

Zeitschrift: Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles = Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg
Herausgeber: Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles
Band: 91 (2002)

Artikel: Was kann die dritte Teilchengeneration von der zweiten lernen?
Autor: Schaller, Lukas A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-308828>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 29.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Was kann die dritte Teilchengeneration von der zweiten lernen?

Lukas A. SCHALLER

1. Teilchen und Wechselwirkungen

Das fast "unendlich" Kleine und das fast "unendlich" Grosse sind über Teilchenphysik und Kosmologie miteinander sehr eng verbunden, wie Fig. 1 andeuten soll. Ausgehend vom Menschen ($\sim 1\text{m}$) erreichen wir auf der rechten Bildhälfte, indem wir zu immer kleineren Dimensionen vorstossen, über Zellen und DNA-Ketten Moleküle und Atome (10^{-10} m), Kerne und deren Nukleonen (10^{-13} m) und schliesslich Quarks und Leptonen ($< 10^{-18}\text{ m}$). Auf der linken Bildhälfte dagegen gelangen wir über die Erde (10^7 m), unser Sonnensystem und die Galaxien zu immer grösseren Dimensionen (heutige Ausdehnung des Universums 10^{26} m). Je länger aber das Licht braucht, bis es uns von den Sternen oder Galaxien her erreicht, je weiter weg sind diese Objekte von uns entfernt, und je kleiner war dann die Ausdehnung des Universums. Vor ca. 14 Mia. Jahren war die Energiedichte im Universum unendlich hoch, dessen Ausdehnung unendlich klein. Alles entstand aus dem "Big Bang", und sehr bald - d.h. nach weniger als 10^{-30} s ! - bildeten sich auch Quarks und Leptonen. Diese "Elementarteilchen" treffen wir aber auf der rechten Bildhälfte wiederum an, sodass sich damit der vom Menschen ausgehende Zyklus schliesst.

Die grundsätzliche Frage ist immer dieselbe, nämlich zu erforschen, "was unsere Welt im Innersten zusammenhält". Was bedeuten somit die praktisch punktförmigen Elementarteilchen, die Quarks und Leptonen, und was bewirken sie? Nach dem sog. Standardmodell, das heute immer noch fast allen "Angriffen" der Experimentalphysiker standhält, gibt es drei "Generationen", resp. "Familien" von Elementarteilchen. Uns am geläufigsten sind die Teilchen der ersten Generation, die "elementaren" Elektronen in der Atomhülle sowie die Atomkerne im Atomzentrum mit ihren Protonen und Neutronen. Letztere sind aus je drei "elementaren" Quarks, genannt "up" und "down", zusammengesetzt. Zum Elektron gehört auch noch das entsprechende Neutrino, das Elektronenneutrino. Die Teilchen

