



Trefferwahrscheinlichkeit

kosmischer Strahlung mit Molekülen der Atmosphäre

R. Sydow, Niederfinow (Deutschland)
(2022)

abstrakt: Das Myonenexperiment ist eines der am häufigsten herangezogenen Experimente, wenn es um die Bestätigung der speziellen Relativitätstheorie geht. Darin geht es um die Entstehung und den Zerfall der durch kosmische Strahlung initiierten Myonen in der Atmosphäre. Ausgehend von der Entstehungshöhe dieser Myonen und ihrer Geschwindigkeit wird auf eine mögliche Konzentration der Myonen auf der Erdoberfläche geschlossen. Hier wird gezeigt, dass diese Konzentration der Myonen auch mittels klassischer Methoden der Statistik erklärt werden kann.



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abkürzungen	2
Einleitung	3
Methodik	4
Rechenweg der Primärstufe	5
Auswertung	8
Rechenweg der Sekundärstufe	9
Durchführung der Berechnung	12
Auswertung	13
Myonen-Zerfallswahrscheinlichkeit	15
Diskussion	16
Anlagen	18
Anl. 1: Excel-Makro	18
Literatur	19

Abkürzungen

RT	Relativitätstheorie
SRT	spezielle Relativitätstheorie

Einleitung

Die Detektion von kosmischen Myonen auf der Erdoberfläche wird von den Verfechtern der RT als untrüglicher Beweis für die Richtigkeit der SRT angeführt.

In diesem Aufsatz geht es nicht darum, dass die Myonen entstehen und wie sie erzeugt werden. Es wird hier der Frage nachgegangen, wie mit den Mitteln der klassischen Physik nachgewiesen werden kann, dass kosmische Myonen zwangsläufig auch auf der Erdoberfläche zu finden sein müssen.

Die Aussage, dass die Myonen in einer bestimmten Höhe der Atmosphäre¹ entstehen (unabhängig davon, welche Höhe für diesen Entstehungsprozess genannt wird), ist insofern fragwürdig, weil die angegebenen Höhenangaben über die Literaturquellen sehr stark streuen. Es werden in der folgenden Tabelle beispielhaft verschiedene Entstehungshöhen angeführt, in welchen die Myonen nach Maßgabe der entsprechenden Autoren entstehen:

Verfasser	Höhe	Wertung	Quelle
Ahrens	„zwischen 50 km und 15 km“	„im Mittel“	[Ahr] S. 43
unbekannt	„in 30 Kilometer Höhe bilden“		[ub4]
Fließbach	„30 km“	„etwa“	[Fli] S. 132
Bührke	„etwa 30 km“	„Wie Physiker wissen“	[Büh] S. 46
Schmutzer	„20 bis 30 km“	„etwa“	[Scm] S. 61
Ripota	„20 bis 30 km“	„etwa“	[Büh] S. 50
Artecha	„von 20-30 km“		[Art] S. 128
Trefzger	„20 km“	„oberhalb von“	[Tre] S. 8
Lehner	„20 km“	„etwa“	[Leh]
Pelte	„h = 20 km“	„etwa“	[Pel] S. 327
Heisenberg	„etwa 20 km“	„hauptsächlich“	[Hei] S. 5
Imlintz	„ungefähr 20 km“	„ersten Wechselwirkungen“	[ImI] S. 12
Pöpperl	„etwa 15 km“	„entstehen“	[Pöp]
Varesi	„ca. 15km“	„entstehen“	[Var]
Eckstein	„10 bis 20 km“	„entstehen“	[Eck] S. 28
Karg	„etwa 10 bis 15 km“	„entstehen“	[Kar] S. 23
Pörtner	„14 km“	Entstehung	[Pör] S. 5
Chown	„etwa 12,5 Kilometer“	„entstehen“	[Cho] S. 129
Almer	„ca. 12km“	„entstehen“	[Alm]
Maalampi	12 km	„typischerweise“	[Maa] S. 67
Meyndt	„etwa 10 bis 15 Kilometer“	„entstehen“	[Mey] S. 21
Mücke	„10 km“	„mehr als“	[Müc] S. 9

¹ Die Myonen entstehen als Sekundärstrahlung beim Zerfall der bei der Reaktionen kosmischer Strahlung mit den Molekülen der Atmosphäre entstehenden Pionen

Quellenangabe: Sydow, R. Trefferwahrscheinlichkeit, kosmischer Strahlung mit Molekülen der Atmosphäre, Niederfinow (Deutschland) 03.06.2022
<https://rolfswelt.de/diverses/#trefferwahrscheinlichkeit>

Revision: 1.1.1.2 vom 15.07.2023

copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow



Dehne	„10 km“	„Entstehungsort“	[Deh] S. 5
Kainzbauer	„10 km“	„ungefähr“	[Kai]
Bachmann	„ca. 10 km“	„erzeugten“	[Bac] S. 6
Ruder	„(\approx 10 km)“	„in großer Höhe“	[Rud] S. 53
Weger	„9 – 12 km“	„Heutzutage wissen wir“	[Weg] S. 4
Meschede	„9000 m“	„erzeugt“	[Mes] S. 631
Chew	6000 Meter	üblicherweise über	[Che] S. 1

Tab 1: Gegenüberstellung der Entstehungshöhen von Myonen nach Literaturquellen

Im Übrigen wird in keiner Quelle begründet², warum die Myonen gerade in der vom jeweiligen Autor angegebenen Höhe entstehen sollen. Es wird üblicherweise darauf hingewiesen, dass bei der Wechselwirkung der primären kosmischen Strahlung (zumeist Protonen) mit den Molekülen der oberen Atmosphärenschichten (hauptsächlich Stickstoff und Sauerstoff) Pionen entstehen. Deren Lebensdauer sei in der Größenordnung von 10^{-8} Sekunden. Das suggeriert, dass sie beim Zerfall in Myon und Restprodukte einen Weg von maximal $10^{-8} c$ (also etwa 3 m) zurücklegen. Der Entstehungsort der Myonen wird also faktisch mit dem der Pionen gleich gesetzt. Dass man der wissenschaftlichen Gerechtigkeit wegen den Pionen einen relativistisch kontrahierten Weg zuerkennen sollte und ihre Zerfallszeit ebenso der Zeitdilatation unterliegen sollte, bleibt grundsätzlich außer Acht.

Allein diese Uneinigkeit der Wissenschaftler provoziert Widerspruch. Warum wird bei der Beweisführung des Zerfalls kosmischer Myonen als Nachweis für die Zeitdilatation der Primäreffekt des Zerfalls der Pionen ausgespart. Weiterhin ist es suspekt, wenn der Bereich der Myonen-Entstehung von 6 bis 50 km reichen soll. Ob dann dieser Bereich ausreicht, um alle möglichen Literaturquellen einzubeziehen, ist fraglich.

Methodik

Es drängt sich die Frage auf, wann ein kosmisches Teilchen auf ein Teilchen der Atmosphäre treffen wird, um mit diesem zu wechselwirken. Diese Frage dürfte augenscheinlich nur mit den Mitteln der Wahrscheinlichkeitsrechnung zu beantworten sein. Also ist die Frage umzuformulieren: Mit welcher Wahrscheinlichkeit wird ein kosmisches Teilchen auf ein Teilchen der Atmosphäre treffen?

Im Folgenden wird eine definierte Menge von Teilchen betrachtet, welche aus dem Kosmos kommend etwa senkrecht auf die Erdoberfläche rasen. Beim Flug durch die Atmosphäre werden sie mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auf Teilchen der Atmosphäre treffen, sodass die weiteren Reaktionen bis hin zur Myonen-Entstehung betrachtet werden können.

