

M
U

Jahrgang 42
Heft
Juni 1989

4

Mathematik

Physik

Der
mathematische
und
naturwissenschaftliche
Unterricht

Biologie

Chemie

 DÜMMLER

Über den Ursprung optischer Aktivität

Verfasser: Dr. Markus Eiswirth, z. Z. Stanford University, Chemical Department, Stanford CA, USA; Reg.-Rat Dr. Robert J. Schwankner, Bayer. Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, 8000 München 81; cd. Dipl.-Chem. Patrizia Mikulcik, Destouchesstraße 60, 8000 München 40

Neuere Vorstellungen zum Ursprung optischer Aktivität werden diskutiert. Phänomene der schwachen Wechselwirkung (z. B. natürliche β -Aktivität) werden als mögliche Ursache eines präbiotischen Weges zur homochiralen Biochemie vorgestellt.

»God made the laws only nearly symmetrical so that we should not be jealous of His perfection.«

(Richard Feynman)

1 Aus der Kinderstube der Stereochemie

Im Frühjahr 1848 beschäftigte sich L. PASTEUR mit der Kristallstruktur des Ammonium-natrium-tartrats, einem Weinsäuresalz, das in zwei Konfigurationen – D und L – kristallisiert, wie wir heute wissen. Was er fand, war ein Gemisch zweier Kristallsorten, die einander wie Bild und Spiegelbild gleichen. Unter Zuhilfenahme von Lupe und Pinzette trennte er das Kristallgemisch mechanisch in zwei Häufchen »rechts- und linkshändiger« Kristalle, die nach Auflösen in Wasser die Ebene des linear polarisierten Lichtes um genau den gleichen Betrag in entgegengesetzter Richtung drehen, während das ursprüngliche Gemisch (»Pasteurs Starthausen«) optisch inaktiv war.

Mit diesen Beobachtungen legte PASTEUR, der – nebenbei bemerkt – am Collège von Besançon sein Baccalauréat ès sciences in Chemie mit der Beurteilung »médiocre« – mittelmäßig – bestanden hatte, die Grundlage der Stereochemie.

Die Problematik der Spiegelsymmetrie beschränkt sich nicht nur auf den mikroskopischen Bereich, sondern durchzieht die gesamte Natur. Einen Exkurs in die Zoologie zeigt Abbildung 1. Fast alle natürlich vorkommenden Schneckenhäuser sind rechtsgewunden.



Abb. 1. Linksgewundene Schneckenhäuser treten als Ergebnis spontaner Mutation (1:10 000) auf – ein Beispiel natürlicher Verteilungsasymmetrie chiraler Objekte

Linksgewundene treten etwa im Verhältnis 1:10 000 als Ergebnis spontaner Mutation auf. Aus anatomischen Gründen können sich nur gleichartige, nicht aber zueinander symmetrische Individuen paaren. Somit ist die Fortpflanzung linksgewundener Spezies praktisch auszuschließen. Es liegt also eine Verteilungsasymmetrie zweier grundsätzlicher Möglichkeiten vor.

Verstärkt wandte man sich nach der Pasteurschen Entdeckung dem detaillierten räumlichen Aufbau der Moleküle zu. Nach J. H. VAN'T HOFF (1874) ist das tetraedrische Kohlenstoffatom sowohl für das Fehlen von Isomeren bei den Summenformeln CH_2YZ als auch für das Auftreten von Spiegelbildisomeren – Enantiomeren – verantwortlich, was z. B. bei PASTEURS Weinsäuresalzen der Fall war.

A. COTTON versuchte darauf mit Hilfe von zirkular polarisiertem Licht optisch aktive Stoffe direkt aus inaktiven Edukten zu synthetisieren [1] und beobachtete ein unterschiedliches Absorptionsvermögen für rechts bzw. links zirkular polarisiertes Licht (Zirkulardichroismus) optisch aktiver Stoffe. Er folgerte daraus die Möglichkeit, durch destruktive Radiolyse von Racematen (mit zirkular polarisiertem Licht) die eine der beiden Formen selektiv zerstören zu können, um eine relative Anreicherung eines Antipoden zu erzielen.