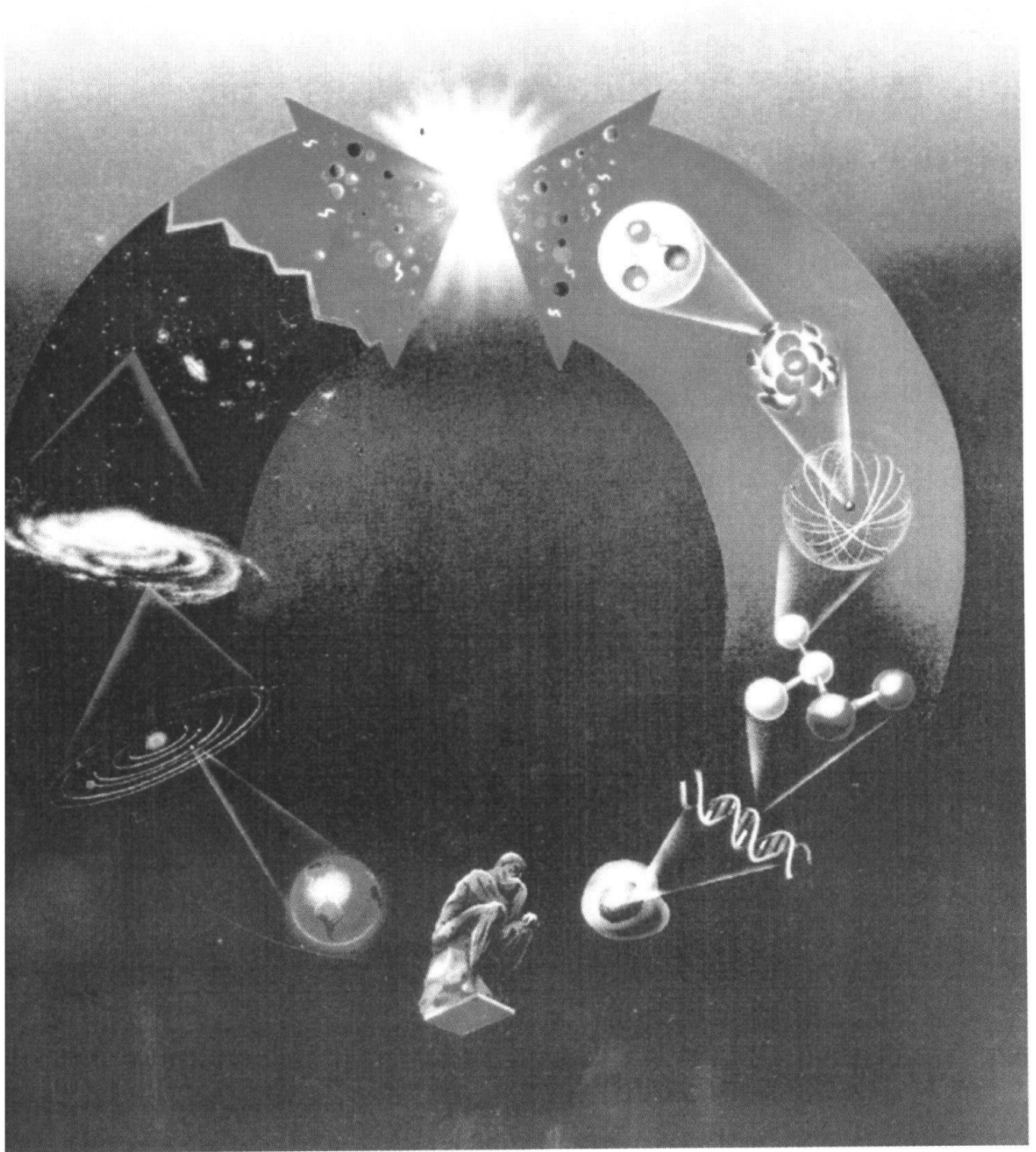


Fig. 1: Anschauliche Darstellung der engen Verbindung zwischen Teilchenphysik und Kosmologie

der zweiten Generation sind das "charmed" und das "strange" Quark, sowie das Myon und sein Neutrino. Zur dritten Generation gehören "top", resp. "truth" und "bottom", resp. "beauty" Quark, sowie das Tauon und sein Neutrino. Um Teilchen der 2. oder 3. Generation zu erzeugen, braucht es sehr hohe Energien. So ist z.B. die Masse des 1995 erstmals am Fermilab bei Chicago gefundenen Topquarks etwa gleich der Masse eines Goldkerns!

Zwischen all diesen Teilchen wirken vier Kräfte, resp. vier Wechselwirkungen. Es ist dies zunächst einmal die Schwerkraft. Diese ist aber wegen den sehr kleinen Massen aller Elementarteilchen in der Teilchenphysik im allgemeinen vernachlässigbar. Sie dominiert dafür umso mehr die Bewegungen der Planeten um die Sonne, ja das gesamte Gebiet der Astrophysik. Die uns nächstgeläufigste Kraft ist die elektromagnetische oder etwas populärer ausgedrückt die Coulombkraft. Jedermann weiss wohl noch, dass sich gleichnamige Ladungen abstoßen, ungleichnamige anziehen. Elektromagnetische Kräfte werden durch Photonen übertragen, zu denen auch das Licht gehört. In der Kern- und Teilchenphysik haben wir es aber nicht mit gewöhnlichem Licht zu tun, sondern mit elektromagnetischer Strahlung viel höherer Energie. Man redet dann von sog. Gammastrahlung. Viel weniger geläufig sind die zwei verbleibenden Kräfte, welche die "schwachen" und "starken" Wechselwirkungen ausmachen. Für die schwache Wechselwirkung ist z.B. der Betazerfall eines Atomkerns typisch, wo im wesentlichen ein Neutron in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino zerfällt. Die starke Wechselwirkung schliesslich manifestiert sich etwa beim α -Zerfall, fundamentaler noch zwischen den Quarks und deren "Austauschteilchen", den sog. "Gluonen".