² Siehe hierzu die in der Spalte „Wertung“ der Tab. 1 eingetragenen Hinweise zur Entstehung der Myonen

Quellenangabe: Sydow, R. Trefferwahrscheinlichkeit, kosmischer Strahlung mit Molekülen der Atmosphäre, Niederfinow (Deutschland) 03.06.2022
<https://rolfswelt.de/diverses/#trefferwahrscheinlichkeit>

Revision: 1.1.1.2 vom 15.07.2023

copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow



Um diese Wahrscheinlichkeit zu ermitteln, ist es notwendig, zum Aufbau der Atmosphäre entsprechende Festlegungen zu treffen.

Welche Höhe hat die Atmosphäre?

- Die zu betrachtende Höhe der Atmosphäre wird mit 80 km festgelegt (siehe [Syd1])
- Damit ist zwar erst die Mesosphäre erreicht (siehe [Dec]). Es sind aber bis zu dieser Höhe 99,99% der Masse der Atmosphäre erfasst (vgl. [Syd1])
- Bis 80 km ist auch eine gleichmäßige Verteilung der Elemente gegeben (siehe [Roe] S. 71)

Welchen Aufbau hat die Atmosphäre?

- Hier interessiert die Dichteverteilung der Massen in der Atmosphäre
- Dazu wird die Standardatmosphäre herangezogen ([Gru] S. 18)
- Die Werte für die Dichte sind der Standardatmosphäre nach DIN 5450 entnommen ([Stü])
- Die Dichteverteilung als Funktion der Höhe wird angenommen mit:
 $\rho(h) = 1,4325e^{-0,000143h} \text{ [kg/m}^3\text{]}$ (siehe [Syd1])

Sonstige erforderliche Daten:

- Atomare Einheit $1u = 1,660539040(20) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ (siehe [ub1])
- Masse des Stickstoffatoms $M_{SK} = (14,0067 \pm 0,0001) \cdot u$ ([ub3])
- Kerndurchmesser des N-Atoms $D_{SK} = 5,784 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ ([Krö] S. 39 Gl. 64)
- Durchmesser eines Protons $D_{p+} = 1,7 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ ([ub2])
- Ein Überdeckungsfaktor, der aussagt, wieviel Prozent der Radien der beiden aufeinandertreffenden Teilchen sich überdecken müssen, um eine Wechselwirkung mit dem Ausgang der Pionenentstehung zu haben. Im Unterschied zu Streuversuchen kommt es hier direkt darauf an, dass es bei der Kollision zu kernumformenden Wechselwirkung kommen muss, was in einem Streuversuch nicht zwingend gewollt ist. Das bedeutet, dass bei null % Überdeckung die Radien der Teilchen zu addieren sind und bei 100 % nur Volltreffer gezählt werden dürfen. Damit ist der Wirkungskradius abzuschätzen nach der Formel:

$$r_w = \left(1 - \frac{\ddot{u}}{100}\right) \cdot (r_{Proton} + r_{Stickstoffkern}) \quad \text{Gl. 1}$$

(genauere Berechnungen sind nach [Sta] S. 7 ff. denkbar; vgl. [Krö] S. 34)
von dem Auftreten der Stickstoffatome im molekularen Verband N_2 sei hier abstrahiert.

Rechenweg der Primärstufe

Der Rechenweg wird im Folgenden dargestellt, indem die benutzte Excel-Tabelle erläutert wird. Die zugehörigen Formeln werden erklärt.

Im oberen Teil einer Excel-Tabelle Tab. 2 von Zeile 1 bis Zeile 9 werden die bekannten, oben angegebenen Konstanten eingetragen.

	A	B	C	D	E
1	Dichte-Koeffizient			1,4325	kg/m ³
2	Dichte-Exponent			0,000143	1/m
3	Masse Stickstoffatom			14,0067	u
4	atomare Einheit			1,66E-27	kg
5	Kerndurchmesser Stickstoff			5,78E-15	m
6	Durchmesser Proton			1,70E-15	m
7	Überdeckungsfaktor \ddot{U}			20	%
8	Anzahl der Protonen pro qm			1000	Stk.
9	Höhe des betrachteten Volumens			2,00	m

Tab. 2: Eingangswerte in die Berechnung in der Excel-Tabelle

Es gibt einen Zwischenwert, der den Radius der Wechselwirkung ergibt. Dieser berechnet sich nach der Gleichung Gl. 1 und wird in der Zeile 11 der Excel-Tabelle ermittelt:

	A	B	C	D	E
11	Wirkungsradius			5,987E-15	m

Tab. 3: Berechnung des Wirkungsradius' r_w

Dann wird ein Tabellenbereich für die Berechnung der erforderlichen Zwischenergebnisse und Ergebnisse bereitgestellt. Dieser Bereich soll 40000 Zeilen beinhalten. Damit ist die Höhe der Atmosphäre von 80 km in 2-m-Schalen darstellbar.

	A	B	C	D	E	F	G	H
16	lfd. Nr.	Höhe	Dichte	N-Kerne	P_Fläche	Anz._Pr	P_Vol	Getroffene
17	0	80000	1,540E-05	8717533,27	2,14E-15	1000,0000	3,68E-08	3,677E-05
18	2	79998	1,541E-05	8718364,38	2,14E-15	1000,0000	3,68E-08	3,678E-05
...								
40017	80000	0	1,4325	394914644	4,39E-12	0,0054	3,46E-03	1,879E-07

Tab. 4: Aufbau der Excel-Tabelle

Die Inhalte dieser Zellen der Excel-Tabelle werden im Folgenden beschrieben:

- lfd. Nr. in Spalte „A“
„lfd. Nr.“ stellt die laufende Nummer der Zeile dar und ist für die weitere Berechnung ohne Belang.
- Höhe in Spalte „B“
Mit „Höhe“ ist die Höhe über Normalnull gemeint. Auf diese Höhe beziehen sich die Berechnungen in der entsprechenden Zeile.
Als Anfangswert der Höhe, der in die Zelle „B17“ einzutragen ist, wird die 80000 gewählt. Dieser Wert dokumentiert die Höhe von 80 km, ab welcher die Wechselwirkung der Protonen mit den Stickstoffatomen betrachtet werden soll. In den folgenden Zeilen wird dieser Wert um die Höhe des betrachteten Atmosphärenvolumens aus Zelle „D9“ verringert. Damit erreicht man die Höhe 0 nach 40000 Schritten. Die Formel lautet „=B17-D9“.



- **Dichte in Spalte „C“**
In dieser Spalte wird die Dichte berechnet, die sich nach der Formel (s. u.) entsprechend der in Spalte B angegebene Höhe einstellt. Einen speziellen Anfangswert gibt es nicht, sodass in Zeile 17 und den folgenden Zeilen äquivalente Formeln stehen. Die Formel für Zeile 17 ist: „=D\$1*EXP(-D\$2*B17)“.
- **N-Kerne in Spalte „D“**
Aus der Dichte, die in einer bestimmten Höhe besteht, ist die Anzahl der Stickstoffatome im betrachteten Volumenelement zu berechnen. Die Dichte wird angegeben in kg/m^3 . Das bedeutet, dass sich als Ergebnis eine Anzahl von Stickstoffatomen je m^3 ergibt. Zu diesem Zweck ist die Dichte durch die Masse eines Stickstoffatoms zu dividieren. Weil diese Masse in der atomaren Maßeinheit u (s. D\$4) angegeben ist, muss die Dichte auch noch durch diese Einheit dividiert werden.

