hier eine Verletzung der CP Symmetrie vorliegt [32].

Diese 0,2% reichen jedoch ebenfalls nicht aus, um die Asymmetrie zu erklären und es werden weitere Experimente folgen müssen, bis die Anzahl der beobachteten Verletzungen ausreicht, um die zweite Bedingung zu erfüllen [27].

4.3 Thermodynamisches Ungleichgewicht

Ein System – in diesem Fall unser Universum – befindet sich in einem Zustand thermodynamischen Gleichgewichts, wenn innerhalb des Systems kein Energieaustausch stattfindet. Dies trifft jedoch nicht auf die entscheidende Phase des Universums zu, da das Universum zu dem Zeitpunkt expandierte, als Folge dessen abkühlte und es somit zu einem beständigen Energieaustausch kam [27]. Dementsprechend befand sich das Universum in einem thermodynamischen Ungleichgewicht und die dritte Bedingung Sakharovs ist erfüllt.

Doch warum ist diese Bedingung überhaupt notwendig?

In einem System, das sich im thermodynamischen Gleichgewicht befindet, laufen Reaktionen und deren Umkehrreaktionen im selben Maße ab. Deshalb würden alle Reaktionen, die für die Entstehung einer Asymmetrie sorgen würden, durch die entsprechenden Umkehrreaktionen aufgehoben werden. Folglich war das Vorhandensein eines thermodynamischen Ungleichgewichts in der Frühphase des

Universums zwingend nötig, um die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie entstehen zu lassen [33].

5 Resümée und Ausblick

Zusammenfassend ergibt sich, dass das erste Sakharov Kriterium bisher nicht bestätigt werden konnte, das zweite in nicht ausreichendem Maße beobachtet wurde und das dritte Kriterium vollständig erfüllt ist. Somit reichen die bisherigen Forschungsergebnisse nicht aus, um die Asymmetrie in diesem Ausmaß zu begründen, weshalb sich aktuelle Forschungsprojekte darum bemühen, die Lücke zu schließen.

So konnte z.B. durch den Bau von sogenannten B-Fabriken¹⁴, wie dem Teilchenbeschleuniger am SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) in den USA oder dem 2018 in Kraft getretenem Teilchenbeschleuniger SuperKEKB in Japan, 2004 erstmals eine CP Verletzung durch B-Mesonen nachgewiesen werden [21] [22]. Um die Ausmaße der Verletzung nachzuweisen, wird dazu bis heute an Teilchenbeschleunigern wie dem SuperKEKB geforscht [21].

Parallel zu der Forschung an B-Mesonen in Japan forschte der LHC in Genf in dem LHCb genannten Projekt nicht nur an einer CP Verletzung durch B-Mesonen sondern auch an einer derartigen Verletzung durch D-Mesonen [25]. Indem der gesamte bis 2018 gesammelte Datensatz analysiert wurde, konnte festgestellt werden, dass auch D-Mesonen die CP Symmetrie verletzen und es laufen aktuell weitere Experimente, um diese Entdeckung genauer zu erforschen [31].

Ein weiterer, vielversprechender Weg, um eine Antwort auf die Frage zu finden, warum die Asymmetrie entstanden ist, liegt für viele Wissenschaftler in der Erforschung der Gravitationswellen [27]. Diese wurden von Albert Einstein bereits 1915 im Zuge der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt, konnten jedoch erst 2015 nachgewiesen werden [3]. Indem man diese Gravitationswellen untersucht, erhofft man sich wie im Falle der kosmischen Hintergrundstrahlung, Informationen über die Zeit kurz nach dem Urknall zu bekommen und somit besser verstehen zu können, welche damaligen physikalischen Prozesse zu der Asymmetrie geführt haben, welche wir heute im Universum beobachten [27].

¹⁴ Teilchenbeschleuniger, die auf die Produktion von B-Mesonen ausgerichtet sind [21]

Alles in allem lässt sich sagen, dass es noch viele weitere Experimente und Berechnungen braucht, bis wir uns der Antwort auf die Frage nach der Asymmetrie nähern können und dass wir bis jetzt nur einen kleinen Teilbereich ergründen konnten.

