

# **Viktor Hess und die Entdeckung der Kosmischen Strahlung**

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades Magister der  
Naturwissenschaften

eingereicht von

Georg Federmann  
Institut für Radiumforschung und Kernphysik

Wien, im Jänner 2003

1.	Vorwort.....	4
2.	Einleitung.....	5
3.	Die Lage vor Viktor Hess.....	7
3.1.	Die „Elektrisierung“ (Ionisation) der Luft.....	7
3.2.	Die „Elektrizitätszerstreuung“ (Ladungstransport) in der Luft .....	9
3.3.	Messmethoden der Luftelektrizität .....	14
3.3.1.	Maßeinheiten .....	14
3.3.2.	Messgeräte .....	22
3.3.2.1	Die Ionisationskammer .....	31
3.3.2.2	Der Wulf'sche Strahlenapparat.....	34
3.4.	Die Jagd auf die ionisierende Strahlung .....	36
3.4.1.	Theodor Wulf und der Eiffelturm.....	36
3.4.2.	Die Jäger gehen in die Luft – Albert Gockel.....	38
3.4.3.	Viktor Hess bestimmt das Absorptionsverhalten der Gammastrahlung und begibt sich das erste Mal in die Luft .....	40
4.	Die Entdeckung der <i>Kosmischen Strahlung</i> .....	45
4.1.	Die ersten beiden Ballonflüge 1911.....	45
4.2.	Die sieben Fahrten 1912 – die Entdeckung einer neuen Strahlung .....	47
4.2.1.	Die erste Fahrt.....	50
4.2.2.	Die zweite Fahrt.....	51
4.2.3.	Die dritte Fahrt.....	54
4.2.4.	Die vierte Fahrt.....	55
4.2.5.	Die fünfte Fahrt.....	56
4.2.6.	Die sechste Fahrt.....	57
4.2.7.	Die siebente Fahrt – Die Entdeckung der <i>Kosmischen Strahlung</i> .....	59
4.3.	Schlussfolgerungen .....	62
5.	Viktor Hess in Innsbruck.....	66
6.	Die neuen Messgeräte.....	69
6.1.	Die Nebelkammer .....	70
6.2.	Die Photographische Platte .....	71
6.3.	Das Geiger-Müller-Zählrohr .....	73
7.	Die neuen Teilchen.....	74

7.1.	Das Wesen der <i>Kosmischen Strahlung</i> .....	74
7.2.	Erste Antimaterie – das Positron.....	76
7.3.	Das Myon – ein „schweres Elektron“ .....	78
7.4.	Die Kosmischen Sterne .....	79
7.5.	Das Pion – Vermittler der Kernkräfte .....	82
8.	Einige Lebensdaten .....	83
8.1.	Viktor Franz Hess .....	83
8.1.1.	Familie, Kindheit und Ausbildung .....	83
8.1.2.	Einzug ins Wissenschaftliche Leben .....	84
8.1.3.	Entdeckung der <i>Kosmischen Strahlung</i> .....	85
8.1.4.	Die weitere Karriere in der Wissenschaft.....	86
8.2.	Leopold Pfaundler von Hadermur.....	87
8.3.	Franz Serafin Exner.....	89
8.4.	Stefan Meyer .....	90
8.5.	Paul Karl Ludwig Drude .....	90
8.6.	Robert Andrews Millikan.....	91
8.7.	Carl David Anderson.....	92
9.	Literaturverzeichnis .....	95
10.	Danksagungen.....	99
11.	Curriculum Vitae .....	100

## 1. Vorwort

Was haben Erwin Schrödinger, Wolfgang Pauli und Viktor Hess gemeinsam? – Keine Ahnung, wer war der dritte noch mal?

Was sie gemeinsam haben, ist, dass alle drei als Österreicher geboren wurden und dass alle drei im Laufe ihres Lebens den Nobelpreis gewannen.

Schrödinger und Pauli sind populär. Die Schrödinger Gleichung und das Pauli Verbot werden meist schon in den höheren Jahrgängen der schulischen Laufbahn zitiert und ziehen sich roten Fäden gleich durch das Studium der Physik. Es besteht kein Zweifel, dass Schrödinger und Pauli jedem Physiker und auch vielen Menschen, die weniger direkt mit der Physik zu tun haben, zumindest namentlich ein Begriff sind.

Bei Viktor Franz Hess verhält es sich hingegen anders. Sein Name ist beinahe gänzlich in Vergessenheit geraten, und der Gegenstand seiner Entdeckung, die *Kosmische Strahlung*, wird gerne mit der von Gamov und Dicke 1948 geforderten Kosmischen Hintergrundstrahlung, einem Nachglühen des Urknalls, verwechselt, beziehungsweise überhaupt von Esoterikern mit Hilfe von Glaspysramiden und Kautschukplatten unschädlich gemacht.

Tatsächlich handelt es sich bei der *Kosmischen Strahlung* um einen steten Strom von geladenen Teilchen, die aus dem Weltall kommend auf die Erdatmosphäre treffen. Heute weiß man, dass es sich dabei hauptsächlich um Protonen (etwa 86 %) und Heliumkerne (etwa 12 %) handelt. Außerdem kommen alle Elemente bis hinauf zum Uran in abnehmenden Anteilen vor. Damit ist die *Kosmische Strahlung* im Gegensatz zur weitaus intensiver beobachteten elektromagnetischen Strahlung (Licht sowie Röntgen- und Radiowelle) die einzige Materiestrahlung, die wir aus dem Weltall empfangen können. Weit ist auch der Bereich, in dem die Energien der einzelnen Strahlungsteilchen schwanken. Einzelne Teilchen weisen Energien von weniger als  $10^3$  eV auf und andere wiederum jenseits der  $10^{20}$  eV. Ein eV (Elektronvolt) entspricht  $1.6 \cdot 10^{-19}$  J, daher entsprechen  $10^{20}$  eV rund 16 J. Ein solcher subatomarer Kraftprotz hätte also genügend Energie, um einen Stein von einem Kilogramm um rund  $1\frac{1}{2}$  Meter anzuheben.

Die Frage, wo diese Strahlung ihren Ursprung hat, ist bis auf einen von der Sonne stammenden Anteil bis heute ungeklärt. Man geht aber davon aus, dass ein Großteil der Teilchen in Supernovaexplosionen freigesetzt und dabei gewaltig beschleunigt wird. Wie lange die *Kosmische Strahlung* danach das Weltall durchquerte, bis sie bei der Erde anlangte, lässt sich aus dem Verhältnis radioaktiver und stabiler Nuklide eines Isotops schließen. Daher können wir heute sagen, dass die Teilchen der *Kosmischen Strahlung* vor etwa  $10^7$  Jahren freigesetzt wurden.

Doch als sich Viktor Hess daran machte, einige eigentümliche Phänomene in der atmosphärischen Elektrizität zu untersuchen, wusste man von alle dem noch nichts. Vor fast hundert Jahren legte Hess mit scharfem Geist und hervorragender Experimentierkunst den Grundstein zur Erforschung der *Kosmischen Strahlung* und eröffnete damit ein Forschungsgebiet, das bis heute bei weitem nicht abgeschlossen

ist, sich für die Moderne Physik aber als sehr wichtig und hilfreich erwies. So gelang es Viktor Hess Impulse zu setzen, die nicht nur den Weg für weitere künftige Nobelpreisträger ebneten, sondern auch ein Verständnis von vielen Zusammenhängen in der Grundlagenphysik ermöglichten, die das Bild der Wissenschaft Physik am Beginn des neuen dritten Jahrtausends prägen.

Umso erstaunlicher mithin, dass es die Erinnerung an seinen Namen nicht mit ins neue Jahrtausend geschafft zu haben scheint. Daher scheint es naheliegend, im Rahmen einer Diplomarbeit das Leben und Schaffen eines österreichischen Nobelpreisträgers wieder ins rechte Licht zu rücken. Umso wichtiger, als Viktor Hess der einzige österreichische Nobelpreisträger für Physik war, der nicht nur in Österreich geboren wurde, sondern auch seine Nobelpreisarbeit selbst in Österreich, nämlich am Institut für Radiumforschung in Wien, durchgeführt hat.

Da der amtliche Rahmen der üblichen Diplomarbeitsaufgabe nicht gesprengt werden soll, die Arbeit selbst aber möglichst leicht und für jedermann erreichbar sein soll, so ist es projektiert, sie mit Hilfe der jungen Technologie des Internets weltweit verfügbar zu machen: <http://www.federmann.co.at/vfhess/index.html>

## 2. Einleitung

Die Geschichte der Entdeckung der *Kosmischen Strahlung* ist von den Anfängen her tief in der Erforschung der Elektrizität und dabei vor allem der Leitfähigkeit der Atmosphäre verwurzelt. Die Anzahl der Physiker, die sich mit den elektrischen Erscheinungen beschäftigten, ist seit deren Entdeckung stetig angewachsen, von Galvani über Coulomb bis Maxwell und Thomson.

Um 1900 waren einige der ganz großen Mysterien rund um die Elektrizität erforscht und geklärt. Bereits 1750 äußerte Benjamin Franklin die Vermutung, dass die elektrische Ladung von diskreten Teilchen getragen wurde. J.J. Thomson gelang es im Jahre 1897, den Teilchencharakter der elektrischen Ladungsträger, die als *Elektronen* bezeichnet wurden, nachzuweisen, und das Verhältnis von Masse zu Ladung der Elektronen zu bestimmen. 1910 erweiterte Robert Andrews Millikan die Kenntnisse um das Elektron, indem er die Elementarladung (die elektrische Ladung des Elektrons) mit seinem berühmten Öltröpfchenversuch bestimmte. Damals erhielt er den Wert

$$q_e = 1.63 \cdot 10^{-19} \text{ Cb.}$$

Millikan setzte seine Versuchsreihe noch einige Zeit fort und verbesserte sein Ergebnis schrittweise, bis er 1917 den Wert

$$q_e = 1.59 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$$

erhielt. Dieser Wert lag schon sehr nahe an dem heute gültigen [1]:

$$q_e = (1.602\ 176\ 462 \pm 0.000\ 000\ 063) \cdot 10^{-19} \text{ Cb.}$$

Einige Phänomene warteten um die Jahrhundertwende aber noch auf ihre Klärung. Unter anderem bereitete den Physikern, die damals annahmen, ihre Umwelt bereits beinahe bis ins letzte Detail zu verstehen, eine Sache Kopfzerbrechen: Wenn sie einen Metallzylinder elektrisch luden, so verlor dieser mit der Zeit seine Ladung, egal, wie

gut sie ihn gegen die Erde isolierten. Da sonst keine Erklärung blieb, musste wohl die Entladung über die Luft der Atmosphäre erfolgen. Wie aber die Luft, die eigentlich selbst ein Isolator sein sollte, diesen Ladungstransport bewerkstelligte, war den Forschern ein Rätsel, dessen Lösung in recht direkter Folge zur Entdeckung der *Kosmischen Strahlung* führte.

Was den geneigten Leser erstaunen mag, wenn er die Messprotokolle und Berichte der Altvorderen studiert, sind die einfachen Mittel und Geräte, auf die der naturwissenschaftliche Forscher damals angewiesen war. Mit akribisch genauer Arbeit, gewappnet mit einem wachen und scharfen Geist, gelang es aber trotz allem Unbill, aus den spärlichen und vagen Messergebnissen folgerichtige und später immer wieder neu bestätigte Schlussfolgerungen zu ziehen. So ist die Entdeckung der *Kosmischen Strahlung* bis heute ein Denkmal starker Denkleistung und kreativer Schaffenskraft großer Wissenschaftler am Beginn einer neuen Physik.

Die *Kosmische Strahlung* war eine wichtige Quelle für die Kern- und Teilchenphysiker, aus der sie ihr Wissen über ihre Schützlinge, die Atomkerne und ihre Bauteile, beziehen konnten. Das *Positron*, das *Myon*, das *Pion* und die *Kernzertrümmerung* (die *Kosmischen Sterne* der Marietta Blau) wurden in der *Kosmischen Strahlung* das erste Mal nachgewiesen. Lange bevor die ersten künstlichen Teilchenbeschleuniger ihren Dienst aufnahmen, waren schon einige der fundamentalsten Teilchen mit Hilfe der *Kosmischen Strahlung* entdeckt worden; Verdienste, die den Nachfolgern von Viktor Franz Hess in der Höhenstrahlungsforschung anzurechnen sind.

Trotz der großen Verdienste dieser Arbeitsgemeinschaft sind ihre Taten und ihre Wege im Großen und Ganzen ins Dunkel geraten. Einerseits, da sie einfach zeitlich ein Stück zurückliegen, und andererseits, weil die Protokolle und Messberichte nicht ganz leicht zugänglich und in einer Form abgefasst sind, die heute unter Umständen nicht mehr sehr leicht verständlich ist.

Das Ziel dieser Diplomarbeit soll es daher sein, eine leicht zugängliche Darstellung der Vorgangsweise und der Ergebnisse der Arbeit von Viktor Hess zu liefern. Die logische Konsequenz ist eine Internet-Publikation zur Forschungsarbeit von Viktor Hess mit dem Ziel, seine Arbeit sowohl für den interessierten Laien spannend darzustellen, als auch seine Vorgangsweise dem fachlich versierten Leser übersichtlich und sachlich nachvollziehbar darzustellen. Im Übrigen soll die Herausforderung angenommen werden, die spannende Geschichte vom Pioniergeist junger naturwissenschaftlicher Forscher zu erzählen, die mit ihren Luftballonen, Schiffen, Seilbahnen und Drachen auf den höchsten Bergen und in den tiefsten Bergwerken nach den Spuren der *Kosmischen Strahlung* suchten.

### 3. Die Lage vor Viktor Hess

#### 3.1. Die „Elektrisierung“ (Ionisation) der Luft

Um uns mit dem wissenschaftlichen Problem vertraut zu machen, mit dem die Erforschung der *Kosmischen Strahlung* ihren Anfang nahm, wollen wir ein kurzes, einführendes Beispiel betrachten:

*Ein naturwissenschaftlicher Forscher des ausklingenden 19. Jahrhunderts beschäftigt sich aus verschiedenen Gründen mit der Elektrizität der Atmosphäre. Nach einigen Mühen ist es ihm gelungen, einen Metallzylinder herzustellen, der durch eine findige Konstruktion aus Naturkautschuk und Ebonit hervorragend gegen die Erde isoliert ist und eine elektrische Ladung zu halten im Stande sein sollte. Der Forscher lädt nun den Körper elektrisch auf und stellt zu seiner Überraschung fest, dass der Metallzylinder, sich selbst überlassen, seine elektrische Ladung doch wieder verliert. Der Forscher weiß sich darauf keinen Reim, da er ja selbst dafür gesorgt hat, dass der Zylinder hervorragend isoliert ist. Daher macht er sich daran, eine Erklärung dafür zu finden, was mit der elektrischen Ladung geschehen ist, die er seinem Metallzylinder anvertraut hatte.*

Bereits im Jahre 1785 zeigte Coulomb, dass jeder in Luft aufgestellte metallische Leiter seine Ladung allmählich verliert, und dass dieser Effekt, den er *Elektrizitätszerstreuung* nannte, nicht womöglich auf eine mangelhafte Isolierung der den Leiter tragenden Einrichtung, sondern auf eine wenn auch geringe Fortführung oder Leitung der Elektrizität durch die Luft zurückzuführen ist.

Bis in die achtziger Jahre des 19. Jahrhunderts lagerte dieses Phänomen im Schatten des Interesses der allgemeinen Forschungstätigkeit, weshalb sich lange die abwegige Annahme hielt, dass feuchte Luft besser leite als trockene. Eine Annahme, die auf einen Analogieschluss vom verbesserten Leitvermögen benetzter Kontaktstellen gegenüber trockenen auf die Bedingungen in der Atmosphäre zurückzuführen sein mag.

F. Linss fand 1887 erstens, dass ganz im Gegensatz zur landläufigen Annahme die Elektrizitätszerstreuung bei klarem Wetter und daher bei trockener Luft am größten ist, und zweitens fand er eine regelmäßige Schwankung der elektrischen Zerstreuung, also des Ladungsverlustes pro Zeiteinheit. Beim damaligen Stand des Wissens um die elektrische Leitfähigkeit von Gasen konnte man keine befriedigende Erklärung der Elektrizitätszerstreuung finden, bis die Erforschung der Röntgen- und Becquerelstrahlung, also der Radioaktivität, einen gehörigen Fortschritt brachte.

