

v01

Lebensdauer kosmischer Myonen

Joel Koch

joel.koch@tu-dortmund.de

Axel Vogt

axel.vogt@udo.edu

Durchführung: 13.01.2025

Abgabe: DATUM

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Aufbau und Durchführung	4
3.1 Aufbau	4
3.2 Durchführung	6
4 Auswertung	7
4.1 Eichung der Zeitskala des Diskriminators	7
4.2 Bestimmung der mittleren Lebensdauer kosmischer Müonen	7
5 Diskussion	9
6 Originaldaten	9
Literatur	23

1 Zielsetzung

Ziel dieses Versuches ist es die **mittlere** Lebensdauer kosmischer Myonen zu bestimmen, um dabei grundlegende Detektorkomponenten näher kennen zu lernen.

2 Theorie

Die Informationen über die Teilchen werden der particle data group entnommen[1]. Myonen sind Elementarteilchen aus der zweiten Generation der Fermionen und gehören zur Leptonenfamilie. Die Myonen, die auf der Erde gemessen werden können, sind Sekundärteilchen, die bei der Wechselwirkung von hochenergetischer kosmischer Strahlung von zum Beispiel der Sonne mit den oberen Schichten der Erdatmosphäre entstehen. Sie entstehen in einer Höhe von etwa 15 km. Trifft ein Proton auf ein Atom der Erdatmosphäre, entstehen bei der Kollision Sekundärteilchen. Da Pionen und Kaonen die leichtesten Mesonen sind, entstehen diese bei der Kollision am häufigsten. Diese wiederum zerfallen über die elektromagnetische Wechselwirkung in Myonen und Myon-Neutrinos via der folgenden Zerfallskanäle

$$\begin{aligned}\pi^\pm &\rightarrow \mu^\pm \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu), \\ K^\pm &\rightarrow \mu^\pm \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu).\end{aligned}$$

Um die Impulserhaltung einzuhalten, wird neben einem Myonen auch ein Myon-Neutrino ν_μ (bei Zerfall eines π^+) oder Antineutrino $\bar{\nu}_\mu$ erzeugt (bei Zerfall eines π^-). Selbiges gilt für die Kaonen. Die Myonen selber zerfallen in Elektronen und Elektron-Antineutrinos via

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm \nu_e (\bar{\nu}_e) \bar{\nu}_\mu (\nu_\mu).$$

Die durchschnittliche Zeit, die ein Teilchen benötigt, um in andere Teilchen zu zerfallen wird (mittlere) Zerfallszeit τ genannt. Sie folgt über das Zerfallsgesetz

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \tag{1}$$

wobei $N(t)$ die Anzahl der noch nicht zerfallenen Teilchen zum Zeitpunkt t ist und N_0 die Anzahl der Teilchen zum Zeitpunkt $t = 0$. Die Zerfallskonstante λ ist dabei ein Proportionalitätsfaktor, der für jedes Teilchen unterschiedlich ist. Mithilfe des Zerfallsgesetzes kann **man** die mittlere Lebensdauer τ eines Teilchens durch zeitliches Ableiten und umstellen bestimmt werden,

$$\frac{N(t)}{N_0} = \lambda e^{-\lambda t} dt, \tag{2}$$

$$\tau = \langle t \rangle = \int_0^\infty t \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \tag{3}$$

Dass die Myonen auf der Erde auftreffen lässt sich nach dem klassischen Modell der Physik nicht beschreiben, da die Lebensdauer der Myonen von $2,197 \mu\text{s}$ zu kurz wäre, um die Erde zu erreichen,

$$s = v \cdot t \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 2,196 \cdot 10^{-6} \text{s} \approx 660 \text{ m}.$$

Die Myonen erreichen die Erde jedoch, da sie aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit eine Zeitdilatation erfahren, die nach der speziellen Relativitätstheorie von Albert Einstein beschrieben wird,

$$\gamma = \frac{E}{m_\mu c^2} = \frac{10 \cdot 10^9}{105,66 \cdot 10^6} \approx 94,7,$$

$$\rightarrow s = vt \cdot \gamma \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 2,196 \cdot 10^{-6} \text{s} \cdot 94,7 \approx 62,4 \text{ km}.$$

Somit bestimmt sich die Wahrscheinlichkeit für ein Myon auf der Erde aufzutreffen zu

$$P = e^{-L/s} \text{ mit } L = 15 \text{ km},$$

$$P_{\text{klassisch}} = e^{-L/660 \text{ m}} \approx 1,3 \cdot 10^{-10} \%,$$

$$\text{Cool! } P_{\text{relativistisch}} = e^{-L/62,4 \text{ km}} \approx 78,63\%.$$

3 Aufbau und Durchführung

Im folgenden wird zunächst der Aufbau der Messvorrichtung anhand der schematischen Darstellung in Abbildung 1 erläutert und anschließend die Durchführung des Experiments beschrieben.

