

Trocknende Gummibärchen reduzieren die Lebensdauer von Anti-Materie

Christoph Hugenschmidt¹ und Hubert Ceeh

Physik Department E21 and Heinz Maier-Leibnitz Zentrum (MLZ),
Technische Universität München, Lichtenbergstraße 1, 85748 Garching, Germany

Einleitung

Positronium ist ein exotisches Atom, das aus einem Elektron und seinem Antiteilchen –dem Positron– besteht und sich in Gummibärchen bildet, wenn man diese mit Positronen bombardiert. In unserem Experiment konnten wir eindeutig zeigen, dass die Zerstrahlungsrate dieser Positroniumatome mit zunehmendem Trocknungsgrad des verwendeten Gelatine-Glucose-Komposits zunimmt. Somit gelang es uns nicht nur die reduzierte Lebensdauer von Positronen in trocknenden Gummibärchens zu messen, sondern darüber hinaus die mittlere Größe der nano-skaligen Poren, worin Positronium zerstrahlt, in den jeweiligen Biopolymerproben zu quantifizieren.²

Das Experiment

Gummibärchen stellen ein ideales Modellsystem für Biopolymere dar, die im Wesentlichen aus vernetzter Gelatine und Glukose bestehen. Als Probenmaterial wurden für unsere Experimente lediglich rote Gummibärchen³ eingesetzt, um etwaige Farbabhängigkeiten auszuschließen. Unbehandelte rote Gummibärchen wurden mit paarweise gleich präparierten Proben verglichen. Ein Gummibärchenpaar wurde 24 h lang in einem Wasserbad vollständig mit Wasser beladen. Zwei weitere Pärchen wurden gezielt getrocknet: Das eine Gummibärchenpaar wurde drei Tage lang bei 35°C bei einem reduzierten Druck von $2 \cdot 10^4$ Pa dehydriert, während das andere über zwei Jahre lang zusammen mit ausreichend Silicagel als Trocknungsmittel eingepackt bei Raumtemperatur gelagert wurde. Das Foto in Abbildung ?? zeigt die mit unterschiedlichem Wassergehalt präparierte Proben.

Für die eigentliche Messung der Positroniumslebensdauer fixierten wir je ein Pärchen identischer Proben sandwichartig um eine radioaktive Quelle, die Positronen emittiert, um optimal den Raumwinkel auszunutzen und so alle Positronen in die Gummibärchens implantieren zu können (s. Abbildung 2). Praktischerweise emittiert die hier verwendete Positronenquelle ²²Na mit jedem Positron auch ein hochenergetisches nahezu promptes Gammaquant, das zur Generierung des für die Lebensdauermessung notwendigen Start-Signals genutzt wird. Das Stopp-Signal liefert eines der bei der Zerstrahlung von Positronen mit Elektronen frei werdenden Gammaquanten. Details zu den entsprechend schnellen Detektoren mit zugehöriger Elektronik zur Datenauslese finden sich sonst wo (z.B. in CH2014).

¹Corresponding author: Christoph.Hugenschmidt@frm2.tum.de

²Eingehende Informationen zu dieser Studie – wie Details zum Lebensdauerspektrometer, Lebensdaueränderung im Biopolymer unter axialem Druck, Dichtebestimmung, komplementäre kalorimetrische Messungen zur Bestimmung der Glasübergangstemperaturen, weitere Berechnungen und Erläuterungen sowie Verweise auf weitere Fachartikel – finden sich in der entsprechenden wissenschaftlichen Originalveröffentlichung CH2014.

³Das Probenmaterial wurde vom Studienleiter privat finanziert und von der Haribo Produktions-GmbH & Co. KG erworben. Da nur rote Proben verwendet wurden, konnte das restliche Material zur weiteren Motivationssteigerung unter den Experimentatoren aufgeteilt werden.

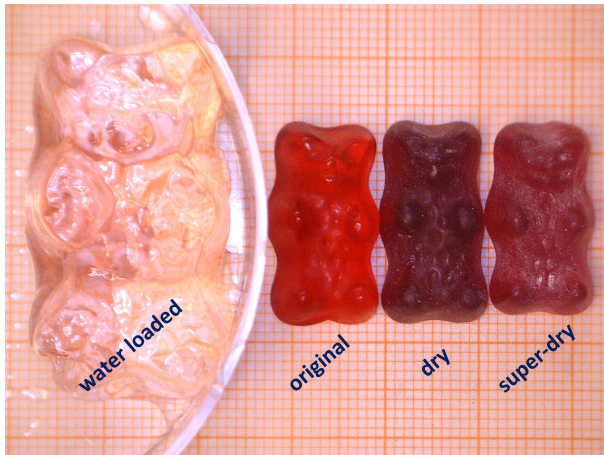


Abbildung 1: Die Probenfamilie.

