

Fortgeschrittenenpraktikum 1 - Sommersemester 2022

Aufgabe **Myonlebensdauer**

Ort: 0/404 (Praktikumsräume → [Optikraum](#))

Betreuer: [Emmerich Kneringer](#), Zimmer 8/16, Tel. 0512/507-52081

Skriptum: © Reinhard Bischof, mit Ergänzungen von EK

Homepage: <http://physik.uibk.ac.at/hephy/muon> → FP1

[blaue Texte sind **clickbare** links]

Dort finden Sie auch eine [Frageliste](#), die Sie nach dem Studium dieses Skriptums durchgehen sollten.

1. Myonen - Teil der kosmischen Strahlung

1.1 Die Botschaft von oben

[Ausgangsfrage: Warum ist Luft elektrisch leitend?]

1901 vermutete C.T.R. Wilson erstmals: „... the continuous production of ions in dust-free air could be explained as being due to radiation from sources outside our atmosphere, possibly radiation like Röntgen rays or like cathode rays, but of enormously greater penetrating power“.

Er verwarf diesen Gedanken allerdings wieder, weil die abschirmende Wirkung von Felsen

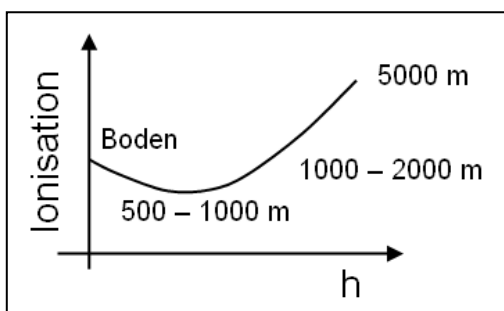


keine signifikante Abnahme der Ionisation zeigte. Jesuitenpater Wulf fand bei Ionisationsmessungen am Eiffelturm, dass die Abnahme viel langsamer erfolgte, als durch die Absorption der Erdstrahlung in der Luft zu erwarten war. Auch Messungen bei Ballonaufstiegen (Bergwitz und Gockel) zeigten ein ähnliches Ergebnis.

Erst V. F. Hess konnte bei seinen Ballonflügen

1912 unter Verwendung von sehr zuverlässigen Ionisationskammern überzeugend nachweisen, dass es eine Strahlung extraterrestrischer Herkunft gibt:

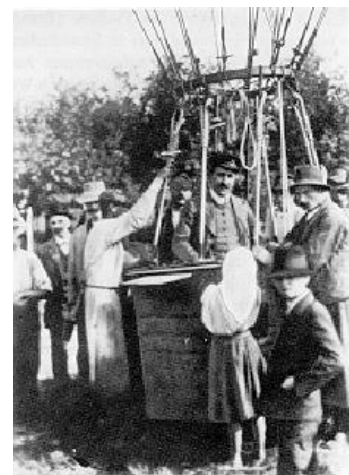
„Nachdem ich schon bei den acht vorhergehenden, von Wien aus



unternommenen Fahrten gefunden hatte, dass die Gesamtstrahlung in Höhen von 1000 bis 2000

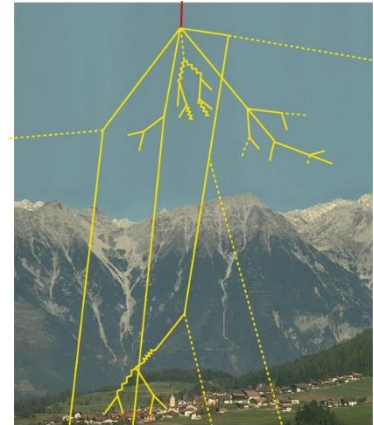
m ebenso groß ist wie am Boden, also größer als in 500 und 1000 Meter ist, ergab sich in den Höhen von

2000 m aufwärts eine noch viel auffallendere Steigerung der Gamma-Strahlung mit der Höhe.



In 4000 Meter war die Gamma-Strahlung schon um die Hälfte stärker als am Boden, in 5000 m mehr als doppelt so stark. ...Wenn man an der Ansicht festhält, dass nur die bekannten radioaktiven Produkte in der Atmosphäre eine Gamma-Strahlung erregen, so müsste man zur Erklärung der von mir beobachteten Strahlungserhöhung in 5000 m annehmen, dass zufällig gerade in dieser Höhe eine lokale Anhäufung radioaktiver Materie stattgefunden habe. Dies ist aber so unwahrscheinlich, dass man eher der Ansicht zuneigen wird, dass ein Teil der beobachteten Gamma-Strahlung von oben her in die Atmosphäre eindringt - also außererrestrischen Ursprungs ist.“

Die enorme Bedeutung dieser Entdeckung wurde aber erst einige Zeit später klar, als erkannt wurde, dass diese „**Kosmische Strahlung**“ überwiegend Teilchennatur hat. Man hatte einen kostenlosen Strom hochenergetischer und unerforschter Teilchen zur Verfügung, dessen Untersuchung wesentliche Erkenntnisse mit sich brachte.



Als Hess 1936 für seine Entdeckung den Nobelpreis bekam, war er Professor in Innsbruck und hatte am Hafelekar eine weithin bekannte „Station für Ultrastrahlenforschung“ in Betrieb. Seit einem Umbau im Jahr 1967 wird dieses Gebäude für die Dauerregistrierung von Myonen- und Neutronenstromdichte genutzt.

R. Steinmaurer, Erinnerungen an V.F. Hess, den Entdecker der kosmischen Strahlung, und an die ersten Jahre des Betriebes des Hafelekar-Labors, in: Early History of Cosmic Ray Studies, ed. Y. Sekido and H. Elliot, D. Reidel Publishing Company 1985 oder auf <http://physik.uibk.ac.at/hephy/Hess/Steinmaurer.html>

1.2 Das Teilchen, das niemand wollte

1935 wurde von Yukawa ein Teilchen vorhergesagt, das die starke Wechselwirkung vermitteln sollte. Dieses Teilchen sollte 100 – 200 mal so viel Masse wie das Elektron haben und positiv oder negativ geladen sein.