3.1 Aufbau

Eine schematische Darstellung des in dem Experiment verwendeten Aufbau des Detektors ist in Abbildung 1 zu sehen. Über eine Hochspannungsquelle werden zwei Photomultiplier betrieben, die sich an zwei gegenüberliegenden Seiten eines mit einem organischen Szintillator gefüllten Stahlzylinders befinden. Bewegt sich ein Teilchen durch das Szintillatormaterial, wird es durch die Wechselwirkung angeregt und emittiert Photonen, die durch den Photoeffekt Elektronen aus dem Szintillatormaterial lösen. Diese Elektronen werden durch das elektrische Feld des Szintillatormaterials beschleunigt und regen weitere Elektronen an, sodass eine Lawine entsteht. Am Ende des Photomultipliers kann die Ladungslawine als messbaren Spannungsimpuls gemessen werden.

Bevor die Signale der Photomultiplier weiterverarbeitet werden, werden sie mithilfe von Verzögerungsleitungen synchronisiert. Die Signale der Photomultiplier werden mithilfe eines Diskriminators diskriminiert und der Untergrund wird mithilfe einer *threshold*-Spannung unterdrückt. Übersteigt ein Signal den vorgegebenen Schwellwert, wird ein Rechteckimpuls erzeugt, der sich meist im sogenannten *NIM-Standard* befindet. *NIM* steht für *Nuclear Instrument Module* und ist ein Standard für die Verarbeitung von Signalen in der Kernphysik. Es legt Kabel und Stecker fest, die in der Kernphysik verwendet werden, um

Das liest sich so als würde das Myon angeregt werden und dann Elektronen abstrahlen, die dann weitere Elektronen aus den Atomhüllen des Szintillators herausschlagen und die dann auf den Photomultiplier treffen. Das ist aber nicht das was passiert!

4

Durch Energieübertragung/Wechselwirkung zwischen dem Myon und den Atomen des Szintillators werden die Elektronen in den Atomhüllen des Szintillators angeregt und emittieren beim Rückgang in den Grundzustand Photonen. Diese Photonen breiten sich radialsymmetrisch um die Flugbahn des Myons aus, sodass einige auch das Fenster zum Photomultiplier treffen. Im Photomultiplier schlagen die Photonen dann je ein Elektron aus seiner Bindung (Photoeffekt). Das Elektron wird beschleunigt, schlägt weitere Elektronen aus und es entsteht eine Lawine die wir als negativen Spannungspuls hinter den Photomultipliern mit dem Oszilloskop sehen. Wenn ein Myon in ein Elektron zerfällt, dann ist auch das Elektron in der Lage den Szintillator zum emittieren von Photonen anzuregen.

Ihr habt die Breite des Pulses aber eingestellt. Auf 10 ns wahrscheinlich.

selektiert

werden

Ja und die Gleichzeitigkeit and den ANDs ist besser definiert.

die Verbindung von Geräten zu standardisieren und somit Kompatibilität und ein schnelle Verarbeitung von Signalen zu gewährleisten. Ein Signal, das unter dem Schwellwert liegt wird nicht weiter betrachtet und somit herausgefiltert. Die Diskretisierung durch Rechteckspannungen **hat den Vorteil**, dass sie sich bereits als digitale Signale eignen.

Die Signale aus den beiden Diskriminatoren **wird in einem Koinzidenzschaltkreis geleitet**, der die Signale beider Photomultiplier miteinander vergleicht. **Es wird nur ein Signal weitergeleitet, wenn beide Signale gleichzeitig auftreten, weshalb die vorgeschaltete Verzögerung notwendig ist.** Dieser Schritt filtert weiteren Untergrund aus den Messwerten heraus.