2. Exotische Atome (Experimente der 2. Generation)

Ein "normales" Atom besteht bekanntlich aus einem Atomkern und den um ihn herumkreisenden Elektronen, wobei der Atomkern rund 10'000 mal kleiner ist als die Elektronenradien. Elektronen sind typische Elementarteilchen der 1. Generation. Wird jetzt eines dieser Elektronen durch ein schwereres Lepton, z.B. durch das 200 mal schwerere Myon, dem "schweren Elektron" der 2. Generation, ersetzt, so spricht man statt von einem "normalen" Atom von einem "exotischen" Atom, oder in diesem speziellen Fall von einem "myonischen" Atom (1). Ein solches Atom ist nicht stabil, sondern zerfällt mit einer Halbwertszeit, die beim myonischen Wasserstoff der Halbwertszeit des freien Myons entspricht ($2 \cdot 10^{-6} s$ oder $2 \mu s$),

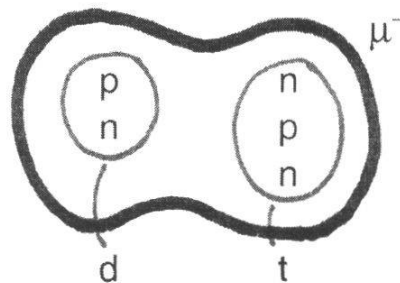
bei schweren myonischen Atomen aber nur noch bei rund $0.07\mu\text{s}$ liegt. Da die Bohr'schen Bahnen umgekehrt proportional den Massen des betreffenden Leptons sind, sind myonische Atome rund 200 mal kleiner als normale Atome. Diese Tatsache macht etwa myonische Atome oder Moleküle um Größenordnungen geeigneter als die Ende der 80er Jahre propagierte "kalte Fusion", resp. die ganz neu aufgekommene "Bubble Fusion" (2), um ernsthaft nach Energiegewinnung durch Fusion zu suchen.

Myonenkatalysierte Fusion (μCF)

In einem Wasserstoffgemisch (H,D,T) laufen die folgenden Reaktionen ab:



Im so gebildeten $d\mu t$ -Molekül



kommt das Myon so nahe an die Deuterium- und Tritiumkerne heran, dass die Fusionsreaktion $d\mu t \Rightarrow \mu^- + \alpha + n + 17.6 \text{ MeV}$ stattfinden kann.



Fig. 2: Myonenkatalysierte Fusion in Wasserstoffgemischen

Spezifisch kann die sog. "myonenkatalysierte Fusion" (μCF) in einem Wasserstoffgemisch zustandekommen, welches aus allen drei

Wasserstoffisotopen H, D und T besteht. Das Myon kann dabei ein Deuterium-Tritium Molekül bilden und die beiden Kerne derart nahe bringen, dass sie fusionieren (Fig.2). Das bei der exothermen Fusionsreaktion $d\mu t \rightarrow \mu^- + \alpha + n + 17.6 \text{ MeV}$ wiederum freiwerdende Myon kann dann weitere solche Fusionsreaktionen auslösen, bevor es über die schwache WW zerfällt, $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$. Unter optimalen Bedingungen können 200 mal 17.6 MeV oder 3.5 GeV Energie erzeugt werden. Leider reicht diese freiwerdende Energie noch nicht ganz aus, um die zur Herstellung eines Myons notwendige Energie zu kompensieren und damit einen Netto-Energiegewinn zu erreichen. Es fehlen aber nicht 20 oder 30 Größenordnungen wie etwa bei der "kalten Fusion" oder der "Bubble Fusion", sondern nur 2-3! Die endgültige Limitierung liegt im sog. "Sticking", d.h. in der Tatsache, dass in 0.5 % aller Fälle das bei der Fusionsreaktion erzeugte Myon nicht frei ist für weitere Fusionen, sondern am Helium kleben bleibt: $d\mu t \rightarrow \mu^- {}^4\text{He} + n$ ("Sticking"). μCF -Experimente sind an sog "Mesonenfabriken" in den letzten zwei Jahrzehnten durchgeführt worden, unter anderem auch durch unsere ME-Forschungsgruppe am PSI (Paul Scherrer Institut) in Villigen (3,4).

Eine andere Klasse von Experimenten, die von der Fribourger Gruppe ebenfalls am PSI durchgeführt wurden, sind Präzisionsmessungen einer fundamentalen kernphysikalischen Grösse, nämlich des Kernladungsradius vieler Elemente. Wiederum spielt dabei die Kleinheit des Bohrradius eines myonischen Atoms gegenüber einem normalen, elektronischen Atom eine wichtige Rolle. Der Bohrradius beträgt nämlich in mittelschweren und schweren myonischen Atomen nur noch wenige fm (10^{-15} m). Das Myon dreht dann etwa im Fall des Bleikerns ($Z=82, r_{ph} = 5.5 \text{ fm}$) sogar im Innern dieses Kerns seine Runden! Fig. 3 zeigt die Differenzen von Kernladungsradien für einen Grossteil des periodischen Systems, und zwar einerseits bei der Addition zweier Neutronen ("Isotopieshifts", z.B. ${}^{56}_{26}\text{Fe}^{30} - {}^{54}_{26}\text{Fe}^{28}$ oder ${}^{54}_{24}\text{Cr}^{30} - {}^{52}_{24}\text{Cr}^{28}$, aufgetragen bei $N=29$), andererseits bei der Addition zweier Protonen ("Isotonieshifts", z.B. ${}^{64}_{30}\text{Zn}^{34} - {}^{62}_{28}\text{Ni}^{34}$ oder ${}^{66}_{30}\text{Zn}^{36} - {}^{64}_{28}\text{Ni}^{36}$, aufgetragen bei $Z=29$). Man beachte insbesondere die Ordinatenkala in am (10^{-18} m) und die erreichte Präzision (ebenfalls 1-2 am). Die myonischen Messungen führten zu mehreren Veröffentlichungen (siehe z.B. 5-7) und wurden 1995 zusammen mit Elektronenstreuungsmessungen und optischen Isotopieshiftdaten zusammenfassend veröffentlicht (8).