1937 wurde ein anscheinend passendes Teilchen in der kosmischen Strahlung (das Myon) gefunden, und zwar fast zeitgleich von J. C. Street und E. C. Stevenson an der Harvard Universität bzw. von C. D. Anderson und S. H. Neddermeyer am California Institute for Technology. Die Namensgebung war anfangs nicht

einheitlich und reichte von Yukon (für Yukawa) bis zu dem von Anderson vorgeschlagen und von Millikan unterstützten Mesotron, woraus Bhaba das einfachere Wort Meson entwickelte.

Die experimentellen Abschätzungen für die Zerfallszeit ergaben aber im Vergleich zur Theorie für das Yukawa-Teilchen zu lange Zeiten (L. Nordheim 1939).

Die Ansicht, das Yukawa-Teilchen gefunden zu haben, führte auch dazu, dass dem Myon die Verwandtschaft mit dem Elektron abgesprochen wurde (Bethe 1940): „It seems to us, that the only name definitely to be avoided, is ‘heavy electron’. If there is any truth in the current theories, then the new particle differs from an electron as much as any particle can: It has a different mass, a different spin and different statistics.“

1942 gelang Bruno Rossi mit einem Aufbau aus drei Zählrohrgruppen und einem selbstentwickelten TAC (Time to Amplitude Converter), **der die Zeit zwischen zwei Pulsen in eine entsprechende Spannung umsetzt**, die erste genaue Bestimmung der Zerfallszeit des Myons: $2.3 \pm 0.2 \mu\text{s}$. Diesen Wert verbesserte er im folgenden Jahr auf $2.15 \pm 0.07 \mu\text{s}$ (zum Vergleich: der heute anerkannte Wert ist: $2.19703 \pm 0.00004 \mu\text{s}$).

1947 wiesen Powell et al. nach, dass geladene, „schwere primäre“ Mesonen (π -Mesonen) in „sekundäre Mesonen“ (Myonen) zerfallen:

„It is convenient to apply the term meson to any particle with a mass intermediate to that of a proton and an electron... we have found evidence of mesons, which, at the end of their range, produce secondary mesons“. Nach den damaligen Modellvorstellungen wurde aber erwartet, dass geladene π -Mesonen direkt in Positronen und Elektronen zerfallen. Die Myonen wollten also nirgends recht hineinpassen. Gell-Mann und Rosenbaum formulierten das in einem später erschienenen Artikel im Scientific American so: „The muon was the unwelcome baby on the doorstep, signifying the end of days of innocence“.

Carl. D. Anderson, Seth H. Neddermeyer, Note on the Nature of Cosmic Ray Particles, Phys. Rev. 51, 884 (1937)

R. A. Millikan, Phys. Rev. 55, 105 (1939)

H. J. Bhaba, Nature 143, 276 (1939)

L. Nordheim, Lifetime of the Yukawa Particle, Phys. Rev. 55, 506 (1939)

H. A. Bethe, Meson Theory of Nuclear Forces, Phys. Rev. 57, 260 (1940)

Bruno Rossi, Norris Nereson, Desintegration Curve of Mesotrons, Phys. Rev. 62, 417 (1942)

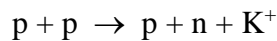
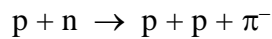
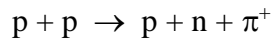
C.F. Powell et al., Processes involving charged Mesons, Nature 159, 694 (1947)

Murray Gell-Man, E. P. Rosenbaum, Elementary Particles, Scientific American, Juli 1957, p. 72

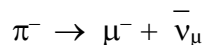
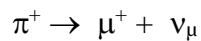
1.3 Das „kosmische“ Myon

Die Myonen der (sekundären) kosmischen Strahlung entstehen durch Wechselwirkung der primären kosmischen Strahlung, die aus hochenergetischen Protonen, α -Teilchen und leichten Kernen besteht, mit den Molekülen der oberen Atmosphäre.

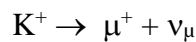
Bei Zusammenstößen von Protonen mit Luftmolekülen entstehen unter anderem geladene Pionen und Kaonen :



Die geladenen Pionen haben eine relativ kurze mittlere Lebensdauer (26 ns) und zerfallen fast ausschließlich in Myonen:



Auch ein Teil der Kaonen (ca. 64 %) zerfällt in Myonen, z. B.



Die Myonen sind vergleichsweise langlebig (ca. 2.2 μ s im Vakuum), unterliegen nicht der starken Wechselwirkung und verlieren hauptsächlich durch Ionisation der von ihnen durchlaufenen Materialien an Energie. Bremsstrahlung spielt eine geringe Rolle – wegen der im Vergleich zu den Elektronen großen Ruhemasse (206-fache Elektronmasse).

Diese Eigenschaften sorgen für eine große Reichweite der Myonen in der Atmosphäre, sodass auf Meereshöhe die Anzahl der Myonen (im Vergleich zu p , n , e , π) überwiegt (siehe Abb. 1). Zudem spielt wegen der großen Energie der „kosmischen“ Myonen und der damit verbundenen hohen Geschwindigkeit die relativistische Zeitdilatation eine große Rolle.

Frage: Welche Reichweite hat ein Myon mit einer kinetischen Energie von 2 GeV und mittlerer Lebensdauer im Vakuum (relativistisch und nichtrelativistisch gerechnet)?

Noch eine **Frage:** Wie kann man einem Nichtphysiker eine Energieangabe in eV (od. MeV) verständlich machen (z. B. β -Teilchen von ^{137}Cs mit 0.514 MeV)?