Nun wird das Signal aus dem Koinzidenzschaltkreis in drei Wege aufgeteilt, wobei zwei davon sofort an verschiedene AND-Gatter weitergeleitet werden. AND-Gatter sind logische Schaltungen, die nur dann ein Signal weiterleiten, wenn beide Eingangssignale gleichzeitig auftreten. Das dritte Signal wird an eine weitere Verzögerungskomponente weitergeleitet, die das Signal um feste 30 ns verzögert, **was im letzten Schritt wichtig werden wird**. Nach der Verzögerungskomponente wird ein Monoflop geschaltet, der das gepulste Signal in ein durchgängiges binäres Signal umwandelt. Der Monoflop gibt **zusätzlich** ein negiertes und ein normales Signal aus, die an die beiden AND-Gatter weitergeleitet werden. Somit ist das erste AND-Gatter ein *Veto*-Gatter, das nur dann ein Signal weiterleitet, wenn das Signal des Monoflops negiert ist, also genau dann, wenn **das Signal des Monoflops nicht auftritt**. Das zweite AND-Gatter leitet das Signal nur dann weiter, wenn das Signal **am Monoflops auftritt**, was durch die Verzögerungskomponente erst nach 30 ns geschieht. Somit können die Signale der beiden Gatter für das Starten und Stoppen einer *time-amplitude-converter*-Schaltung verwendet werden, die die Zeitdifferenz zwischen den beiden Signalen misst. Ohne die Verzögerung würde das Startsignal ebenfalls das Stoppsignal sein. In dem Versuch stellt das Startsignal das Eintreten eines Myons in den Detektor dar. Das Stoppsignal entspricht dem Zerfall eines Myons in diesem, wodurch **die letztlich die mittlere Lebensdauer von kosmischen Myonen bestimmt werden kann**.

Die TAC wird an einen PC angeschlossen, der mithilfe eines Multi-Channel-Analysers (MCA) die Signale aufnimmt. Ein MCA ist ein Gerät, das die Signale in einem bestimmten Zeitfenster aufnimmt und in einem Histogramm darstellt. Meist wird ein schneller Analog-Digital-Wandler (ADC; kurz für *Analog-Digital-Converter*) verwendet, um die Signale aufzunehmen und zu speichern.

kein Signal am Monoflop eingetroffen ist und es noch nicht zurück in seinen Grundzustand gegangen.

Grundzustand: Signal am negierten Output

Zustand für die "Suchzeit" nach Eintreffen eines Signals: Signal am normalen Output