Beachtet man nun, dass für weitere Berechnung die Anzahl der Stickstoffatome nötig ist, die in einer Dimension des Raumes zu erwarten sind, folgt bei der Annahme einer Gleichverteilung der Atome, dass aus der je m^3 erhaltenen Anzahl die 3. Wurzel zu ziehen ist.
Auch bei dieser Berechnung gibt es keinen Startwert und in der 17 und den folgenden Zeilen stehen äquivalente Formeln. Es ergibt sich für die Zeile „D17“ die Formel „=POTENZ(C17/D\$3/D\$4;1/3)“.
- **P_Fläche in Spalte „E“**
Über die Anzahl der Stickstoffatome in einer Dimension ergibt sich die Anzahl der Stickstoffatome in der Querschnittsfläche, die von der senkrecht einfallenden kosmischen Strahlung durchflogen wird. Diese Anzahl ist gerade das Quadrat der Stickstoffatome je Dimension dieser Fläche. Jedes Stickstoffatom kann mit seinem Kern und einem kosmischen Proton wechselwirken (vgl. [Hei] S. 2). Die Wechselwirkungsfläche ist die Kreisfläche mit dem in Zelle „D\$11“ berechneten Wirkungsradius. Summiert man diese Fläche über alle Stickstoffatome in der Querschnittsfläche, erhält man die auf die Querschnittsfläche zu beziehende Trefferwahrscheinlichkeit. Sie berechnen sich in den Zellen dieser Spalte ab der Zeile 17 in identischer Weise. Die einzutragende Formel ist: „=D17*D17*PI()/4*D\$11*D\$11“.
- **Anzahl in Spalte „F“**
Wichtig ist es, die Entwicklung der Protonenzahl über die Höhe zu betrachten. Es handelt sich um die Anzahl der Protonen, die von der Ausgangsmenge in einer bestimmten Höhe oder einem bestimmten Volumenelement noch vorhanden ist. Um hier die Berechnungen durchführen zu können, ist im Feld F17 die Ausgangsmenge der betrachteten Protonen einzutragen. Das geschieht durch „=D\$8“.
Ab dem Feld F18 muss die Anzahl der Protonen berechnet werden, die im nächsten Volumenelement für eine mögliche Kollision zur Verfügung stehen. Diese Anzahl von Protonen berechnet sich simpel, indem von der Anzahl der Protonen aus dem vorangegangenen Volumenelement die Anzahl der Treffer des betrachteten Volumenelementes abgezogen wird. Es ist also in Zeile 18 einzutragen: „=F17-H17“.
- **P_Vol in Spalte „G“**

Die Trefferwahrscheinlichkeit für die Stickstoffatome in der Querschnittsfläche ist mit der der Trefferwahrscheinlichkeit der Stickstoffatome, die sich in den darunter liegenden Schichten befinden, zu kombinieren. Diese wird eingetragen als: „=1-Potenz(1-E17;D17*\$D\$9)“ (siehe [Syd2]).

- **Getroffene in Spalte „H“**

Ist die Wahrscheinlichkeit bekannt, mit der die einfallenden Protonen im betrachteten Volumenelement einen Treffer landen werden, kann über die Anzahl der noch im Volumenelement übrig gebliebenen Protonen die Anzahl der möglichen Treffer berechnet werden. Es ist lediglich die Wahrscheinlichkeit P_{Vol} mit der Anzahl dieser restlichen Protonen zu multiplizieren. Das erfolgt mittels der Formel: „=F17*G17“.

Auswertung

Die so vorbereitete Excel-Tabelle ist durch Kopieren der Zeile 18 nach unten zu vervollständigen. Die entsprechenden Ergebnisse berechnen sich automatisch.

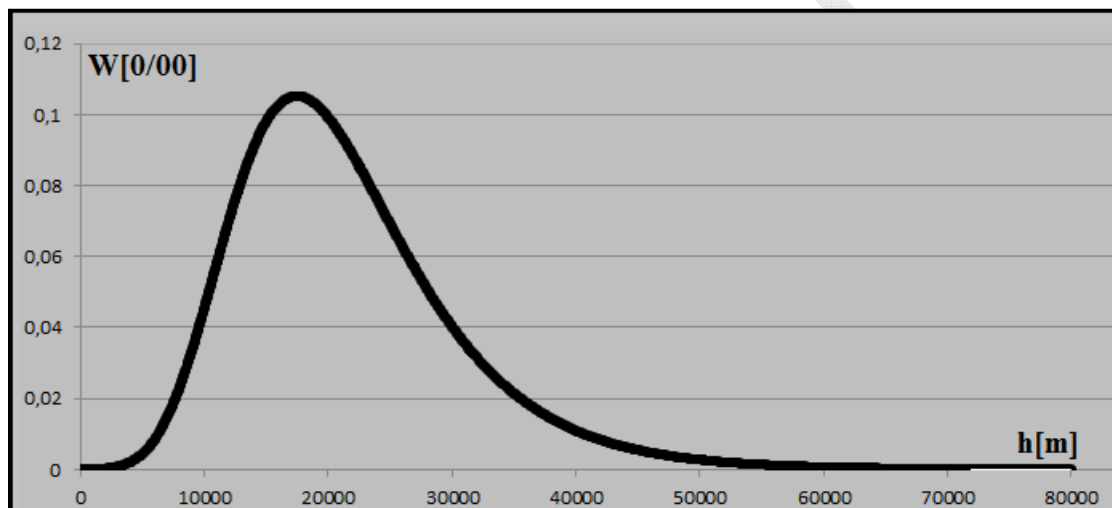


Bild 1: Kollisionen K in Abhängigkeit der Höhe h

Fügt man eine Grafik in die Tabelle ein, die auf der Abszisse die Höhe (Spalte B) abträgt und auf der Ordinate die Anzahl der Getroffenen (Spalte H) hat, ergibt sich das Bild 1.

Es zeigt sich, dass es über den gesamten Höhenbereich der Atmosphäre von 80 km die Wahrscheinlichkeit für Kollisionen der kosmischen Strahlung mit Teilchen der Atmosphäre gegeben ist. Das Maximum der Trefferwahrscheinlichkeit liegt etwa bei 17,2 km Höhe. Dieses Maximum ist sicherlich abhängig von getroffenen Festlegungen der Berechnung und kann in der Realität variieren. Auch ist das Modell willkürlichen Annahmen unterworfen.

Es zeigt aber deutlich, dass die Wechselwirkung der einfallenden kosmischen Strahlung mit einer geringen Wahrscheinlichkeit bereits bei 80 km Höhe beginnt. Dieser Beginn resultiert natürlich daraus, dass nur über diesen Höhenbereich Untersuchungen angestellt wurden.



Weiter ist festzustellen, dass auch in der Höhe null (also an der Erdoberfläche) die Wahrscheinlichkeit für Wechselwirkungen der kosmischen Strahlung mit den Molekülen der Atmosphäre nicht gleich null ist.

Rechenweg der Sekundärstufe

Mit der Berechnung der Wahrscheinlichkeitskurve der Primärstufe (siehe Bild 1) ist die Entstehungswahrscheinlichkeit von Pionen durch Reaktion der kosmischen Strahlung mit den Molekülen in den verschiedenen Höhen der Atmosphäre erklärt.

Damit ist nun die Voraussetzung zur Bestimmung der höhenabhängigen Myonen-Zahl gegeben. Der Berechnung der Sekundärstufe steht nun nichts mehr entgegen. Mit der Sekundärstufe ist die Entstehung der Myonen aus dem Zerfall der Pionen gemeint. Damit steht die Aufgabe, den Zerfall der Pionen rechenstechnisch nachzuvollziehen, sodass dann auf den Ort (die Höhe) der Myonen-Entstehung geschlossen werden kann.

