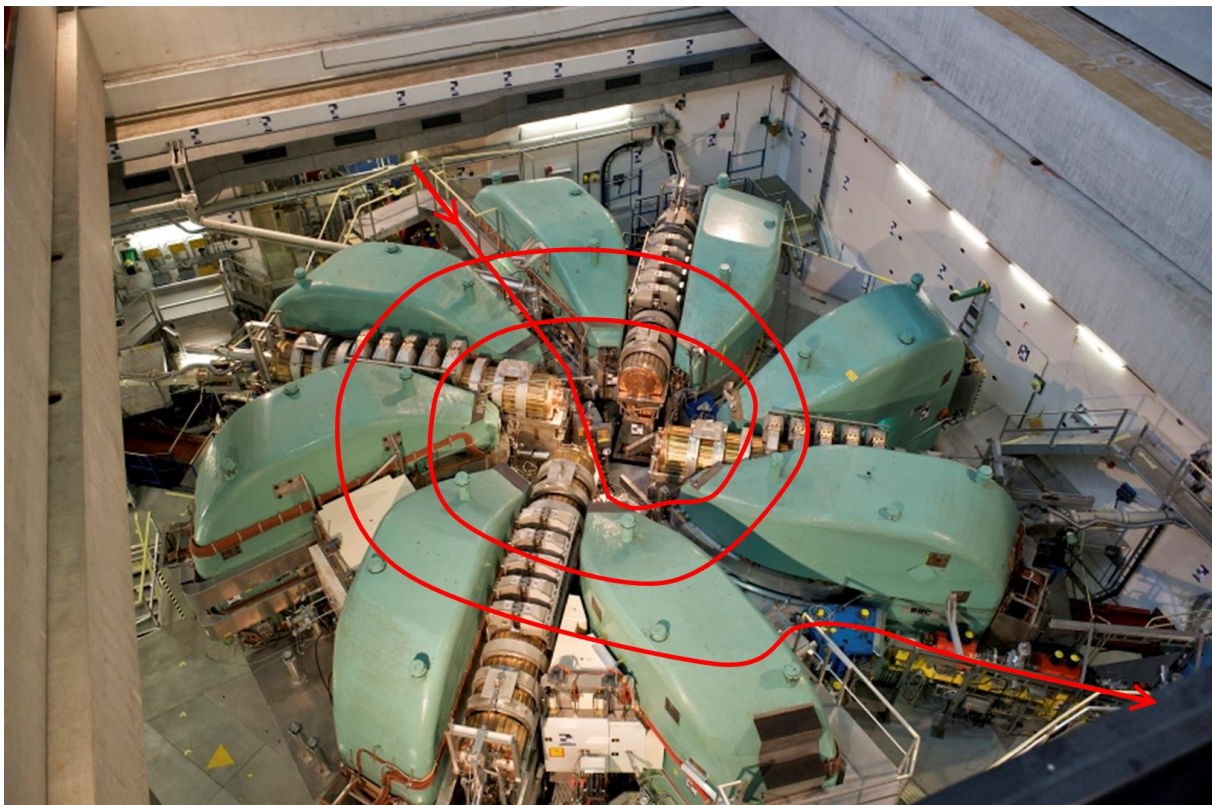


## Weiteres zur Myonen-Physik

BERNHARD LAUSS | KLAUS KIRCH

Dieses Dokument ist eine Ergänzung zum Artikel „Neues aus der zweiten Familie“ in **Physik in unserer Zeit**, 44. Jahrgang 2013, Nr. 4, S. 180.

### Wie werden am Paul Scherrer Institut Myonen erzeugt?

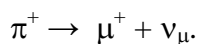


**Abb. 1** Blick auf das Herzstück des Protonbeschleunigers am Paul Scherrer Institut, das Ringzyklotron mit den grünen Sektormagneten. Die rote Linie skizziert den Protonenstrahlverlauf. Nach 186 Umläufen erreichen die Protonen maximale Energie. Sie werden nun werden nach außen extrahiert und in Richtung des Pion-Produktionstargets gelenkt.

Das Paul Scherrer Institut (PSI) in Villigen, Schweiz betreibt einen mehrstufigen Protonenbeschleuniger. Seine Endstufe, ein Zyklotron (Abbildung 1), beschleunigt Protonen auf eine Energie von 590 MeV. Dieses Ringzyklotron wird mit dem weltweit intensivsten kontinuierlichen Strahlstrom von derzeit bis zu 2,4 mA betrieben. Das entspricht einer einzigartigen Strahlleistung von 1,4 MW.

Sobald die Protonen im Zyklotron ihre maximale Energie erreicht haben, werden sie in Richtung Pion-Produktionstarget ausgekoppelt. In diesem Graphittarget produzieren die Protonen über die starke Wechselwirkung Pionen. Wegen der positiven Ladung der Protonen werden dabei etwa dreimal mehr  $\pi^+$  als  $\pi^-$  erzeugt. Die geladenen Pionen zerfallen zu 99,9877% in Myonen.