Radioaktivität, so erfasste man bald, kann die Leitfähigkeit aller Gase auffallend anheben. Diese verbesserten Leitungseigenschaften führte man auf eine Erzeugung freier Ladungsträger zurück. Die neuen Ladungsträger entstanden, indem die energiereiche radioaktive Strahlung die elektrisch neutralen Atome und Moleküle der Atmosphäre in positive und negative *Ionen* aufspaltete; diese spezielle Fähigkeit der radioaktiven Strahlung brachte ihr auch den Namen *ionisierende Strahlung* ein. Auf jeden Fall führten diese Erkenntnisse zu einer Neudeutung des Leitungsmechanismus in Gasen: der *Ionenleitung*. Nach dieser neuen Auffassung sind wie in Elektrolyten so auch in Gasen stets positive und negative Teilchen, die sogenannten *Ionen*, vorhanden (z.B. Elektronen und positiv geladene Atome). Wenn jetzt ein elektrisches Feld vorhanden ist, so beginnen die Ionen je nach ihrem Vorzeichen entlang der elektrischen Feldlinien zu wandern (der Name *Ion* ist dem Griechischen entlehnt und bedeutet etwa *Wanderer*). Der Analogieschluss von der Ionenleitung im Elektrolyten auf die Ionenleitung im Gas war ein ähnlich großer Verdienst, wie dann die Anwendung der Lehre von den Gasionen auf die Verhältnisse in der atmosphärischen Luft durch die beiden deutschen Forscher Julius Elster und Hans Geitel, indem sie eine befriedigende Deutung des Vorganges der Elektrizitätszerstreuung brachten. [2,3]

Coulomb hatte ja das Phänomen der *Elektrischen Zerstreung* noch so gedeutet, dass sich kleinste Teilchen wie Staubpartikel, *Aerosole* genannt, durch Kontakt mit einer elektrisch geladenen Oberfläche an dieser aufladen, dann im elektrischen Feld von dieser Oberfläche weggestoßen werden und so die Ladung abtransportieren. Daher nahm man auch an, dass feuchte Luft, in der größere Mengen von Wassertropfen (zum Beispiel bei Nebel) und anderen Verunreinigungen vorhanden sind, verbesserte Leitungseigenschaften aufweist. Aber jetzt wusste man um die stete Präsenz geladener Ionen in der Luft, die auch dann gegeben war, wenn kein geladener Metallzylinder aufgestellt wurde. Diese Ionen entstanden durch die ladungstrennende Wirkung der ionisierenden Strahlung. Die *Zerstreung der Elektrizität*, wie man sie bis dahin bildhaft bezeichnete, wurde also nicht dadurch verursacht, dass Staubpartikel die Ladung des Metallzylinders abtransportierten. Vielmehr wurden bereits vorhandene Ionen durch das elektrische Feld des Zylinders angezogen. So zieht ein positiv geladener Zylinder Elektronen und negative Ionen (Atome und Moleküle, die ein zusätzliches Elektron gebunden haben) an, ein negativ geladener Zylinder zieht positive Ionen (Atome, denen Elektronen fehlen) an. Die Ladung des Zylinders wird durch die ungleichnamig geladenen Ionen mit der Zeit ausgeglichen.

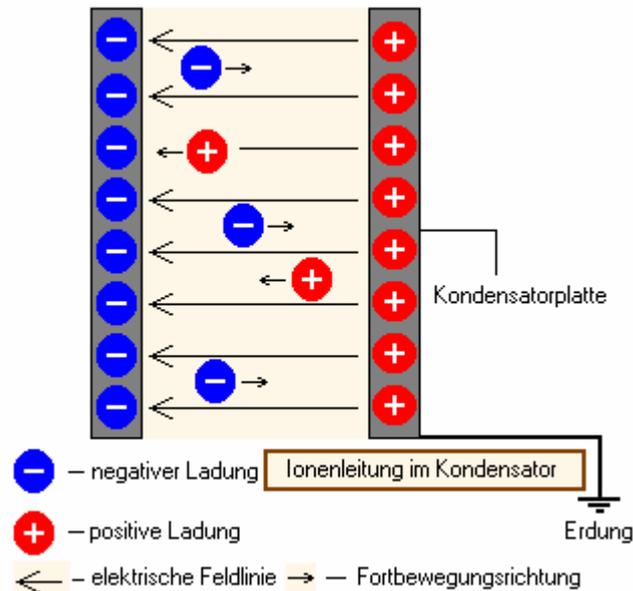
Das Forschungsgebiet der Lufterlektrizität war um 1900 ein sehr großes. Schon seit den Versuchen von Le Monnier im 18. Jahrhundert wusste man um eine elektrische Spannungsdifferenz zwischen der Erde und der Atmosphäre. Der Potentialunterschied zwischen Erde und Luft beträgt je Meter Höhendifferenz etwa 100 bis 300 V. Dieser *Gradient* des Erdpotentials ergibt das elektrische Feld der Erde. Das gleichzeitige Bestehen einer elektrischen Spannung in der Atmosphäre und der Leitfähigkeit der Atmosphäre ergibt durch die Wanderung der freien Ladungsträger einen ständigen vertikalen Strom, der über die gesamte Erdoberfläche summiert etwa 100 Ampere beträgt. Die Beschäftigung mit dieser Leitfähigkeit der Luft führte dann in fast direkter Folge zur Entdeckung der *Kosmischen Strahlung*. Darum sei diesem so beschrifteten Weg zunächst die Aufmerksamkeit geschenkt. [4]

### 3.2. Die „Elektrizitätszerstreuung“ (Ladungstransport) in der Luft

Jedes Gas enthält stets positiv und negativ geladene Elektrizitätsträger, die als *Ionen* bezeichnet werden. Ihre Ladung ist gleich der elektrischen Elementarladung

$$q_e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$$

oder einem Vielfachen davon. Meist haben die Ionen aber die einfache Elementarladung, ihre Massen hingegen können in weiten Bereichen variieren.

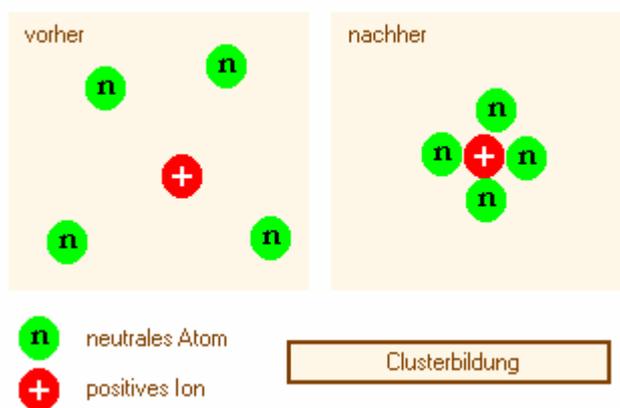


**Abbildung 3-1** Die Bewegung der Ionen im elektrischen Feld eines Kondensators  
Befinden sich Ionen in einem elektrischen Feld, so wirkt auf sie eine beschleunigende Coulombkraft entlang der elektrischen Feldlinien. Dadurch setzen sich die Ionen in Bewegung und driften auf die entgegengesetzt geladene Kondensatorplatte zu.

Denken wir uns ein Gas, z.B. Luft, das sich im Zwischenraum zweier Metallplatten befindet, deren eine geerdet, die andere unter negative Spannung gesetzt ist (Abbildung 3-1); dann werden die positiven Ionen in Richtung der elektrischen Feldlinien (die definitionsgemäß von positiven Ladungen ausgehen und in negativen Ladungen enden), die negativen in die Gegenrichtung in Bewegung gesetzt und so lange beschleunigt werden, bis die beschleunigende Coulombkraft und die geschwindigkeitsabhängige Reibungskraft der Ionen an der Luft ein Gleichgewicht finden. Von da an wandern die Ionen mit einer nur von ihrer Größe und der elektrischen Feldstärke abhängigen, konstanten Geschwindigkeit weiter, bis sie zu einer der beiden Leiterplatten gelangen, wo sie ihre Ladung abgeben. Die Geschwindigkeit, die ein Ion bei einer elektrischen Feldstärke von  $1 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$  erreicht, ist eine typische Größe für dieses Ion und wir bezeichnen sie daher als die Beweglichkeit  $k$  des Ions.

Für die Leitfähigkeit der Luft sind fast immer Ionen in Form von geladenen Atomen verantwortlich. Freie Elektronen stehen als Ladungsträger fast nie und nur in Ausnahmefällen zur Verfügung, so in sehr reinem Stickstoff und in den reinen Edelgasen. In diesen Gasen ist die Beweglichkeit der negativen Elektronen etwa hundert mal größer als die der positiven Atome. Das rührt daher, dass die Elektronen

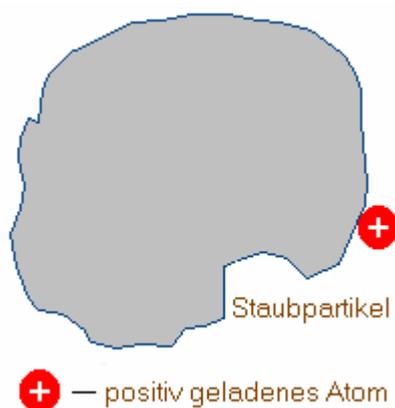
sehr viel kleiner und daher viel beweglicher als die Atome sind. Die große Beweglichkeit der negativen Ionen in Edelgasen verschwindet sofort bei Beimengung geringer Mengen anderer Gase wie Sauerstoff und Kohlendioxid, weil sich die Elektronen sofort an diese Gasmoleküle anlagern. In der normalen Luft tragen also freie Elektronen zum Ladungstransport nicht bei und sind somit von keinem Einfluss auf die Leitfähigkeit der Atmosphäre. Allerdings ist auch der Fall selten, dass ein Ion als Ladungsträger aus einem einzelnen Atom besteht. Ladungstragende Einzelatome oder Einzelmoleküle sind in der Luft nicht beständig, sondern gehen rasch durch Anlagerung an andere Atome in sogenannte *Cluster* über, wodurch ein Atom- oder Molekülverband entsteht, der dann im elektrischen Feld die Ladung transportiert.



**Abbildung 3-2 Ionen-Cluster**

Anziehende elektrische Kräfte zwischen Ionen und neutralen Atomen führen dazu, dass sich größere Cluster bilden können. Diese leichten Cluster sind um einiges größer als die einzelnen Atome und können sich daher nur langsam durch das Medium bewegen.

Diese *leichten Ionen (Cluster)*, deren Beweglichkeit  $k$  in Gasen von Atmosphärendruck die Größenordnung  $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  bei einer elektrischen Feldstärke von  $1 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$  aufweist, vermitteln vorwiegend die Elektrizitätsleitung der freien Atmosphäre. Meistens befinden sich in der Luft Verunreinigungen, sogenannte *Aerosole* wie z.B. Wassertröpfchen bei Nebel, aber auch Verbrennungsprodukte wie Russteilchen, Staub und anderes, also große Teilchen, an die sich die Ionen ebenfalls anlagern können. Dadurch entstehen große und schwere Ionen, die stark an Beweglichkeit einbüßen. Die Beweglichkeit dieser sehr *schweren Ionen* variiert je nach der Größe zwischen  $10^{-2}$  und  $10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  bei einer Feldstärke von  $1 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Wenn die beiden Platten des Kondensators einen Abstand von 10 cm aufweisen und die Spannungsdifferenz 200 V beträgt, dann ergibt sich für die kleinen Ionen eine Geschwindigkeit von etwa  $30 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , die dann die Entfernung zwischen den beiden Platten in einer Zeit von  $\frac{1}{3} \text{ s}$  durchlaufen würden. Die großen Ionen benötigen dafür etwa 500 bis 1000 s.



**Abbildung 3-3 Ein schweres Ion**

Ein schweres Ion entsteht, wenn sich ein Ion, durch elektrostatische Kräfte angezogen, an einem Aerosol (Staub, Russ, usw.) anlagert. Dadurch büßt das Ion praktisch seine Beweglichkeit in der umgebenden Luft ein.

In der Atmosphäre werden ständig und allorts Ionen erzeugt. Die Stärke der Ionisation ist durch die Zahl der Ionenpaare gegeben, die pro Sekunde und Kubikzentimeter erzeugt werden. Gleichzeitig werden Ionen durch verschiedene Prozesse auch wieder vernichtet oder für den Ladungstransport in der Luft irrelevant gemacht. Entweder kommt es zu Wiedervereinigung mit Ionen entgegengesetzten Vorzeichens, wodurch ein elektrisch neutrales Teilchen entsteht, oder das Ion lagert sich an ein sehr großes, ungeladenes Teilchen (Staub, Nebel, etc.) an, wodurch es seine Beweglichkeit einbüßt. Außerdem kann das Ion durch *Diffusion*, *Adsorption*, oder *elektrische Konvektion* wegtransportiert werden, und steht dann für einen Ladungstransport nicht mehr zur Verfügung. Der wichtigste Effekte dabei ist die Wiedervereinigung, auch *Rekombinierung* genannt. Sobald in einem Gasvolumen gleichzeitig positiv und negativ geladene Teilchen bestehen, muss auf Grund elektrischer Anziehungskräfte eine Tendenz zur Wiedervereinigung entgegengesetzter Ladungen bestehen. Die Rekombinierung wird offenbar umso öfter erfolgen, je mehr positive als auch negative Teilchen im Volumen anwesend sind, wodurch sich die Zahl der im Volumen pro Zeiteinheit durch Rekombinierung verschwindenden Ionen anschreiben lässt als:  $n = \alpha \cdot n_+ \cdot n_-$ , wobei  $n_{\pm}$  die Anzahl der positiven und negativen Ionen angibt;  $\alpha$  heiße Wiedervereinigungskoeffizient und hat die Dimension  $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Die Dimension von  $n$  ist  $\text{Teilchen} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ . Gleichzeitig werden vom Ionisator  $q$  Ionenpaare  $\cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$  erzeugt. Dadurch ist die Änderung der Anzahl der Ionen gegeben durch:

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha \cdot n^2$$

Bei gleichzeitiger Wirkung des Ionisators und der Rekombinierung muss sich nach einiger Zeit ein Gleichgewicht einstellen, in dem die Gesamtionenzahl unveränderlich bleibt:

$$\frac{dn}{dt} = 0.$$

In diesem Zustand hängt die Ionenzahl durch folgende Beziehung nur mehr von  $\alpha$  und  $q$  ab:

$$n = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}$$

Zur Ionendiffusion kommt es dort, wo ein Gefälle der Ionenkonzentration im Gas besteht, z. B. an der Grenzfläche zwischen der stark ionisierten Bodenluft und der relativ ionenarmen Luft darüber. Adsorption ereignet sich dort, wo ein ionisiertes Gas an die Oberfläche eines Leiters grenzt (z. B. ein Meer oder eine metallische Oberfläche). Durch *Influenz* erzeugt jedes Ion eine entgegengesetzt geladene *Spiegelladung* im Leiter, was zu einer anziehenden Wirkung zwischen dem Leiter und dem Ion führt. Diese Ionenadsorption hat eine Reichweite von etwa 0.1 mm und kann daher in den meisten Anwendungsfällen vernachlässigt werden.

Konvektion bedeutet, dass ein Transport durch Luftbewegung stattfindet. Die elektrische Konvektion kann zu einem starken Transport von Ladungen führen und so eine beträchtliche Verminderung der Ionenzahl bewirken. In der freien Atmosphäre ist diese Auswirkung aber gering, da im Schnitt durch die Grenzflächen eines betrachteten Volumens gleich viele Ionen ein- wie austreten.

Wichtig für alle Messungen, die mit Ionisation zu tun haben, ist der Begriff des *Sättigungsstromes*, der im folgenden besprochen werden soll (Abbildung 3-4): Wir betrachten wieder einen Kondensator, der aus zwei Leiterplatten mit entgegengesetzter Ladung besteht. Es ist eine Erfahrungstatsache, dass die Luft unserer Atmosphäre stets leicht ionisiert ist. Aus der entgegengesetzten Ladung, die auf den beiden Kondensatorplatten aufgebracht ist, ergibt sich eine Potentialdifferenz und damit ein elektrisches Feld. Die Ionen, die sich im elektrischen Feld des Kondensators befinden, beginnen sich zu bewegen und werden gegen die entgegengesetzt geladene Elektroden hin getrieben, wo ihre Ladungen ausgeglichen werden.

Solange das elektrische Feld nicht zu stark ist, kann die Zahl der im Konvektionsstrom abtransportierten Ladungen im Vergleich zur Gesamtionenanzahl vernachlässigt werden. In diesem Fall ist der Ionenstrom proportional zur am Kondensator angelegten Spannung,  $I \propto U$ , das Ohmsche Gesetz gilt. Man spricht hier auch vom *freien Strom*. Wird aber die Spannung weiter erhöht, so wächst die Zahl der pro Zeiteinheit zur Elektrode geführten Ladungen, die verfügbare Zahl an Ionen im Volumen sinkt stetig, und damit auch die Leitfähigkeit des Gases. Die Stromstärke wächst nicht mehr proportional mit der Spannung, sondern langsamer. Schließlich wird die Feldstärke so hoch, dass gänzlich alle Ionen abtransportiert werden, die im Volumen pro Zeiteinheit entstehen. Dann ist der Strom in dem Sinn nicht mehr von der Spannung am Kondensator, sondern vom Volumen im Kondensator und von der Ionisationsrate abhängig.

$$I = e \cdot Q \cdot V$$

e..... Elementarladung  $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$  Cb

q..... Ionisationsrate in Ionenpaare  $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$

V..... Volumen in  $\text{cm}^3$

Einen solchen Strom nennt man Sättigungsstrom. Er ist dadurch charakterisiert, dass bei weiterer Steigerung der Spannung am Kondensator die Stromstärke unverändert

bleibt. Ist das genaue Volumen bekannt, so kann man vom gemessenen Sättigungsstrom auf die Ionisation im Kondensator zurückrechnen. Kommt als Ionisationsquelle zum Beispiel nur ionisierende Strahlung in Frage, so kann man dann weiter vom Sättigungsstrom auf die Intensität der Strahlung rückschließen. In der Atmosphäre reichen meist Feldstärken von 10 bis 50  $\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ , um den Sättigungszustand zu erreichen. Man sieht daraus sofort, dass die Spannung am Kondensator umso höher sein muss, je größer das Messgerät ist, und je weiter die Kondensatorplatten dadurch voneinander entfernt sind.