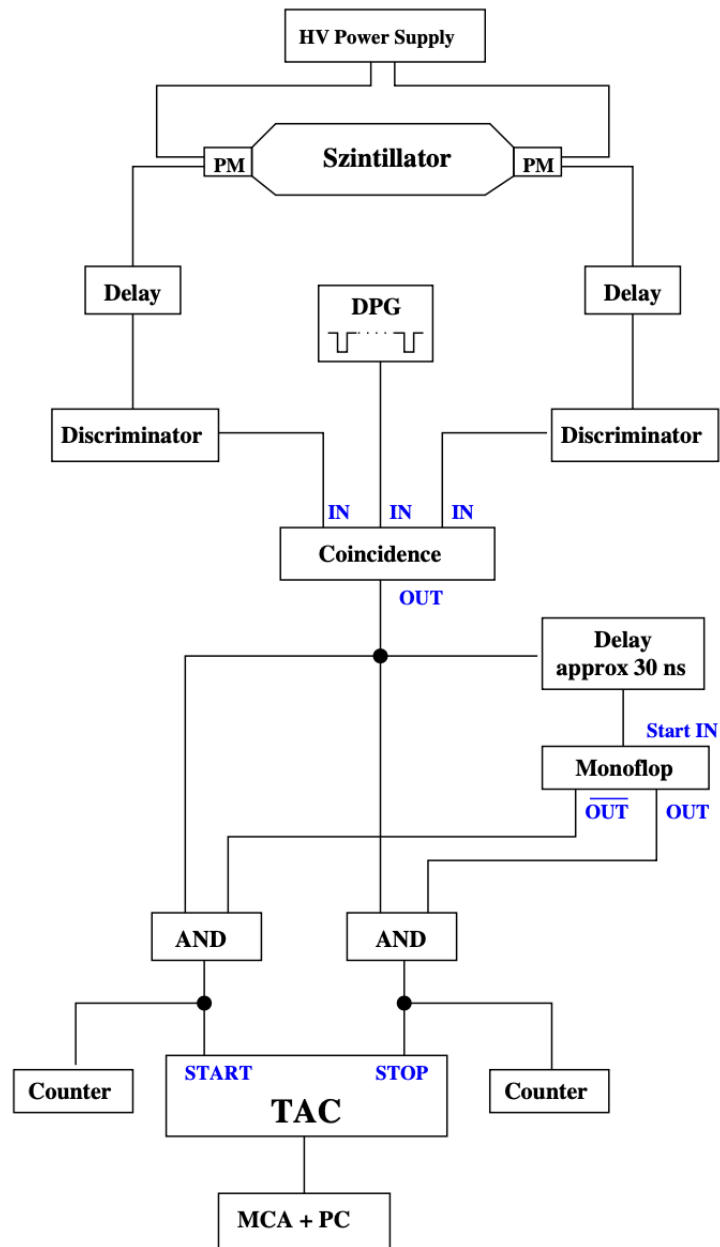


Abbildung 1: Schematische Darstellung des in dem Experiment verwendeten Detektors [2].

3.2 Durchführung

Zunächst wird der Detektor aufgebaut und die Hochspannung angeschaltet. Im ersten Messschritt wird sichergestellt, dass die Photomultiplier korrekt arbeiten, indem sie an ein Oszilloskop angeschlossen werden. Nachdem sichergestellt wurde, dass die Pho-

Signale weitergeben

sich die
Pulsfrequenz
hinter der
Koinzidenz
maximiert.

tomultiplier **korrekt arbeiten**, werden die Diskriminatoren so eingestellt, dass **bei** beiden Photomultiplier in einer Sekunde ungefähr 30 Signale **eintreffen**. Danach wird der Versuch zuende aufgebaut. Die Verzögerungsleistungen werden so eingestellt, dass **ein idealer Messbereich eingestellt** wird. Der Monoflop wird so eingestellt, dass die Suchzeit ungefähr im erwarteten Bereich der **Lebensdauer** der Myonen, also etwa $1\text{ }\mu\text{s}$ bis $10\text{ }\mu\text{s}$, liegt. Die TAC wird an den PC angeschlossen. **Zerfallsdauer**

Bevor die Messung **jedoch** gestartet werden kann, muss ein Doppelpulsgenerator verwendet und an der Koinzidenzschaltung eingeschaltet werden. Der Doppelpulsgenerator erzeugt zwei Rechteckimpulse, die in einem festen **zeitlichen** Abstand zueinander liegen und von dem MCA aufgenommen werden. Bei manuellem variieren des Abstandes der Impulse können die Kanäle des MCA kalibriert werden. Nachdem die Kalibrierung abgeschlossen ist, wird der Doppelpulsgenerator ausgeschaltet und die Messung gestartet. Es wird eine hinreichend lange Messzeit gewählt, um genügend Daten zu sammeln.

4 Auswertung

4.1 Eichung der Zeitskala des Diskriminators

Ein Plot der aufgenommenen Daten zur Eichung der Zeitachse mittels des Doppelpulsgenerators **sind** in Abbildung 2 zu finden. Dort ist die Pulsbreite gegen die Kanalnummer aufgetragen. Durch die Kenntnis der gleichmäßigen Pulsabstände lässt sich die Zeitskala der Kanäle eichen, denn der Kanal, in welchem der zweite Puls des Doppelpulsgenerators gemessen wurde gibt an, wie viele Zeiteinheiten bis zur Messung des Pulses vergangen sind. Da die Relation zwischen Pulsbreite und Kanalnummer linear ist

$$T_{\text{Puls}}(N_{\text{Kanal}}) = TN_{\text{Kanal}} + T_0 . \quad (4)$$

Dabei hat die Zeitkonstante τ die Einheit Zeit/Kanal und ist die Dauer, die ein Event in einem Kanal bedient wird, bevor der Detektor zum Nächsten springt.

Durch den linearen Fit, welcher zusätzlich in Abbildung 2 abgebildet ist, wurde $T = (21,66 \pm 0,02)\text{ns}$ bestimmt.