Da für die entwickelte Funktion keine explizite Formel ermittelt wurde und diese Funktion lediglich als Wertetabelle vorliegt, reduziert sich auch die Berechnung der Sekundärstufe auf ein mittels Excel durchgeführtes Verfahren. Die Genauigkeit der Funktionswerte ist durch die Abstufung der Atmosphärenschichten von 2 m gegeben. Bei Aufbringung entsprechender Rechenzeit kann sie erhöht werden, wenn das gewünscht sein sollte.

Weiß man nun, wo und wann ein Pion entsteht, hat man damit noch lange nicht den Ort und den Zeitpunkt des Zerfalls dieses Pions. Der Zerfall gehorcht einer Zerfallskurve, die voraussagt, wie viele Pionen einer vorbestimmten Pionen-Menge zu einem bestimmten Zeitpunkt noch nicht zerfallen sein wird.

Das Zerfallsgesetz zu kennen, ist primär notwendig, um diesbezügliche Aussagen über die Zerfallswahrscheinlichkeit machen zu können (vgl. [Syd3]). Nun wird in der einschlägigen Literatur grundsätzlich davon ausgegangen, dass dieses Zerfallsgesetz einer Exponentialfunktion gehorchen muss. Weil es keine nachgewiesene andere Verteilung für den Zerfall der Pionen gibt und der Einfluss der Zerfallskurve auf die hier zu begutachtende Zerfallswahrscheinlichkeit ob der sehr geringen Lebensdauer der Pionen eher als vernachlässigbar eingeschätzt wird, soll mit dieser exponentiellen Zerfallskurve weiter gerechnet werden.

Die Rechnung hat nach den Erkenntnissen des Rechenweges der Primärstufe zu berücksichtigen, dass an jedem Ort (also in jeder Höhe) Pionen entstehen, die bei ihrem Weiterflug durch die Atmosphäre entsprechend einer vorgegebenen Zerfallskurve zerfallen werden. Das bedeutet, dass in einer betrachteten Höhe die Summe aller Pionen mit der jeweiligen Zerfallswahrscheinlichkeit ihres Entstehungsortes zu betrachten ist, wenn man die zerfallenden Pionen an einem Ort erfassen möchte. Im Bild 2 ist diese Situation

veranschaulicht. Von der schwarzen Kurve, der Wahrscheinlichkeit der Pionen-Entstehung gehen die weißen Wahrscheinlichkeitskurven des Pionen-Zerfalls aus. In einer Höhe h , an der die Zerfallswahrscheinlichkeit der Pionen erfasst werden soll (senkrechte schwarze Linie), sind die Zerfallswahrscheinlichkeiten der einzelnen Pionen-Zerfallskurven aufzusummieren.

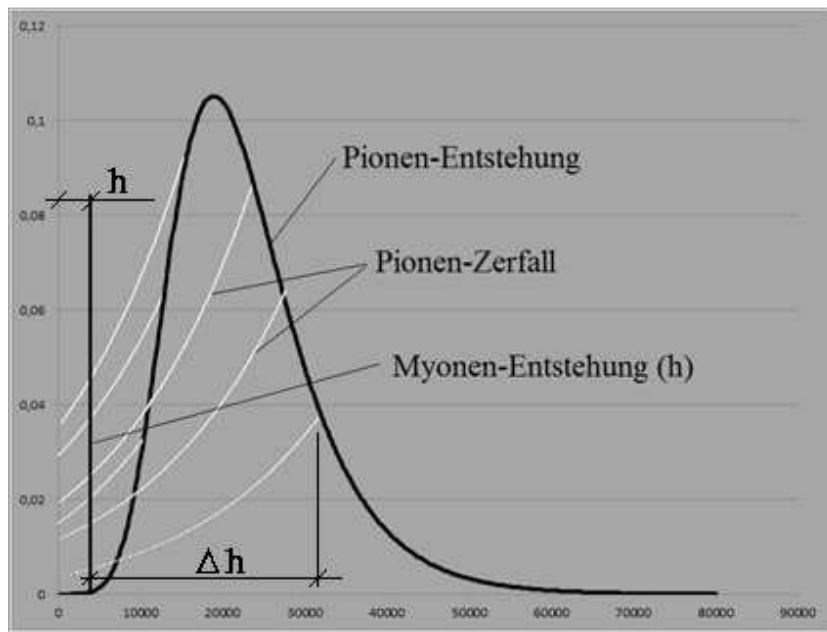


Bild 2: Abschätzung des Pionen-Zerfalls

Grundsätzlich wären die Formeln der Kurven der Pionen-Entstehungswahrscheinlichkeit und die der Pionen-Zerfallswahrscheinlichkeit zu kombinieren und über die Höhe zu integrieren. Da aber die Funktion der Pionen-Entstehung nicht als Gleichung vorliegt, reduziert sich die Summierung auf eine numerische. Die Frage, die sich stellt, ist die Frage nach dem ‚Wie‘. In welcher Weise lassen sich die Zerfallswahrscheinlichkeiten der Pionen in einer bestimmten Höhe berechnen?

Die Darstellung in Bild 3 verdeutlicht den angewendeten mathematischen Hintergrund. Es gibt die Funktion der Pionen-Entstehung $f_E(h)$ (Bild 1). Die an der Stelle h entstehenden Pionen zerfallen nach dem Zerfallsgesetz $N = N_0 e^{-\lambda t}$ mit der Zeitfunktion, die sich aus $ct = \Delta h$ ergibt. Es wird dabei die Lichtgeschwindigkeit c angenommen, weil die Pionen-Geschwindigkeit aufgrund ihres Energiegehaltes dieser Geschwindigkeit nahe kommt. Für Pionen geringerer Geschwindigkeit würden sich steilere Exponentialkurven ergeben und der Unterschied zwischen Entstehung und Zerfall der Pionen damit geringer ausfallen. Das ΔH im Bild 3 entspricht der Entfernung von der Entstehungshöhe der Pionen bis zur Höhe, an welcher die zerfallenen Pionen betrachtet werden. Der Koeffizient N_0 in der Zerfallsgleichung

entspricht gerade dem Wert von $f_E(h)$ und bedeutet die Anzahl der an einer Stelle h entstandenen Pionen.

Für die folgenden Ausführungen zu beachten ist, dass eine Zerfallskurve i.a. nicht die an einer Stelle oder zu einem Zeitpunkt zerfallenden Teilchen darstellt, sondern dass es sich bei einer Zerfallskurve um die entsprechende Darstellung der übrig gebliebenen Teilchen handelt.

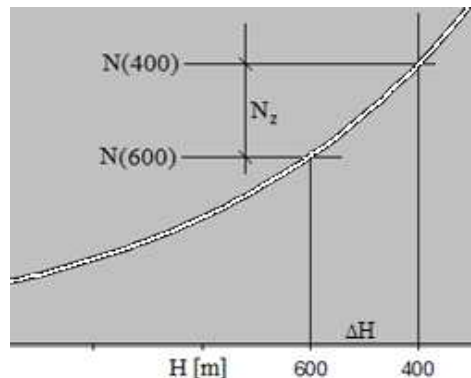


Bild 3: Darstellung einer Zerfallskurve

Zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes ist im Bild 3 die angenommene Zerfallskurve der Pionen dargestellt. Sie ist so gezeichnet, wie sie auch im Bild 2 liegt. Bild 3 stellt also einen Ausschnitt des Bildes 2 dar. Um auf die Funktion des Bildes 3 schließen zu können, ist dem Bild eine anders bezeichnete Abszisse gegeben. Die mit H bezeichnete Abszisse hat ihren Ursprung ($H = 0$) am Ort der Pionen-Entstehung und eine Richtung, die der Höhe h entgegen gerichtet ist. Damit ergibt sich die Höhendifferenz $\Delta h = -\Delta H$.