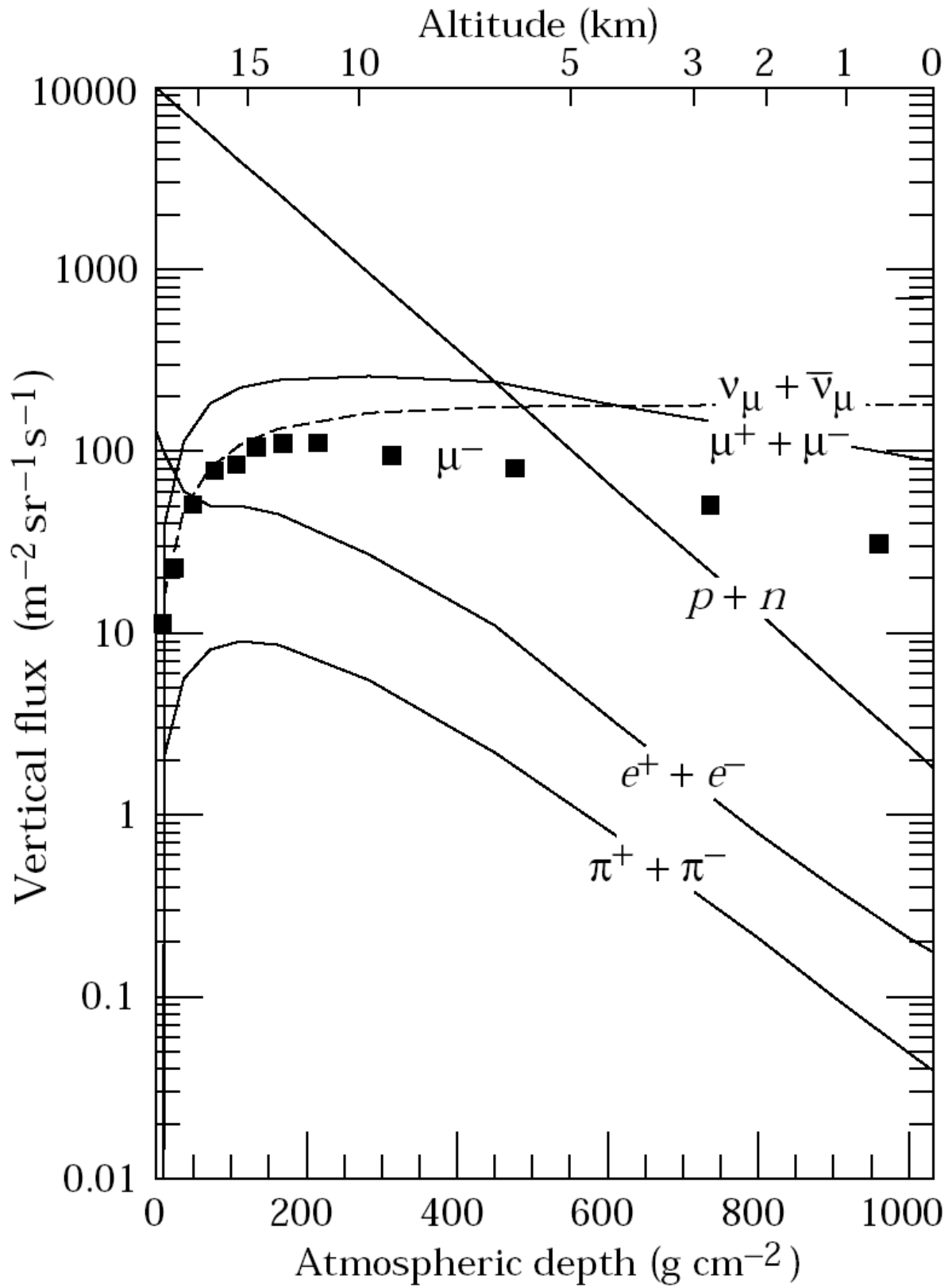


Abb. 1: Vertikaler Fluss der Teilchen der kosmischen Strahlung mit einer Energie über 1 GeV (gerechnete Kurven aus: C. Caso et al., *European Physical Journal C3*, 1 (1998), die Messpunkte für die negativen Myonen sind Daten von R. Bellotti et al., *Phys. Rev. D53*, 35 (1996)).

1.4 Der Einfluss der kosmischen Strahlung auf elektronische Bauteile

1978 wurden erstmals Speicherfehler in DRAMs beobachtet, die durch Verunreinigungen der Plastikgehäuse mit α -Strahlern verursacht wurden. Diese Beobachtungen führten zu Überlegungen, ob auch die Teilchen der kosmischen Strahlung entsprechende Fehler auslösen können. Da die Zahl der Elektronen in der Ionisationsspur eines kosmischen Teilchens gering ist im Vergleich zur Zahl der Elektronen, die zur Informationsspeicherung pro Bit verwendet werden, ging man davon aus, dass überwiegend Teilchentreffer auf Siliziumkerne und die durch die entstehenden Trümmer hervorgerufene Ionisation eine Rolle spielen. Es sollten also hauptsächlich Neutronen und Pionen Störungen verursachen können und dementsprechend war eine starke Höhenabhängigkeit der Effekte zu erwarten. Feldversuche ergaben tatsächlich eine Zunahme der Fehlerrate entsprechend der Zunahme der Neutronenstromdichte mit der Höhe. Beispielsweise ist die Fehlerrate in Leadville (3095 Meter Seehöhe) ca. 13-mal, in Denver (1609 m) 5-mal so hoch wie auf Meeresniveau.

J. F. Ziegler et al, IBM experiments in soft fails in computer electronics (1978-1994), IBM Journal of Research and Development, 40 (1), 1996

2. Ein kurzer Besuch im Elementarteilchenzoo

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik geht heute davon aus, dass die Materie aus Leptonen und Quarks aufgebaut ist, die halbzahligen Spin haben (Fermionen):

Leptonen: Elektron, Myon, Tau

und die drei entsprechenden Neutrinos.

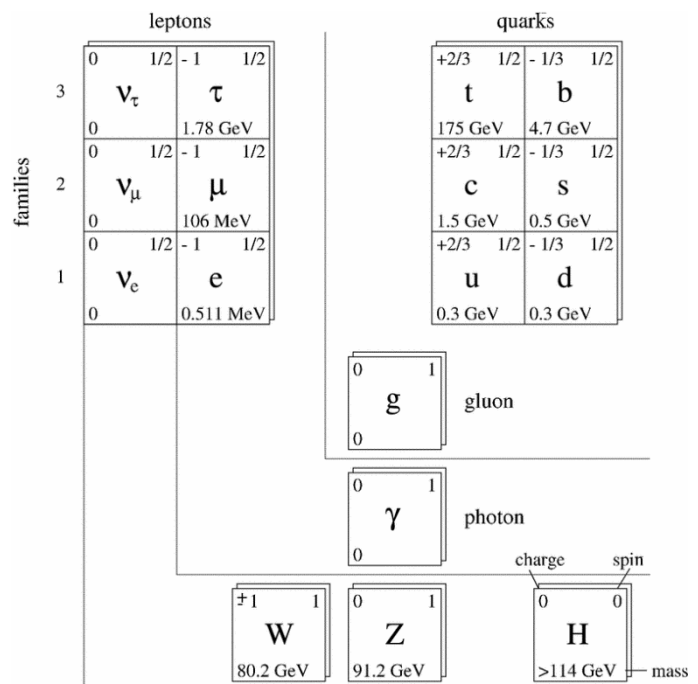
Quarks : u (up), d (down),
c (charm), s (strange), t (top), b (bottom).