4.2 Bestimmung der mittleren Lebensdauer kosmischer **Müonen** :)

Da die Spannung am Detektor zu hoch eingestellt war, sind die aufgenommenen Daten an ihrem Anfang durch eine Spannungsspitze überlagert und daher nicht **zu gebrauchen**. Aus diesem Grund wurden hier die ersten 30 Kanäle nicht verwendet. Außerdem wurden die letzten 150 aufgenommenen Datenpunkte ebenfalls nicht verwendet, da dort quasi kein Signal mehr gemessen wurde. **nutzbar**

Zur Bestimmung der Cutoffs wurden verschiedene Cutoffs getestet und jeweils ein **Fo**it durchgeführt. Dabei wurde überprüft, wie das Entfernen weiterer Datenpunkte die Lebenszeit beeinflusst, um ein Gebiet zu erreichen, in welchem sich bei ± 10 Datenpunkten kaum noch etwas an der bestimmten Lebenszeit der kosmischen **Müonen** ändert. :)

Die Standardabweichung einer Poissonverteilten Zufallsvariable wie den Counts ist $\sigma = \sqrt{N}$. Diese ist in Abbildung 3 als Fehlerbalken der einzelnen Messwerte aufgetragen.

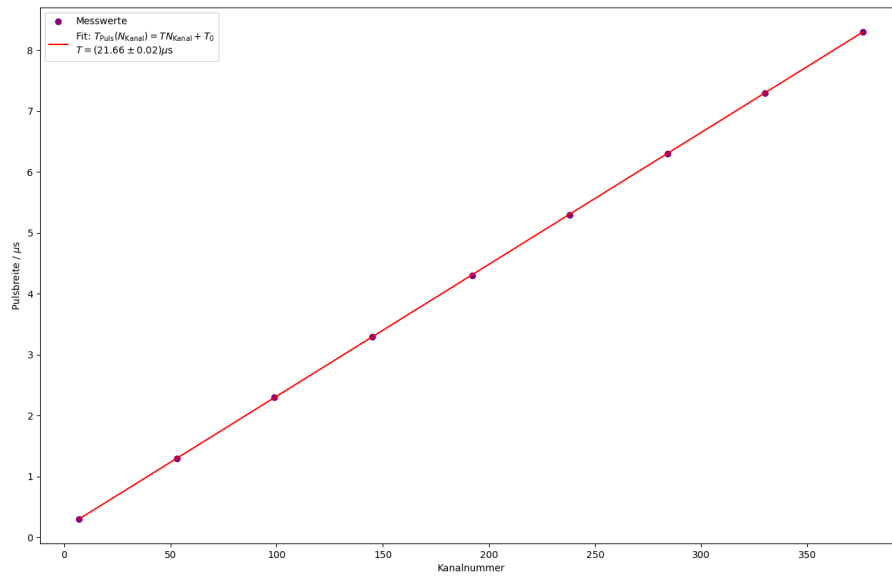


Abbildung 2: Linearer Fit zur Eichung des Diskriminators. Die Steigung der Geraden, $T = (21.66 \pm 0.02) \text{ ns}$ ist die errechnete Zeit pro Kanal.

;)

Um die Lebenszeit der kosmischen Müons zu bestimmen, wurden die Daten mit der Exponentialfunktion

$$N(t) = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5)$$

gefittet.

Als mittlere Lebensdauer ergibt sich aus dem Fit $\tau = (2.07 \pm 0.09) \mu\text{s}$.

Das ist ein richtig gutes Ergebnis!