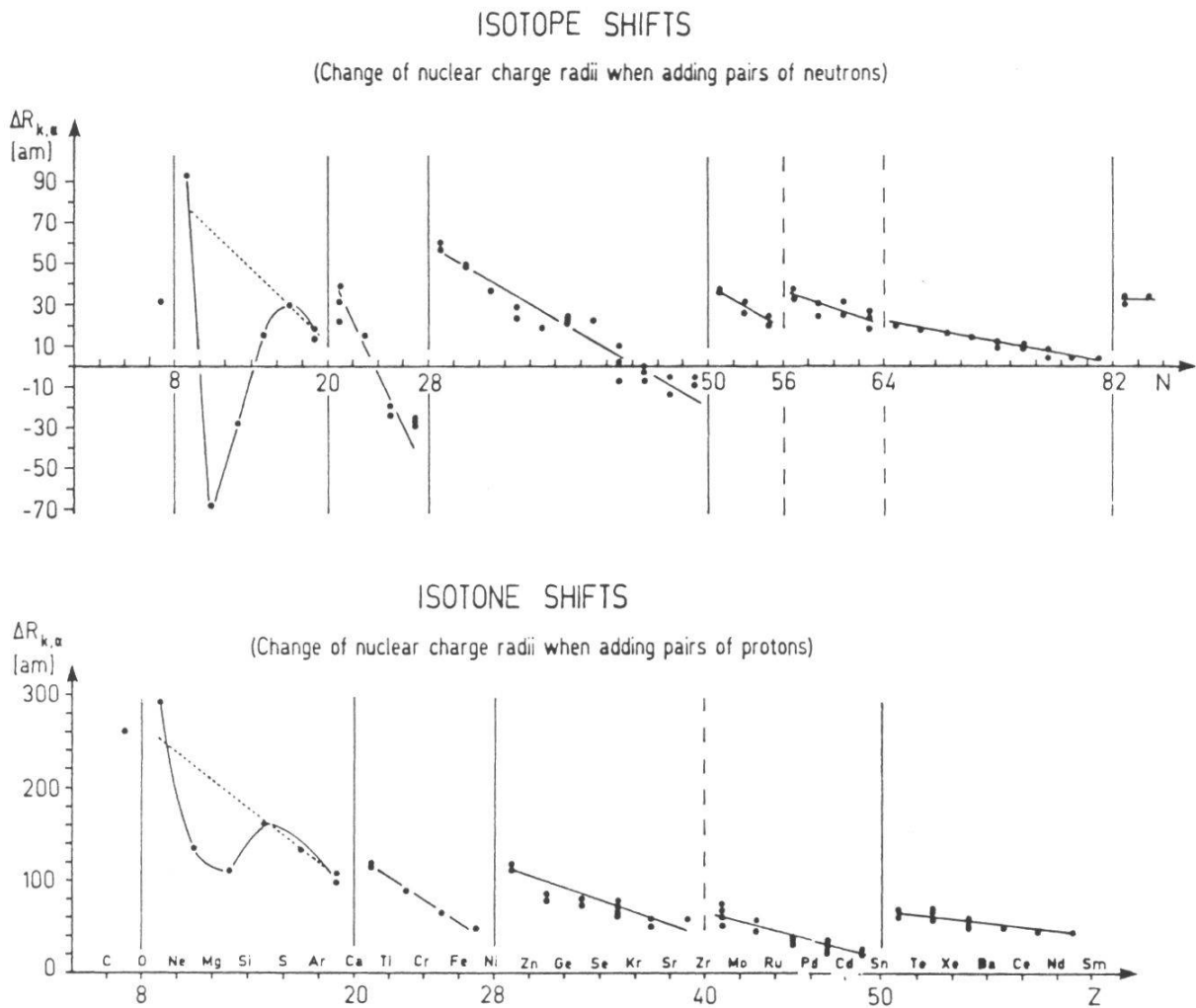


Fig. 3: Differenzen von Kernladungsradien über einen weiten Bereich des periodischen Systems. Der obere Teil zeigt Isotopieshifts als Funktion der Anzahl Neutronen, der untere Teil Isotonieshifts als Funktion der Anzahl Protonen (siehe auch Text).