Eine geringfügige radiogen induzierte Diskriminierung eines Antipoden stellten W. KUHN und Mitarbeiter 1929 an α -Brompropionsäureethylester, $\text{H}_3\text{C}-\text{HCBBr}-\text{COOC}_2\text{H}_5$, und später – in verstärkter Weise – am α -Azidopropionsäuredimethylamid, $\text{H}_3\text{C}-\text{HCN}_3-\text{CON}(\text{CH}_3)_2$, vor [2]. Jedoch sind die Unterschiede in den Ausbeuten dieser beiden durch die Einwirkung von zirkular polarisiertem UV-Licht asymmetrischen Synthesewege zu gering, um etwa ein technisches Verfahren zu etablieren. Ferner ist der Anteil an zirkularem Licht im natürlichen Tageslicht so klein, daß sich der wohl wichtigste photochemische Vorgang, die Assimilation, keiner Enantiomerer bedient: Chlorophyll und andere Assimilationspigmente sind optisch inaktiv.

Worin besteht aber nun der Grund, daß die Grundbausteine des Lebens, die Proteine, sich nahezu

ausschließlich aus L-konfigurierten Aminosäuren aufbauen? Auch bei der Verwendung von Zucker zeigt die Natur eine ausgeprägte Verteilungsasymmetrie, bevorzugt tritt hier die D-Form auf.

2 Spiegelungen

Grundlage der klassischen Physik sind die Erhaltungssätze der Energie, des Linear- und Drehimpulses, welche sich letztlich aus der Homogenität und Isotropie des physikalischen Raum-Zeit-Kontinuums ableiten lassen, d. h. u. a. daß die Naturgesetze nicht davon abhängen, welches spezielle Koordinatensystem zur Beschreibung der Vorgänge herangezogen wird.

Translation, Drehung und Verschiebung des Zeitnullpunktes gehören zu den kontinuierlichen Transformationen, sie können also in beliebigen kleinen Schritten ausgeführt werden. Im Gegensatz dazu stehen die diskontinuierlichen Transformationen, die »Spiegelungen«, bei welchen es ein Objekt und sein Spiegelbild gibt, aber keinen allmählichen Übergang zwischen beiden. Zu den Spiegelungen zählen

- Rauminversion: Operator i (Inversion, d. h. Vorzeichenänderung aller räumlichen Koordinaten)
- Zeitinversion: Operator T (Umkehrung des Bewegungsablaufes, d. h. alle Geschwindigkeiten und auch elektrische Ströme kehren ihr Vorzeichen um)
- Ladungsinversion: Operator C (bei der alle Ladungen einem Vorzeichenwechsel unterworfen werden).

In der Quantenphysik entspricht die Invarianz von Naturgesetzen gegenüber einer Raumspiegelung – Übergang eines rechtshändigen in ein linkshändiges Koordinatensystem – der sog. Paritätserhaltung.

Wie wirkt nun die Raumspiegelung (i) auf verschiedene Größen ein?

- Skalare wie z. B. Energie sind bezüglich der Inversion invariant.

- Polare Vektoren $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ wie Geschwindigkeit und

elektrisches Feld, die die Richtung im Raum fest-schreiben, werden unter Invertierung sämtlicher Koordinaten ihr Vorzeichen wechseln

$$i \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x \\ -y \\ -z \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}. \quad (1)$$

- Axiale Vektoren (a) – sie legen einen Drehsinn fest – reproduzieren sich, da sie aus dem Vektorprodukt zweier polarer Vektoren hervorgehen, z. B. Drehmoment, magnetisches Feld

$$a = P_1 \times P_2 \quad (2)$$

$$ia = (P_1 \times P_2) = iP_1 \times iP_2 = (-P_1) \times (-P_2) = a. \quad (2a)$$

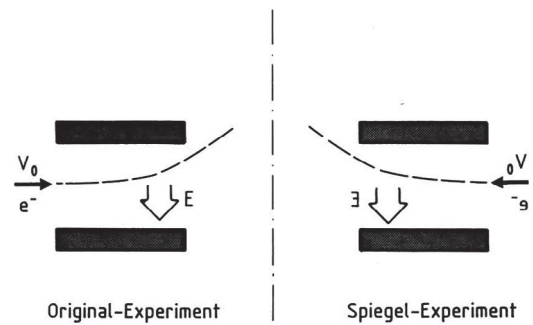


Abb. 2. Elektroneninjektion in ein homogenes elektrostatisches Feld. Dargestellt sind Bild- und Spiegelexperiment

Zustände, die bei Inversion ihr Vorzeichen beibehalten, sind von positiver (gerader), solche, bei denen es sich umkehrt, von negativer (ungerader) Parität. Da der Inversionsoperator (i) äquivalent zu einer Spiegelung und einer darauffolgenden Drehung um 180° ist, folgt aufgrund der bereits erwähnten Isotropie des Raumes bezüglich Drehungen, daß Paritätserhaltung nichts anderes als Invarianz bedeutet, d. h. das Spiegelbild eines physikalischen Prozesses muß ebenfalls einen möglichen Vorgang darstellen.