Eine besonders hohe Rate an Myonen kann man bei einem Myonimpuls von 29,8 MeV/c extrahieren. Diesen Impuls haben sogenannte Oberflächen-Myonen. Sie stammen von an der Oberfläche des Graphit-Produktionstargets gestoppten positiven Pionen und entstehen in einem einfachen Zweikörperzerfall



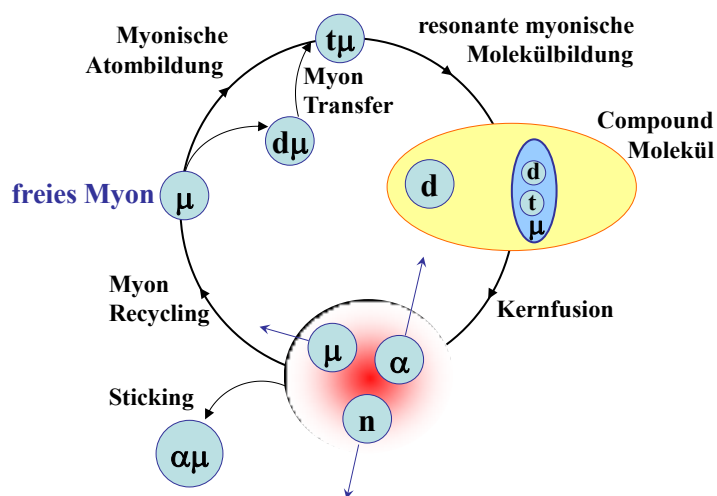
Aufgrund der Paritätsverletzung in diesem schwachen Zerfall sind die Myonen praktisch zu 100 % longitudinal polarisiert, denn die Myonneutrinos existieren ausschließlich linkshändig. Das heißt, dass die Spins beider Teilchen gegen die jeweilige Flugrichtung zeigen. Derzeit werden Myonraten von bis zu  $3 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$  am PSI erzielt.

Da selbst diese höchsten Raten an Myonen für manche Experimente noch nicht ausreichen, wird weltweit an Konzepten für noch intensivere Myonstrahlen gearbeitet. Forscher in Japan und in den USA entwickeln Projekte für gepulste hochintensive Strahlen. In der Schweiz wird am PSI die Möglichkeit untersucht, die Intensität in kontinuierlichen Strahlen um weitere zwei Größenordnungen zu erhöhen. Damit würde das PSI seinen Spitzenplatz in der Myonintensität ausbauen. Dafür ergäbe ganz neue Optionen für die fundamentale Teilchenphysikforschung, aber auch die Oberflächen- und Festkörperphysik.

### Myonische Atome und myonkatalysierte Fusion

Ein positives (Anti-)Myon zerfällt im Wesentlichen unabhängig von seiner Materialumgebung. Ein negatives Myon hingegen kann in Materie verschiedene sehr komplexe Prozesse verursachen. Wie ein Elektron kann es von einem Atom eingefangen werden, wobei vorhandene Elektronen verdrängt werden und ein myonisches Atom entsteht. Das Myon ist 207 Mal schwerer als ein Elektron, daher ist beispielsweise myonischer Wasserstoff ( $\mu^-p$ ) 207 Mal kleiner als normaler Wasserstoff ( $e^-p$ ). Die Wechselwirkung des Myons mit dem Proton ist dadurch viel größer. Deshalb können sowohl das Proton selbst als auch Eigenschaften der schwachen Wechselwirkung im durch die starke Wechselwirkung gebundenen Proton untersucht werden.

Hat man ein Gemisch von Wasserstoffisotopen (Wasserstoff, Deuterium, Tritium) vorliegen, bilden sich myonische Atome bei allen diesen Isotopen. Dabei wandert das Myon allerdings unter Energiegewinn zum jeweils schwereren Isotop. Diese myonischen Atome sind elektrisch neutral. Sie können daher den Umgebungsatomen so nahe kommen, dass es zur spontanen Fusion zweier Atomkerne sogar bei Raumtemperatur kommt.



**Abb. 2** Schema der möglichen myonischen Prozesse in einem Wasserstoffisotopengemisch am Beispiel eines Deuterium – Tritium Gemisches indem es zur myon-katalysierten Fusion kommt.

Abbildung 2 skizziert die komplexe Prozessfolge anhand eines Deuterium-Tritium (D-T) Gemisches: Ein Myon bildet ein myonisches Wasserstoffatom am Deuteron  $d\mu$ , und kurz darauf transferiert es zum Triton  $t\mu$ . Danach kommt es zur Bildung eines myonischen Moleküls  $dt\mu$ , das einen Teil eines elektronischen Wasserstoffmoleküls ersetzt. Im myonischen Molekül kommt es unmittelbar unter Energiefreisetzung zur Kernfusion in verschiedene Endzustände. Myonische Atom- und Molekülbildungsraten hängen von den involvierten Isotopen ab und sind für ein D-T-Gemisch am schnellsten.

Nach der Fusion wird das Myon meist wieder frei. Es wird recycelt und steht für einen neuerlichen Zyklus zur Verfügung. Das Myon wirkt also wie ein Fusionskatalysator, deswegen spricht man auch von Myon katalysierter Fusion. Mit einer geringen, Haftwahrscheinlichkeit bleibt das Myon am Fusionsprodukt haften (sticking). Bis zu 200 Fusionen kann ein Myon bei ausgewählten Bedingungen innerhalb seiner kurzen Lebenszeit von  $2,2 \mu\text{s}$  katalysieren. Die Anwendung dieser Fusion in der Energieproduktion verhindert letztlich nicht diese kurze Lebensdauer, sondern die Haftwahrscheinlichkeit des Myons. Die genaueste Untersuchung dieser zur Fusion führenden Prozesse wurde vor kurzem am PSI abgeschlossen [1].

## Literatur

[1] D. V. Balin et al., Phys. of Part. and Nucl. **2011**, 42, 185.