Im Bild 3 ist veranschaulicht, dass die hier angenommene Zerfallskurve (dicke, weiße Kurve) in der Höhe $H = 400$ m eine Anzahl $N(400)$ darstellt und in der Höhe $H = 600$ m nur noch die Anzahl $N(600)$ ausweist. In der Zwischenzeit sind die Teilchen N_z zerfallen. Allgemein leitet sich daraus der Zusammenhang ab:

$$N_z = N_1(H = H_1) - N_2(H = H_2) \quad \text{Gl. 2}$$

Beachtet man, dass $N_z / \Delta H$ für $\Delta H \rightarrow 0$ gerade dem Anstieg $f'(x) \rightarrow [f(x+\Delta x) - f(x)] / \Delta x$ (vgl. [Göh] S. 65) der angenommenen Zerfallskurve entspricht, lässt sich aus der Zerfallskurve die Anzahl der in einer Höhe zerfallenen Teilchen bestimmen. Sei die Zerfallskurve $f_z(H)$, folgt für die in einer Höhe H zerfallenden Teilchen N_z :

$$N_z(H) = \Delta k_B * f'_z(H) \quad \text{Gl. 3}$$

Der Faktor Δk_B stellt einen Korrekturfaktor dar, der sich aus der Breite eines betrachteten Intervalls ergibt und ist für die numerische Integration nicht zu vernachlässigen. Weil zur Ermittlung des Anstieges einer Funktion diese Breite eines Intervalls gegen null gehen müsste, dies hier aber bei der numerischen Integration nicht umgesetzt werden kann, muss dieser Faktor eingeführt werden.



Nimmt man an, dass die Zerfallskurve im Bild 3 einem Exponentialgesetz folgt:

$$f_z(H) = N_0 e^{-\lambda \frac{H}{c}}, \quad \text{Gl. 4}$$

ergibt sich die Ableitung dieser Funktion zu:

$$f'_z(H) = -\frac{\lambda}{c} N_0 e^{-\lambda \frac{H}{c}}, \quad \text{Gl. 5}$$

Wegen der Gleichheit von $N_0(H) = f_E(\Delta H = 0) = f_E(h)$ ergibt sich wegen Gleichung Gl. 3 die Anzahl der zerfallenden Pionen in einer bestimmten Höhe h (vgl. Bild 2) zu:

$$\Pi_Z(h) = \Delta k_B \sum_{\Delta h=0}^{\Delta h=80\text{km}-h} \left(-\frac{\lambda}{c} f_E(h + \Delta h) e^{-\frac{\lambda \Delta h}{c}} \right) \quad \text{Gl. 6}$$

$$\Pi_Z(h) = -\Delta k_B \frac{\lambda}{c} \sum_{\Delta h=0}^{\Delta h=80\text{km}-h} \left(f_E(h + \Delta h) e^{-\frac{\lambda \Delta h}{c}} \right) \quad \text{Gl. 7}$$

$$\Pi_Z(h) = k_{100} \sum_{\Delta h=0}^{\Delta h=80\text{km}-h} \left(f_E(h + \Delta h) e^{-\frac{\lambda \Delta h}{c}} \right) \quad \text{Gl. 8}$$

In den Gleichungen 4 bis 8 bedeuten:

- h → die Höhe, in der die Anzahl der zerfallenen Pionen ermittelt werden soll
- Δk_B → der Korrekturfaktor für die Breite des betrachteten Höhenintervalls
- Δh → der Abstand der Entstehungshöhe der Pionen von h
- $h + \Delta h$ → die Entstehungshöhe der Pionen
- $f_E(h + \Delta h)$ → die Anzahl der in der Höhe $h + \Delta h$ entstandenen Pionen
- λ → die Zerfallskonstante der Zerfallsfunktion der Pionen
- $e^{-\frac{\lambda \Delta h}{c}}$ → der Wert der Zerfallskurve nach der Höhendifferenz Δh
- $\frac{\lambda}{c}$ → ein Koeffizient in der Maßeinheit [1/m], der auf die zerfallenen Pionen schließen lässt
- k_{100} → Korrekturfaktor, der normiert, dass in der Summe aller betrachteten Pionen die Anzahl der zerfallenen Pionen gerade der Anzahl der entstandenen Pionen ist. Diese Korrektur ist notwendig, wenn die Wahrscheinlichkeit des Zerfalls eines Pions nach der Exponentialfunktion in der Summe nicht eins ergibt.

Weil die Funktion f_E in der Gleichung Gl. 8 nicht als Formel vorliegt, sondern sie lediglich als Wertetabelle³ existiert, ist es vorteilhaft, die weitere Bearbeitung ebenfalls im Excel-Programm durchzuführen.

Durchführung der Berechnung

Zu diesem Zweck wird die in oben beschriebene Excel-Tabelle weiterentwickelt. In den Spalten H bis J werden Daten vorbestimmt:

³ Siehe Bild 3, wo diese Wertetabelle aus der oben beschriebenen Excel-Tabelle als Funktion dargestellt ist

Quellenangabe: Sydow, R. Trefferwahrscheinlichkeit, kosmischer Strahlung mit Molekülen der Atmosphäre, Niederfinow (Deutschland) 03.06.2022
<https://rolfswelt.de/diverses/#trefferwahrscheinlichkeit>

Revision: 1.1.1.2 vom 15.07.2023

copyright ©: alle Rechte vorbehalten, 2022, Rolf Sydow



	H	I	J
1	Exponentialverteilung		
2	Pionen-Lebensdauer	2,60E-09	s ([Sta] S. 5)
3	λ (Lambda)	384615384,6	1/s
4	c (Lichtgeschwindigkeit)	299792458	m/s ([Hoc] S. 315)
5	Exponent	1,282938828	1/m
6	Korrekturfaktor k_{100}	7,20E-01	m

Tabelle 5: Daten zur Berechnung der Zerfallskurve der Pionen

Dabei wurde die Lebensdauer der Pionen der Literatur entnommen. Der Kehrwert davon entspricht dem in der Gleichung Gl. 8 verwendeten λ im Exponenten. Die Lichtgeschwindigkeit sollte hinlänglich bekannt sein. Damit ist der Koeffizient (λ/c) des Exponenten der Gleichung Gl. 8 zu berechnen. Der Korrekturfaktor kann erst nach Berechnung der Werte der Exponentialkurve ermittelt werden und wird weiter unten beschrieben.

Des Weiteren ist die Tabelle Tab 4 um 3 Spalten zu erweitern:

	A	...	I	J	K
16	lfd. Nr.	...	Exponential	Pionen-Zerfall	normiert
17	0	...	1,28E+00	4,72E-05	3,40E-05
18	2	...	9,86E-02	5,08E-05	3,66E-05
...					
40017	80000	...	0,00E+00	2,61E-05	1,88E-05

Tabelle 6: erweiterte Tabelle zur Berechnung des Pionen-Zerfalls

Mithilfe der vorberechneten Werte ist die Spalte „I“ mit der Exponentialkurve zu füllen, die sich für den Pionen-Zerfall ergibt: $I17=EXP(-\$I\$5\cdot A17)$. Die mit „lfd. Nr.“ bezeichnete Spalte enthält die Höhen in aufsteigender Richtung (also die Abszisse in H: siehe Gleichung Gl. 4). Dass diese Werte zur Berechnung der Exponentialfunktion verwendet werden, heißt die Richtung der Exponentialkurve als Zerfallskurve in Bezug auf die Höhe (Spalte „B“) zu beachten.

Hat man die Werte der Exponentialkurve berechnet, ist es mittels eines Makros (siehe Anl. 1) möglich, die gesuchte Summe nach der Formel Gl. 8 auszurechnen. Dieses in Excel eingebundene Makro berechnet für alle Zellen von 17 bis 40017 die Summe aller Zerfallskurven, die mit deren Ursprungs-Pionenzahl (Spalte „H“) bewertet wurden und trägt sie in die Spalte 10 (Spalte „J“) ein.