Auch bei Experimenten mit kaonischen Atomen ist die Fribourger ME-Gruppe beteiligt. Das negativ geladene Kaon, bestehend aus den Elementarteilchen anti-up (\bar{u}) Quark und strange (s) Quark, ist wie das vorher geschilderte Myon ein Teilchen der zweiten Generation. Es ist etwa fünfmal schwerer als das Myon, unterliegt aber im Gegensatz zum Myon auch der starken Wechselwirkung. Das Experiment mit Codenamen DEAR (DAΦNE Exotic Atom Research) wird gegenwärtig am Elektron-Positron-Kollider "DAΦNE" in Frascati bei Rom durchgeführt (9,10). Es hat zum Zweck, mit Hilfe kaonischer Atome den Einfluss der starken

Wechselwirkung auf Wasserstoffkerne zu untersuchen. Dabei finden für die dabei relevanten Röntgenenergien (2-15 keV) die insbesondere in Neuenburg entwickelten hochauflösenden CCD (Charged Coupled Devices) Detektoren Verwendung (11).

3. Exotische Atome, Ausblick auf die 3. Generation

Interessant in diesem Zusammenhang wäre insbesondere die "tauonkatalysierte Fusion". Das negativ geladene Tauon ist ein rund 17 mal schwereres Elementarteilchen als das Myon, d.h. ein 3500 mal schwereres Lepton als das Elektron! Die Bohrbahnen eines tauonischen Atoms wären dann rund 3500 mal enger als die in normalen Atomen, die entsprechenden Uebergangenergien 3500 mal höher! Man würde daher erwarten, dass Fusionsreaktionen - analog solchen in myonischen Wasserstoffmolekülen - noch viel schneller ablaufen, resp. dass die Fusionswahrscheinlichkeit noch viel höher wäre. Der "Hick" dabei ist aber die sehr kurze Lebensdauer eines Tauons, nämlich nur $0.29 \cdot 10^{-12} s$ oder rund 10 Millionen mal kleiner als die des Myons. Zusätzlich vermögen die Teilchenbeschleuniger viel weniger Tauonen als etwa Myonen pro sec zu erzeugen. Dies hängt einerseits damit zusammen, dass die Masse eines Tauons 17 mal grösser ist als die eines Myons, sodass zu dessen Erzeugung nach Einstein ($E = mc^2$) eine 17mal höhere Energie zur Verfügung gestellt werden muss. Andererseits ist auch die Wahrscheinlichkeit, dass die durch das beschleunigte Teilchen (normalerweise ein Proton) ausgelöste Kernreaktion Tauonen erzeugt, um Größenordnungen kleiner als die Wahrscheinlichkeit, dass bei kleineren Energien wie etwa am PSI Myonen erzeugt werden. Je höher nämlich die auf eine Target einfallende Energie, je mehr verschiedene Reaktionen sind möglich, und nur wenige dieser Reaktionen erzeugen negative Tauonen. Eine "Taufabrik" liegt somit noch in weiterer Ferne. Dagegen sind gerade zum jetzigen Zeitpunkt Experimente im Aufbau, welche Tauonen messen wollen, um die ganz neu entdeckten sog. Neutrino-Oszillationen zu untersuchen (12). Solche Oszillationen sind nur möglich, wenn die Neutrinos Masse besitzen. Sie sind somit nicht im anfangs erwähnten Standardmodell eingebettet und führen daher, wie es im Jargon der Teilchenphysiker heisst, "zu neuer Physik".

4. Symmetrien und deren Brechungen, 2. Generation

Der zweite Teil dieses Vortrags befasst sich mit Symmetrien und deren Brechungen. Symmetrien sind nicht nur für die Physik grundlegend,

sondern auch für die gesamte naturwissenschaftliche Forschung. Aber auch in der Kunst spielen sie eine primordiale Rolle. Dabei ist eine perfekte Symmetrie meist weniger ästhetisch als eine leichte Brechung dieser Symmetrie.