Abbildung 2 zeigt ein Elektron, das in ein homogenes elektrisches Feld mit der Anfangsgeschwindigkeit v_0 eintritt. Durch die elektrische Ladung resultiert eine parabelförmige Flugbahn, da das sich gleichförmig horizontal bewegende Elektron zusätzlich einer vertikalen Beschleunigung unterworfen ist. Die Spiegelung des Experimentes ändert das Ladungsvorzeichen nicht; in beiden Fällen zeigt sich gleichsinnige Ablenkung des Elektrons.

3 Materie/Antimaterie-Verteilungsasymmetrie

Der Operator der Ladungsinversion (C) überführt alle Teilchen in die zugehörigen Antiteilchen.

Bei strenger Gültigkeit von C besteht so z. B. kein Energieunterschied zwischen einem Elektron, das sich im elektrischen Feld eines Protons bewegt (Hydrogenium), und einem Positron im Feld eines Antiprotons (Positronium).

Im Fall der Bildung eines Elektron/Positron-Paares aus einem Photon (Paarbildung) ist es irrelevant, in welche der beiden Richtungen das Elektron fliegt. Für das Positron gilt v. v. dasselbe (Abb. 3). Die Gültigkeit von C zu allen Zeiten (dies sollte zu gleichen Anteilen Materie und Antimaterie im Universum geführt haben) läßt phantastische Spekulationen auf weit voneinander entfernte Antiwelten im All zu, wie sie z. B. in einem Gedicht von H. P. FURTH auf Versfüßen paarvernichtend aufeinander zustolpern:

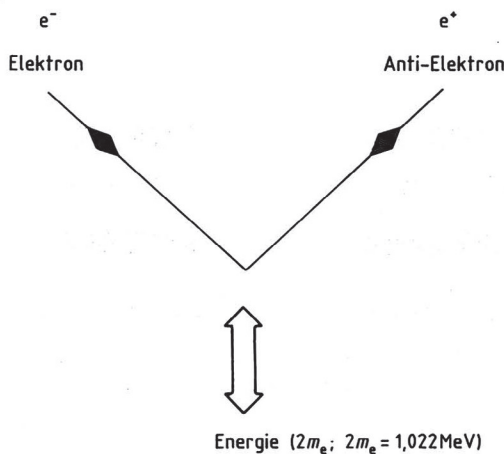


Abb. 3. Paarbildung und -vernichtung

*Perils of Modern Living
Well up beyond the tropostrata
There is a region stark and stellar
Where, on an streak of anti-matter
Lived Dr. Edward Anti-Teller.
Remote from Fusion's origin,
He lived unguessed and unawares
With all his antikith and kin.
And kept macassars on his chairs.
One morning idling by the sea,
He spied a tin of monstrous girth
That bore three letters: A. E. C.
Out stepped a visitor from Earth.
Then, shouting gladly o'er the sands,
Met two who in their alien ways
Were like as lentils. Their right hands
Clasped, and the rest was gamma rays.*

[25]

Es wurde lange Zeit angenommen, daß die drei Operatoren i , C und T ebenso wie die eingangs erwähnten kontinuierlichen Transformationen absoluten natürlichen Symmetrien entsprächen, mit anderen Worten, daß nach Invertierung sämtlicher Raumkoordinaten, Transformation von Teilchen in Antiteilchen oder Spiegelung der Zeitachse eine neue und erlaubte physikalische Welt entstünde. Folglich ist es unmöglich, eine absolute Definition von links und rechts bzw. Materie und Antimaterie anzugeben.