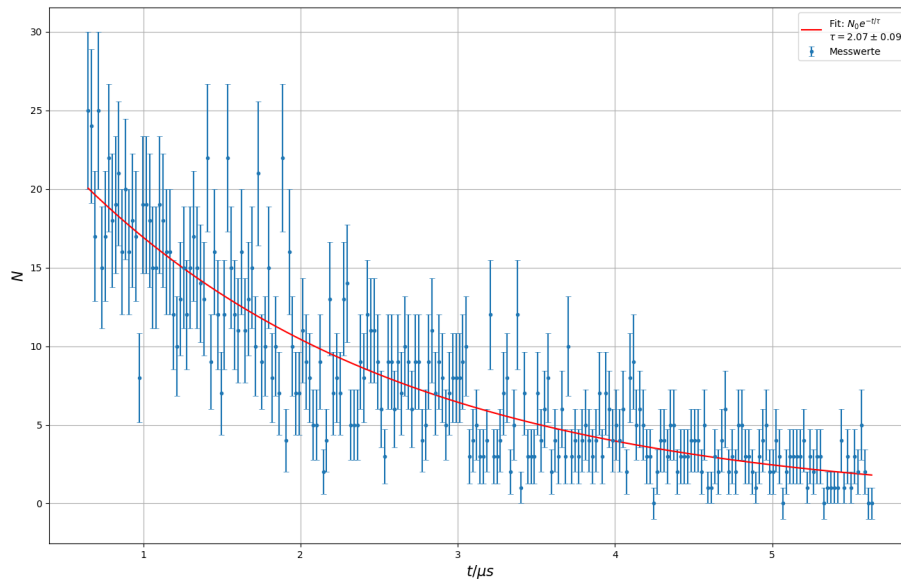


Abbildung 3: Fit zur Bestimmung der Halbwertszeit kosmischer M μ onen.

5 Diskussion

;)

Der Literaturwert f \ddot{u} r die mittlere Lebensdauer von M μ onen ist $\tau = 2.19703 \pm 0.00004 \mu\text{s}$. [3] Der experimentell bestimmte Wert von $\tau = (2.07 \pm 0.09) \mu\text{s}$ liegt nur knapp au \ddot{u} berhalb der Standardabweichung und hat eine relative Abweichung von 5.8%. Grund daf \ddot{u} r k \ddot{o} nnte sein, dass bei der Durchf \ddot{u} hrung Bauteile besch \ddot{a} digt wurden, was dazu f \ddot{u} hrte, dass eine h \ddot{o} here Betriebsspannung verwendet wurde, was die Spannungsspitze am Anfang des Plots verursachte. Da bei Exponentialfunktionen jedoch gerade dieser Bereich am st \ddot{a} rksten zum Fit beitr \ddot{a} gt, wurde die Varianz der Daten durch dessen Wegschneiden erh \ddot{o} ht.

6 Originaldaten

Tabelle 1: Messwerte zur Eichung.

Pulsbreite	Kanal
0.3	7
1.3	53
2.3	99

Continued on next page

Warum englisch? :D

Pulsbreite	Kanal
3.3	145
4.3	192
5.3	238
6.3	284
7.3	330
8.3	376

Tabelle 2: Messwerte zur Bestimmung der Lebenszeit.

Index	Counts
0	0
1	0
2	0
3	2
4	20
5	23
6	17
7	32
8	24
9	22
10	21
11	21
12	27
13	15
14	26
15	26
16	29
17	49
18	130
19	232
20	258
21	318
22	273
23	181
24	139
25	106
26	62
27	30
28	35

Continued on next page

Index	Counts
29	27
30	25
31	24
32	17
33	25
34	15
35	17
36	22
37	18
38	19
39	21
40	16
41	20
42	16
43	18
44	17
45	8
46	19
47	19
48	18
49	15
50	15
51	19
52	18
53	16
54	16
55	12
56	10
57	13
58	15
59	12
60	15
61	17
62	15
63	14
64	13
65	22
66	9
67	16
68	12

Continued on next page

Index	Counts
69	7
70	12
71	22
72	15
73	12
74	11
75	16
76	11
77	13
78	15
79	10
80	21
81	9
82	10
83	15
84	8
85	10
86	7
87	22
88	4
89	16
90	10
91	7
92	7
93	11
94	9
95	8
96	5
97	5
98	9
99	2
100	4
101	13
102	7
103	8
104	7
105	13
106	14
107	5
108	5
Continued on next page	

Index	Counts
109	5
110	9
111	8
112	12
113	11
114	11
115	9
116	6
117	3
118	9
119	9
120	6
121	9
122	7
123	10
124	9
125	6
126	9
127	9
128	4
129	5
130	9
131	11
132	7
133	9
134	8
135	5
136	7
137	8
138	8
139	8
140	9
141	10
142	3
143	4
144	5
145	3
146	3
147	4
148	12