Auswertung

Nun liegen die Werte für den Pionen-Zerfall in der 10. Spalte (Spalte „J“) vor. Diese sind lediglich zu normieren, indem man sie mit dem Normierungsfaktor k_{100} aus Zelle „I6“ multipliziert.

Wenn die Kurve des Pionen-Zerfalls berechnet wurde, kann auch der Korrekturkoeffizient k_{100} ermittelt werden. Dieser ergibt sich einfach, indem man die Summe aller entstandenen Pionen aus der Spalte ‚Getroffene‘ durch die Summe aller zerfallenen Pionen aus der Spalte ‚Pionen-Zerfall‘ teilt. Es steht also in „I6“:

$I6 = \text{Summe}(H17:H40017) / \text{Summe}(J17:J40017)$.

Damit ist garantiert, dass die Anzahl der zerfallenden Pionen der Anzahl der entstandenen Pionen entspricht. Eine Differenz ergibt sich dadurch, dass die Zerfallskurven in dieser Rechnung lediglich bis zur Erdoberfläche betrachtet werden, sie aber theoretisch bis ins Unendliche gehen.

Die sich ergebenden Werte werden in die Spalte „K“ eingetragen und können dem Bild für den Zerfall (Bild 1) zugefügt bzw. überlagert werden.

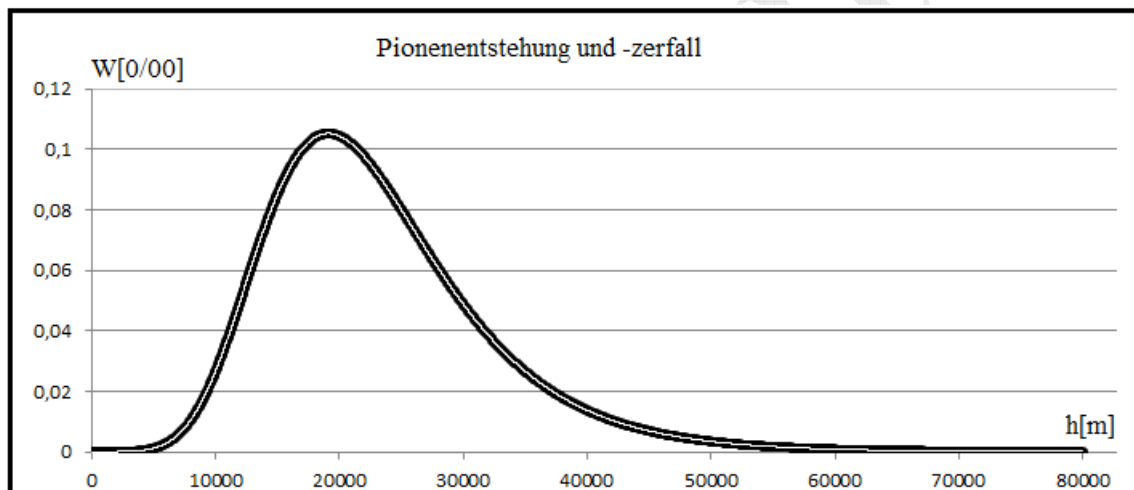


Bild 4: überlagerte Darstellung des Pionen-Zerfalls (weiß)
über die Pionen-Entstehung (schwarz)

Im Ergebnis dieser Rechnung zeigt sich, dass der Pionen-Zerfall nicht erkennbar von der Pionen-Entstehung abweicht.

Die Lebensdauer der Pionen ist offensichtlich so gering, dass es zwischen Entstehung und Zerfall keinen nennenswerten örtlichen Unterschied gibt. Das war zu erwarten, weil wie oben bereits erwähnt die mittlere Lebensdauer nur einen Flugweg von etwa 3 m ergäbe.

Zu diskutieren wäre, dass eine Anwendung der Gesetzmäßigkeiten der SRT dazu führen müsste, dass die Zerfallskurve wegen einer anzunehmenden Zeitdilatation wesentlich anders aussehen würde. Der Zerfall der Pionen müsste in Analogie zum angenommenen Zerfall der Myonen wesentlich später stattfinden. Das entspräche einer Streckung der Zerfallskurve und der Zerfall der Pionen würde mehr zur Erdoberfläche hin stattfinden. Damit ergäbe sich der

Entstehungsort der Myonen aus dem Pionen-Zerfall ebenfalls näher an der Erdoberfläche. Das Argument einer Myonen-Entstehung in großer Höhe der Atmosphäre verliert damit an Beweiskraft.

Myonen-Zerfallswahrscheinlichkeit

Hat man das Verfahren für den Pionen-Zerfall erarbeitet, kann dieses in gleicher Weise zur Berechnung des Myonen-Zerfalls benutzt werden. Es sind lediglich die entsprechenden Anfangsdaten einzugeben und die Berechnung kann mittels Makro (wie vor beschrieben und siehe Anl. 1) erfolgen. In den Spalten H bis J werden nun die Daten vorbestimmt:

	H	I	J
1	Exponentialverteilung		
2	Myonen-Lebensdauer	2,20E-06	s ([Dan] S. 307)
3	λ (Lambda)	454545,4545	1/s
4	c (Lichtgeschwindigkeit)	299792458	m/s ([Hoc] S. 315)
5	Exponent	0,0015162	1/m
6	Korrekturfaktor k_{100}	1,996970662	m

Tabelle 7: Daten zur Berechnung der Zerfallskurve der Myonen

Es ergibt sich im Bereich für die einzugebenden Konstanten der Excel-Tabelle (siehe Tabelle Tab 5) lediglich zwei Änderungen. Diese sind die Myonen-Lebensdauer im Feld „I2“ und deren Wert λ im Feld "I3".

Die Änderung des Korrekturfaktors k_{100} ergibt sich im Selbstlauf durch die entsprechende im Feld „I6“ hinterlegte Formel.

Nach Anwendung des Makros (Anl. 1) ergeben sich die folgenden Berechnungsbeispiele:

	A	...	I	J	K
16	lfd. Nr	...	Exponential	Pionen-Zerfall	normiert
17	0		1,52E-03	5,15E-08	1,03E-07
18	2		1,51E-03	1,07E-07	2,13E-07
...					
40017	80000	...	3,18E-56	4,47E-05	8,93E-05

Tabelle 8: erweiterte Tabelle zur Berechnung des Myonen-Zerfalls

Zu beachten ist, dass die angegebenen Werte sich auf eine Schichtdicke von 2 m beziehen. Für die weitere Auswertung wären diese also durch 2 zu dividieren.

Das Ergebnis der Berechnung ist im Bild 5 dargestellt.

Es ist zu ersehen, dass also der Myonen-Zerfall ebenso wie der Pionen-Zerfall über den gesamten Bereich der Atmosphäre stattfindet. Dass die Kurve des Pionen-Zerfalls mit der der Pionen-Entstehung faktisch identisch ist, wird hier unterstellt.

Die beiden Kurven erscheinen ähnlich, wobei das Maximum des Myonen-Zerfalls noch niedriger (abschätzungsweise bei 17 km Höhe) liegt.