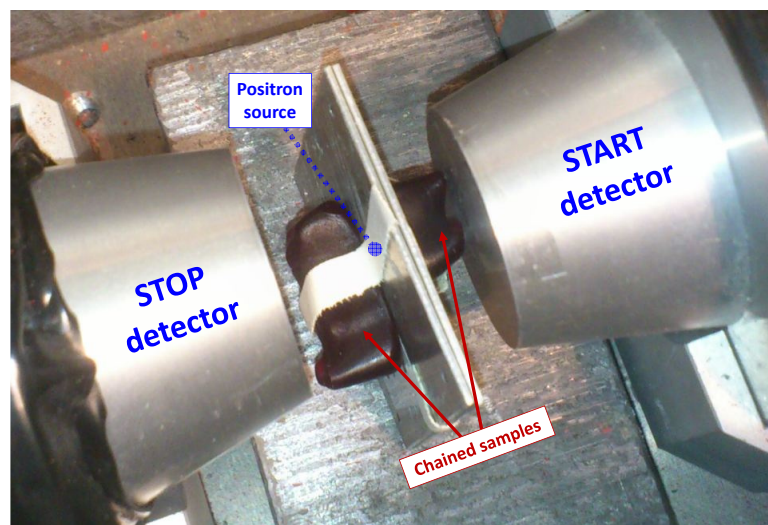


Abbildung 2: Aufbau für die Messung der Positroniumslebensdauer in Gummibärchen.

Die Ergebnisse

Die Auswertung der gewonnenen Zeitspektren erfolgte durch eine zweikomponentige Zerlegung in Exponentialfunktionen der Gestalt

$$I(t) = I_1 \exp^{-t/\tau_1} + I_2 \exp^{-t/\tau_2} + c_{bgr},$$

wobei τ_1 und τ_2 die charakteristischen Lebensdauern mit den zugehörigen Intensitäten I_1 und I_2 sind; dem konstanten Untergrund wird mit c_{bgr} Rechnung getragen. Die kurze Lebensdauerkomponente rührt vom kurzlebigen para-Positronium (Positronium mit antiparalleler Ausrichtung von Elektronen- und Positronenspin, $\tau = 125$ ps) sowie der direkten Zerstrahlung von Positronen mit Elektronen (ohne Positroniumsbildung) und ist für die weitere Auswertung nicht relevant. Die lange Lebensdauer τ_2 ist direkt mit der Größe der Nanoporen korreliert, worin das Positronium⁴ zerstrahlt.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch die Rohdaten der Zeitspektren für die getrocknete und die wasserbeladene Probe. Schon per Auge lässt sich direkt erkennen, dass trockenere Gummibärchen die Positroniumslebensdauer deutlich verkürzen. Die roten Linien demonstrieren die

⁴Genau genommen wird hier das langlebige ortho-Positronium mit paralleler Ausrichtung von Elektronen- und Positronenspin betrachtet, das im folgenden kurz *Positronium* genannt wird.

hervorragende Übereinstimmung der angepassten Exponentialfunktion mit den Messdaten für die lange Lebensdauerkomponente.

Abbildung 3: Rohdaten der Lebensdauerspektren: Klar per Auge erkennbar ist die deutlich kürzere Positroniumslebensdauer im getrockneten Gummibärchen.

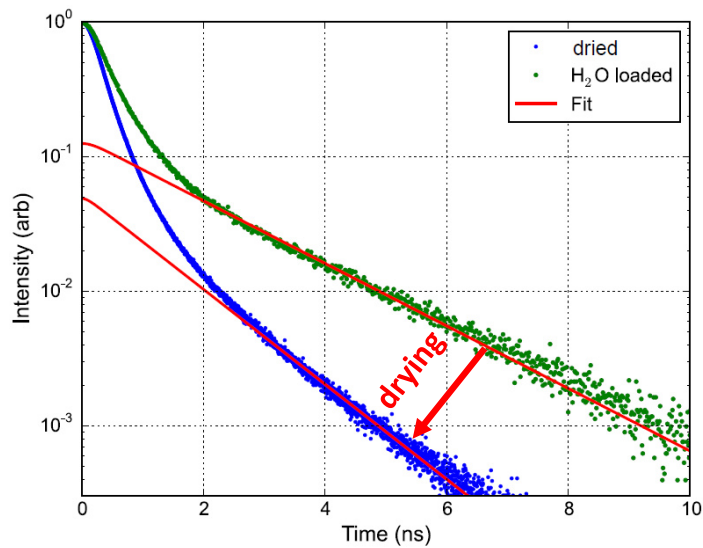
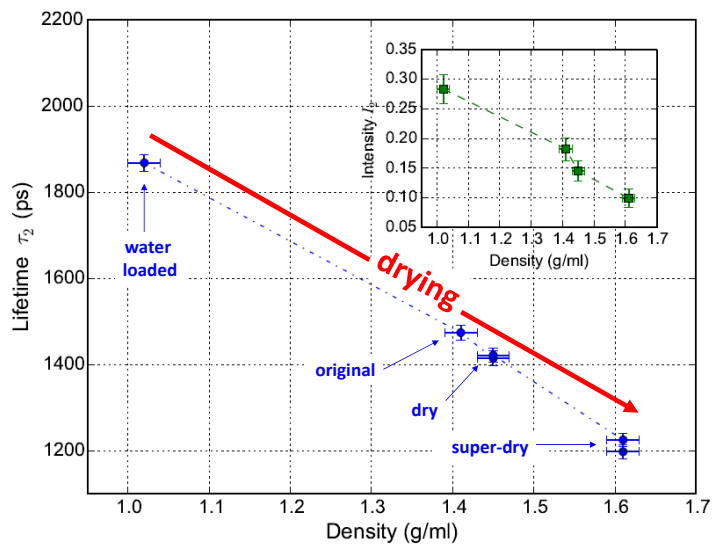


Abbildung 4: Die Positroniumslebensdauer τ_2 in Gummibärchen in Abhängigkeit ihrer Dichte und damit bei unterschiedlichem Wassergehalt; verkleinert die zugehörige Intensität I_2 .