Die drei bedeutensten Symmetrien in der Teilchenphysik sind die Spiegelsymmetrie oder "Parität" P , die Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie oder "Ladungskonjugation" C sowie die Zeitumkehrsymmetrie T . Die Parität P kehrt die Vorzeichen aller kartesischen Koordinaten um, und zwar nicht nur beim Ortsvektor, sondern bei allen Polarvektoren. Dagegen lässt sie das Vorzeichen von Axialvektoren, d.h. von Vektorprodukten zweier Polarvektoren wie typischerweise von Drehimpuls oder Spin, unverändert. Die C -Parität transformiert Teilchen in Antiteilchen, wobei sich insbesondere das Vorzeichen der Ladung umkehrt. Die Zeitumkehr schliesslich kehrt das Vorzeichen der Zeit um und ist somit eine "Vorwärts-Rückwärtsymmetrie".

1957 wurde bei schwachen Wechselwirkungen (Betazerfall) gezeigt, dass die Spiegelsymmetrie maximal gebrochen ist. So existiert z.B. kein rechtshändiges Neutrino, nur ein linkshändiges. Wendet man hingegen die kombinierte Symmetrieoperation CP an, so wird aus dem linkshändigen Neutrino ein rechtshändiges Antineutrino, welches in der Natur beobachtet wird. Das Jahr 1964 markierte einen weiteren Meilenstein bei der Suche nach Symmetriebrechungen, als man beim Zerfall neutraler Kaonen auch eine leichte Verletzung der CP -Symmetrie fand (13). Diese leichte Asymmetrie - sowie zuvor schon die maximale P -Verletzung bei schwachen Wechselwirkungen - konnte ins Dreigenerationen-Standardmodell der Teilchenphysik einigermaßen eingebettet werden. Andererseits gibt es aber auch eine markante Asymmetrie zwischen Teilchen und Antiteilchen in unserem Universum, die bis heute nicht verstanden ist. CP -Symmetrie und T -Symmetrie sind miteinander verknüpft, wenn man an die sog. CPT -Symmetrie glaubt, d.h. an die Forderung, dass unsere Welt und eine zeitumgekehrte, spiegelbildliche Antiwelt denselben Naturgesetzen gehorchen. Die CPT -Symmetrie ist Voraussetzung für alle lokalen Quantenfeldtheorien, und sie hat bis heute allen "Angriffen" der Experimentalphysiker standgehalten.

In den letzten Jahren wurden, wiederum mit Fribourger Beteiligung, am sog. CPLEAR Experiment (14) am CERN bei Genf Messungen durchgeführt mit dem Ziel, empfindliche Tests sowohl der CP - als auch der T - und CPT -Symmetrien am neutralen Kaonensystem durchzuführen. Das

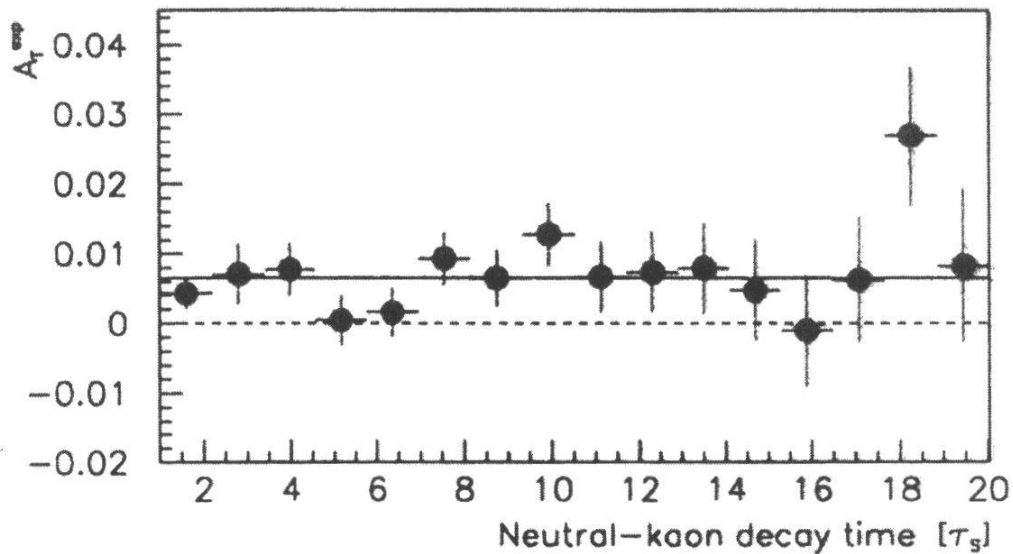
wohl wichtigste Resultat dieser Experimente ist die dabei erstmalig gefundene direkte Zeitverletzung in der Mikrophysik. Man benutzt dazu die Tatsache, dass eine Teilchenreaktion der Art $a+b \Leftrightarrow c+d$ bei Gültigkeit der Zeitumkehrsymmetrie auch in Rückwärtsrichtung mit genau derselben Wahrscheinlichkeit ablaufen muss. Ist dies nicht der Fall, so ist z.B. die folgende zeitabhängige Asymmetrie von null verschieden:

$$A_T = \frac{P(\bar{K}_{t=0}^0 \rightarrow K_{t=\tau}^0) - P(K_{t=0}^0 \rightarrow \bar{K}_{t=\tau}^0)}{P(\bar{K}_{t=0}^0 \rightarrow K_{t=\tau}^0) + P(K_{t=0}^0 \rightarrow \bar{K}_{t=\tau}^0)}$$