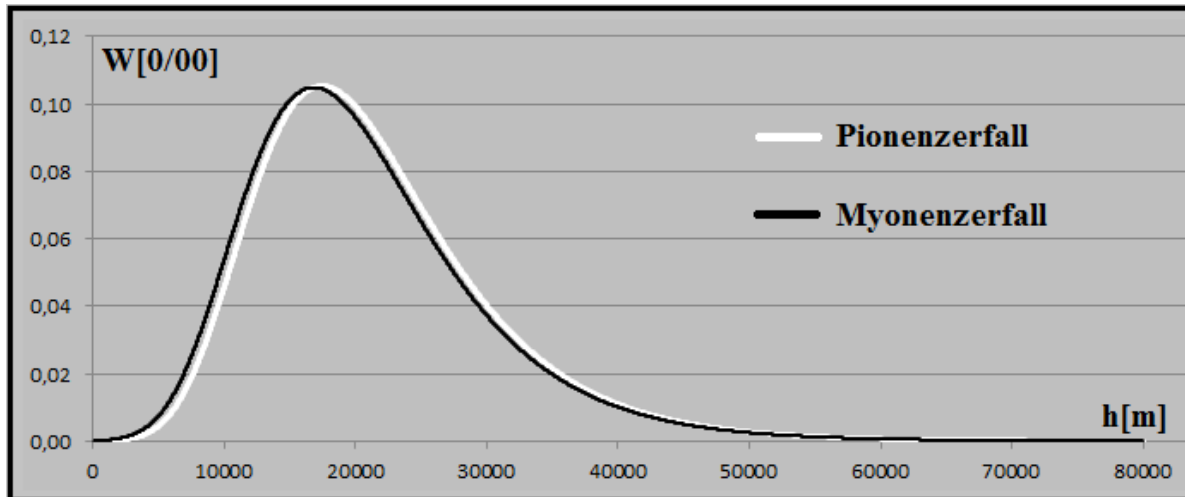


Bild 5: Wahrscheinlichkeit für Zerfall von Pionen und Myonen

Eine Approximation der Kurven durch eine Weibull-Verteilung scheint möglich zu sein. Diese würde aber sicherlich weitere Einbußen der Exaktheit der Kurven mit sich bringen. Jedenfalls ist zu erkennen, dass die Wahrscheinlichkeit des Myonen-Zerfalls an der Erdoberfläche größer null ist.

Diskussion

Würde man nun die Höhenangaben der Myonen-Entstehung nach Tabelle Tab 1 derart interpretieren, dass es sich bei diesen Höhen um das Maximum der Wechselwirkung kosmischer Protonen mit der Atmosphäre handelte, würde die hier gezeigte Untersuchung nachweisen, dass damit nicht ausgeschlossen werden kann, dass Myonen in der Nähe der Erdoberfläche entstehen und zerfallen.

Sicherlich ist bei den getroffenen Annahmen noch einiges zu konkretisieren, zu verbessern oder genauer darzustellen. Damit wird aber an dem Prinzip der Herleitung der Wahrscheinlichkeitskurve von Treffern der kosmischen Strahlung mit den Molekülen der Atmosphäre, als auch an der Zerfallskurve der daraus entstandenen Myonen nichts verändert.

Das bedeutet, dass die Veränderung von getroffenen Annahmen und die Veränderung von eingesetzten Werten sicherlich zu Differenzen den Wahrscheinlichkeitskurven führen werden. Das Maximum wird sich mit der Veränderung der angenommenen Werte verschieben. Die



Kurve wird aber in jedem Fall in ihrer Form erhalten bleiben und der Weibull-Verteilung ähnlich sein.

Um diese Wahrscheinlichkeitskurve nachzuvollziehen, wären Messungen in einem Zeitbereich und an derselben geografischen Position erforderlich. Nur so kann die im Bild 5 gezeigte Wahrscheinlichkeitskurve des Myonen-Zerfalls verifiziert werden. Das wird sich aber als schwierig erweisen.

Eine Durchführung von Messungen über verschiedene Zeitpunkte hätte den zeitgerechten Einfall kosmischer Strahlung zu berücksichtigen. Da der Einfall kosmischer Strahlung kein streng kontinuierlicher ist, würden zu unterschiedlichen Zeiten durchgeführte Messungen zu keinen in Korrelation stehenden Ergebnissen führen.

Auch ist der nicht zu garantierende senkrechte Einfall der kosmischen Strahlung ein Problem, dass rechentechnisch zu berücksichtigen wäre, um zu aussagekräftigen Ergebnissen zu kommen.

Letztlich bleibt aber die Erkenntnis, dass die Argumentation der Relativisten ins Leere geht, wenn sie behaupten, dass sich aus der Entstehungshöhe und der mittleren Zerfallszeit der kosmischen Myonen die Zeitdilatation ableiten könnte.



Anlagen

Anl. 1: Excel-Makro

```
Sub Überl_Tab1()  
' Überlagerung von Verteilungen im Bereich von Zeile 17 bis 40017  
Start = 17  
For i = 0 To 40000  
    aktzei = i + Start  
    Sum = 0  
    For j = 0 To i  
        Sum = Sum + Cells(j + Start, 9).Value * Cells(aktzei - j, 8).Value  
        If Cells(j + Start, 9).Value = 0 Then j = i  
    Next j  
    Cells(aktzei, 10).Value = Sum  
    Cells(1, 10) = i  
Next i  
End Sub
```



Literatur

- [Ahr] Ahrens, J. C.: Überprüfung der Genauigkeit der Relativitätstheorie mit atmosphärischen Myonenneutrinos aus den AMANDA-Daten der Jahre 2000 bis 2003
Johannes Gutenberg-Universität Mainz Mainz (08.11.2006) cited 15.01.2014
<http://inspirehep.net/record/741098/files/diss.pdf>
- [Alm] Almer, J.: Myon-Experiment
Gymnasium Bayern unbekannt (01.02.2011) cited 10.12.2013
http://www.edu-maphy.de/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=phys:ph11:rossi_hall.pdf
- [Art] Artech, S. N.: Kritik der Grundlagen der Relativitätstheorie
google Moskau (2008) cited 21.10.2009
http://www.antidogma.ru/index_deu.html
- [Bac] Bachmann, S.: F13 - Lebensdauer von Myonen
Universität Heidelberg Heidelberg (15.11.2011) cited 20.08.2016
C:\Komponenten\Literatur\Bibliothek_Recherchen\Physik\F13_Anleitung.pdf
- [Büh] Bührke, T.: $E=mc^2$, Einführung in die Relativitätstheorie
Deutscher Taschenbuch Verlag München 07/1999
- [Che] Chew, R. C. K.: Special Relativity fails to resolve cosmic muon decay
google Singapore (13.08.2014) cited 21.08.2016
<http://vixra.org/pdf/1408.0078v2.pdf>
- [Cho] Chown, M.: Warum Gott doch würfelt, über "schizophrene Atome" und andere Merkwürdigkeiten aus der Quantenwelt
Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG München (2013) cited 16.03.2015
<https://books.google.de>
- [Dan] Daniel, H.: Physik 4, Atome-Festkörper-Kerne-Teilchen
Walter de Gruyter GmbH Berlin (1998)
<http://books.google.de/>
- [Dec] Decker, S.: Aufbau der Erdatmosphäre
Westdeutscher Rundfunk Köln Köln (13.08.2014) cited 16.09.2016
<http://www.planet-wissen.de/natur/klima/erdatmosphaere/pwieaufbaudererdatmosphaere100.html>
- [Deh] Dehne, C.; Fleischmann, S.: Lebensdauer von Myonen der Höhenstrahlung
google unbekannt (12/2003)
<http://www.fleischmann-netz.de/studium/fpi/fpi-6d.pdf>
- [Eck] Eckstein, D.: Epstein erklärt Einstein
genius media AG Frauenfeld (Schweiz) 14.10.2008
<http://www.relativity.li/epstein/pdf-downreads.html>