Die Quarks tragen drittelzahlige

Ladungen (u,c,t: $+2/3$; d,s,b: $-1/3$) und sind nicht als freie Teilchen beobachtet worden. Sie sind die Bausteine für die

Mesonen (2 Quarks) und Baryonen (3 Quarks).

Zu jedem der 6 Leptonen und 6 Quarks gibt es das Antiteilchen mit entgegengesetzter Ladung.



Name	Masse [MeV/c ²]	Masse /m _e	mittlere Lebensdauer
Leptonen			
Elektron	0.51099907 ± 0.00000015	1	> 4.3 · 10 ²³ Jahre
Myon μ	105.658389 ± 0.000034	206.7716	2.19703 ± 0.00004 μs
Tau τ	1777.05 ± 0.25	3477.599	(290 ± 1.2) · 10 ⁻¹⁵ s
Beispiele für bosonische Hadronen (Mesonen)			
Pionen π ⁺ , π ⁻	139.56995 ± 0.00035	273.136	26.033 ± 0.005 ns
π ⁰	134.9764 ± 0.0006	264.146	8.4 ± 0.6 · 10 ⁻¹⁷ s
Kaonen K ⁺ , K ⁻	493.677 ± 0.016	966.117	12.386 ± 0.024 ns
K ⁰	497.672 ± 0.031	973.935	51.7 ± 0.4 ns
Beispiele für fermionische Hadronen (Baryonen)			
Proton p	938.27231 ± 0.00028	1836.152	> 1.6 · 10 ²⁵ Jahre
Neutron n	939.56563 ± 0.00028	1838.684	886.7 ± 1.9 s

3. Die mittlere Lebensdauer des Myon

3.1 Der Myonzerfall

Ein Myon zerfällt mit einer mittleren Lebensdauer von 2.197 μs in ein Elektron (Positron) und Neutrinos:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

Auf das Elektron (Positron) wird maximal eine kinetische Energie übertragen, die der halben Ruhemasse des Myons entspricht (53 MeV). Die Elektronenergie kann also im Bereich zwischen 0 und 53 MeV liegen.

Negative Myonen können in die K-Schale eines Atoms eingefangen werden und so ein Myoniumatom bilden. Wegen ihrer großen Masse ist ihr Orbit ca. 200-mal näher am Kern als bei Elektronen ($r_{\text{Bohr},n} = 4\pi\epsilon_0/e^2 \cdot n^2\hbar^2/m_\mu$), die Wellenfunktionen von Kern und Myon überlappen und das Myon kann vom Kern eingefangen werden:

$$\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$$

Da **in Materie** also ein weiterer Reaktionskanal für negative Myonen besteht, ist ihre mittlere Lebensdauer kleiner. Die Wahrscheinlichkeit für einen Myoneinfang steigt mit der vierten

Potenz der Kernladungszahl Z . Bei Kernen mit niedriger Ladungszahl ist der Unterschied in der mittleren Lebensdauer gering (z.B. bei Kohlenstoff ist $\tau_\mu = 2.025 \mu\text{s}$).

Denken Sie an diesen Effekt für den Fall, dass bei Ihrer Messung die Myonlebensdauer tatsächlich geringer sein sollte, als erwartet. Diskutieren Sie dann, ob dieser Effekt bei diesem Experiment eine Rolle spielen kann.

Was müsste zusätzlich passieren, außer dass das Myon unter Aussendung eines Neutrinos im Kern verschwindet?

Weiters: Ist auch ein Zerfall des Myons im Orbit (um den Kern) möglich?

3.2 Die Bestimmung der mittleren Lebensdauer

Die grundlegende Idee für die Messung ist nun, das Myon in einem Target zu stoppen, diesen Prozess zu detektieren, auf das Zerfallselektron (Positron) zu warten und die Zeit zwischen dem Stopp und dem Zerfall zu messen. Wenn das kleinste messbare Zeitintervall der verwendeten Stoppuhr Δt ist, dann kann man das Ergebnis darstellen als die Zahl der Zerfälle im Zeitintervall 0 bis Δt , Δt bis $2\Delta t$ usw.

Für das gestoppte Teilchen besteht die Wahrscheinlichkeit $\text{const} \cdot dt$ im Zeitintervall dt zu zerfallen. Sei $P(t)$ die Wahrscheinlichkeit, dass das Teilchen vom Stopp ($t=0$) bis zum Zeitpunkt t nicht zerfallen ist. Dann ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Teilchen bis $t+dt$ überlebt:

$$P(t + dt) = P(t) \cdot (1 - \text{const} \cdot dt)$$

$$\frac{dP}{dt} = -\text{const} \cdot P \Rightarrow P(t) = e^{-\text{const} \cdot t}$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen bis zum Zeitpunkt t überlebt und dann im Zeitintervall dt zerfällt, ist gegeben durch die **Exponentialverteilung** $P(t) \cdot \text{const} \cdot dt$

Für die mittlere Lebensdauer des Teilchens gilt damit:

$$\tau = \int_0^{\infty} t \cdot \text{const} \cdot e^{-\text{const} \cdot t} dt = \frac{1}{\text{const}}$$

und somit ist

$$P(t) = e^{-t/\tau}$$

Wenn in der gesamten Messzeit N Teilchen im Target stoppen, dann sind im Zerfallsdauerintervall $m \cdot \Delta t$ bis $(m+1) \cdot \Delta t$

$$\Delta N = N \left(e^{-m\Delta t/\tau} - e^{-(m+1)\Delta t/\tau} \right)$$

Teilchen registriert worden.