\mathcal{T} non-invariance

$$A_T^{\text{exp}}(\tau) = \frac{\eta N(\bar{K}_{t=0}^0 \rightarrow e^+ \pi^- \nu_{t=\tau}) - \xi N(K_{t=0}^0 \rightarrow e^- \pi^+ \bar{\nu}_{t=\tau})}{\eta N(\bar{K}_{t=0}^0 \rightarrow e^+ \pi^- \nu_{t=\tau}) + \xi N(K_{t=0}^0 \rightarrow e^- \pi^+ \bar{\nu}_{t=\tau})}$$

6.4×10^5 events enter this asymmetry



$$\langle A_T^{\text{exp}} \rangle_{(1-20)\tau_S} = (6.6 \pm 1.3) \times 10^{-3}$$

$$\chi^2/\text{d.o.f.} = 0.84$$

Fig. 4: Mikroskopische Verletzung der Zeitinvarianz beim neutralen Kaonensystem (siehe auch Text).

Dabei ist P' die Wahrscheinlichkeit, dass ein zur Zeit $t=0$ erzeugtes neutrales Antikaon zur Zeit $t=t$ als ein neutrales Kaon zerfällt, und P die Wahrscheinlichkeit, dass ein zur Zeit $t=0$ erzeugtes neutrales Kaon zur Zeit $t=t$ als ein Antikaon zerfällt. Beim CPLEAR Experiment konnten Kaon und Antikaon sowohl bei der Produktion ($t=0$) als auch beim Zerfall ($t=t$) eindeutig identifiziert werden. Wegen der S(Strangeness)-Erhaltung in starken Wechselwirkungen legt nämlich die Produktionsreaktion $p\bar{p} \rightarrow K^\mp \pi^\pm K^0 (\bar{K}^0)$ eindeutig fest, ob es sich um ein Kaon ($K^0 = \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}, S=+1$) oder ein Antikaon ($\bar{K}^0 = \begin{pmatrix} \bar{d} \\ s \end{pmatrix}, S=-1$) handelt. Wegen der $\Delta S = \Delta Q$ Regel andererseits kann bei $t=t$ der semileptonische Zerfall $K^0 (\bar{K}^0) \rightarrow e^\pm \pi^\mp \nu_e (\bar{\nu}_e)$ zur Kaonenidentifikation verwendet werden.

Fig.4 zeigt die gemessene Asymmetrie als Funktion der K_S Zerfallszeit $\tau_s = 0.8935 \cdot 10^{-10} s$ unter Berücksichtigung der Normalisierungsfaktoren η und ξ . Das Resultat ist eindeutig von null verschieden, und der Asymmetrie-Mittelwert errechnet sich zu 0.0066 ± 0.0013 (15). Die CPLEAR Kollaboration konnte zeigen, dass dieses Resultat einerseits unabhängig ist von einer gleichzeitigen Verletzung der CP-oder CPT-Symmetrie, andererseits aber mit der andersweitig (aus dem Zweipionenzerfall des K_L) gemessenen CP-Asymmetrie und damit auch mit der CPT-Symmetrie verträglich ist (16, 17). Beachte, dass bei Gültigkeit der CPT-Symmetrie eine Verletzung der CP-Symmetrie mit einer gleichgrossen Verletzung der T-Symmetrie einhergehen muss. Schliesslich sei noch bemerkt, dass eine mikroskopische Verletzung der Zeitumkehrinvarianz nichts mit dem einseitigen Ablauf der Zeit zu tun hat. Dieser hängt über den Entropiebegriff von den makroskopischen Anfangsbedingungen ab und kann somit (leider!) nicht geändert werden.