- [Fli] Fließbach, T.: Relativistische Mechanik
Universität Siegen Siegen cited 22.04.2013
<http://www2.uni-siegen.de/~flieba/pdf/aprobe.pdf>
- [Göh] Göhler, W.: Höhere Mathematik, Formeln und Hinweise
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig 4. Aufl. 1974
- [Gru] Gruber, T.: Die Rolle der Atmosphäre in der Geodäsie
TUM Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie München (03.03.2008) cited
19.09.2016
www.iapg.bgu.tum.de/mediadb/22386/22387/20080301_DLR_IPA_Seminar.pdf
- [Hei] Heisenberg, W. (Hrsg.): Kosmische Strahlung, Vorträge gehalten Max-Planck-Institut für Physik
Göttingen
Springer Verlag Göttingen 2. Aufl. (1953) cited 18.11.2015
<https://books.google.de>
- [Hoc] Hoche, D. et al.: Physik Abitur, Duden - Basiswissen Schule
PAETEC Verlag für Bildungsmedien Berlin Mannheim Leipzig Wien Zürich 2003
www.schuelerlexikon.de
- [Iml] Imlintz, C.: Nachweis kosmischer Teilchen im Schulunterricht
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Freiburg (20.07.2010) cited 01.05.2016
http://hpfr03.physik.uni-freiburg.de/arbeiten/diplomarbeiten/imlintz_staatsexamen_2010.pdf
- [Kai] Kainzbauer, J. et al.: Myonen
Gymnasium Wattwil Wattwil (Schweiz) cited 30.08.2015
http://www.kantiwattwil.ch/downloads/academiaposter09_myonen.pdf
- [Kar] Karg, T. et al.: Teilchenphysik, kosmische Strahlung
Joachim Herz Stiftung Hamburg 1. Aufl. (2016) cited 20.08.2016
http://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/Material_Lehrkraefte/Unterricht_TP_Kosmische-Strahlung_red.pdf
- [Krö] Kröll, T.: Skript Kernphysik SS12
Technische Universität Darmstadt Darmstadt (2012) cited 01.02.2020
https://www.ikp.tu-darmstadt.de/media/ikp/kroell/kernphysik2012/skript_Kernphysik_SS12_Kap03.pdf
- [Leh] Lehner, M.: ohne
Seeland Gymnasium Biel Biel cited 13.12.2013
www2.slgb.ch/users/physik/myonen/myon1.doc
- [Maa] Maalampi, J.: Die Weltlinie, Albert Einstein und die moderne Physik
Springer Verlag Berlin cited 20.10.2015
<https://books.google.de>



- [Mes] Meschede, D.: Gerthsen Physik
Springer Verlag Heidelberg 24. Aufl. (2010) cited 26.02.2012
<http://www.springerlink.com/content/978-3-642-12894-3#section=782231&page=1&locus=6>
- [Mey] Meyndt, J.: Nachweis kosmischer Strahlung in Form von Myonen unter theoretischen und didaktischen Gesichtspunkten, Wissenschaftliche Arbeit zum Staatsexamen
Albert-Ludwigs Universität Freiburg Freiburg (06.06.2013) cited 22.01.2014
<http://hep.uni-freiburg.de/Kamiokanne/Staatsexamensarbeit.pdf>
- [Müc] Mücke, M.; Kreier, M.: Myon-Lebensdauer
Technische Universität Dresden Dresden (24.01.2003) cited 29.01.2014
<http://iktp.tu-dresden.de/IKTP/lehre/fprak/muon/muon.pdf>
- [Pel] Pelte, D.: Physik für Biologen
Springer Verlag Berlin (2005) cited 16.03.2015
<https://books.google.de>
- [Pöp] Pöpperl, H.: Das Myonenexperiment, Nachweis der Zeitdilatation und Lorentzkontraktion mit Myonen
Ludwigsgymnasiums Straubing Straubing cited 10.12.2013
<http://ppprl.de/lg/unterr/physik/einstein05/myonen/myonen.pdf>
- [Pör] Pörtner, L.: Myonen und Zeitdilatation
Universität Bielefeld Bielefeld (2013) cited 22.01.2014
<http://www.physik.uni-bielefeld.de/~yorks/pro13/poertner.pdf>
- [Roe] Roedel, W.; Wagner, T.: Physik unserer Umwelt, Die Atmosphäre
Springer-Verlag Berlin Heidelberg Heidelberg 4. Aufl. (2011) cited 08.09.2016
http://cost733class.geo.uni-augsburg.de/moin/iguawiki/data/pages/KursmaterialWS1213_HsKliver/attachments/Roedel_Die_Atmosphaere.pdf
- [Rud] Ruder, H.; Ruder, M.: Die Spezielle Relativitätstheorie
Vieweg Verlag Tübingen 1993
http://ihtik.lib.ru/2012.03_ihtik_physics/
- [Scm] Schmutzer, E.: Relativitätstheorie - aktuell, Ein Beitrag zur Einheit der Physik
B. G. Teubner Stuttgart Jena 1996
<http://books.google.de/books?>
- [Sta] Stachel, J.: Physik V, Kern- und Teilchenphysik
Universität Heidelberg Heidelberg (11.07.2016) cited 08.09.2016
<http://www.physi.uni-heidelberg.de/~stachel/skript.pdf>
- [Stü] Stütz, P.: Standardatmosphäre nach DIN 5450
Universität der Bundeswehr München München cited 13.09.2016
https://www.unibw.de/lrt13_1/lehre/xtras/standardatmosphaerenachdin5450.pdf



- [Syd1] [2402] Sydow, R.: einige Eigenschaften der Standardatmosphäre
www Niederfinow 02.06.2022
<https://rolfswelt.de/diverses/#standardatmosphere>
- [Syd2] Sydow, R. Wahrscheinlichkeitsaddition Niederfinow 03.06.2022
<https://rolfswelt.de/mathematik/#wahrscheinlichkeit-addition>
- [Syd3] Sydow, R. Die Exponentialverteilung, als Zerfallsgesetz Niederfinow 2022
<https://rolfswelt.de/mathematik/#funktionen-exponentialfunktion>
- [Tre] Trefzger, T.: Kosmische Myonen in der Kaffeekanne - Teilchenphysik in der Schule
Johannes Gutenberg-Universität Mainz Mainz cited 09.12.2013
<http://www.physik.uni-mainz.de/lehramt/Talks/muo.pdf>
- [ub1] unbekannt: Atomare Masseneinheit
wikipedia unbekannt cited 12.09.2016
https://de.wikipedia.org/wiki/Atomare_Masseneinheit
- [ub2] unbekannt: Proton
wikipedia unbekannt (02.01.2020) cited 01.02.2020
<https://de.wikipedia.org/wiki/Proton>
- [ub3] unbekannt: Stickstoff
wikipedia unbekannt (01.09.2016) cited 25.09.2016
<https://de.wikipedia.org/wiki/Stickstoff>
- [ub4] unbekannt: Wie lassen sich Zeitdehnung und Längenkontraktion nachweisen?
Konradin Medien GmbH Leinfelden-Echterdingen (18.01.2011) cited 25.04.2022
<https://www.wissenschaft.de/allgemein/wie-lassen-sich-zeitdehnung-und-laengenkontraktion-nachweisen/>
- [Var] Varesi, A.: Erweiterte spezielle Relativitätstheorie
metager München 07.02.2005
http://www.einstein-relativity.de/publications/srt_veroeffentlichung_varesi_07.02.05.pdf
- [Weg] Weger, H.: Entwicklung eines Spurdetektors zum Nachweis kosmischer Myonen mithilfe von Leuchtstoffröhren
Georg-August-Universität Göttingen Göttingen (04.04.2012) cited 02.02.2014
<http://physik2.uni-goettingen.de/research/high-energy/publications/MastersWeger.pdf>