3.2.1 Diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilungen (für Zählexperimente)

Das Ergebnis der Messung ist die Anzahl der Ereignisse (Zerfälle) in den Zeitintervallen mit der Breite Δt . Für die Auswertung einer Messung mit insgesamt N Zerfällen ist interessant, mit welcher Wahrscheinlichkeit n Ereignisse in einem bestimmten Zeitintervall zu erwarten sind. Bezeichne p die Wahrscheinlichkeit für einen Zerfall im m -ten Zeitintervall, dann ist die Wahrscheinlichkeit für n Ereignisse im m -ten Intervall und $N-n$ Ereignisse außerhalb gleich

$$p^n (1-p)^{N-n}$$

wenn man eine bestimmte Abfolge voraussetzt. Da aber die Reihenfolge beliebig ist, muss dieses Ergebnis noch mit der Zahl der Möglichkeiten, n Ereignisse auf N Beobachtungen zu verteilen, multipliziert werden. Somit erhält man als Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(n)$:

$$P(n) = \frac{N(N-1)\dots(N-n+1)}{n!} p^n (1-p)^{N-n} = \binom{N}{n} p^n (1-p)^{N-n}$$

$P(n)$ wird als Bernoulli- oder **Binomialverteilung** bezeichnet. Sie wird verwendet, wenn ein Zufallsereignis mit zwei möglichen Ausgängen N -mal auftritt, wobei N fest vorgegeben ist.

$P(n)$ ist normiert:

$$1 = (p + (1-p))^N = \sum_{n=0}^N \binom{N}{n} p^n (1-p)^{N-n} = \sum_{n=0}^N P(n)$$

Mit dieser Wahrscheinlichkeitsverteilung kann nun der Erwartungswert von n (in diesem Fall auch der wahrscheinlichste Wert) bestimmt werden:

$$\langle n \rangle = \sum_n n P(n) = Np = \bar{n} \quad (\text{was zu erwarten war}).$$

Interessanter ist das Ergebnis für die Varianz:

$$\sigma^2 = \left\langle (n - \bar{n})^2 \right\rangle = \sum_{n=0}^N (n - \bar{n})^2 P(n) = Np(1-p)$$

In vielen Fällen wird eine große (zufällige) Anzahl von Beobachtungen vorliegen und die Zahl der Ereignisse in einem bestimmten Intervall klein sein. Dann wird

$$P(n) = \frac{N^n \left(1 - \frac{1}{N}\right) \dots \left(1 - \frac{n-1}{N}\right)}{n!} p^n (1-p)^{N-n} \quad \text{annähernd zu}$$

$$\frac{(Np)^n}{n!} e^{\ln(1-p)(N-n)} \quad \text{und mit } \bar{n} = Np \ll N \quad \text{ist}$$

$$P(n) = \frac{\bar{n}^n e^{-\bar{n}}}{n!} \quad (\text{Poissonverteilung})$$

Der Erwartungswert für n mit dieser Verteilung ist

$$\langle n \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} n \frac{\bar{n}^n}{n!} e^{-\bar{n}} = \bar{n} e^{-\bar{n}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\bar{n}^{n-1}}{(n-1)!} = \bar{n} e^{-\bar{n}} e^{\bar{n}} = \bar{n}$$

Für die Standardabweichung (Streuung) ergibt sich nach längerer Rechnung:

$$\sigma = \sqrt{\bar{n}}$$

Wenn die Zahl der Messungen groß ist und auch die Wahrscheinlichkeit für ein Ereignis in dem betrachteten Intervall groß ist, dann kann man mit Hilfe der Stirling'schen Formel für große n

$$n! \approx \sqrt{2\pi n} n^n e^{-n}$$

aus der Binomialverteilung die Gauß'sche Wahrscheinlichkeitsverteilung ableiten:

$$P(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi p(1-p)N}} e^{-\frac{(n-pN)^2}{2p(1-p)N}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(n-\bar{n})^2}{2\sigma^2}}$$

Bei der Lebensdauerermessung ist für die Anzahl der Ereignisse in einem Zeitintervall die **Poissonverteilung** zuständig. Als Ereignis kann man hier die Registrierung eines Myons (wie in Aufgabe 2 - siehe 3.5), aber auch den Zerfall eines Myons (Aufgabe 4) betrachten. Beachte, dass bei der Lebensdauerermessung N nicht fest sondern variabel ist.

3.2.2 Die „Maximum Likelihood“ Methode

Achtung: Diese Fitmethode wird nur der Vollständigkeit halber (und für Interessierte) erklärt. Wir verwenden die in Punkt 3.2.3. angegebene sogenannte Chi-Quadrat Methode.

Die Aufgabe der Auswertung besteht nun darin, den wahrscheinlichsten Wert für die Lebensdauer zu finden. Für jedes Messintervall (mit der Nummer m und der Breite Δt) kann man eine Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(n_m, a_k)$ konstruieren, wobei a_k die Parameter der Funktion sind, mit der man die Anzahl der Ereignisse \bar{n} berechnet. Den besten Parametersatz

kann man aus der Forderung erhalten, dass die kombinierte Wahrscheinlichkeitsverteilung ein Maximum wird:

$$L = \prod_m P(n_m, a_k) \stackrel{!}{=} \text{Max.} \quad (L = \text{Likelihood funktion})$$

Für die Berechnung ist es günstiger, den Logarithmus von L zu verwenden

$$\ell := \ln L = \sum_m \ln P(n_m, a_k)$$

Die $P(n_m, a_k)$ sind hier Poissonverteilungen $\exp(-a) \cdot a^n / n!$, wobei für n die Zahl der beobachteten Zerfälle im jeweiligen Intervall und für $a (= \bar{n})$ die Zerfallsfunktion f_m mit den Parametern Lebensdauer und Gesamtzahl der Zerfälle einzusetzen ist.