1956 wiesen T. D. LEE und C. N. YANG [3], veranlaßt durch experimentelle Befunde, darauf hin, daß schwache Wechselwirkungen, wozu z. B. die β -Umwandlungen zählen, nicht der Paritätserhaltung gehorchen. Auf Vorschlag von C. N. YANG führte C. S. WU [4] das berühmte Experiment durch, das die Annahme der Paritätsverletzung bestätigte. ^{60}Co -Kerne wurden bei niedrigen Temperaturen ent-

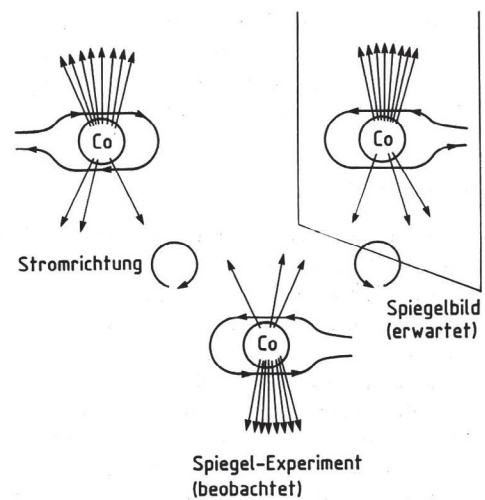
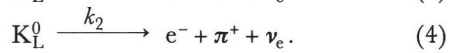
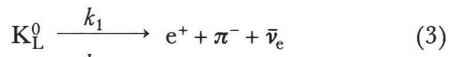


Abb. 4. Wu-Experiment zum Nachweis der Nichterhaltung der Parität; man beachte die Anisotropie der β -Emission (vgl. Text)

lang einer Achse durch ein magnetisches Feld (Spule) ausgerichtet. Die Emission von β -Teilchen erfolgt dann bevorzugt in einer Richtung, während das Spiegelbild nicht beobachtet wird (Abb. 4). Damit war der experimentelle Beleg der Paritätsverletzung bei der β -Umwandlung in Form einer Anisotropie der Elektronenemission erbracht. Außerdem wurde festgestellt, daß die Zerfallselektronen nicht ausgerichteter Kerne longitudinal polarisiert sind und sich (bevorzugt) wie linksgewundene Schrauben verhalten, d. h. ihr Spin (Eigendrehimpuls) ist antiparallel zu ihrem Impuls. Dagegen entstehen vorwiegend »rechtshändige« Teilchen bei β^+ -Zerfällen [24].

E. WIGNER schlug daher die Verknüpfung von Inversion i und Ladungskonjugation C zum sogen. PC-Theorem vor [5], weil deren kombinierte Anwendung wieder zu beobachtbaren physikalischen Zuständen führt, da diese Operation z. B. die Transformation von linkshändigen Elektronen in rechtshändige Positronen beim β -Zerfall bewirkt. Darüber hinaus wurde aufgrund sehr allgemeiner Annahmen (die bis heute niemand ernsthaft bezweifelt) gezeigt, daß die physikalischen Gesetze invariant sind bezüglich einer Kombination von Koordinaten-, Ladungs- und Zeitinversion (Schwinger-Lüders-Pauli- oder PCT-Theorem). CRONIN u. a. [6] entdeckten 1964 einen seltenen Zerfall einer neutralen K-Mesonenform (K_L^0), die in zwei verschiedenen Arten ablaufen kann.

Gleiche Teilchen zerfallen demnach mit Geschwindigkeitskonstanten k_1 und k_2 jeweils in drei Produkte, ein positiv (negativ) geladenes Pion, ein Elektron (Positron) sowie ein (Anti-)Elektronenneutrino. Die beiden Prozesse können durch kombinierte PC-Transformation ineinander überführt werden (das K_L ist sein eigenes Antiteilchen):



Exakte Gültigkeit des PC-Theorems verlangt, daß k_1 und k_2 (also beide Geschwindigkeitskonstanten) exakt gleich sind. Das Experiment ergab jedoch einen eindeutig größeren Wert für k_1 (etwa 0,5 Prozent!).

PC-Asymmetrie sowie die Existenz eines Zeitpfeils spielen eine wichtige Rolle in den Modellen des frühen Universums, besonders im Hinblick auf die Erklärung der Tatsache, daß nur ein verschwindender Bruchteil Antimaterie in dem bisher erforschten Teil des Kosmos aufgefunden wurde (Materie/Antimaterie-Verteilungsasymmetrie).