6 Anhang

6.1 Quellenverweise

Literatur:

- [A] Quinn, Helen R./Witherell, Michael S.: Die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie. In: Spektrum der Wissenschaft, 12/1998, S.91
- [B] Schäfer, Björn Malte: Wo ist bloß die Energie geblieben. In: Spektrum der Wissenschaft Kompakt, 04/2017, S.29

Internet¹⁵:

Websites

- [1] Home|CERN – Violation of Particle Anti-Particle Symmetry S.14, 20
11.08.2004 (Abruf: 17.02.2024)
- https://indico.cern.ch/event/417891/attachments/864978/1210589/CP_violation_1_new.pdf
- [2] LEIFiPhysik – Energiebilanz beim Beta-Plus-Zerfall
(Abruf: 18.02.2024)
- <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/radioaktivitaet-fortfuehrung/grundwissen/energiebilanz-beim-beta-plus-zerfall>
- [3] Max-Planck-Gesellschaft – Gravitationswellen 100 Jahre nach Einsteins Vorhersage entdeckt
11.02.2016 (Abruf: 24.02.2024)
- <https://www.mpg.de/9972086/gravitationswellen-entdeckung>
- [4] Medizin-Physik-Wiki – Paarbildung
(Abruf: 10.02.2024)
- <https://medizinphysik.wiki/glossar/paarbildung/#:~:text=Wechselwirkun>

¹⁵ Wenn kein Autor oder der Stand angegeben sind, so sind diese Daten unbekannt.

g%20eines%20Photons%20mit%20dem,Elektron%2DPositron%2DPaar
%20%C3%BCbertragen

- [5] Spektrum der Wissenschaft – Annihilation
(Abruf: 06.02.2024)
<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/annihilation/553>
- [6] Spektrum der Wissenschaft (Dr. Müller, Andreas) – Antimaterie
(Abruf: 04.02.2024)
<https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/antimaterie/16#:~:text=Antimaterie%20besteht%20aus%20Antiteilchen.,wie%20Farbladung%20und%20schwache%20Hyperladung>
- [7] Spektrum der Wissenschaft – Baryogenese
(Abruf: 11.02.2024)
<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/baryogenese/1271>
- [8] Spektrum der Wissenschaft – Baryonenzahl
(Abruf: 14.02.2024)
<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/baryonenzahl/1273>
- [9] Spektrum der Wissenschaft – CP-Verletzung
(Abruf: 14.02.2024)
<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/cp-verletzung/2615>
- [10] Spektrum der Wissenschaft (Dr. Müller, Andreas) – Hintergrundstrahlung
(Abruf: 10.02.2024)
<https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/hintergrundstrahlung/179>
- [11] Spektrum der Wissenschaft (Dr. Müller, Andreas) – Kaonen
(Abruf: 19.02.2024)
<https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/kaonen/213>
- [12] Spektrum der Wissenschaft – Mesonen

(Abruf: 16.02.2024)

<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/mesonen/9623>

- [13] Spektrum der Wissenschaft (Dr. Müller, Andreas) – Neutrino

(Abruf: 20.02.2024)

<https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/neutrino/309>

- [14] Spektrum der Wissenschaft (Castelvecchi, Davide) – Neutronenzerfall:

Doppelt so genau, aber genau so rätselhaft

20.10.2021 (Abruf: 14.02.2024)

<https://www.spektrum.de/news/neutronenzerfall-doppelt-so-genau-aber-genau-so-raetselhaft/1938136>

- [15] Spektrum der Wissenschaft – Paarbildung

(Abruf: 10.02.2024)

<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/paarbildung/10835>

- [16] Spektrum der Wissenschaft – Parität

(Abruf: 17.02.2024)

<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/paritaet/10923>

- [17] Spektrum der Wissenschaft – Protonenzerfall

(Abruf: 15.02.2024)

<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/protonenzerfall/11702>

- [18] Spektrum der Wissenschaft – Spin

(Abruf: 20.02.2024)