Für den Teilchenzerfall gilt also (wenn man den konstanten Faktor $\ln n!$ weglässt)

$$\ell = \sum_m (n_m \ln f_m - f_m)$$

Die f_m sind dabei

$$f_m = N(e^{-m\Delta t/\tau} - e^{-(m+1)\Delta t/\tau}) = N \frac{\Delta t}{\tau} e^{-(m+0.5)\Delta t/\tau} + O(\Delta t^3) \quad \text{und} \quad \sum_m f_m = N$$

Für die analytische Bestimmung des Maximums wird nach den Parametern differenziert:

$$\frac{\partial \ell}{\partial a_k} \stackrel{!}{=} 0 \quad \forall k$$

3.2.3 Die Methode der kleinsten Fehlerquadrate

Beim Least-Square-Fit (auch χ^2 Fit) wird durch Variation der Parameter a_k der Wert für

$$\chi^2 = \sum_m \frac{(n_m - f_m(a_k))^2}{\sigma_m^2} \quad \text{minimiert.}$$

Dabei ist n_m die gemessene Zahl von Ereignissen im Intervall m und $f_m(a_k)$ wieder die mit der Modellfunktion berechnete Zahl. Wenn man für die Messunsicherheit σ (hier auch Gewichtung genannt) das Ergebnis für die Poissonverteilung einsetzt erhält man

$$\chi^2 = \sum_m \frac{(n_m - f_m(a_k))^2}{f_m(a_k)}$$

Als Modellfunktion (wieviele freie Parameter?) eignet sich bei der Lebensdauerermessung

$$f_m = y_0 + A \exp(-(x_m - x_0)/\tau)$$

Der konstante Untergrund y_0 berücksichtigt die Myonen, die im Detektor nicht zerfallen. Durch die **Totzeit** der Detektorelektronik wird das Histogramm bei kleinen Zeiten verfälscht und für die Auswertung muss dieser Teil (bis x_0) weggelassen werden.

Für die Durchführung der Parameteranpassung steht das Programm Origin zur Verfügung, das die Methode der kleinsten Fehlerquadrate verwendet. Beachten Sie dabei, dass der Messfehler richtig gewählt wird (Gewichtung!).

3.3 Experimentelle Details

Zum Nachweis der Myonen und zugleich als Target wird ein **Plastikszintillationsdetektor** verwendet. Geladene Teilchen wie die Myonen regen die Moleküle des Plastikmaterials an, die diese Energie zum Teil (etwa 3%) als Photonen im UV-Bereich abgeben. Damit diese kurzen Lichtpulse von Photomultipliern registriert werden können, die im sichtbaren Bereich (hier: blau) empfindlich sind, werden dem Plastikmaterial in geringer Konzentration fluoreszierende Materialien zugesetzt, mit denen die Wellenlänge in den gewünschten Bereich **verschoben** wird. Der Spannungspuls am Ausgang des Photomultipliers wird verstärkt und über einen Diskriminator, der Pulse unter einer bestimmten Höhe unterdrückt, in ein digitales Signal umgeformt (Abb. 2).

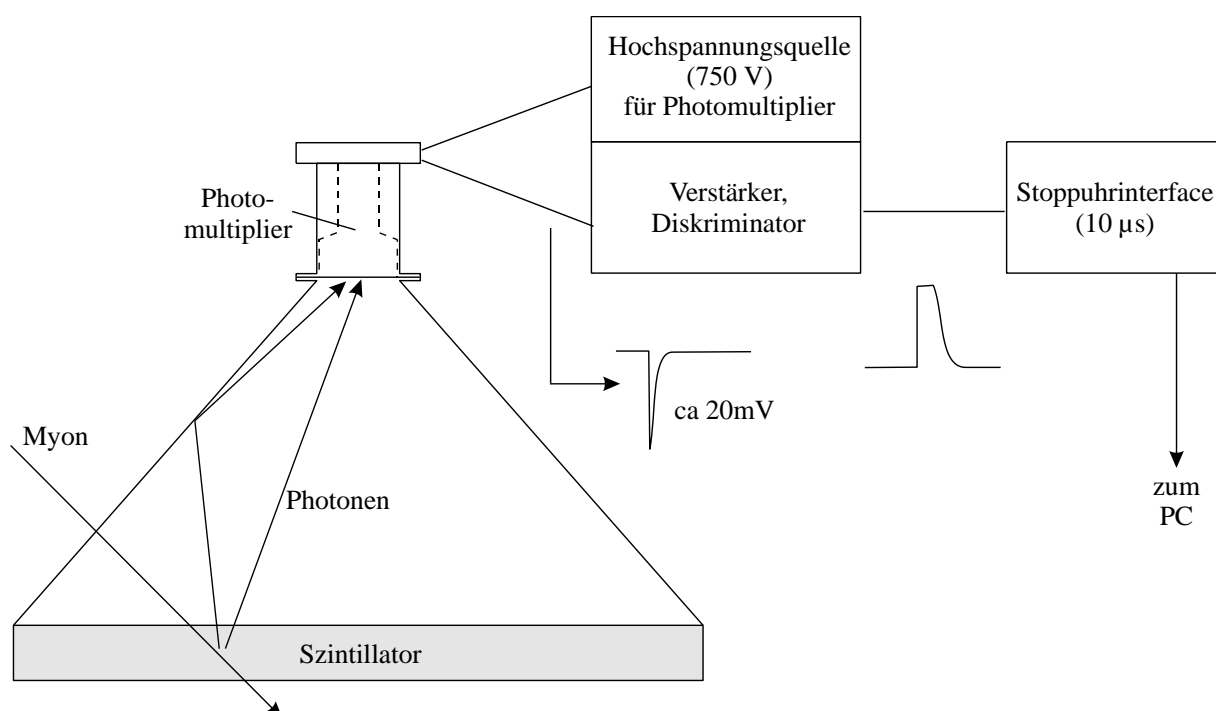


Abb. 2 : Experimenteller Aufbau.

Hier ist angenommen, dass das Myon im Szintillator nicht stoppt (= häufigster Fall).