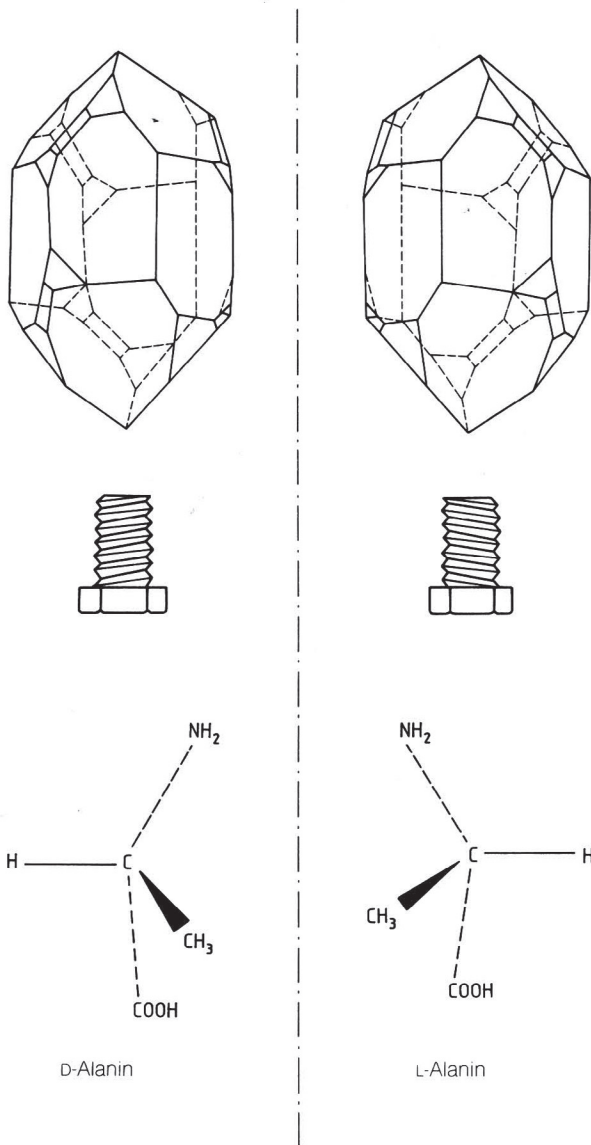


Abb. 5. Makroskopische und mikroskopische Chiralität; Schraube, Quarz, α -Aminosäure

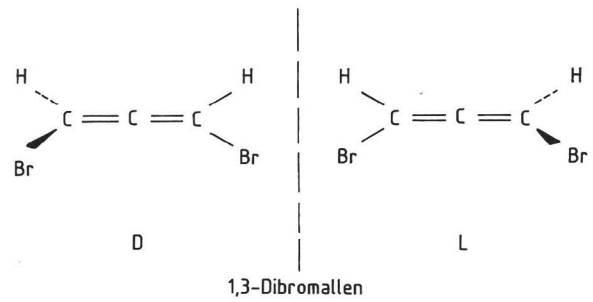


Abb. 6. Enantiomere von 1,3-Dibromallen; gestrichelte Bindungen weisen nach hinten, keilförmige nach vorn, die übrigen liegen in der Papierebene (vgl. Text)

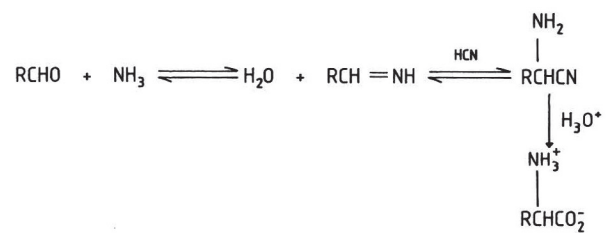


Abb. 7. Strecker-Synthese; ein möglicher präbiotischer Weg zu Aminosäuren im racemischen Urozean

Als exakte Symmetrie bleibt jedoch die gleichzeitige Anwendung aller 3 Operatoren (PCT-Invarianz) erhalten.

4 Asymmetrie in Biomolekülen

Objekte, die sich nicht mit ihrem Spiegelbild zur Deckung bringen lassen, werden mit Lord KELVIN (1893) chiral genannt (Abb. 5). Chiralität tritt dann auf, wenn die betrachtete Struktur keine Spiegelebene, kein Symmetriezentrum und keine Drehspiegelachse besitzt. Dagegen kann ein Objekt Drehachsen besitzen und trotzdem chiral (also nicht deckungsgleich mit seinem Spiegelbild) sein. Ein chemisches Beispiel stellen entsprechend substituierte Allenderivate dar (Abb. 6). Das gezeigte Molekül weist eine C_2 -Achse (Rotation um 180°) auf, die durch das mittlere C-Atom verläuft. Man kann jedoch anhand von Abbildung 6 oder eines Modells leicht erkennen, daß Bild und Spiegelbild nicht deckungsgleich sind, also Enantiomere vorliegen. (Es soll darauf hingewiesen werden, daß der Begriff dissymmetrisch meist in gleicher Bedeutung wie chiral gebraucht wird. Als asymmetrisch hingegen werden solche Objekte bezeichnet, die überhaupt keine Symmetrieelemente, also auch keine Drehachse, besitzen.)