5. Symmetrien und deren Brechungen, Ausblick auf die 3. Generation

Analog dem neutralen Kaonensystem, bei dem erstmals 1964 die CP-Verletzung und 1999 die T-Verletzung gefunden wurde, findet heute das neutrale B-Mesonensystem immer stärkere Beachtung. Es gibt dort nicht nur zwei, sondern sogar vier neutrale B-Mesonen, alle aus einem beauty (b) oder antibeauty (\bar{b}) Quark der dritten Teilchengeneration zusammengesetzt:

$$B^0 = \begin{pmatrix} d \\ \bar{b} \end{pmatrix}; \bar{B}^0 = \begin{pmatrix} \bar{d} \\ b \end{pmatrix}; B_s^0 = \begin{pmatrix} s \\ \bar{b} \end{pmatrix}; \bar{B}_s^0 = \begin{pmatrix} \bar{s} \\ b \end{pmatrix}$$

Zu Beginn dieses Jahrtausends sind zwei neue sog. B-Mesonenfabriken entstanden, nämlich in Stanford in Kalifornien sowie in Japan. Auch am neu zu konstruierenden CERN LHC (Large Hadron Collider) wird ein B-Experiment aufgebaut. Das Zauberwort ist dabei CP-Verletzung mit neutralen B-Mesonen! Erste experimentelle Resultate liegen bereits vor und weisen darauf hin, dass auch im neutralen B-Mesonensystem eine leichte Verletzung der CP-Symmetrie vorhanden ist (18).

Desweiteren wird eifrig daran geforscht, eine Erweiterung des heute überraschenderweise immer noch gültigen Dreigenerationen-Standardmodells festzustellen, z.B. mit dem eventuellen Auftauchen sog. "supersymmetrischer Teilchen". Zusammen mit den schon erwähnten Neutrino-Oszillationen liegt hier ein weiteres unerforschtes Gebiet vor auf der Suche nach dem, "was die Natur im Innersten zusammenhält".

Referenzen:

- 1) L.A.Schaller: *Schwere Elektronen und leichte Protonen im Dienste der Naturwissenschaften und der Medizin*. Bull.Soc.Frib.Sc.Nat. 62, 47 (1973)
- 2) B.Goss Levi: *Skepticism greets claim of bubble fusion*. Physics Today, April 2002, p.16
- 3) S.Tresch et al.: *Measurement of the formation rate and the radiative decay of the muonic molecules $(p\mu^3\text{He})^*$ and $(p\mu^4\text{He})^*$* . Phys.Rev. A58, 3528 (1998)
- 4) A. del Rosso et al.: *Measurement of the fusion rate in $(d\mu^3\text{He})$* . Hyp.Int. 118, 177 (1999)
- 5) L.A.Schaller et al.: *Nuclear charge radii of the carbon isotopes ^{12}C , ^{13}C and ^{14}C* . Nucl. Phys. A379, 523 (1981)
- 6) C.Piller et al.: *Nuclear charge radii of the tin isotopes from muonic atoms*. Phys.Rev. C42, 182 (1990)
- 7) G.Fricke et al.: *Behavior of the nuclear charge radii systematics in the s-d shell from muonic atom measurements*. Phys. Rev. C45, 80 (1992)
- 8) G.Fricke et al.: *Nuclear ground state charge radii from electromagnetic transitions*. Atomic Data Nucl. Data Tables 60, 177 (1995)
- 9) S.Bianco et al., DEAR Collaboration: *The DEAR case*. Rivista del Nuovo Cimento 22, 11 (1999)
- 10) G.Beer et al., DEAR Collaboration: *A new method to obtain a precise value of the mass of the charged kaon*. Phys. Lett. B535, 52 (2002)
- 11) J.-P.Egger, D.Chatellard and E.Jeannet: *Progress in soft x-ray detection: the case of exotic hydrogen*. Particle World 3, No.3, 139 (1993)
- 12) H.Murayama: *The origin of neutrino mass*. Phys.World 15, May 2002, p.35

- 13) J.H.Christenson et al.: *Evidence for the 2π decay of the K_2^0 meson*. Phys.Rev.Lett. 13, 138 (1964)
- 14) R.Adler et al.: *The CPLEAR detector at CERN*. Nucl. Instr. Meths. A379, 76 (1996)
- 15) A.Angelopoulos et al, CPLEAR Collaboration: *First direct observation of time-reversal non-invariance in the neutral kaon system*. Phys. Lett. B444, 43 (1998)
- 16) L.A.Schaller: *T violation and CPT tests at CPLEAR*. AIP Conf. Proc. 539, 187 (2000)
- 17) A.Angelopoulos et al, CPLEAR Collaboration: *T-violation and CPT-invariance measurements in the CPLEAR experiment: a detailed description of the analysis of neutral kaon decays to $e\pi\nu$* . Eur.Phys.J. C22, 55 (2001)
- 18) Y.Karyotakis et al.: *A violation of CP symmetry in B meson decays*. Europhysics News 33/3, 89 (2002)