Die Geschwindigkeit, mit der sich die Ionen im Gas bewegen, ist abhängig davon, wann das Gleichgewicht zwischen der Coulombkraft und der geschwindigkeitsabhängigen Reibungskraft erreicht wird. Bei hohen elektrischen Feldstärken können jetzt die Ionen derartig stark beschleunigt werden, dass ihre Energie ausreicht, andere Atome oder Moleküle im Gas zu ionisieren, die dann im elektrischen Feld ebenfalls so lange beschleunigt werden, bis sie ihrerseits zu einer solchen *Stoßionisation* anderer Gasmoleküle fähig sind. Wenn dies der Fall ist, kommt es zu einer neuerlichen starken Vermehrung der anwesenden Ladungsträger, und daher zu einem Anstieg der Leitfähigkeit der Luft, was auch den Entladungsstrom entsprechend ansteigen lässt.

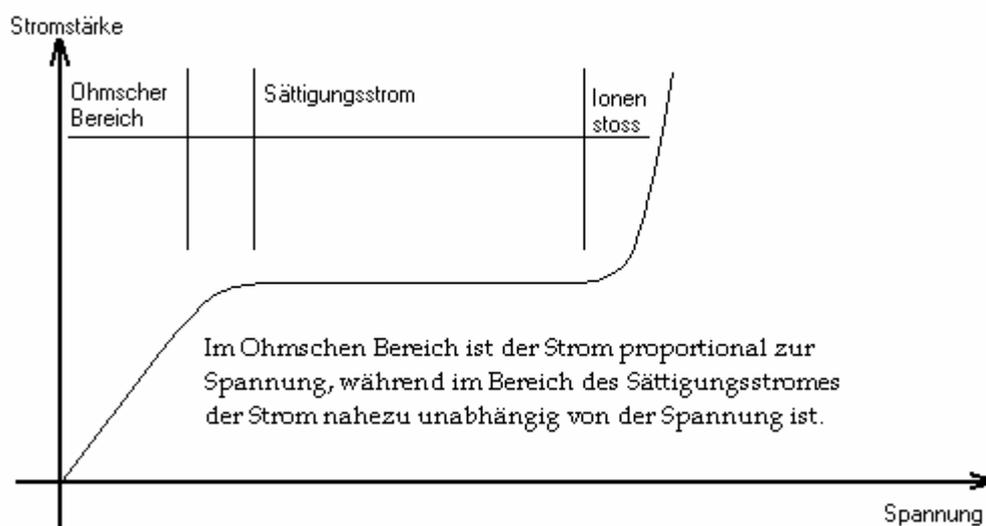


Abbildung 3-4 Strom-Spannungscharakteristik

Die Ionisationsmessungen, die in dieser Arbeit dargestellt werden sollen, sind fast durchwegs im Bereich des Sättigungsstromes ausgeführt worden, da man ja vom gemessenen Entladungsstrom möglichst direkt auf die dafür verantwortliche *ionisierende Strahlung* schließen können wollte. [4]

### 3.3. Messmethoden der Luftelektrizität

#### 3.3.1. Maßeinheiten

Maßeinheiten dienen dazu, Messgrößen wie Distanzen oder Zeiträume quantitativ erfassen und darstellen zu können, also letztendlich um Messungen durchführen zu können. Betrachten wir den Fall, wo ein Mann einem weitläufigen Bekannten, der etwas abseits lebt, die Länge eines bestimmten Weges schriftlich mitteilen will. Um seinen Freund die tatsächliche Weglänge deutlich zu machen, müssen die beiden über eine gemeinsame Grundlage verfügen: *eine Maßeinheit*. Dabei handelt es sich um eine Vergleichsgröße, die man verwendet, um der tatsächlichen Messgröße eine Maßzahl zu zuordnen. Die Maßzahl sagt dann über die Messgröße aus, welches Verhältnis sie zur Maßeinheit einnimmt.

Wenn der Mann aus dem Beispiel aus Europa stammt, so mag es für ihn naheliegend erscheinen, dass er sich für den *Meter* (m) als Maßeinheit entscheidet. Also misst er aus, wie oft er den Metermaßstab entlang des zu bestimmenden Weges hintereinander legen muss. Er mag zu dem Ergebnis kommen, dass der Weg in diesem Falle 400 Meter lang ist. Wenn der Mann aber aus Amerika stammt, so hätte er genauso gut als Maßeinheit *yards* wählen können. Ein yard entspricht 3 feet oder 0.9144 Meter, also hätte man die Weglänge ebenso richtig auf 437.44 yards bestimmen können. Der Empfänger der Postkarte wird aus beiden Angaben den gleichen Schluss ziehen können, wenn er mit der jeweiligen Maßeinheit vertraut ist.

Was beide Beispiele gemein haben, ist, dass sich der Informant für eine beliebige Maßeinheit mit der Dimension einer Länge entscheiden konnte, um eine Entfernung anzugeben, was auf den ersten Blick wohl auch sehr vernünftig erscheint, aber nicht die einzig mögliche Lösung für das Problem darstellt. So könnte der Mann aus der Geschichte etwa versuchen, seinem Freund einen lebendigeren Eindruck der Weglänge zu vermitteln, indem er schreibt, dass er gerade fünf Minuten von z. B. der Universität entfernt wohnt. Man beachte, dass in diesem dritten Beispiel eine Maßeinheit mit der Dimension einer Zeit verwendet wurde, um die Länge eines Weges anzugeben, was im Prinzip einen Widerspruch darstellen müsste! Rein gefühlsmäßig aber kann jeder etwas mit dieser eher kryptischen Entfernungsangabe anfangen. Der Schreiber muss dabei von der Annahme ausgehen, dass alle Menschen mit annähernd der gleichen Geschwindigkeit unterwegs sind, wenn sie durch die Stadt spazieren, wodurch eine eindeutige Zuordnung zwischen Entfernungen und den Zeiten ihrer Bewältigung ermöglicht wird.

Wie wahrscheinlich jeder aus eigener Erfahrung auf diversen Wanderwegen, wo die Entfernung zur Blockhütte, die erst gegen Abend am Horizont auftauchte, mit fünfzehn Minuten angegeben war, weiß, ist die menschliche Fortbewegungsgeschwindigkeit keine anthropologische Konstante, sondern individuell und stark von der Situation abhängig, und damit nur sehr bedingt geeignet, Entfernungen zuverlässig anzugeben.

Allerdings gibt es eine tatsächlich konstante Geschwindigkeit, die dann auch gerne dazu verwendet wird, Entfernungen durch eine Zeit anzugeben, wo typischere Einheiten wie Meter, Kilometer und dergleichen nicht mehr mithalten können: und das

ist die *Lichtgeschwindigkeit*. Seit Albert Einstein, Michelson und Morley ist es allgemein bekannt, dass die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit mit

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

(genauer Wert:  $299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

konstant ist. Der Weg, den ein Lichtquant pro Sekunde zurücklegt, ist also für jede Sekunde gleich. Außerdem ist die Lichtgeschwindigkeit enorm hoch, und so eignen sich die Strecken, die das Licht in einem Jahr zurücklegt, um die Beschreibung besonders großer Entfernungen zu bewältigen. Ein *Lichtjahr* ist also die Strecke, wo ein Lichtquant zu einem anderen sagen würde: "Ja, da gehst Du schon mal ein Jahr." Was etwa  $9\frac{1}{2}$  Billionen ( $10^{12}$ ) Kilometern entspricht. Was ist das wichtige an den obigen Beispielen?

1. Wir haben gesehen, dass man einer Messgröße verschiedene Maßeinheiten zuordnen kann. So kann man eine Länge in Meter, yards und vielen anderen Maßeinheiten angeben, was dann immer zu einer anderen Maßzahl führt. So hieße eine Entfernung  $d$  zum Beispiel in Metern  $d = 5$  Meter, oder in yards  $d = 5.47$  yards. Was beide Angaben gemein haben ist, dass beide Maßeinheiten die Dimension einer Länge haben.
2. Ebenso kann man einer Messgröße eine neue Dimension zuordnen. Im obigen Fall war es die Dimension der Zeit (die benötigt wird, um den Weg zu bewältigen), die wir verwendeten, um eine Messgröße mit der Dimension einer Länge zu beschreiben. Das ging deswegen, da wir mit Hilfe der konstanten Lichtgeschwindigkeit die Möglichkeit einer eindeutigen Zuordnung der Messgrößen hatten.

Ähnliche Umrechnungen wie die oben angeführte werden notwendig, wenn man die Messberichte aus den Zeiten von Viktor Hess und seinen Zeitgenossen quantitativ verstehen will. In der Gegenwart erfreut sich das *SI-System* einer zunehmenden Beliebtheit. Das *Système International* ist ein Einheitensystem mit den Basiseinheiten Meter (Länge), Sekunde (Zeit) und Kilogramm (Masse). Alle weiteren Größen sind von diesen abgeleitet. Die Einheit der Kraft  $F$  (nach dem englischen *force*) ist z.B. das *Newton* (kurz **N**). Da das Newton keine Basisgröße im SI-System ist, muss es folglich aus den Basisgrößen abgeleitet werden. Für das Newton erhält man:

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2},$$

bei genauerem Hinsehen erkennt man das erste Newton'sche Axiom

$$F = m \cdot a$$

*Kraft = Masse x Beschleunigung.*

Die Beschleunigung wird nach dem englischen Ausdruck *acceleration* mit  $a$  bezeichnet.

Vor allem in der Anfangszeit der Erforschung der *Kosmischen Strahlung* experimentierte der physikalische Forscher recht viel mit relativ hohen Spannungen und eher geringen Ladungen, mit denen die Ionisationskammern betrieben wurden, die damals das Kernstück jedes Strahlenapparates bildeten. Besonders interessierten sich die Physiker für die Ladungen, dabei vor allem für die Elementarladung und ihre ganzzahligen Vielfachen. Im SI-System ist allerdings die Definition der Ladung

keineswegs einfach, sondern erfolgt über den Strom. Daher ist es zweckmäßig, zunächst die Definition der Stromstärke zu betrachten:

*Man denke sich zwei unendlich lange Leiter, die einen Abstand zueinander von exakt einem Meter einhalten. Die beiden Leiter werden genau dann von einem Strom  $I$  von der Stärke von je einem Ampere (A) durchflossen, wenn die Kraft je Einheitslänge zwischen den beiden Leitern  $2 \cdot 10^{-7} \text{ N/m}$  beträgt. Das Ampere ist die Maßeinheit des elektrischen Stromes.  $[I] = \text{A}$ .*

Es mag auffallen, dass den Basisgrößen kg, m, s im SI-System Kleinbuchstaben, den abgeleiteten Größen wie A und N Großbuchstaben zugeordnet werden. Die SI-Einheit für die Ladung Q mit der Einheit *Coulomb* (Cb) ergibt sich dann aus der Beziehung

$$1 \text{ Cb} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}, \text{ oder eine Amperesekunde.}$$

Zu Hess' Zeiten hingegen verwendete man noch sehr gerne das cgs-System. Die Basiseinheiten hier sind der Zentimeter, das Gramm und die Sekunde - cm, g, sec. Aus den Anfangsbuchstaben ergibt sich die Abkürzung cgs. Allerdings waren nicht nur die Basisgrößen verschieden, sonst wäre der Unterschied kaum erwähnenswert gewesen. Die beiden Einheitensysteme verwendeten auch recht verschiedene Strategien in der Definition ihrer Messgrößen.

Verfolgen wir zunächst einmal den Weg der Definitionen der abgeleiteten Größen, bis wir wiederum bei der Ladung angelangt sind. Im SI-System wählte man vor einiger Zeit den Weg über das Ampere, also über die Kräfte zwischen zwei Strömen, die dann das Ampere, die Stromstärke definierten. Zur Zeit von Viktor Hess aber interessierte man sich weniger für die Kräfte zwischen den Magnetfeldern zweier Ströme; was vor allem die Aufmerksamkeit der Forscher fesselte, waren die Wechselwirkungen und die Kräfte zwischen „ruhenden“ elektrischen Ladungen.

Die Kraft F wird auch im cgs-System über den Zusammenhang  $F = m \cdot a$  definiert. Da hier überhaupt kein Unterschied in der Philosophie sondern nur in den Maßeinheiten besteht, unterscheiden sich die Einheiten N (SI-System) und *dyn* (cgs-System) nur um einen konstanten Faktor

$$1 \text{ dyn} = 10^{-5} \text{ N}.$$

Betrachten wir die Gleichung für die Coulombkraft

$$F_C = \epsilon \cdot Q'$$

Hier steht  $\epsilon$  für die elektrische Feldstärke ( $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$  in SI-Einheiten), die von der Ladung Q erzeugt wird, und Q' steht für eine elektrische Probeladung, die diese Feldstärke spürt. Wenn F und Q bereits gegeben sind, kann man aus diesem Zusammenhang die elektrische Feldstärke herleiten.

Der elektrische Fluss  $\Phi$  durch die Begrenzungsfläche eines geschlossenen Volumens (z.B. die Oberfläche einer Kugel) ist proportional zu der eingeschlossenen Ladung, bzw. zu dem Oberflächenintegral der Feldstärke über eine geschlossene Sphäre rund um eine Ladung (diesen Zusammenhang gibt das Gauss'sche Gesetz wieder):

$$\Phi = \oint \epsilon df = 4r^2 \pi \cdot |\epsilon| = \eta \cdot Q$$

wobei  $\Phi$  den elektrischen Fluss bezeichnet,  $\epsilon$  die elektrische Feldstärke, die durch die Ladung  $Q$  erzeugt wird.  $4r^2\pi$  erhält man durch das Oberflächenintegral über die Kugel ( $4r^2\pi$  ist tatsächlich die Kugeloberfläche), die die Ladung  $Q$  enthält. Das letzte Gleichheitszeichen ergibt sich aus dem Gauss'schen Gesetz.

Wenn man nur den rechten Teil der Gleichung betrachtet, dann kann man  $\epsilon$  wie folgt ausdrücken:

$$4r^2 \pi \cdot |\epsilon| = \eta \cdot Q \Rightarrow \epsilon = \eta \cdot \frac{Q}{4r^2 \pi}$$

Besonderes Interesse wird jetzt noch der Proportionalitätskonstante  $\eta$  zuteil. Im SI-System sind uns hier die Hände gebunden. Wir haben bereits den Strom, die Ladung und die Kraft definiert, es gibt kein zurück und kein Ausweichen. Wir müssen  $\alpha$  berechnen und heraus kommt ein Wert, der dem Formelzeichen  $\epsilon_0$  zugeordnet wird:

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{s} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

Das bedeutet für die elektrische Feldstärke  $\epsilon$  im Systeme International:

$$\epsilon = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$$

wo  $Q$  die elektrische Ladung darstellt, die das Coulombfeld erzeugt,  $\epsilon_0$  ist die dielektrische Feldkonstante, deren Wert sich aus der Definitionen der Einheiten ergibt, und  $r$  ist der Abstand von der elektrischen Ladung  $Q$ . Beim cgs-System sind allerdings noch alle Wege offen, und das macht man sich auch trefflich zu Nutze. Man greift die Gelegenheit beim Schopf und definiert jetzt erst die Einheit der Ladung, wo die Notwendigkeit dafür erkannt wird. Im Prinzip macht man das so, dass man die Konstante  $\eta = 4\pi$  setzt. Damit ist die Feldstärke  $\epsilon$  ganz einfach zu berechnen:

$$\epsilon = \frac{Q}{r^2}$$

und die Kraft  $F = \epsilon \cdot Q$ , die die elektrische Ladung  $Q$  auf eine Probeladung  $Q'$  ausübt, wird einfach zu

$$F = \frac{Q \cdot Q'}{r^2}$$

verglichen mit der Coulombkraft aus dem SI-System:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot Q'}{r^2}$$

Man erkennt eine einfachere Darstellung in der Formel mit einer Betonung des Wesentlichen. Außerdem erspart man sich die halbe Schreiarbeit, was vor allem in einer Zeit, als Papier und Tinte knapp waren, ein maßgeblicher Vorteil gewesen sein

könnte. Dafür muss man sich jetzt im cgs-System daran machen, herauszufinden, was man damit bewirkt hat, dass man obige Konstante  $\eta$  einfach gleich  $4\pi$  gesetzt hat. Nachdem wir wieder auf das Coulombgesetz kommen wollen, müssen wir die Dimension der Ladung so wählen, dass diese Formel konsistent bleibt:

$$F = \frac{Q \cdot Q'}{r^2}$$

Das bedeutet in den Dimension der einzelnen Messgrößen:

$$\text{dyn} = \frac{\text{esu} \cdot \text{esu}}{\text{cm}^2}$$

wobei das esu die Einheit der Ladung im cgs-System darstellt (engl. **e**lectro**s**tatic **u**nit). Als nächstes wird die Einheit der Kraft dyn auf die Basisgrößen im cgs-System zurückgeführt:

$$\frac{\text{cm} \cdot \text{g}}{\text{s}^2} = \frac{\text{esu}^2}{\text{cm}^2}$$

Daraus kann man dann recht einfach die Dimension der Ladung berechnen, die man sich weiter oben durch die Vereinfachung eingehandelt hat. Es folgt:

$$[q] = \text{esu} = \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{cm}^{\frac{3}{2}} \cdot \text{s}^{-1}$$

Im SI-System erhielt die Ampere-Sekunde den Namen Coulomb (Cb). Im cgs-System erhält obige Mischung aus Gramm, Zentimetern und Sekunden den Namen *esu*, eine Abkürzung für elektrostatische Einheit (electrostatic unit). Früher war noch der Name *Franklin* für die Ladung geläufig, der aber heute kaum noch Erwähnung findet. Zu beachten ist auf jeden Fall, dass die elektrostatische Einheit noch nichts mit der Elementarladung zu tun hat!