Die Synthese chiraler aus achiralen Molekülen (eine wichtige Zugangsmöglichkeit ist die Strecker-Synthese von α -Aminosäuren, Abb. 7) wird normalerweise bei Abwesenheit von chiralen Einflüssen immer

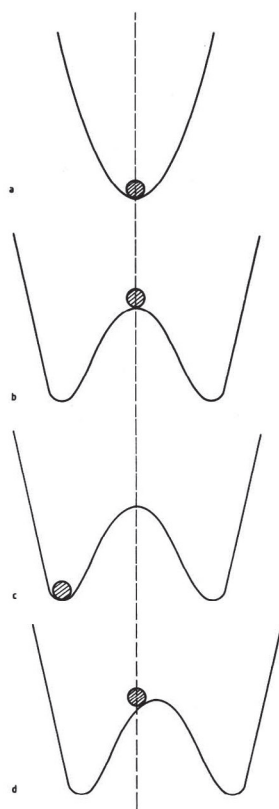


Abb. 8. Modell für den Zugang zur homochiralen Biochemie (L-Aminosäuren; D-Zucker, vgl. Text)

zu einem 1:1-Gemisch zweier möglicher Konfigurationen, dem Racemat führen.

Die Situation in lebenden Organismen ist aber eine ganz andere als im hypothetischen Urozean, welcher zunächst Aminosäuren in racemischen Gemisch gelöst enthielt. Die Proteine als Basiselement des Lebens bestehen überwiegend aus α -Aminosäureketten mit L-Konfiguration. Es sei nochmals in Erinnerung gerufen, daß die optisch aktiven Enantiomere die Ebene des linear polarisierten Lichts um denselben Winkel in entgegengesetzte Richtung drehen, und sich im Racemat die Effekte intermolekular auslöschen, eine Nettodrehung also nicht beobachtet wird. Die Frage nach dem Grund des Überhanges einer Form z. B. L-Aminosäuren und D-Zucker in der Natur stellt gleichsam die Frage nach dem Ursprung der optischen Aktivität. (Interessant ist in diesem Zusammenhang, daß sich die wenigen natürlich vorkommenden D-Aminosäuren oft als Konstituenten von Antibiotika erwiesen haben.) Die Situation läßt sich nun grob mit Darstellung in Abbildung 8 vergleichen: 8a ist absolut symmetrisch und stabil. 8b dokumentiert zwar noch dieselbe Symmetrie, doch wird die Kugel in diesem metastabilen Zustand nicht lange verweilen und zwangsläufig in eine der beiden Mulden rollen, -

es genügt hierzu nur ein Windhauch - so daß die anfängliche Symmetrie verletzt wird (Abb. 8c).

Dieser »Windhauch« kann aufgrund verschiedener Gründe die bestehende Verteilungssymmetrie eingeleitet haben. Dem heutigen Kenntnisstand zufolge lassen sich drei Theorien formulieren:

a) Die erste besteht in der Annahme einer rein zufälligen, präbiotischen Auswahl eines optischen Isomeren, in dem winzige Fluktuationen die Asymmetrie induzieren. Dieses Konzept des »Urahn der Symmetrie« [7] betrachtet die Auswahl der Antipoden als gleich wahrscheinlich, legt aber Mechanismen zugrunde, die stochastischer Ableitungen bedürfen, auf welche aber hier nicht näher eingegangen werden soll.