Die Datenanalyse aller Spektren erlaubt den quantitativen Vergleich der gemessenen Positroniumslebensdauer τ_2 mit dem Trocknungsgrad und der damit einhergehenden Dichteänderung der Biopolymere (Abbildung 4). Die doppelten Werte der getrockneten Proben belegen die exzellente Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei wiederholten Messungen. Eindeutig ist mit zunehmendem Trocknungsgrad der Gummibärchen die Abnahme der Positroniumslebensdauer zu beobachten. Im wasserbeladenen Zustand beträgt die Lebensdauer des Positroniums etwa 1860 ps während diese in supertrockenen Gummibärchen um mehr als ein Drittel auf 1200 ps sinkt. Zudem nimmt auch die Intensität I_2 , die ein Maß für das gesamte freie Volumen ist, für trockenerer Proben deutlich ab.

Das freie Volumen

Wendet man ein semiempirisches quantenmechanisches Modell an, lässt sich aus der gemessenen Lebensdauer τ_2 die mittlere Größe der Nanoporen bestimmen. Löst man die radiale Schrödingergleichung unter Verwendung der Einteilchenwellenfunktion des Positroniums in einen sphärischen Hohlraum, erhält man die Korrelation zwischen Positroniumslebensdauer und Hohlraumradius R

$$\tau_{\text{o-Ps}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R}{R} + \frac{\sin[2\pi(1 - \Delta R/R)]}{2\pi} \right)^{-1} \text{ ns}$$

mit dem empirisch bestimmten Parameter $\Delta R = 1.656 \text{ \AA}$.⁵

Die hieraus abgeleiteten Werte zum mittleren Volumen V der Nanoporen, der relativen Änderung des gesamten freien Volumens bezogen auf unbeschadete Gummibärchen $\Delta V_{\text{tot}}/V_{\text{tot},0}$ sowie deren Massendichte ρ sind in der Tabelle zusammengestellt. In die Berechnung des gesamten freien Volumens geht außer der mittleren Größe der Nanoporen auch deren Anzahl ein, die über die I_2 -Variation abgeschätzt werden kann. Die deutlich geringere Positroniumslebensdauer im supertrockenen Gummibärchen ist auf das, verglichen mit der wasserbeladenen Probe, etwa 2,5-mal geringere mittlere Volumen der Nanoporen von nur noch $33,5 \text{ \AA}^3$ zurück zu führen. Darüber hinaus kann man zusammen mit den deutlich geringeren I_2 -Messwerten auf ein etwa sechsmal kleineres freies Volumen in der supertrockenen Probe schließen.

Probe	ρ [g/cm ³]	V [\AA^3]	$\Delta V_{\text{tot}}/V_{\text{tot},0}$
wasserbeladen	1.02(2)	84.3(1.9)	2.54(23)
original	1.41(2)	51.6(1.3)	1.00(11)
trocken	1.45(2)	47.1(1.3)	0.48(10)
super-trocken	1.62(2)	33.5(1.0)	0.41(5)

Tabelle 1: Aus den Positroniumslebensdauermessungen bestimmte Werte für die mittlere Hohlraumgröße V und die relative Änderung des gesamten freien Volumens $\Delta V_{\text{tot}}/V_{\text{tot},0}$; ρ ist die Dichte der Gummibärchenproben.

Fazit

Eindeutig wurde die Reduzierung der Lebensdauer von Positronium in getrockneten Gummibärchen experimentell nachgewiesen. Diese Beobachtung wird auf die Volumenverringerng der Nanoporen bei zunehmender Dehydrierung der Biopolymere zurückgeführt.

In der Tat wird die Methode der Positroniumslebensdauerspektroskopie nicht nur bei Biopolymeren, sondern generell zur zerstörungsfreien Charakterisierung des freien Volumens amorpher Substanzen – Polymere wie auch anorganische Gläser – eingesetzt. Mittlerweile fand 2014 eigens hierzu zum 11. Mal eine internationale Konferenz statt.⁶

Literatur

CH2014: Christoph Hugenschmidt and Hubert Ceeh. *The free volume in dried and H₂O loaded biopolymers studied by positron lifetime measurements*. The Journal of Physical Chemistry B, 118 (2014) 9356

⁵Die rechnerische Herleitung nach dem sogenannten Tao-Eldrup Modell findet sich im Appendix von CH2014; Details und Erweiterungen zu dem Modell finden sich in den dort angegebenen Referenzen ebenfalls.

⁶International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (PPC)