<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/spin/62715>

- [19] Welt der Physik (Konitzer, Franziska) – Materie und Antimaterie im Vergleich

01.09.2016 (Abruf: 24.01.2024)

<https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/antimaterie/materie-und-antimaterie-im-vergleich/>

- [20] Wikipedia – Antimaterie
08.01.2024 (Abruf: 05.02.2024)
<https://de.wikipedia.org/wiki/Antimaterie>
- [21] Wikipedia – B-Fabrik
12.10.2023 (Abruf: 21.02.2024)
<https://de.wikipedia.org/wiki/B-Fabrik>
- [22] Wikipedia – CP-Verletzung
06.12.2023 (Abruf: 21.02.2024)
<https://de.wikipedia.org/wiki/CP-Verletzung>
- [23] Wikipedia – Eichboson
11.06.2021 (Abruf: 21.02.2024)
<https://de.wikipedia.org/wiki/Eichboson>
- [24] Wikipedia – Ladungskonjugation
12.02.2023 (Abruf: 13.02.2024)
<https://de.wikipedia.org/wiki/Ladungskonjugation>
- [25] Wikipedia – LHCb
01.11.2023 (Abruf: 23.02.2024)
<https://de.wikipedia.org/wiki/LHCb>

Videos

- [26] 100 Sekunden Physik – Antimaterie
17.12.2017 (Abruf: 05.02.2024)
<https://www.youtube.com/watch?v=JPZNBzDfDfU>

- [27] Arvin Ash – The Baryogenesis Anomaly: What happened to all the Antimatter?
25.07.2021 (Abruf: 10.02.2024)
https://www.youtube.com/watch?v=h9d_HimHmG0
- [28] History of the Universe – Why Is The Universe Out Of Balance?
10.11.2021 (Abruf: 05.02.2024)
https://www.youtube.com/watch?v=I2_gYIxpHZE
- [29] Pretty Much Physics – Sakharov Conditions|Where is all the Antimatter?
08.03.2020 (Abruf: 10.02.2024)
<https://www.youtube.com/watch?v=PSIMJ8Wf5eo>
- [30] Science Ready – Particle and Antiparticle Annihilation
28.07.2022 (Abruf: 06.02.2024)
<https://www.youtube.com/watch?v=AHqRXbCaZNw>
- [31] The Royal Institution – Why is There More Matter Than Antimatter in the Universe?
14.11.2019 (Abruf: 12.02.2024)
<https://www.youtube.com/watch?v=6ZuMjNh3WuY>
- [32] Urknall, Weltall und das Leben (Josef M. Gaßner) – CPT Symmetrie
16.08.2019 (Abruf: 19.02.2024)
<https://www.youtube.com/watch?v=sq4ILsJcwfM>
- [33] Urknall, Weltall und das Leben (Josef M. Gaßner) – Erste Sekunde nach dem Urknall
31.03.2022 (Abruf: 08.02.2024)
<https://www.youtube.com/watch?v=646alThzRhE>

Abbildungen:

Deckblatt: Logo GGB

<https://www.greselius.de/wir-stellen-uns-vor/unser-logo>

Abbildung 1: Schalenmodell Wasserstoff

<https://www.sps-lehrgang.de/atommodelle/>

Abbildung 2: Annihilation eines Elektron-Positron-Paars

<https://images.app.goo.gl/f41JC9zX4wq26ygK6>

Abbildung 3: Erzeugung eines Elektron-Positron-Paars

<https://medizinphysik.wiki/grundlagen/wechselwirkung-der-materie/#Paarbildung>

Abbildung 4: Neutrinos unter C, P und CP Symmetrie

<https://slideplayer.org/slide/917197/>

6.2 Erklärungen

Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbst angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken (auch aus dem Internet) entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe. Verwendete Informationen aus dem Internet sind nach Absprache mit dem Fachlehrer vollständig im Ausdruck zur Verfügung zu stellen.

Bramsche, den

Unterschrift der Schülerin

Veröffentlichung

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Bramsche, den

Unterschrift der Schülerin