Zunächst müssen wir noch einige wichtige Größen der Elektrostatik im cgs-System definieren, um in der Lage zu sein, alle Messergebnisse, die Hess und seine Kollegen erzielt haben, so recht begreifen zu können. Die elektrische Feldstärke  $\epsilon$  wurde oben schon erwähnt. Sie ermöglicht es dem Interessierten, die Kraft zu bestimmen, die auf eine Probeladung  $Q'$  in der Nähe einer anderen Ladung  $Q$  ausgeübt wird:

$$F = \epsilon \cdot Q'$$

wobei  $\epsilon$  das elektrische Feld ist, das von der Ladung  $Q$  erzeugt wird:

$$\epsilon = \frac{Q}{r^2}$$

Die Dimension von  $\epsilon$  ist nach obiger Gleichung  $F = \epsilon \cdot q$  leicht abzuschätzen. Die Dimension von  $F$  ist bereits wohlbekannt, und ebenso die von  $q$ . Damit ergibt sich für  $\epsilon$ :

$$\epsilon = \frac{F}{Q'} \Rightarrow [\epsilon] = \frac{\frac{\text{cm} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}}}{\text{s}^2}}{\frac{\text{cm}^{\frac{3}{2}}}{\text{s}}} = \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{cm}^{-\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1}$$

In unserem Fall ist dieser Zusammenhang vor allem als Zwischenziel auf unserem Weg zur elektrischen Spannung interessant. Hier geht man von dem Zusammenhang aus, dass

$$U = \epsilon \cdot d$$

und damit erhält man:

$$U = \epsilon \cdot d \Rightarrow [U] = \frac{g^{\frac{1}{2}}}{cm^{\frac{1}{2}} \cdot s} \cdot cm = g^{\frac{1}{2}} \cdot cm^{\frac{1}{2}} \cdot s^{-1}$$

U ist die elektrische Spannung zwischen zwei Punkten mit dem Abstand d. Das sind nun alles recht eigentümliche und ungewohnte Maßeinheiten, verglichen mit den bequemen SI-Einheiten Volt (V) für die Spannung und Volt pro Meter (V/m) für die elektrische Feldstärke. Allerdings sehen auch die SI-Einheiten nicht mehr viel sympathischer aus, wenn man sie auf die Basisgrößen zurückführt. Für die Spannung erhielte man einen Ausdruck wie  $[V] = [m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}]$ , wobei da das Ampere noch gar nicht auf die Basisgröße zurückgeführt ist.

Nach den bisherigen Überlegungen mit dem cgs-System kommt jetzt der entscheidende Schritt, warum wir die ganze Mühen der Herumrechnens auf uns genommen haben: Alle Messgeräte, die zur Entdeckung der *Kosmischen Strahlung* am Anfang des 20. Jahrhunderts ihr Scherflein beigetragen haben, waren in gewisser Weise einem Kondensator ähnlich. Eine Ladung wurde auf irgend eine Art von Ladungsspeicher aufgebracht, und die durch diese Ladung verursachte Spannung wurde dann abgelesen und beobachtet. Zwischen der Ladung eines Kondensators und der an ihm liegenden Spannung besteht ein wichtiger Zusammenhang:

$$Q = C \cdot U$$

wo Q die elektrische Ladung, U die Spannung und C eine Proportionalitätskonstante sind. Man sieht also, dass Ladung und Spannung einander proportional sind. C ist eine Konstante, die von den Eigenschaften des Kondensators, vor allem von seiner Geometrie (also seiner Form) abhängt. Daher nennt man C auch die Kapazität (das Fassungsvermögen, engl: capacity) des Kondensators.

Die Dimension dieser Konstanten ergibt sich aus ähnlichen Überlegungen wie oben. Während im *Système International* die Kapazität den Namen Farad (die Einheit Farad wird mit F abgekürzt, genauso wie die Kraft F. Also nicht verwechseln!) erhält, bekommt sie im cgs-System eine verblüffende Größe:

$$Q = C \cdot U \Rightarrow C = \frac{Q}{U} \Rightarrow [C] = \frac{cm^{\frac{3}{2}} \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot s^{-1}}{cm^{\frac{1}{2}} \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot s^{-1}} = cm$$

Die Dimension der Kapazität eines Kondensators ist also der wohlvertraute Zentimeter, was für Benutzer des SI-Systemes anfangs zu größeren Vorstellungsschwierigkeiten führen mag. Für Viktor Hess und seine physikalischen Mitstreiter war es jedenfalls so selbstverständlich, die Kapazität in Zentimetern anzugeben, wie es für viele von uns klar wäre, dafür Farad zu benutzen. Da man aber, wenn man sich mit den Messergebnissen von Viktor Hess quantitativ auseinandersetzt

setzt, mit Einheiten seiner Wahl konfrontiert wird, so wollen wir an dieser Stelle die ungewohnten Einheiten mit Sinn erfüllen, indem wir sie mit Größen vergleichen, die wir aus dem Alltag kennen. Da bietet sich als erstes die elektrische Elementarladung an:

$$\text{SI: } q_e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$$

$$\text{cgs: } q_e = 4.803 \cdot 10^{-10} \text{ esu}$$

Bildet man weiters den Quotienten aus den obigen Werten für die Elementarladung in den beiden Einheitensystemen, so erhält man den folgenden Zusammenhang:

$$1 \text{ Cb} = 2.998 \cdot 10^9 \text{ esu.}$$

Bis zum Umrechnungsfaktor zwischen Farad und Zentimeter, wobei Zentimeter in diesem Zusammenhang die Kapazität des Kondensators beschreiben soll, ist der Weg zwar noch etwas länger, aber zum Glück nicht sehr beschwerlich. Seinen Ausgangspunkt soll er bei einem Zusammenhang nehmen, der eine der wichtigsten Größen der Physik definiert:

$$\text{Energie} = \text{Kraft} \times \text{Weg},$$

$$E = F \cdot d,$$

wo E die Energie ist, F eine Kraft und d der Weg, dem entlang die Kraft F wirkt. Die Definition der Energie ist vom Einheitensystem unabhängig, und man gelangt zu folgendem Zusammenhang:

$$[E] = J = [F \cdot d] = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} = \frac{10^3 \text{ g} \cdot 10^4 \text{ cm}^2}{\text{s}^2} = 10^7 \text{ dyn} \cdot \text{cm} = 10^7 \text{ erg}$$

Die Einheit der Energie im SI-System ist das *Joule* (J), benannt nach dem Physiker James Prescott Joule (1818 - 1889), der seinerzeit einige wesentliche Gedanken zum Thema Wärme und Energie angestellt hat. Im cgs-System heißt die Einheit der Energie *erg* (erg leitet sich vom griechischen Wort *ergon* für Energie ab). Aus den obigen Umformungen ist ersichtlich, wie man vom SI - Joule zum cgs - erg kommt.

Freilich bewegen wir uns im Zusammenhang mit den messtechnischen Arbeiten der Arbeitsgemeinschaft der Ultrastrahlenforscher vornehmlich im Gebiet der Elektrostatik. Daher drängt sich leicht die Frage auf, wie groß denn die Energie ist, die durch typisch elektrostatische Wechselwirkungen zustande kommt. Wie oben erwähnt ist  $E = F \cdot d$ . Als Kraft kommt in der Elektrostatik die Coulombkraft in Frage. Daher gilt, wenn man obige Zusammenhänge zusammenfasst:

$$E = F \cdot d = \epsilon \cdot q \cdot d = (\epsilon \cdot d) \cdot q = U \cdot q$$

Damit ist der folgende Zusammenhang gewonnen:

$$E = q \cdot U$$

beziehungsweise

$$U = \frac{E}{q}$$

woraus wir uns, nachdem wir die Umrechnungsgrößen für E und Q schon kennen, die Umrechnungsgröße für die Spannung errechnen können:

$$U = \frac{E}{q} \Rightarrow 1V = \frac{1J}{1Cb} = \frac{1N \cdot m}{1Cb} = \frac{10^7 \text{ erg}}{2.998 \cdot 10^9 \text{ esu}} = 3.336 \cdot 10^{-3} \text{ g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{cm}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1}$$

Der letzte wichtige Zusammenhang auf diesem Weg ist die Kondensatorgleichung, die den Zusammenhang angibt zwischen der Spannung, die an einem Kondensator liegt, und der Ladung, die dadurch am Kondensator akkumuliert wird, oder umgekehrt. Auf jeden Fall ist die entstehende Ladung umso größer, je größer die Kapazität des Kondensators ist. Wir nehmen einen Kondensator an, der eine Kapazität von einem Farad haben soll, und an dem eine Spannung von einem Volt liegen soll; dann akkumuliert sich im Kondensator eine Ladung von einem Coulomb:

$$[Q] = [U] \cdot [C]$$

$$Cb = V \cdot F$$

Daraus lässt sich endlich der Umrechnungsfaktor von Farad in Zentimeter und umgekehrt bestimmen:

$$C = \frac{Q}{U} \Rightarrow 1F = \frac{1Cb}{1V} = \frac{2.998 \cdot 10^9 \text{ cm}^{\frac{3}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1}}{3.336 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1}} = 8.988 \cdot 10^{11} \text{ cm}$$

Bildet man den Kehrwert, so findet man folgenden Zusammenhang:

$$1 \text{ cm} = 1.12 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 1.12 \text{ pF (pikoFarad)}.$$

Wenn also Viktor Hess schreibt, dass er bei seinen Ballonflügen, mittels derer er die *Kosmische Strahlung* entdeckt hatte, einen Strahlenapparat mit einer Kapazität von 1.59 cm verwendete, so ist daraus zu schließen, dass die Kapazität des Gerätes in SI - Einheiten 1.78 pF beträgt.

Für den besseren Überblick und um ein eventuelles Nachrechnen zu erleichtern sind hier noch einmal einige wichtige SI - cgs - Äquivalente in folgender Tabelle zusammengefasst:

	<u>cgs-Einheiten</u>	<u>SI-Einheiten</u>
Ladung (Q)	$\text{esu} = \text{cm}^{\frac{3}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1}$	$= 3.336 \cdot 10^{-10} \text{ Cb}$
Strom (I)	$\text{cm}^{\frac{3}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-2}$	$= 3.336 \cdot 10^{-10} \text{ A}$
Spannung (U)	$\text{cm}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1}$	$= 2.997 \cdot 10^2 \text{ V}$
Kapazität	$\text{cm}$	$= 1.12 \text{ pF}$

Abbildung 3-5 Wichtige Größen in SI und cgs Einheiten

### 3.3.2. Messgeräte

Ohne sich von Anfang an recht darüber im Klaren zu sein oder es zu bezwecken, entwickelten Julius Elster und Hans Geitel die ersten Strahlungsmessgeräte. Eigentlich waren die beiden nur daran interessiert, die seltsame und unerwartete Leitfähigkeit, die sie in der Luft der Atmosphäre entdeckt hatten, aufzuklären. Dazu entwickelten sie ein Messgerät, das die Fähigkeit besaß, die Leitfähigkeit der Luft zu messen. Im Prinzip war es ein geladener Körper, den sie aufstellten, dessen elektrische Ladung sich im Lauf der Zeit verflüchtigte, indem sie von der Luft abgeleitet wurde. Da diese Leitfähigkeit der Luft aber zum größten Teil von der natürlichen Radioaktivität verursacht war, indem die radioaktive Strahlung die Luft ionisierte und so freie Ladungsträger für den Ladungstransport zur Verfügung stellte, die es ohne Radioaktivität nicht gegeben hätte, war das aber eine genial einfache und effiziente Methode, die Radioaktivität selbst zu messen. [3]

So fanden Julius Elster und Hans Geitel auch sehr schnell heraus, dass die Entladung eines elektrisch geladenen Körpers sehr viel schneller vonstatten geht, wenn radioaktive Präparate in die Nähe dieses Körpers gebracht werden. Man entdeckte, dass die Entladungszeit in sehr guter Genauigkeit von der Höhe der Aktivität des radioaktiven Präparates abhing. Darum ging man bald dazu über, nicht mehr die Luftionisation mit Hilfe der Radioaktivität zu untersuchen, sondern umgekehrt die Radioaktivität mit Hilfe der Ionisation zu erforschen, die sie in der Luft bewirkt.

Die Wissenschaftler hatten erkannt, dass unter kontrollierten Umständen die radiogene Leitfähigkeit der Luft und besonderer Gase sehr genaue Rückschlüsse auf die Anwesenheit, die Stärke, sowie weitere Eigenschaften wie die Energie der Radioaktivität zulässt. Wie aber ist es denn möglich, dass man aus so einfachen und wenig differenzierten Informationen wie aus einem Spannungsverlust pro Zeiteinheit, den man von einer Ionisationskammer erhält, wie sie Theodor Wulf und Viktor Hess in größerem Maßstab benutzten, oder aus einer Anzahl von irgendwelchen Ereignissen, die man von einem Geiger-Müller-Zählrohr erhält, auf die Art, die Intensität und die Energie einer radioaktiven Quelle schließen kann?

Eine Antwort auf diese spannende und in diesem Zusammenhang wichtige Frage soll in aller Kürze und der notwendigen Tiefe in diesem Kapitel gegeben werden. Zunächst hatte man um 1900 die Radioaktivität entdeckt, ein Phänomen, das, weil es sehr spannend und sehr neu war, von einer großen Zahl an Wissenschaftlern der ganzen Welt auf verschiedensten Gebieten begeistert aufgenommen wurde. Weil sich sehr viele der ganz großen Wissenschaftler jener Zeit dieses Themas annahmen (unter anderen Marie Curie und Ernest Rutherford), wurden auf dem Gebiet auch sehr schnell sehr große Fortschritte erzielt, und die Vorstellung, die Kenntnis, die der Mensch von seiner Welt hatte, wurde revolutioniert!

Das Ziel, das sich die Strahlenforscher also steckten, war, radioaktive Strahlung nachzuweisen und zu messen. Da radioaktive Strahlung aber mit unseren Sinnen nicht direkt wahrnehmbar ist, war man dabei ganz und gar auf geeignete Messgeräte angewiesen. Kein Wunder also, dass über Jahrzehnte und Jahrtausende hinweg keiner etwas von ihrer steten Präsenz ahnte. Wenn man die radioaktiven Strahlen jetzt aber doch dingfest machen will, so muss man sich an ihre Fersen heften und es verstehen, die Spuren zu lesen, die sie in ihren meist kurzen aber ereignisreichen Leben

hinterlassen. Wie diese Spuren genau aussehen, das hängt stark davon ab, welche Wechselwirkungen die Strahlung mit der Materie, die sie durchdringt, eingeht, also wie Strahlung und Medium interagieren. Und hier kommen die Eigenschaften der verschiedenen Strahlungstypen ins Spiel, die sich stark voneinander unterscheiden können.

Radioaktive Strahlung setzt sich immer aus *Photonen* (elektromagnetische Strahlung) oder aus fundamentalen Bestandteilen der Materie zusammen, die sich mitunter mit recht hoher Energie versehen durch den Raum bewegen. Das können Elementarteilchen sein, wie das *Elektron* und das *Positron*, oder *Nukleonen* (als Nukleus bezeichnet man den Atomkern; Nukleonen sind Bestandteile des Atomkerns) wie das *Proton* und das *Neutron*, oder viel schwerere Teilchen wie der Atomkern des Edelgases *Helium* (Alphateilchen) und noch größere Atomkerne. Oder es handelt sich eben um *Quanten elektromagnetischer Strahlung*, wie sie in der Gammastrahlung ( $\gamma$ -Strahlung) vorkommen.

Ein ganz wesentliches Kriterium zur Unterscheidung der Wechselwirkungen, die eine bestimmte Art der Strahlung eingehen kann, ist, ob sie aus elektrisch geladenen oder elektrisch neutralen Teilchen besteht:

<u>geladene Teilchen:</u>	<u>ungeladene Teilchen:</u>
schnelle Elektronen,	Röntgen- und Gammastrahlung,
schnelle Positronen,	Neutronen (schnell und langsam).
Protonen, Heliumkerne,	
schwere Kerne.	

Abbildung 3-6 Verschiedene Formen radioaktiver Strahlung

Je nach Entstehungsart der Strahlung wird sie aus verschiedenen der oben angeführten Komponenten zusammengesetzt sein. Üblicherweise ist Strahlung ein Zerfallsprodukt, wenn ein Atomkern eine spontane Umwandlung durchmacht und sich dabei meist in einen Atomkern eines anderen Elementes verwandelt. Die Richtung des Zerfalls ist dabei dadurch vorgegeben, dass der Produktkern stets leichter sein muss, als der Ausgangskern. Die Masse des Produktkerns ist stets geringer als die des Ausgangskerns.