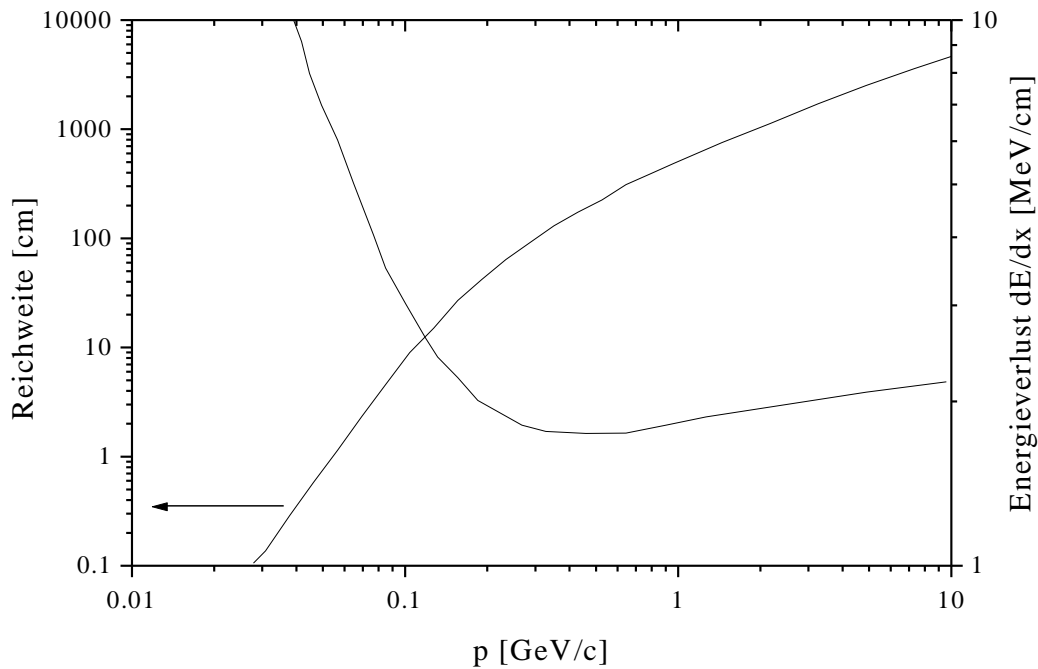


Abb. 3: Reichweite und Energieverlust von Myonen im Plastiksintillator
(Quelle: C. Caso et al., *European Physical Journal C3*, 1 (1998)).

Der Puls am Ausgang des Verstärkers hängt davon ab, wieviel Energie die Myonen im Szintillator durch Ionisation verlieren (vgl. Abb. 3).

Die verwendete Szintillatorscheibe hat einen Durchmesser von einem Meter und eine Dicke von 7.5 cm. Sie ist in der Basis eines Kegels eingebaut (siehe Abb. 2). Im Experiment sind zwei Detektoren übereinander montiert (siehe Abb. 5). Der vertikale Abstand der beiden Szintillatorscheiben beträgt dabei ebenfalls genau 1 m.

Wenn ein Myon in den Szintillator eintritt, löst der entstehende Puls in der Messkarte (eine sogenannte Timerkarte) des angeschlossenen PCs die Registrierung des entsprechenden Zeitpunkts t aus. Jeder weitere Puls – sei es vom Myonzerfall oder vom nächsten zufällig eintreffenden Myon – wird ebenso registriert. Auf diese Weise können bis zu $N = 100$ Zeitpunkte t_i auf der Messkarte gespeichert werden, bevor diese Daten schließlich per Labview-Software ausgelesen werden. Die Software erlaubt es sogar, die benötigten Zeitdifferenzen $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ direkt auszulesen. Während des Auslesevorgangs ist die Messung inaktiv. Um diese weitere **Totzeit** gering zu halten, muss man ein großes N verwenden. Kurze **hochfrequente Netzstörungen** hingegen eliminiert man am besten durch die Wahl eines kleinen N .

3.4 Durchführung der Aufgaben

Details dazu werden am Praktikumsnachmittag (in Form einer **Arbeitsliste**) bekanntgegeben. Zur Vorbereitung genügt es, dieses Skriptum zu studieren, und sich Antworten zu den im Text verstreuten Fragen zu überlegen (insbesondere zu den Punkten 3.4.1 und 3.4.3).

Da in diesem Praktikum häufig Messreihen in Histogramme konvertiert werden müssen, sollten Sie sich noch überlegen, wie ein (Computer-) Programm aussehen muss, das aus einer Tabelle von N Messungen $a(i)$ einer bestimmten Größe ein Histogramm $[x(j), n(j)]$ erzeugt.

1. Einführende Messungen (ohne Messcomputer):

- Myonfluss (Zum Vergleich: Was sagt Abb. 1 auf Seite 5 über den Myonfluss am Boden aus?)
- Prozentsatz von Myonen, die gleichzeitig durch beide Detektoren gehen (siehe Abb. 5)

Fragen:

- Schätzen Sie die **maximale Energie E_{\max}** ab, die ein Myon bei senkrechtem Einfall (von oben) auf den Detektor im Detektor abgibt, wenn es gerade noch im Detektor gestoppt wird.
- Gibt ein höherenergetisches Myon (das also im Detektor nicht gestoppt wird) **mehr oder weniger Energie** im Detektor ab?
- Schätzen Sie den **Prozentsatz** von Myonen ab, die im Detektor gestoppt werden.

Hinweis: Beantwortung der Fragen mittels Abb. 3 (die ersten zwei Fragen) und Abb. 4 (dritte Frage).