b) Die zweite Hypothese fußt auf thermodynamischen Gesichtspunkten. Generell werden links- und rechtshändige Enantiomere eines chiralen Moleküls als isoenergetisch betrachtet; jedoch trägt die paritätsverletzende schwache Wechselwirkung geringfügig zur Gesamtenergie des chiralen Moleküls bei. Dieser Beitrag ist für jedes Enantiomer gleich groß, aber aufgrund der Dissymmetrie der schwachen Wechselwirkung für das eine negativ, für das andere positiv. Diese - winzige - paritätsverletzende Energiedifferenz könnte bei chemischen Prozessen zur Bevorzugung eines der beiden Enantiomeren geführt haben, was über Zeitalter hinweg zur Selektion einer Homochiralität beigetragen haben mag (Abb. 8d). Obwohl die (paritätsverletzenden) Energieunterschiede vernachlässigbar klein erscheinen, - sie liegen für kleine Moleküle in der Größenordnung $\sim 10^{-38}$ J - reichen sie aus, um in einem racemischen Gemisch (z. B. dem präbiotischen Ozean) einen Überhang des bevorzugten Enantiomeren zu erzeugen. Jüngsten Studien zufolge genügt unter präbiotischen Bedingungen ein See mit einem Volumen von $4 \cdot 10^6$ m³ und ein Mindestzeitraum von 10 000 a zur Selektion einer Homochiralität [8].

Der Ausgangszustand beinhaltet eine »echte« Bevorzugung eines Antipoden. Er ist aufgrund mikroskopischer Energiedifferenzen nicht mehr absolut symmetrisch, und die weiteren Reaktionsverläufe in eine favorisierte Richtung sind somit evident (Abb. 8d).

c) Eine weitere Möglichkeit für die Diskriminierung eines Antipoden ist mit dem Einfluß der natürlichen β -Aktivität zu erklären, die früher noch deutlich größer war als heute.

Die longitudinal polarisierten β -Teilchen, d. h. ihr Spin ist parallel zur Impulsrichtung, verursachen zirkular polarisierte Bremsstrahlung [9], die mit einem der beiden Enantiomeren stärker wechselwirkt (Cotton-Effekt), somit stereoselektiv (photo-)chemische Reaktionen [10] induziert, was zum Überschuss einer Konfiguration im Urozean geführt haben mag.

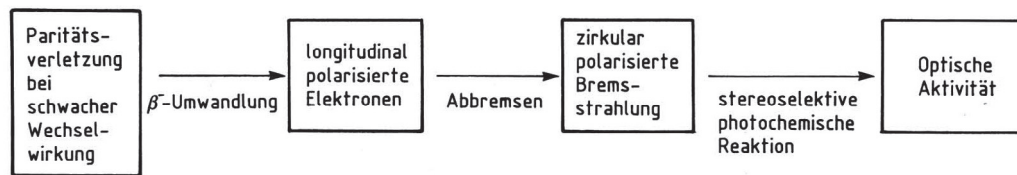


Abb. 9. Mögliche Einkoppelung der natürlichen β^- -Aktivität zur Generation nicht-racemischer präbiotischer Systeme (stereoselektiv destruiierende Radiolyse)

Das Modell der sog. Vester-Ulbricht-Hypothese [11] ist in Abbildung 9 dargestellt. Andere Autoren wiederum halten die zirkular polarisierte Bremsstrahlung für eine nur intermediäre Quelle der optischen Aktivität und legen direkt mit dem Enantiomeren in Wechselwirkung tretende polarisierte β -Teilchen zugrunde [12]. Es wurden in den letzten Jahren viele Versuche durchgeführt, optische Aktivität durch β -Strahlen zu induzieren [13, 22].

Den ersten Erfolg erzielte A. S. GARAY 1968 am System D- und L-Tyrosin: Die D-Form zerfiel unter Einwirkung von ^{90}Sr Strontiumionen als β -Quelle in wässriger Lösung schneller [13].

Seine Ergebnisse wurden jedoch angezweifelt [12], da jegliche Anstrengungen, das Experiment zu reproduzieren, bisher scheiterten.

W. BONNER beobachtete einen stereoselektiven Zerfall des D, L-Leucins, das er mit künstlich erzeugten, polarisierten Elektronen (Linearbeschleuniger: 120 keV) bestrahlte [15]. Mit linkshändigen Elektronen erhielt er eine Ausbeute von 1% Überschuss des L-Isomeren.

Um wieder auf die vereinfachte Darstellung von Abbildungen 8 und 9 zurückzukommen, war die »Händigkeit« der β -Strahlung im Rahmen dieses Modells weichenstellend für die Auslese zwischen zwei Enantiomeren, die sich wie Spiegelbilder zueinander verhalten und daher mit nicht zentrosymmetrischen Einflüssen der β -Strahlung (β^- bzw. β^+) unterschiedlich wechselwirken, wobei dies für ein Enantiomeres (L bzw. D) die selektive radiolytische Zersetzung bedeutete.