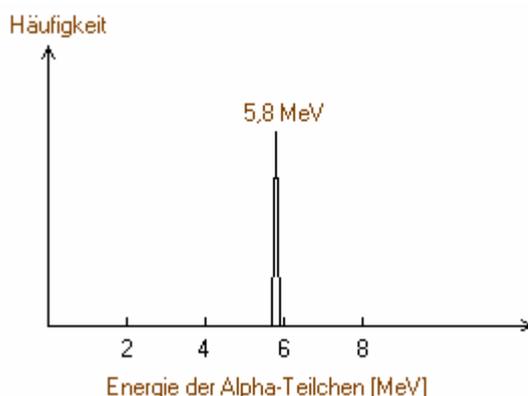
Diesen Vorgang bezeichnet man als *Radioaktiven Zerfall* (eigentlich ein *Atomkernzerfall*). Die beim Zerfall freiwerdende Energie berechnet sich mit Hilfe der berühmten Einsteinschen Masse-Energie Beziehung aus dem Produkt der Massendifferenz und dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit:

$$\text{Energie} = ( \text{Masse}_{\text{Ausgangskern}} - \text{Masse}_{\text{Produktkern}} ) \cdot c^2$$

Je nach den genauen Umständen dieses Zerfalls unterscheidet man hauptsächlich unter den drei verschiedenen Zerfallsarten  $\alpha$ -Zerfall,  $\beta$ -Zerfall und die *spontane Kernspaltung*. Dabei werden verschiedene Formen radioaktiver Strahlung emittiert:

- $\alpha$ -Strahlung: schwere Atomkerne leiden im allgemeinen unter ihrer großen Masse. Sie sind so groß geworden, dass sie keine stabile Form mehr annehmen

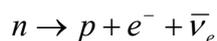
können. Sie haben sich weit von ihrem energetischen Gleichgewicht entfernt, das ihren Bestand sichern würde. Von Zeit zu Zeit kommt es dann vor, dass ein kleiner Teil der Nukleonen in Form eines Heliumkernes den Verband verlässt. Diese Form der Strahlung nennt man  $\alpha$ -Strahlung, den emittierten Heliumkern das  $\alpha$ -Teilchen.  $\alpha$ -Teilchen sind doppelt positiv geladen und bestehen aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Die beim Kernzerfall frei werdende Energie wird an das  $\alpha$ -Teilchen übergeben. Da die Energie beim Zerfall eines bestimmten Atomkerns immer gleich ist, haben auch alle  $\alpha$ -Teilchen dieses Atomkerns die gleiche Energie. Wir erhalten eine monoenergetische Strahlung, das bedeutet, dass alle Strahlungsteilchen im Energiespektrum an einem Punkt zu finden sind:



**Abbildung 3-7 Energiespektrum der  $\alpha$ -Teilchen**

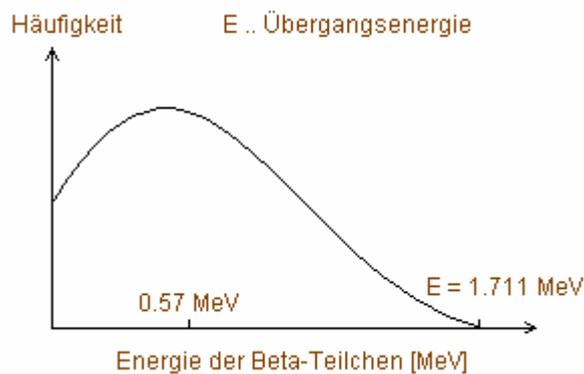
Energiespektrum der  $\alpha$ -Teilchen des Zerfalls von  $^{226}\text{Ra}$ -Kernen in den Grundzustand von  $^{222}\text{Rn}$ -Kernen.

- $\beta$ -Strahlung: Atomkerne bestehen aus Protonen und Neutronen, wobei die Kerne nach einem speziellen Gleichgewicht in der Anzahl der beiden Bestandteile streben. Für schwere Atomkerne (z.B. Uran) wird die Protonenzahl bei weitem durch die Anzahl der Neutronen übertroffen, welche unter anderem die wichtige Aufgabe haben, durch die sogenannte Kernkraft (die starke Wechselwirkung) die Abstoßung der Protonen untereinander auszugleichen, um zu verhindern, dass die Protonen in einer riesigen Coulombexplosion das ganze Atom in die Luft jagen. Jedoch führt ein Zuviel an Neutronen ebenso dazu, dass sich der Kern von einem energetischen Gleichgewicht entfernt; daher wird der Kern seinen Neutronenüberschuss einfach dadurch abbauen, indem er einzelne Neutronen in Protonen umwandelt!



n bezeichnet das Neutron, das im Kern zu einer Überzahl der Neutronen beigetragen hatte. Das elektrisch neutrale Neutron zerfällt in ein positives Proton (p), ein negatives Elektron ( $e^{-}$ ) und in ein Elektron-Antineutrino ( $\bar{\nu}_e$ ). Dieses Elektron ist es auch, das den Kern als  $\beta$ -Strahlung verlässt. Das Elektron-Antineutrino verlässt den Kern ebenfalls. Es hat aber die bemerkenswerte Eigenschaft, mit seiner Umwelt in einem derartig reduzierten Maße wechselzuwirken, dass man es lange Zeit nicht einmal gefunden hat. Auf die meisten Anwendungen der Radioaktivität und vor allem auf das Wirken von

Viktor Hess ist es also ohne Einfluss. Die beim Kernzerfall frei werdende Energie wird zwischen dem Elektron und dem Elektron-Antineutrino aufgeteilt, und zwar mehr oder weniger zufällig, sodass die Elektronen der  $\beta$ -Strahlung sich untereinander in der Energie unterscheiden.  $\beta$ -Strahlung ist also nicht monoenergetisch wie die  $\alpha$ -Strahlung. Die meisten Elektronen bekommen eine Energie mit auf dem Weg, die einem Drittel der Energie entspricht, die beim Kernübergang frei wird:

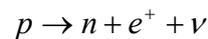


**Abbildung 3-8 Das Energiespektrum der  $\beta$ -Strahlung beim Zerfall von  $^{32}\text{P}$**

Das radioaktive  $^{32}\text{P}$  (Phosphor) Isotop zerfällt mit einer Halbwertszeit von 14,3 Tagen nach  $^{32}\text{S}$  (Schwefel):  $^{32}\text{P} \rightarrow ^{32}\text{S} + e^- + \bar{\nu}_e$ . Man erkennt ein Maximum der Häufigkeit bei etwa einem Drittel der Übergangsenergie.

Diese eigentümliche Energieverteilung kommt, wie man heute weiß, dadurch zustande, dass die Gesamtenergie, die im Kernzerfall frei wird, zwischen Elektron und Elektron-Antineutrino aufgeteilt wird. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts allerdings gab dieses Energiespektrum den Physikern zu denken. Man konnte die Energie bestimmen, die beim Kernübergang frei wurde, indem man die Energie der  $\beta$ -Elektronen und eventuell nachfolgender  $\gamma$ -Quanten bestimmte. Die Energie der  $\beta$ -Elektronen aber schwankte, wie aus obigem Diagramm ersichtlich ist, in einem so weiten Bereich, dass man unmöglich durch die Summen der Strahlungsenergien zu einer konstanten Übergangsenergie für den Kern kommen konnte, was aber der Energiesatz, einer der ganz fundamentalen Sätze der Physik, verlangen würde. Manche dachten schon daran, den Energiesatz für ein makroskopisch-statistisches Phänomen und daher für atomare Größenordnungen als ungültig zu erklären. Da trat Wolfgang Pauli, ein österreichischer Physiker, auf den Plan, der im Jahre 1930 die Misere zum Gefallen aller lösen konnte. Er musste dafür zunächst ein neues Teilchen postulieren, das glücklicherweise später auch gefunden wurde: das Neutrino. Es zeichnet sich dadurch aus, dass es, wenn überhaupt, eine sehr kleine Masse aufweist, elektrisch neutral ist, und mit seiner Umgebung in so geringem Maße wechselwirkt, dass es ganze Welten zu durchdringen vermag, als flöge es durch ein Vakuum. Mit einem solchen Neutrino muss sich das Elektron, das im  $\beta$ -Zerfall entsteht, die Übergangsenergie teilen, und so kommt ein Energiespektrum zustande, das dann auch dem Energiesatz nicht mehr widerspricht.

- $\beta^+$ -Strahlung: Es kann auch geschehen, dass in Kernen mit einem Mangel an Neutronen sich die Protonen in Neutronen umwandeln:



In diesem Fall verlässt anstelle des Elektrons in der  $\beta^-$ -Strahlung ein *Positron* den Atomkern. Dieses Positron ist in diesem Zusammenhang eine völlig neue Art von Teilchen, denn es gehört der Antimaterie an! In einem späteren Kapitel wird es noch einmal erwähnt werden, denn es wurde in der *Kosmischen Strahlung* entdeckt.

Das Positron ist das Antiteilchen zum Elektron. Vom Betrag her hat es die gleiche Ladung wie das Elektron, vom Vorzeichen her ist ihre Ladungen aber genau entgegengesetzt. Außerdem hat es die gleiche Masse wie das Elektron und damit auch die gleiche Ruheenergie. Das bedeutet, wenn man nach Einsteins Gleichung  $E = m \cdot c^2$  ein Positron oder ein Elektron aus Energie erzeugen will, so benötigt man je 511 keV, und da man sie immer nur im Paar erzeugen kann (in der sogenannten Paarerzeugung), so braucht man mindestens  $2 \cdot 511 \text{ keV} = 1.022 \text{ MeV}$  Energie, um ein Anti-Elektron zu erzeugen. Diese Energie muss im radioaktiven Zerfall freigesetzt werden, damit diese Zerfallsart möglich ist. Wenn die Massendifferenz von Ausgangskern und Produktkern kleiner als benötigt ist, dann kann ein  $\beta^+$ -Zerfall nicht stattfinden. Trotzdem kann es zu einem radioaktiven Zerfall kommen, wenn der Atomkern ein Elektron aus der Hülle des Atoms einfängt. Man spricht dann von *Electron Capture* (Elektroneneinfang).

Was die Wechselwirkung mit Materie betrifft, haben die Positronen sehr ähnliche Eigenschaften wie die Elektronen, da sie ja die gleiche Masse und die (entgegengesetzt) gleiche Ladung besitzen. Ein wesentlicher Unterschied ist aber der folgende: wenn ein Positron beim Durchwandern der Materie an das Ende seines Ionisationspfades kommt, dann sucht es sich ein Elektron, von denen gibt es in dichter Materie immer viele, und gemeinsam wandeln sie sich dann in Energie um, meist in zwei  $\gamma$ -Quanten von je 511 keV Energie (*Annihilation*: Paarvernichtung. Dabei wird die *Annihilationsenergie* frei). Ein wesentlicher Unterschied zwischen der Wirkung von Elektronen und Positronen in Materie ist also dieser, dass Elektronen eine rein ionisierende Wirkung haben, während Positronen noch dazu führen, dass ein Photonenpaar ausgestrahlt wird, das man mit dem geeigneten Detektor auch noch registrieren kann.

- $\gamma$ -Strahlung:  $\gamma$ -Strahlung ist nicht auf eine eigene Art des Kernzerfalles zurückzuführen, sondern tritt immer dann auf, wenn ein Atomkern aus einem angeregten Zustand in den Grundzustand übergeht. Die dabei frei werdende Energie wird in Form eines Photons abgegeben. Die Energiedifferenz zwischen zwei Energiezuständen des Kernes ist wohldefiniert, und so weisen die Photonen, die bei solchen Energieübergängen auftreten, immer die gleiche Energie auf. Die  $\gamma$ -Strahlung tritt als treuer Begleiter der  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung in allen jenen Übergängen auf, wo der Kern nicht in den Grundzustand des Tochterkernes, sondern in einen angeregten Zustand zerfällt. Da der Kern aus dem angeregten Zustand nicht direkt in den Grundzustand übergehen muss,

kann die Anregungsenergie auch auf mehrere  $\gamma$ -Quanten aufgeteilt werden, die den verschiedenen Übergängen des Kernes bis in den Grundzustand entsprechen.

- Die Spontane Spaltung tritt nur bei sehr schweren Kernen auf, die so instabil geworden sind, dass sie spontan in zwei Bruchstücke zerfallen können. Dabei wird die sehr hohe Energie von etwa 200 MeV freigesetzt. Außerdem entstehen einige Neutronen mit Energien im Bereich von jeweils einem MeV.
- Neutronen: Neutronen treten auch auf, wo ganze Kerne zertrümmert werden, zum Beispiel bei der Wechselwirkung der *Kosmischen Strahlung* mit den Atomen der Atmosphäre. Neutronen sind elektrisch neutral und wechselwirken daher völlig anders mit Materie, als es das Proton oder das Elektron tun würden. Da aber Neutronen keine entscheidende Rolle in der Entdeckung der *Kosmischen Strahlung* spielten, soll auf ihre Wirkung hier nicht näher eingegangen werden.

Das Ziel des Physikers ist es nun, zu messen, was messbar ist, und messbar zu machen, was noch nicht messbar ist. Um dieses neue Phänomen der Radioaktivität messbar zu machen, brauchte es neuer Mess-Instrumente, die man *Detektoren* nannte. Ein Detektor besteht erstens aus einem Medium, in dem die radioaktive Strahlung durch Wechselwirkungen Spuren hinterlassen soll, indem sie es durchdringt, und zweitens aus einem Mechanismus, der die Spuren der Strahlen liest und auswertet. Das Medium ist in den frühen Fällen einfach die Luft der Atmosphäre gewesen, in dem die radioaktiven Partikel ihre Ionisationsspuren gezogen haben. Später verwendete man besondere Gase, um die Messeffizienz zu verbessern. Noch später, als man von den Messgeräten, die am Prinzip der Ionisationskammer fußten, abkam, verwendete man ganz andere Stoffe wie Halbleiter, photographische Platten oder Kunststoff. Wie weiter oben angedeutet hängt die Funktionsweise des Detektors vornehmlich davon ab, wie die Strahlung, die man messen will, mit Materie interagiert, das heißt, welche Art von Spuren die Strahlung im Medium des Detektors hinterlässt. Beobachtet man geladene Teilchen (wie Heliumkerne in der  $\alpha$ -Strahlung oder Elektronen in der  $\beta^-$ -Strahlung), so stellt man fest, dass sie hauptsächlich über die Coulombkraft mit dem Medium interagieren. Ein geladenes Strahlungsteilchen sieht auf seinem Weg durch die Materie vor allem die Hüllenelektronen der Atome, die ihm in die Quere kommen. Die Wahrscheinlichkeit, dass es mit einem dieser Elektronen interagiert, ist ziemlich hoch und in erster Linie vom Quadrat des Abstandes zwischen ihm und den Elektronen abhängig.

Elektrisch neutrale Strahlungsteilchen (wie das Neutron) hingegen spüren keine Coulombwechselwirkung und sind daher auch für die vielen Elektronen, die überall im Medium eines Detektors herumschwirren, nicht empfänglich. Neutronen interagieren nur mit Atomkernen, die um sehr vieles kleiner sind, als die Elektronenhüllen der Atome. Daher ist auch die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung im Medium geringer, und somit gestaltet sich der Nachweis oder die Messung eines Neutrons auch sehr viel schwieriger, als eines Protons der gleichen Größe.

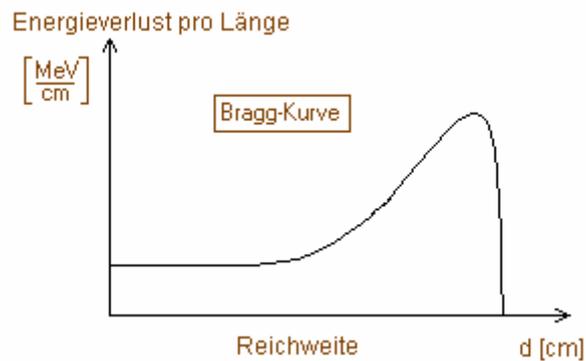
$\gamma$ -Quanten interagieren hingegen gerne mit dem Coulombfeld in einem Atom, wo sie Photoelektronen herauslösen oder sich selbst in ein Elektron-Positron-Paar verwandeln können, oder sie streuen Hüllenelektronen in Vorgängen, die als Compton-Streuung

bekannt sind. Die Wahrscheinlichkeit für diese einzelnen Vorgänge sind von der Energie des Photons der  $\gamma$ -Strahlung abhängig. Wenn keiner dieser Vorfälle eintritt, so passiert das Photon den Detektor unbemerkt und es bleibt kein Hinweis darauf zurück, dass das Photon jemals da war, während ein geladenes Teilchen immer eine Ionisationsspur zurücklässt, die man sehr gut messen kann. Es ist also ziemlich naheliegend, dass die ersten Menschen, die zufällig über die Radioaktivität stolperten, eben solche Teilchen nachwiesen, die sich einer baldigen Entdeckung förmlich zudrängten, indem sie die Elektrometer entluden, die die Forscher der Elektrizität der Atmosphäre gerade erst aufgeladen hatten.

Daher wollen wir zunächst in diesem Kapitel auch vor allem Messgeräte diskutieren, die geeignet sind, solche radioaktive Strahlung nachzuweisen, die aus geladenen Teilchen wie die leichten Elektronen ( $e^-$ ), Protonen (p) und Heliumkernen ( $\alpha$ -Teilchen) besteht. Leichte und schwere Teilchen unterscheiden sich ziemlich stark im äußeren Verhalten beim Durchgang durch das Detektormedium, während die Physik der Wechselwirkungen genau die gleiche ist.

Betrachten wir zunächst das Schicksal schwerer Teilchen wie Heliumkerne: Der Kern hat eine ganz bestimmte Anfangsenergie  $E_0$  bei seinem Start in die Selbständigkeit von seinem Mutterkern mitbekommen. Dieser Energie entspricht eine Geschwindigkeit, mit der er sich von zu Hause entfernt und in den Detektor eintritt. Hier findet dieses  $\alpha$ -Teilchen jetzt Legionen von Elektronen vor, die alle negativ geladen sind, während es selbst positiv geladen ist. Im rasenden Flug an den Elektronen vorbei reicht die Zeit gerade mal für einen kurzen Energietransfer aus. Entsprechend der Coulombkraft fühlt das Elektron einen kurzen, anziehenden Ruck. Manchmal reicht dieser Ruck gerade dazu, das Elektron in ein höheres Energieniveau zu bringen, von wo es bald an seinen Ausgangsort zurückkehrt und dabei ein Röntgenphoton aussendet. Immer wieder wird ein Elektron aber auch ganz aus dem heimatlichen Atomverband herausgerissen, wodurch ein Ionenpaar entsteht, bestehend aus einem freien Elektron mit negativer Ladung und einem Atomrumpf, dem jetzt ein Elektron fehlt und der daher eine positive Ladung aufweist. Auf seinem recht geradlinigen Weg durchs Medium passiert das dem Heliumkern dauernd, und so hinterlässt er wie eine Pflugschar eine breite Furche von umgegrabenen Atomen, eine deutliche Spur für einen Kernphysiker. Diese Ionenspur kann in der Ionisationskammer die Basis für ein Signal sein, in der Wilson'schen Nebelkammer hingegen kann man die Spur und damit den Weg des Heliumkernes selbst durch Kondensation von Wassertröpfchen entlang der Ionisationsspur sichtbar machen!