Continued on next page

Index	Counts
149	3
150	3
151	4
152	7
153	8
154	2
155	5
156	12
157	1
158	7
159	3
160	3
161	3
162	7
163	4
164	6
165	8
166	2
167	4
168	3
169	6
170	3
171	10
172	3
173	4
174	3
175	4
176	5
177	4
178	3
179	4
180	7
181	3
182	7
183	6
184	4
185	5
186	4
187	6
188	2

Continued on next page

Index	Counts
189	8
190	9
191	5
192	6
193	5
194	3
195	3
196	0
197	2
198	4
199	4
200	3
201	5
202	5
203	2
204	3
205	3
206	3
207	4
208	4
209	4
210	2
211	5
212	1
213	1
214	3
215	2
216	4
217	6
218	2
219	3
220	2
221	5
222	5
223	3
224	3
225	2
226	1
227	3
228	4

Continued on next page

Index	Counts
229	5
230	2
231	2
232	4
233	3
234	0
235	2
236	3
237	3
238	3
239	3
240	4
241	1
242	3
243	2
244	3
245	3
246	0
247	1
248	1
249	1
250	1
251	4
252	1
253	3
254	1
255	3
256	2
257	5
258	2
259	0
260	0
261	2
262	2
263	2
264	1
265	1
266	3
267	0
268	2

Continued on next page

Index	Counts
269	1
270	6
271	2
272	1
273	1
274	0
275	3
276	0
277	0
278	1
279	2
280	0
281	2
282	2
283	2
284	1
285	3
286	1
287	2
288	2
289	0
290	1
291	1
292	0
293	1
294	0
295	2
296	1
297	1
298	2
299	1
300	0
301	1
302	1
303	0
304	1
305	1
306	3
307	1
308	0

Continued on next page

Index	Counts
309	1
310	1
311	3
312	0
313	3
314	4
315	0
316	3
317	1
318	3
319	0
320	1
321	0
322	2
323	0
324	1
325	1
326	1
327	0
328	2
329	2
330	2
331	1
332	0
333	3
334	0
335	1
336	1
337	0
338	0
339	0
340	2
341	0
342	1
343	0
344	0
345	0
346	0
347	1
348	2

Continued on next page

Index	Counts
349	3
350	1
351	0
352	1
353	0
354	1
355	1
356	2
357	1
358	1
359	0
360	2
361	0
362	3
363	2
364	0
365	0
366	2
367	0
368	1
369	1
370	1
371	1
372	0
373	0
374	1
375	0
376	0
377	2
378	0
379	0
380	0
381	1
382	0
383	1
384	0
385	1
386	1
387	1
388	2

Continued on next page

Index	Counts
389	0
390	1
391	4
392	1
393	0
394	1
395	1
396	0
397	2
398	1
399	0
400	0
401	1
402	0
403	1
404	0
405	0
406	1
407	0
408	1
409	1
410	0
411	0
412	1
413	0
414	0
415	0
416	0
417	0
418	0
419	0
420	0
421	0
422	0
423	0
424	0
425	0
426	0
427	0
428	0

Continued on next page

Index	Counts
429	0
430	0
431	0
432	0
433	0
434	0
435	0
436	0
437	0
438	0
439	0
440	0
441	0
442	0
443	0
444	0
445	0
446	0
447	0
448	0
449	0
450	0
451	0
452	0
453	0
454	0
455	0
456	0
457	0
458	0
459	0
460	0
461	0
462	0
463	0
464	0
465	0
466	0
467	0
468	0
Continued on next page	

Index	Counts
469	0
470	0
471	0
472	0
473	0
474	0
475	0
476	0
477	0
478	0
479	0
480	0
481	0
482	0
483	0
484	0
485	0
486	0
487	0
488	0
489	0
490	0
491	0
492	0
493	0
494	0
495	0
496	0
497	0
498	0
499	0
500	0
501	0
502	0
503	0
504	0
505	0
506	0
507	0
508	0
Continued on next page	

Index	Counts
509	0
510	0

Literatur

- [1] S. Navas u. a. „Review of particle physics“. In: *Phys. Rev. D* 110.3 (2024), S. 030001.
DOI: 10.1103/PhysRevD.110.030001.
- [2] *V01 Lifetime of cosmic muons*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2024.
- [3] Chemie.de. *Myon*. Accessed: 2025-02-14. 2025. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Myon.html>.