Somit könnte die im Materie-Universum dominierende β^- -Aktivität über Einführung der selektiven AS-Radiolyse (L > D) in die racemische Millersche Uruppe: [23, 20] eine Ursache auf dem präbiotischen Weg zur homochiralen Biochemie sein.

Literatur

- [1] A. COTTON: Recherches sur l'Absorption et la Dispersion de la Lumière par les Milieux Doués du Pouvoir Rotatoire. - Ann. Chim. et Phys. **8** (1896) 347-432.
- [2] W. KUHN - E. KNOPF: Darstellung optisch aktiver Stoffe mit Licht. - Z. phys. Chem. **7B** (1930) 293-310.
- [3] T. D. LEE - C. N. YANG: Question of Parity Conservation in weak interactions. - Phys. Rev. **104** (1956) 254-258.
- [4] C. S. WU - E. AMBLER - R. W. HAYWARD - D. D. HOPKES - R. P. HUDSON: Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay. - Phys. Rev. **105** (1957) 1413-1415.
- [5] E. WIGNER: Relativistic Invariance and Quantum Phenomena. - Rev. Mod. Phys. **29** (1957) 255-268.
- [6] J. H. MULEY: The Nature of Matter. - Oxford: Clarendon Press 1981.
- [7] H. FOLLMANN: Chemie und Biochemie der Evolution. - Heidelberg: Quelle und Meyer 1981.
- [8] D. K. KONDEPUDI - G. W. NELSON: Weak neutral currents and the origin of biomolecular chirality. - Nature **314** (1985) 438-441.
- [9] M. L. GOLDHABER - L. GRODZINS - M. L. SUNYAR: Evidence for Circular Polarization of Bremsstrahlung Produced by Beta Rays. - Phys. Rev. **106** (1957) 826-828.
- [10] O. BUCHARDT: Photochemistry with circularly Polarized Light. - Angew. Chem. (Int. Ed.) **13** (1974) 179-185.
- [11] T. L. V. ULBRICHT - F. VESTER: Attempts to Induce Optical Activity With Polarized β -Radiation. - Tetrahedron **18** (1962) 629-637.
- [12] B. NORDÉN: The Asymmetry of Life. - J. Mol. Evol. **11** (1978) 313-332.
- [13] A. S. GARAY: Origin and Role of Optical Isomery in Life. - Nature **219** (1968) 338-340.
- [14] W. A. BONNER: Experiments on the Origin of Molecular Chirality by Parity Non-Conservation during β -Decay. - J. Mol. Evol. **4** (1974) 23-39.
- [15] W. A. BONNER - M. A. VAN DORT - M. R. YEARIGAN: Asymmetry degradation of D,L-leucine with longitudinally polarised electrons. - Nature **258** (1975) 419-421.
- [16] W. DARGE - I. LARZKÓ - W. THIEMANN: Stereoselectivity of β -irradiation of D,L-tryptophan in aqueous solution. - Nature **261** (1976) 522-524.
- [17] W. A. BONNER - R. M. LEMMON - H. P. NOYES: β -Radiolysis of Crystalline ^{14}C -Labeled Amino Acids. - Org. Chem. **43** (1978) 522/3.
- [18] W. A. BONNER - R. M. LEMMON: Radiolysis, Racemization and the Origin of Optical Activity. - Bioorganic Chem. **7** (1978) 175-187.
- [19] R. J. SCHWANKNER: Laseranwendungen in der Experimentalchemie. - München: Carl Hanser 1978.
- [20] G. SEXTL - R. J. SCHWANKNER - M. EISWIRTH: Abiogene Bildung von Aminosäuren. - Biuz **10** (1980) 23-28.
- [21] W. A. BONNER - N. E. BLAIR: Attempted asymmetric radiolysis of D,L-tryptophan with ^{32}P β -radiation. - Nature **281** (1979) 150/1.
- [22] W. RAHMANN: Die Entstehung des Lebendigen. - Stuttgart: Gustav Fischer 1980.
- [23] S. L. MILLER: Production of Some Organic Compounds under Possible Primitive Earth Conditions. - J. Am. Chem. Soc. **77** (1955) 2351-2361.
- [24] C. S. WU: Parity Experiments in Beta Decays. - Rev. Mod. Phys. **31** (1959) 783/4.
- [25] M. GARDNER: Das gespiegelte Universum. - Braunschweig: Vieweg 1967. □