Jedes Mal, wenn der Heliumkern etwas von seiner Energie an ein Elektron abgibt, wird er ein wenig langsamer. Je langsamer das  $\alpha$ -Teilchen wird, umso mehr Zeit bleibt ihm, um mit einzelnen Elektronen wechselzuwirken, und umso mehr Energie gibt es noch zusätzlich ab. Daher wird der Energieübertrag vom Heliumkern an das Medium gegen Ende der Reichweite des  $\alpha$ -Teilchens immer größer, die Ionisierungsdichte wächst immer mehr an, bis das Teilchen, seiner gesamten Energie beraubt, plötzlich liegen bleibt und sich nicht mehr weiter bewegt.

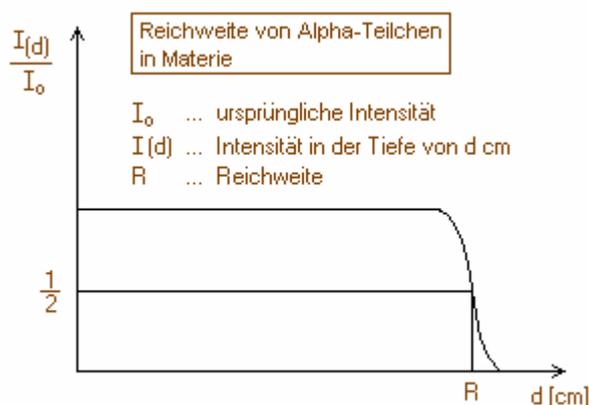


**Abbildung 3-9 Die Braggkurve (nach dem Nobelpreisträger William Bragg)**

Der Energieverlust eines Alpha-Teilchens beim Durchqueren von Materie ist von der Energie des Teilchens abhängig. Am Anfang ist der Energietransfer noch sehr gering, während er kurz vor dem Ende der Reichweite ein Maximum erreicht. Praktische Anwendung findet die Braggkurve z.B. in der Medizin, wenn man tief liegendes Tumorgewebe durch Teilchenbeschuss zerstören will, ohne darüber liegendes gesundes Gewebe beeinträchtigen zu wollen.

Die sogenannte Braggkurve zeigt den Verlauf der Energieabgabe vom geladenen Teilchen an das Medium in Abhängigkeit von der Eindringtiefe in das Medium. Da wie weiter oben angeführt der Energietransfer umso höher ist, je langsamer das Teilchen in der Materie unterwegs ist und je mehr Zeit daher für eine Wechselwirkung zu Verfügung steht, ist der Energieverlust pro Länge da am höchsten, wo das Teilchen fast am Ende seiner Reichweite angekommen ist, also schon fast zum Stillstand gekommen ist. Die Fläche unter der Braggkurve entspricht der übertragenen Energie. Man sieht deutlich, dass ein Großteil der Strahlungsenergie entlang einer verglichen zur Gesamtreichweite kurzen Strecke abgegeben wird.  $\alpha$ -Strahlung weist die Eigenschaft auf, im jeweiligen Medium eine sehr gut bestimmbare Reichweite zu haben. Die Heliumkerne der  $\alpha$ -Strahlung interagieren hauptsächlich mit den Elektronen der Atomhüllen. Da die Heliumkerne 8000 mal schwerer sind, als die Elektronen, auf die sie treffen, werden sie von den Elektronen nur etwas abgebremst, können aber kaum von ihrer Richtung abgelenkt werden, ähnlich wie Nilpferde, die durch einen Vogelschwarm laufen.

Da alle Heliumkerne im Durchschnitt gleich viele Stöße durchmachen und dabei im gleichen Maße an Energie verlieren, haben sie alle annähernd die gleiche Reichweite. Da es sich beim Abbremsen um einen statistischen Prozess handelt, ist die Reichweite nicht exakt die gleiche für alle Alphateilchen, man spricht von einem *Range Straggling*.

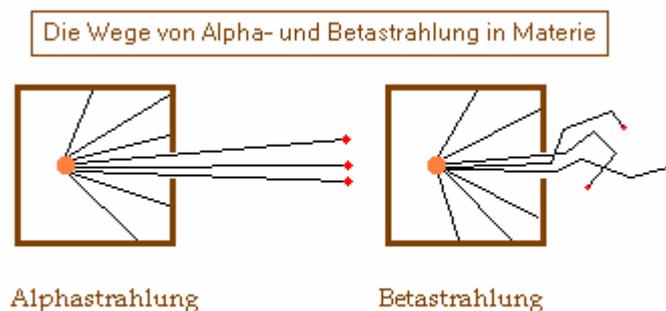


#### Abbildung 3-10 Die Reichweite von Alpha-Teilchen in Materie

Über einen großen Bereich ist die Anzahl der Alpha-Teilchen konstant, Das bleibt auch so bis kurz vor Ende der Reichweite. Innerhalb einer kurzen Strecke kommen dann alle Alpha-Teilchen zu stehen. Als Reichweite  $R$  wird die Distanz bezeichnet, nach der die Anzahl der Alpha-Teilchen auf die Hälfte abgesunken ist.

Da die Reichweite sehr gut definiert ist und vor allem von der Energie der  $\alpha$ -Strahlung abhängt, wurden früher Reichweitenmessungen zur Energiebestimmung durchgeführt. Seitdem es aber bessere Detektoren gibt, die ein Signal erzeugen, das proportional der Strahlungsenergie ist, sind solche indirekten Messungen nicht mehr notwendig.

Ganz anders verhält es sich mit Elektronen, bei denen man nicht genau sagen kann, wie weit sie in einem Medium kommen werden. Dafür gibt es mehrere Gründe. Zum ersten haben die Elektronen eines bestimmten  $\beta$ -Zerfalls keine wohldefinierte Energie sondern einen Wert innerhalb eines bestimmten Spektrums. Da die Reichweite im Medium vor allem mit der Energie korreliert ist, ergibt sich schon aus diesem Umstand ein ganzes Spektrum an zu erwartenden Reichweiten im Medium. Zum zweiten haben die Elektronen der  $\beta$ -Strahlung die gleiche Masse wie die Hüllenelektronen des durchwanderten Mediums. Daher können bei jedem Stoß zwischen den Hüllen- und Strahlungselektronen große Streuwinkel auftreten. Das bedeutet, dass der Weg durch das Medium im allgemeinen recht verwinkelt aussieht. Obwohl alle Wege, die von Elektronen gleicher Energie zurückgelegt werden, in etwa gleich lang sein werden, sind sie in Richtung und Form sehr unterschiedlich. Die Elektronen werden an den verschiedensten Orten zur Ruhe kommen, und von einer wohldefinierten Reichweite im Medium kann keine Rede mehr sein.



**Abbildung 3-11 Die Reichweite von  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung im Vergleich**

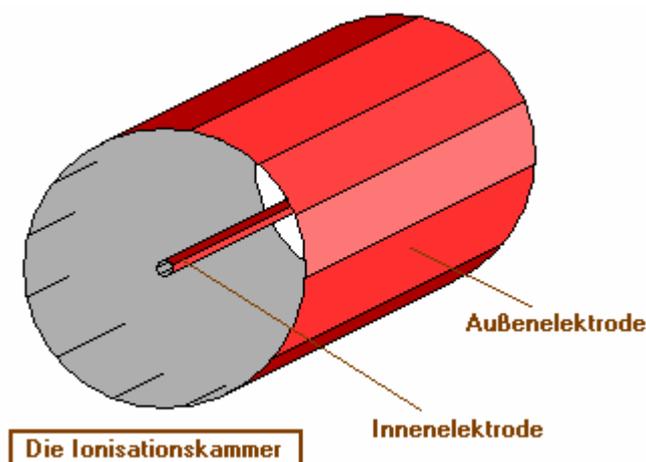
In der sehr schematischen Abbildung ist links eine  $\alpha$ -Quelle dargestellt, die nach rechts hin offen von einer Abschirmung umgeben ist. Dahin entweichen  $\alpha$ -Teilchen in den mit Materie erfüllten Außenraum bis in eine bestimmte Distanz. Rechts ist ein  $\beta$ -Strahler dargestellt, sowie die Wege, die Elektronen in einem Medium zurücklegen könnten. Die farbigen Punkte markieren die Stellen, an denen jeweils das Strahlenteilchen zum Stehen kam. Man kann erkennen, dass Alphastrahlung eine gut definierte Reichweite aufweist, während man bei Betastrahlung nicht von einer wohldefinierten Reichweite sprechen kann.

Die Voraussetzung, dass man jetzt eine radioaktive Strahlung tatsächlich messen oder nachweisen kann, ist, dass das Teilchen im Detektor einer Wechselwirkung unterläuft, die zu nachweisbaren Spuren führt. Wenn ein Heliumkern mit einer Energie von 1 MeV in einen Strahlendetektor gelangt und dort seine gesamte Energie abgibt, so wird er etwa 30.000 Ionenpaare (freie Elektronen und zurückgebliebene Atomrümpfe) erzeugen. Die Zeit, die dafür benötigt wird, ist sehr kurz. Vom ersten Eindringen des Teilchens in die aktive Schicht eines Strahlendetektors bis zum Entstehen der letzten Ladungsträger vergehen im Mittel Nanosekunden ( $10^{-9}$  Sekunden, ein milliardster Teil einer Sekunde) in Gasen oder Pikosekunden ( $10^{-12}$  Sekunden, eine tausendstel Nanosekunde) in Festkörpern. Das ist gehörig schnell, und bei den Reaktionszeiten, die auch heutige Detektoren aufweisen, kann man sagen, dass die gesamte Energie einer radioaktiven Strahlung augenblicklich an den Detektor abgegeben wird.

Das Ergebnis der Wechselwirkung ist in den meisten Fällen eine elektrische Ladung, die im Medium des Detektors gebildet wird. Diese Ladung wird dann mit Hilfe eines elektrischen Feldes gesammelt, das heißt, vom Entstehungsort abtransportiert und zu den Sammelelektroden hingeführt. Zwischen den freien Elektronen und den positiv geladenen Atomrümpfen besteht eine starke Anziehung. Sich selbst überlassen werden die Ionen dazu neigen, wieder elektrisch neutrale Verbindungen einzugehen. Dann wäre die radiogene Ionisationsladung wieder ausgeglichen und für einen Messvorgang verloren. Das gilt es also zu verhindern. [5,6]

### 3.3.2.1 Die Ionisationskammer

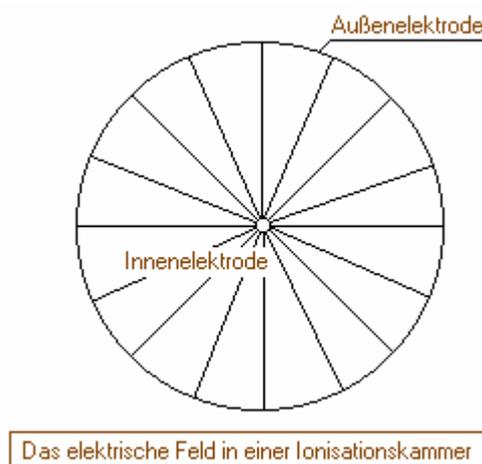
Einer dieser Detektoren, die eine elektrische Ladung mit Hilfe von elektrischen Feldern einsammeln, ist die Ionisationskammer. Sie besteht meist aus einem gasgefüllten, zylinderförmigen Gehäuse, in das zwei Elektroden eingebaut sind. Meistens stellt das Gehäuse selbst eine der beiden Elektroden dar, während die zweite Elektrode in Form einer langen, dünnen Metallstange zentriert in die zylindrische Kammer eingebracht wird.



**Abbildung 3-12 Die Ionisationskammer**

Im Prinzip besteht sie aus zwei gegenüberliegenden Kondensatorplatten, zwischen denen ein elektrisches Feld aufgebaut wird. In der Praxis wird die Ionisationskammer aber meist als zylinderförmiges Gefäß mit langer, dünner Innenelektrode gebaut.

Zwischen den beiden Elektroden baut sich, so eine elektrische Spannung vorhanden ist, ein elektrisches Feld auf.

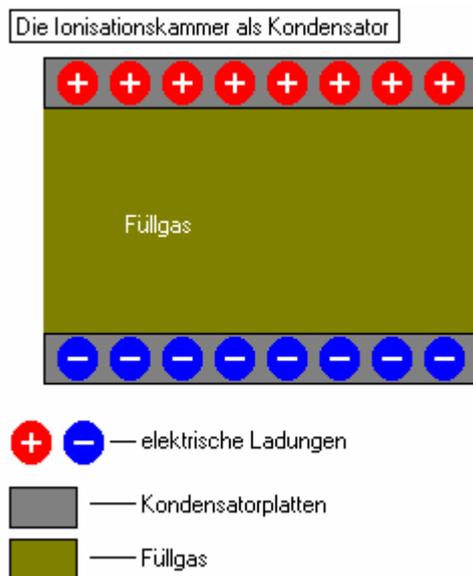


**Abbildung 3-13 Das elektrische Feld in einer Ionisationskammer**

Die Abbildung zeigt den Verlauf der elektrische Feldlinien in einer Ionisationskammer.

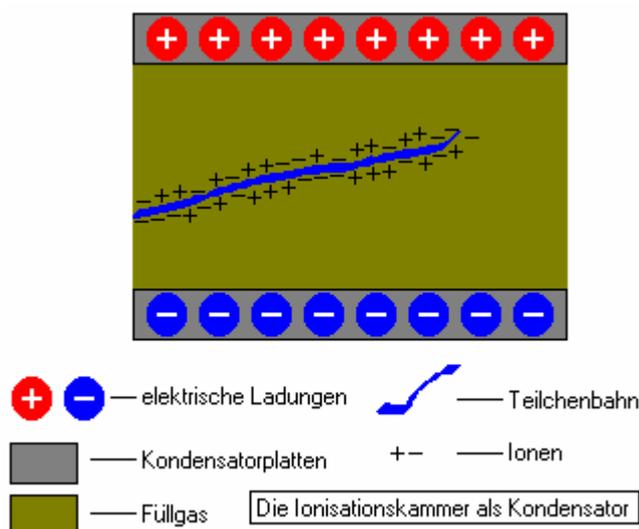
Zu dieser Bauweise entscheidet man sich unter anderem aus einem wichtigen Grund. Da die Wahrscheinlichkeit, dass Ladungsträger rekombinieren, also wieder neutrale Atome bilden und somit für eine Messung verloren sind, stark mit der Geschwindigkeit sinkt, mit der sich die Elektronen und Ionen auf die Elektroden zu bewegen, möchte man möglichst hohe Feldstärken erreichen, um die Ladungsträger auf sehr hohe Geschwindigkeiten zu beschleunigen. Gerade in der Nähe der mittleren, dünnen Elektrode sind die Feldlinien sehr dicht, was wiederum eine hohe Feldstärke bedeutet. Daher hat man in der Nähe der dünnen Elektroden eine hohe Ausbeute an Ladungsträgern.

Vom Prinzip her ist die Ionisationskammer aber ein einfacher Kondensator, und es spricht nichts dagegen, sich aus Gründen der verbesserten Anschaulichkeit die Ionisationskammer als zwei gegenüberliegende Kondensatorplatten vorzustellen:



**Abbildung 3-14 Die Ionisationskammer als Kondensator**

Eine Ionisationskammer ist ein gasgefüllter Kondensator. An den beiden Kondensatorplatten liegt eine Spannung, die zu einer Aufladung des Kondensators führt.

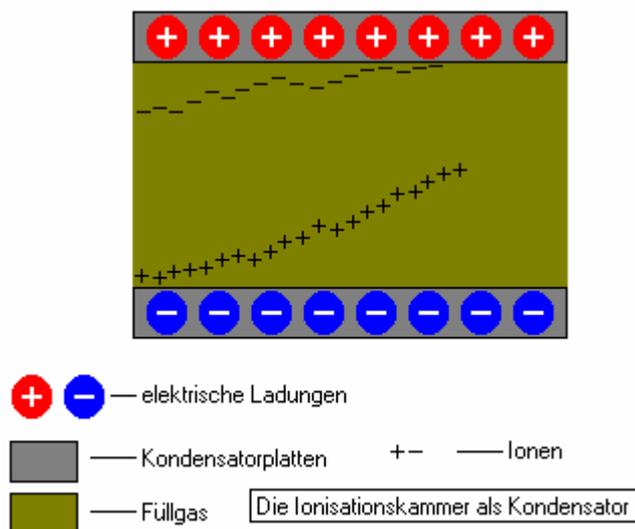


**Abbildung 3-15 Die Ionisationskammer als Kondensator**

Wenn ein ionisierendes Teilchen in das Füllgas einer Ionisationskammer gelangt, erzeugt es dort eine große Zahl von Ionenpaaren entlang seines Weges durch das Medium.