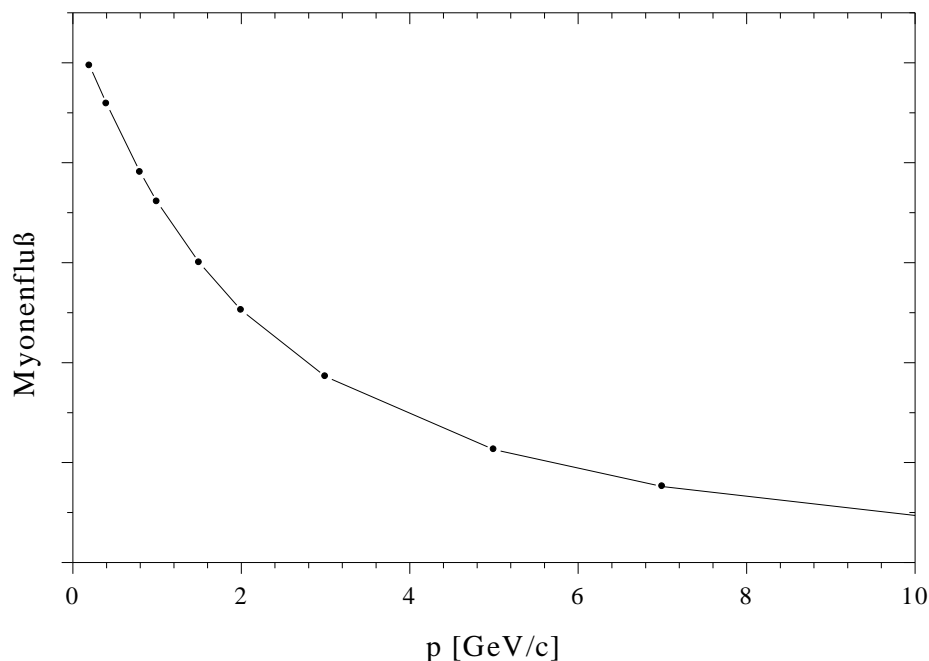
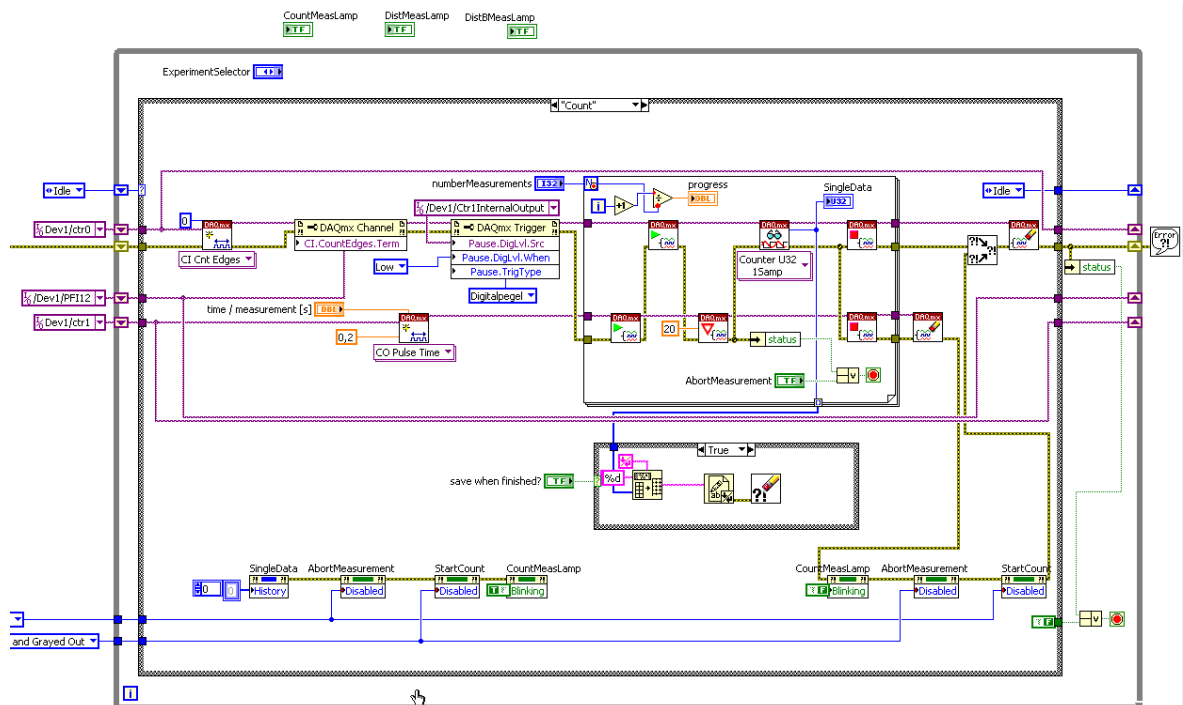


Abb. 4: Impulsverteilung der Myonen auf Meereshöhe
(Quelle: Allkofer et al., Phys. Lett. B36, 425(1971)).

2. Die **Zahl der in einem fest gewählten Zeitintervall vom Detektor registrierten Teilchen** soll mit dem PC mehrmals (z.B. 400-mal) hintereinander gemessen werden. Aus der Messserie wird ein Histogramm erzeugt, an das eine Funktion angepasst werden soll.

Frage: Welche Wahrscheinlichkeitsverteilung beschreibt dieses Histogramm?

Für alle Messungen steht eine Timerkarte (von National Instruments) zur Verfügung, die mit einem **Labview** Programm angesteuert und ausgelesen wird. Labview ist eine grafische Programmiersprache. Für diese Messung sieht die grafische Darstellung so aus:



Das Programm registriert digitale (TTL) Pulse am Counter-Eingang der Messkarte. Es ist als State-Machine (While-Schleife mit integrierter Case-Struktur) ausgelegt, die vier Zustände (**Idle** und **3 Messmodi**) kennt. Im Ruhemodus befindet sich das Programm im Zustand *Idle* (While-Schleife). Dieser Zustand enthält eine Event-Struktur, die bei Start einer Messung den jeweiligen *Case* aufruft. Nach Abschluss der Messung kehrt das Programm in den *Idle*-Zustand zurück.

3. Die **Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Myonpuls** soll für eine große Zahl von Pulspaaren gemessen werden (im Messprogramm sind 10000 Messungen voreingestellt).

Frage: Welche Wahrscheinlichkeitsverteilung ist hier zu erwarten?

Machen Sie dazu folgende Überlegung (analog zu 3.2): Nehmen Sie an, es wurde gerade ein Myon gemessen. Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass das nächste Myon im Zeitintervall $[t, t+\Delta t]$ auftritt, wenn wir im Mittel λ Myonen pro Sekunde erwarten?

4. **Messung der mittleren Lebensdauer der Myonen:** Wegen der geringen Zahl der beobachtbaren Zerfälle ist der Nachmittag dafür zu kurz. Sie starten daher eine Messung, die dann bis zum nächsten Praktikumstermin läuft. Davor den **Diskriminator einstellen** und die korrekte Funktion des Experiments überprüfen! Zur **Auswertung mit dem Praktikums-PC** wird der Datensatz der Messung, die von der Gruppe in der vorhergehenden Woche bzw. beim vorhergehenden Termin gestartet wurde, verwendet.
5. **Auswertung der Hauptmessung:** jede Gruppe analysiert eine Messung von ca. 10000 mit dem oberen Detektor gemessenen Zerfallszeiten und bestimmt die **mittlere Lebensdauer** der Myonen durch Anpassung einer Exponentialfunktion. Es zeigt sich, dass man nicht alle Daten verwenden kann, sondern eine **Auswahl** treffen muss.

Weitere Punkte zur Durchführung und Auswertung werden am Praktikumsnachmittag mittels einer **Arbeitsliste** bekanntgegeben.



*Abb. 5: Die Versuchsanordnung:
Zwei identische Detektoren mit **unterschiedlicher** Verstärkerelektronik.*