Wenn nun ein geladenes Strahlungsteilchen wie etwa ein Elektron oder ein Heliumkern in das Füllgas des Kondensators eintritt, so erzeugt es entlang seines Weges positive und negative Ladungsträger, sogenannte Ionen.

Diese freien Ladungsträger beginnen sofort, sich entlang der elektrischen Feldlinien zu bewegen. Wenn sie an den geladenen Kondensatorplatten ankommen, werden sie als Entladungsstrom registriert.



**Abbildung 3-16 Die Ionisationskammer als Kondensator**

Durch das elektrische Feld in der Ionisationskammer werden die entstehenden Ladungen sofort getrennt und abgesaugt. Je stärker das elektrische Feld ist, umso kleiner ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Ionen rekombinieren.

Die Ströme, die sich durch diesen Ionenfluss ergeben, liegen für Ionisationskammern im Bereich von Piko Ampere (pA,  $10^{-12}$  Ampere). So kleine Ströme können nur mehr mit speziellen Verstärkern und Messgeräten erfasst werden. In den Zeiten, als Viktor Hess mit seinen Versuchen im Ballon unterwegs war, gab es dergleichen freilich noch nicht. Hess konnte also nicht den Entladungsstrom direkt messen. Aber er sah die Möglichkeit, die Abnahme des Potentials zwischen den Kondensatorplatten zu bestimmen. Der Potentialverlust ergab sich daraus, dass die radiogenen Ionen mit der Zeit die ursprüngliche Ladung am Kondensator mehr und mehr ausglich. Aus der Kondensatorgleichung  $Q = C \cdot U$  ergibt sich, dass mit sinkender Ladung auch die Spannung am Kondensator abnehmen muss, da die Kapazität  $C$  für den Kondensator eine unveränderliche Konstante ist. Außerdem ersieht man aus der Kondensatorgleichung, dass man die Kapazität des Kondensators möglichst klein wählen muss, wenn man damit kleine Ionisationsströme messen will. Kleine Ströme führen zu kleinen Ladungsänderungen, die man erst als Änderung der Spannung ablesen kann. Also sollte die Spannungsdifferenz

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C}$$

möglichst groß sein, was man eben dadurch erreicht, dass die Kapazität  $C$  möglichst klein ist. [5,6]

### 3.3.2.2 Der Wulf'sche Strahlenapparat

Theodor Wulfs Anliegen war es, ein Messgerät zu konstruieren, mit dem er die radiogene Ionisation der Luft messen konnte, die sich in seiner Zeit noch am Rande der Messbarkeit befand. Ihm war klar, dass die Ionisation der Luft durch die

Wechselwirkung der ionisierenden, radioaktiven Strahlung mit den Molekülen der Luft verursacht war. Je größer das aktive Volumen des Ionisationsgefäßes seines Messgerätes war, umso größer musste die Wahrscheinlichkeit sein, dass Ionisationsprozesse darin stattfänden, und umso größer musste daher der messbare Effekt ausfallen. Mit der Größe einer Ionisationskammer steigt aber auch die Kapazität, was das Messergebnis, die Spannungsdifferenz nach Ablauf einer bestimmten Zeit, aber wieder verkleinert und ungenauer macht.

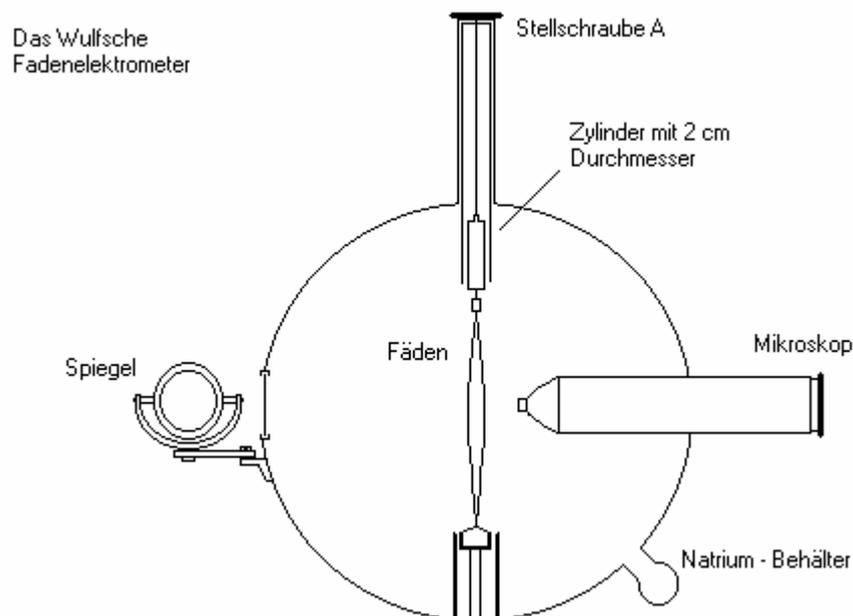
Die schwierige Aufgabe für Theodor Wulf bestand also darin, das Volumen der Ionisationskammer möglichst groß zu machen, dabei aber die Kapazität der Messanordnung möglichst gering zu halten.

Zur Bestimmung von elektrischen Ladungen wurden damals unter Ermangelung anderer Technologien durchwegs Elektrometer verwendet. Dabei handelt es sich um eine Anordnung, die bewegliche Teile meist in Form von metallischen Blättchen oder Fäden aufweist. Sobald diese beweglichen Teile eine elektrische Ladung erhalten, bilden sie gleichnamige elektrische Felder und üben so eine abstoßende Kraft aufeinander aus. Je höher die elektrische Ladung ist, umso größer ist die abstoßende elektrische Kraft, und umso weiter drücken sich die Teile voneinander weg. So kann der Forscher vom Abstand der Blättchen voneinander auf die elektrische Ladung der Blättchen rückschließen. Unter Anwesenheit ionisierender Strahlung wird die Leitfähigkeit der umgebenden Luft erhöht, was sich in einer Abnahme der Ladung und einer entsprechenden Bewegung der beweglichen Teile widerspiegelt.

Theodor Wulf hatte bereits sein Zweifadenelektrometer entwickelt, das als Messgerät zum Bestimmen elektrischer Ladungen wegen seiner geringen Kapazität, seines weiten Messbereiches und seiner großen Empfindlichkeit eine weltweit einzigartige Qualität aufwies.

Elster und Geitel verwendeten das Elektrometer, um damit den Ladungszustand eines zylinderförmigen Entladungskörpers zu bestimmen, was eine große Gesamtkapazität ergab. Die entscheidende Idee von Theodor Wulf bestand darin, die Fäden seines Elektrometers selbst als Entladungskörper zu verwenden, und das Gehäuse des Elektrometers, um das Ionisationsvolumen abzugrenzen. Die so erzielte, sehr kompakte Bauart führte zu sensationell geringen Werten der Kapazität.

Als Elektrometergefäß, das gleichzeitig das Ionisationsvolumen definierte, wählte Theodor Wulf eine liegende Metalltrommel. Im Zylindermantel ist eine kreisrunde Öffnung ausgespart, durch die ein Mikroskop ragt, das zum Beobachten der Fäden dient. Ihm gegenüber ist eine Öffnung, durch die die Fäden mittels eines Spiegels beleuchtet werden können.



**Abbildung 3-17 Der Wulf'sche Strahlenapparat**

Der Wulf'sche Strahlenapparat stellt eine Kombination aus Ionisationskammer und Wulf'schen Zweifadenelektrometer dar.

Mit Hilfe der Stellschraube A lassen sich die Fäden des Elektrometers um die Längsachse des Strahlenapparats drehen, um eine für die Ablesung günstige Position einstellen zu können. Natrium wird verwendet, um die Luft im Inneren des Ionisationsvolumen von Feuchtigkeit frei zu halten.

Der innere, kleinere Zylinder dient der Überprüfung der Isolierung des Gerätes. Wird er über die Fäden gesenkt, so verringert sich das aktive Ionisationsvolumen auf den Innenraum des kleineren Zylinders. Wenn die Entladung pro Zeiteinheit dann entsprechend der Volumsänderung abnimmt, so kann man davon ausgehen, dass die Verlustströme durch mangelhafte Isolierung vernachlässigbar gering sind.

Das Wulf'sche Elektrometer wurde in den nächsten Jahrzehnten vielfach verwendet, verbessert und weiterentwickelt, um die Intensität der Radioaktiven Strahlung zu messen, unter anderen von Albert Gockel, einem Schweizer Physiker, und Viktor Franz Hess, dem Österreichischen Nobelpreisträger für Physik des Jahres 1936. [5,6,7]

## 3.4. Die Jagd auf die ionisierende Strahlung

### 3.4.1. Theodor Wulf und der Eiffelturm

In den folgenden Jahren erkannte man in zunehmendem Maße, dass es gerade die radioaktiven Elemente waren, über deren Wirkung auch Elster und Geitel so erstaunt waren, die besonders geeignet waren, die Atome und Moleküle der Luft ihrer Umgebung zu ionisieren. Die radioaktive Strahlung, die beim Zerfall eines instabilen Elementes entsteht, ist außerordentlich reich an Energie, die deshalb bei weitem ausreicht, um die Bindung eines Hüllenelektrons an sein Atom zu überwinden, die

Elektronen freizusetzen und auf solche Weise neue Ionen in großen Mengen zu erzeugen.

Bis 1910 war es den Physikern gelungen, die radioaktiven Strahlen in drei Kategorien zu gliedern; die zweifach positiv geladenen  $\alpha$ -Teilchen, die als vollständig ionisierte Heliumkerne identifiziert werden konnten; die  $\beta$ -Strahlung, die aus energiereichen Elektronen besteht; und nicht zuletzt die elektrisch neutrale elektromagnetische  $\gamma$ -Strahlung, die aus Photonen besteht, wie auch das Sonnenlicht oder die Röntgenstrahlung. Allerdings weist die  $\gamma$ -Strahlung im wesentlichen eine sehr viel kürzere Wellenlänge beziehungsweise damit verbunden eine sehr viel höhere Energie auf.

Zwei prominente Persönlichkeiten am Gebiete der Luftelektrizität und Strahlenforschung, Nachfolger von Elster und Geitel und direkte Vorarbeiter von Hess waren der Schweizer Albert Gockel und der deutsche Jesuitenpater Theodor Wulf.

Theodor Wulf war ständig bemüht, die Qualität der Messungen, wie sie Elster und Geitel durchgeführt hatten, zu verbessern, indem er die Empfindlichkeit und die Genauigkeit der Messgeräte zu erhöhen trachtete. Dies gelang ihm in einer Weise, dass diese modifizierte Messgeräte seinen Namen erhielten und über Jahrzehnte den Standard bildeten. Er erkannte früh die Vorteile, die daraus resultierten, die benötigten Messzeiten von ganzen Tagen auf wenige Stunden zu verkürzen, um so zum Beispiel die Abhängigkeit der Leitfähigkeit der Atmosphäre von der Tageszeit studieren zu können, ganz abgesehen vom verminderten zeitlichen Aufwand insgesamt, der dann mit einer Messung verbunden war.

Inzwischen hatte man in der Leitfähigkeit der Atmosphäre einen Schlüssel zum Verständnis der Radioaktivität der Luft erkannt. Waren Elster und Geitel noch direkt am Phänomen der atmosphärischen Leitfähigkeit selbst interessiert, so beschäftigten sich die Forscher jetzt mit den Phänomenen, die dahinter standen. Die Leitfähigkeit der Atmosphäre wurde zum Werkzeug, mit dem man der ionisierenden Strahlung ihre Geheimnisse abringen wollte.

Umso wichtiger war es, leistungsfähige Messgeräte zur Verfügung zu haben, um durch die unsicheren und von vielen Faktoren abhängigen Leitungseigenschaften der Luft hindurch der Ionisationsquelle auf den Zahn fühlen zu können. Nebenbei interessierte man sich auch noch für die Abhängigkeit der Ionisation von der Tageszeit (Sternzeit und Sonnenzeit), von der Jahreszeit, und vom Ort (geographische Breite und Seehöhe). Um diese feinen Unterschiede am Rande der Messbarkeit oder der Wahrnehmung ausloten zu können, entwickelte Theodor Wulf seine Messgeräte, welche die späteren Erfolge der Höhenstrahlungsforscher erst in greifbare Nähe rücken ließen.

Unter anderem versuchte Theodor Wulf, den Ursprung der Strahlung selbst zu finden, die für die Ionisation der Luft verantwortlich zu machen war. Gängige Meinung war, dass die radioaktiven Elemente in der Erde als Ursache zu suchen waren. Weiters wusste man, dass radioaktive Strahlung von der Luft absorbiert wird, wodurch die Intensität mit der Entfernung zu ihrer Quelle abnimmt. Theodor Wulf folgerte daraus, dass die Strahlungsintensität umso mehr abnehmen musste, je weiter er sich von der Erde, der hypothetischen Strahlungsquelle, entfernte. Mit der Intensität der Strahlung würde auch die Ionisationsrate abnehmen, und die Entladung seines Strahlenapparates langsamer vonstatten gehen.

Um sich möglichst weit von der Erdoberfläche zu entfernen, erklomm Theodor Wulf im Jahre 1910 den Eiffelturm in Paris, wo er seine Messungen anstellte. Er konnte jedoch nicht die erwartete Minderung der elektrischen Leitfähigkeit der Atmosphäre feststellen. Vielmehr war die Ionisationsrate viel höher als erwartet, was Theodor Wulf zu dem Schluss zwang, dass auch die radioaktive Strahlung noch viel höher war, als sie nach hunderten Metern abschirmender Luft hätte sein dürfen, wenn ihre Quelle die radioaktiven Elemente des Erdbodens wären.

Kritiker warfen ihm fehlerhafte Messungen vor, andere spekulierten um eine radioaktive Eigenstrahlung des Eiffelturmes, die die Messergebnisse beeinflusst oder verfälscht hätten (ein nicht unberechtigter Einwand), Theodor Wulf hingegen stellte die kühne Hypothese auf, dass die Annahme, die Erde sei Ursprung der Radioaktivität, falsch und widerlegt sei. Vielmehr sei es der Kosmos, aus dem eine außerirdische Strahlung stetig auf die Atmosphäre hereinfalle. Es brauchte scheinbar einen Priester, um die kühne Idee aufzustellen, dass der Himmel die Quelle der befragten Strahlung war. Um seine Theorie zu bestätigen, forderte Wulf seine Physikerkollegen auf, mit Drachen und Ballonen Messungen in noch größeren Höhen durchzuführen. Ihn selbst trieb die Abenteuerlust nicht mehr so weit. Hätte er den Gefahren und den Unannehmlichkeiten nächtlicher Ballonfahrten bei Frost und Nebel getrotzt, so wäre eventuell die Ehre sein gewesen, den Nobelpreis für die Entdeckung der *Kosmischen Strahlung* vom Schwedischen König entgegenzunehmen. So blieb es an einem anderen, jüngeren, die Strapazen zu dulden und die Ehrungen entgegenzunehmen, nämlich an Viktor Franz Hess, dem kühnen Ballonfahrer vom Radiuminstitut in Wien. [5,6,7,8]

### 3.4.2. Die Jäger gehen in die Luft – Albert Gockel

Um 1910 war man sich sicher, dass die Hauptquelle der ständigen Luftionisation, und damit auch der hauptverantwortliche Faktor für die Leitfähigkeit der Luft, eine durchdringende  $\gamma$ -Strahlung sei. Die Argumentation, die zu dieser Annahme führte, wurde wie folgt geführt:

Da die ionisierende Strahlung im wesentlichen die Ursache der Ionisation war, dachte man, dass es möglich sein sollte, über die Leitfähigkeit der Luft auf diese Strahlung zurückzuschließen, was man sich in den Versuchen mit den Wulf'schen Elektrometern und Ionisationskammern zu Nutzen machte. Dass die Strahlung sehr durchdringend sein musste, erkannte man schon an der Tatsache, dass auch in Elektrometern, die mit einigen Zentimetern Blei abgeschirmt waren, eine Abnahme des Potentials durch einen Ionisationsstrom zu verzeichnen war. Das musste bedeuten, dass die ionisierende Strahlung durch das Blei hindurch das Elektrometer entladen konnte, was von einer hohen Durchdringlichkeit der Strahlung zeugte. Nun wusste man von irdischen radioaktiven Strahlungsquellen, dass gerade die  $\gamma$ -Strahlung sehr durchdringend ist, während die schweren Alpha-Teilchen und die Elektronen der  $\beta$ -Strahlung sehr leicht abzuschirmen sind. Aus diesen Gründen ging man zur Annahme über, dass diese geheimnisvolle, sehr durchdringende Strahlung natürlich von ihrer Natur her  $\gamma$ -Strahlung sein musste.

Was noch immer im Zweifel lag, war, wo diese Strahlung ihren Ursprung haben sollte. Naheliegender Hypothesen für die Strahlungsquellen waren:

- der Erdboden und in ihm enthaltene radioaktive Stoffe. Tatsächlich ist die Erde auch eine Quelle von Radioaktivität und von ionisierender Strahlung, wie sich leicht zeigen lässt. Weitere Messungen sollten prüfen, ob die Erdoberfläche die einzige Quelle ist, oder ob noch andere in Betracht gezogen werden müssen.
- die Atmosphäre und in ihr enthaltene radioaktive Stoffe. Zur Prüfung dieser Hypothese waren Messungen in größeren Höhen notwendig, die noch ausstanden.
- andere, bisher unbeachtete oder unbekannte Quellen.

Man wusste bereits aus Experimenten, dass radioaktive Strahlung beim Durchdringen von Materie proportional zu deren Dichte absorbiert wird, was neben den weniger durchdringenden  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen auch für die sehr durchdringende  $\gamma$ -Strahlung gilt. Nach Berechnungen des englischen Physikers Adam S. Eve sollte ein Weg von hundert Metern durch die Atmosphäre ausreichen, um die  $\gamma$ -Strahlung in ihrer ionisierenden Wirkung praktisch zu neutralisieren. Das bedeutet, dass die Leitfähigkeit der Atmosphäre, die nach neuesten Erkenntnissen ja erst durch die ionisierende Wirkung radioaktiver Strahlung gegeben war, in einer Höhe von einigen hundert Metern über der Erdoberfläche gegen null gehen musste, wenn die Hauptquelle der gesuchten Ionisation tatsächlich der Erdboden sein sollte. Diesen Sachverhalt wollte man untersuchen, und der Züricher Albert Gockel war einer der ersten, die den Wulf'schen Strahlungsapparat, der im vorigen Kapitel als Wulf'sches Elektrometer beschrieben ist, verwendeten, um während Luftfahrten mit Hilfe eines Ballons die Leitfähigkeit der Atmosphäre in Abhängigkeit der Seehöhe zu untersuchen.

ZEIT	ORT	VOLTVERLUST
7 <sup>h</sup> -9 <sup>h</sup> 30	Schuppen des Gaswerkes in Zürich.	13.3
9 <sup>h</sup> 45-10 <sup>h</sup> 45	800-1100 m über Zürich im Nebel	10.3
10 <sup>h</sup> 45-11 <sup>h</sup> 30	Etwa 1700 m, zwischen Zürich und Zug über dem Nebel	8.3
11 <sup>h</sup> 30-12 <sup>h</sup> 30	1900 m über Entlebuch	8.5
12 <sup>h</sup> 30-1 <sup>h</sup> 30	1900 m über Entlebuch	9.6
1 <sup>h</sup> 30-3 <sup>h</sup> 30	2800 m, Gegend von Olten.	10.0
	Nach der Landung auf der Wiese	9.8

**Abbildung 3-18 Messwerte von Albert Gockel**

Die Tabelle gibt einen kurzen Überblick über die erste Ausfahrt Albert Gockels und die erhaltenen Messwerte.

Für seine Messungen verwendete Albert Gockel einen dünnwandigen Wulf'schen Strahlungsapparat mit den Standardeigenschaften, mit denen dieses Messgerät damals

produziert wurde: Volumen des Luftraumes =  $2700 \text{ cm}^3$ , eine Kapazität von  $1.2 \text{ cm}$  (entspricht  $1.3 \text{ pF}$ ). Ein Potentialsverlust von einer Voltstunde entsprach daher einer mittleren Ionisationsrate von  $0.88 \text{ Ionen} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

Der dünnwandige Apparat konnte für die Luftreise nicht luftdicht verschlossen werden, da auf Grund des Luftdruckgefälles mit zunehmender Höhe der innere Überdruck zur Zerstörung des Gerätes führen hätte können. Während des Aufstieges kam es also zum Druckausgleich des Innenraumes des Elektrometers mit der Außenluft, indem durch einen Gummischlauch Luft zwischen der Atmosphäre und dem Inneren des Gerätes ausgetauscht werden konnte.

Die Ionisationsrate im Inneren des Gefäßes ist proportional zur Luftdichte. Die Luftdichte ändert sich bei einem Aufstieg bis in eine Höhe von 2800 Metern etwa im Verhältnis von 720:500. Die Ionisationsrate lässt hingegen eine solche Abnahme nicht erkennen. Albert Gockel folgerte also vorsichtig aus seinen Resultaten, dass sogar eine gewisse Zunahme der Strahlung mit der Höhe erkennbar sei. Genaueres konnte Gockel wegen des folgenden Zwischenfalls nicht sagen: Er hatte bei seiner ersten Ballonfahrt ein dickwandiges, luftdichtes Messgerät mitgenommen, zu dem Zwecke, die radiogene Ionisation bei konstantem inneren Luftdruck des Messgerätes zu bestimmen. Entsprechend seiner Annahmen nahm in diesem Gerät die Ionisationsrate weitaus weniger stark mit der Höhe ab, als es beim dünnwandigen der Fall war, bis es plötzlich zu einer starken Abnahme der Messwerte kam und das Gerät von da an parallel zum dünnwandigen anzeigte. Gockel folgerte daraus, dass sein Messgerät undicht geworden war und entschied, diese für ihn zu unzuverlässigen Messwerte für eine Auswertung nicht zu verwenden und nur die Angaben des anderen Apparates zu benutzen. Gockel verglich die Ergebnisse seiner Messungen mit denen von D. Pacini aus Italien, H. Mache aus Innsbruck und vor allem denen von Theodor Wulf, der in dieser Zeit eine sehr prominente Figur unter den Forschern, die sich der Lufterlektrizität verschrieben hatten, war. Pacini stellte Messungen in Schiffen am offenen Meer an, Mache in den Alpen in der Nähe von Innsbruck, und Theodor Wulf erklimmte unter anderem den Eiffelturm. Keiner von ihnen jedoch hatte die Möglichkeit oder die Lust, mit einem Ballon aufzusteigen, obwohl Wulf selbst immer wieder in seinen Messberichten dazu angeregt hatte. [3, 4,8]

### 3.4.3. Viktor Hess bestimmt das Absorptionsverhalten der Gammastrahlung und begibt sich das erste Mal in die Luft

Das seltsame Verhalten der Abhängigkeit der Luftionisation von der Höhe überraschte die Physiker einigermaßen, und ein überwiegender Teil der Fachwelt machte Messfehler und unzuverlässige Geräte für die Messergebnisse verantwortlich. Man war sich ja sicher, dass die an der Erdoberfläche beobachtete ionisierende Strahlung zum größten Teil von den radioaktiven Substanzen in der Erde und an der Erdoberfläche herrührten. A. S. Eve berechnete, dass von diesen Substanzen etwa 95 % der Gesamtstrahlung stammen müssen. Den Rest dachte er sich durch in der Atmosphäre verteilten radioaktiven Stoffen verursacht. Nach seiner Theorie müsste daher mit zunehmender Höhe eine Abnahme der Intensität der durchdringenden Strahlung zu beobachten sein. Eve berechnete, dass in einer Höhe von 20 Metern über

der Erde 83 %, in 100 Metern 36 %, und in 1000 Metern nur mehr 0.1 % der ursprünglichen Intensität feststellbar sein dürften.

Die Beobachtungen von Theodor Wulf, Albert Gockel und auch von einem gewissen von Bergwitz haben hingegen keineswegs eine so rasche Abnahme der durchdringenden Strahlung mit der Seehöhe erkennen lassen.

Viktor Hess sah zwei mögliche Erklärungen für das geschilderte Mysterium:

1. Es könnte außer den radioaktiven Substanzen der Erde noch ein weiterer, der Fachwelt bisher unbekannter Ionisator in der Atmosphäre wirksam sein.
2. Die Absorption der Gamma Strahlung in der Luft könnte doch viel langsamer erfolgen, als dies A. S. Eve für seine Berechnungen voraussetzte.

Viktor Hess war klar, dass er diese Möglichkeiten veri- oder falsifizieren musste, bis er die richtige Antwort herausgefunden hatte, um dem Rätsel auf die Spur zu kommen. Er entschloss sich, mit der Frage zu beginnen, der er leichter auf den Grund gehen konnte, nämlich mit der des Absorptionsverhalten der Gamma Strahlung in unserer Atmosphäre. Die Ergründung des zweiten Punktes war auch deswegen von entscheidender Wichtigkeit, da bis zu dieser Zeit noch niemand direkt die Absorption von Gamma Strahlung in Gasen gemessen hatte. Der einzige Zugang war die Extrapolation des Absorptionskoeffizienten aus dem Dichtegesetz, das darauf beruht, dass die Absorption von Strahlung in einem Medium proportional zur Dichte dieses Mediums ist, dass also der Absorptionskoeffizient  $\lambda$  (Lambda) eine Funktion der Dichte ist, mit  $\lambda/D = \text{konstant}$ , wo  $\lambda$  für den Absorptionskoeffizienten und D für die Dichte des Mediums steht.

Also führte Hess eine direkte Bestimmung des Absorptionskoeffizienten der  $\gamma$ -Strahlung durch. Als Messgerät verwendet Hess natürlich ein Wulf'sches Elektrometer. Luftdicht aufgeschraubt war eine Ionisationskammer mit einem Volumen von 11.1 L, also 11100 cm<sup>3</sup> und einem axial angebrachten Zerstreustift. Die Kapazität des Messgerätes betrug 7 cm, was einen ziemlich hohen Wert darstellt. Das konnte Hess sich leisten, da er vorhatte, mit ziemlich starken Ionisatoren zu arbeiten, nämlich Radiumpräparaten. Die Empfindlichkeit des Elektrometers betrug 1.95 Volt pro Teilstrich der Okularskala. Als Messort verwendete Hess die (damals) freie Wiese hinter dem Wiener Radiuminstitut. So hatte er die Möglichkeit, das Radiumpräparat in jeder beliebigen Entfernung von seinem Ionisationsmessgerät aufzustellen.

Mit zwei Problemen hatte Hess bei seinem Experiment allerdings noch zu kämpfen:

- Der zu beobachtende Effekt nimmt proportional zum Quadrat der Entfernung des Ionisators zum Messgerät ab. Daher müssen Sättigungsströme von sehr unterschiedlicher Größe verglichen werden.
- Jede Schwankung der natürlichen Ionisations führt zu vergrößerten Unsicherheiten des Messergebnisses, was vor allem bei kleinen künstlichen Effekten große Auswirkungen haben kann.

Beide Überlegungen erfordern die Verwendung von so großen Quantitäten von Radium, wie man sie nur damals in Freihandversuchen verwendete. Um in einer Entfernung von 90 Metern von der Strahlungsquelle einen für Hess damals gerade

noch bequem messbaren Effekt von 20 Volt pro Stunde zu erhalten, benötigte er 700 Milligramm reines Radium, was einer Radioaktivität von 0.7 Curie oder 26 Milliarden Zerfälle pro Sekunde ( $2.6 \cdot 10^{10}$  Bequerel) entspricht (für heutiges Empfinden enorm hohe Werte!). Viel geringere Distanzen als 90 Meter als maximale Entfernung empfehlen sich nicht für solche Absorptionsmessungen, da ja z. B. in einer 50 m dicken Luftsäule eine Schwächung der Strahlung durch Absorption um nur 20 % feststellbar ist.

Hess führte in folge eine Reihe von 5 Experimenten durch, in denen ihm Präparate von 920 mg, 1020 mg und 1420 mg Radiumchlorid zur Verfügung standen. Die Präparate waren wie üblich in Glasröhrchen eingeschmolzen. Um die  $\beta$ -Strahlung abzuschirmen barg Hess diese Glasröhrchen noch zusätzlich in Bleibehältern von 3 mm Wandstärke.

Im Zuge der Messungen stellte Hess die Präparate in Entfernungen von ganzzahligen Vielfachen von 10 m bis zu 90 m vom Elektrometer entfernt auf, und jedes Mal bestimmte er die Ionisationsrate als Mittelwert von 5 bis 10 Einzelwerten. Dabei machte Hess die wichtige Annahme, dass alle erzeugten Ionen zum beobachteten Spannungsabfall beitrugen, unabhängig von der absoluten Spannung. Die natürliche Zerstreung wurde dabei ebenfalls vor und nach jeder Messung bestimmt, indem das Präparat im Keller versteckt wurde, um so den ionisierenden Einfluss seiner Aktivität auszuschalten.

Die Ionisationsrate, die sich beim  $i$ -ten Experiment durch die radiogene Ionisation ergab, soll im folgenden als  $I_i$  bezeichnet werden, die dazugehörigen Distanz als  $r_i$ . Dann gelten folgende Zusammenhänge:

$$I_i r_i^2 = I_0 r_0^2 \cdot e^{-\lambda(r_i - r_0)}$$

Daraus lässt sich durch mathematisches Umformen der Absorptionskoeffizient ermitteln:

$$\lambda = \frac{\ln(I_0 r_0^2) - \ln(I_i r_i^2)}{r_i - r_0}$$

Dabei steht  $r_0$  wahlweise für die größte oder die kleinste Distanz vom Ionisator. Die Resultate der Messungen von Hess sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

Versuch Nr.	$\lambda$ [ $\text{m}^{-1}$ ]
Nr. 1	$0.458 \cdot 10^{-4}$
Nr. 2	$0.493 \cdot 10^{-4}$
Nr. 3	$0.415 \cdot 10^{-4}$
Nr. 4	$0.479 \cdot 10^{-4}$
Nr. 5	$0.389 \cdot 10^{-4}$
Mittelwert	$0.477 \cdot 10^{-4}$

Die relativ große Abweichung in den Einzelwerten ist in den unvermeidlichen Schwankungen der natürlichen Ionisation während der mehrstündigen Messzeiten begründet. Ansonsten stimmte der gefundene Mittelwert für  $\lambda$  innerhalb von 2 % mit den Erwartungen aus dem Dichtegesetz überein. Hess zeigte also, dass das Absorptionsvermögen der Luft für  $\gamma$ -Strahlung tatsächlich dermaßen beschaffen ist,

wie es A. S. Eve für seine Berechnungen vorausgesetzt hatte, dass also die durchdringende Strahlung der Erde mit der Höhe rasch abnehmen und in einer Höhe von 500 Metern über dem Erdboden nur mehr einige Prozent der ursprünglich Intensität zu messen sein dürften. Nachdem dieser Sachverhalt verifiziert war, waren die Messwerte von Gockel, Wulf und Konsorten umso weniger zu verstehen, aber Hess noch lange nicht mit seinem Latein am Ende. Er war ja zu Beginn seiner Forschungstätigkeit von einem zwei Punkte Programm ausgegangen:

1. Es könnte außer den radioaktiven Substanzen der Erde noch ein weiterer, der Fachwelt noch unbekannter Ionisator in der Atmosphäre wirksam sein.
2. Die Absorption der  $\gamma$ -Strahlung in der Luft könnte doch viel langsamer erfolgen, als dies A. S. Eve für seine Berechnungen voraussetzte.

Viktor Hess war es also gelungen, nachzuweisen, dass der zweite Punkt nicht zur Erklärung des Leitfähigkeitsverhaltens der Atmosphäre geeignet war. Doch darauf war er schon im theoretischen Ansatz seiner Experimente vorbereitet gewesen. Es war quasi nur mehr ein letzter vorbereitender Schritt, eine Unsicherheit, die es auszuschließen galt, bevor Hess sich sinnvoller Weise der Fragestellung seines eigentlichen Interesses widmen konnte: nämlich dem ersten Punkt seines Arbeitsprogrammes, in dem er der Frage nachgehen wollte, ob außer den radioaktiven Substanzen der Erde weitere der Fachwelt noch unbekannte Ionisatoren in der Atmosphäre wirksam sein könnten, wie diese beschaffen wären, und woher sie kämen.

Im Zuge seiner intensiven Forschungen bekam der engagierte Hess gleichfalls die begehrte Gelegenheit, Messungen der durchdringenden Strahlung in verschiedenen Höhen mit Hilfe eines Freiballons durchzuführen.

Als Messinstrument diente auch ihm der Wulf'sche Strahlungsapparat, wie er weiter oben beschrieben ist, allerdings in einer speziellen, verbesserten, eigens für Messungen in großen Höhen und unter Wasser gedachten, und daher besonders luftdichten und stabilen Bauart. Die Wandstärke der aus Messing hergestellten Ionisationskammer betrug 2 mm, so dass der Apparat allen bei Ballonfahrten auftretenden Druckdifferenzen leicht gewachsen war. Die Kapazität des Gerätes war auf 1.6 cm hinuntergedrückt, der Rauminhalt betrug 2039 cm<sup>3</sup>. Ein Spannungsabfall von 1 V·h<sup>-1</sup> entspricht daher einer Ionisationsrate von 1.56 Ionen·s<sup>-1</sup>·cm<sup>-3</sup>. Die Einheit [ Ionen·s<sup>-1</sup>·cm<sup>-3</sup> ] soll im folgenden mit [ J ] bezeichnet werden.

In der Zeit vom 23. August bis zum 28. August 1911, an dem dann die erste Fahrt stattfinden sollte, unternahm Hess vorbereitende Messungen auf der Praterwiese mit eben diesem Wulf'schen Elektrometer und erhielt eine Ionisationsrate von  $(34.6 \pm 1.6) J$ . Wer in dieser Ionisationsrate einen hohen Wert sieht, wird mit Hess vermuten, dass die Wände des Apparates über eine relativ hohe Eigenstrahlung verfügen, die zunächst möglichst genau zu bestimmen ist, bevor man an eine Auswertung irgendwelcher Messergebnisse gehen kann. Hess löste diese Aufgabenstellung, indem er sein Messgerät in den Donauauen unter Wasser setzte und so Vergleichsmessungen unterhalb und oberhalb der Wasserlinie durchführte, um die Umgebungsstrahlung von den Donauwassern abgeschirmt zu wissen. Tatsächlich führte Hess diese Messungen im Kaiserwasser durch, einem Donauarm bei Kaisermühlen. Hess erhielt damit einen Wert von etwa 25 J ohne Angabe eines Fehlers. Daraus ließ sich jedenfalls schließen, dass die Strahlung am Aufstiegsorte im

Wiener Prater ungefähr 10 J betrug. Gleichzeitig fand Hess die Strahlung über dem Wasser stark vermindert. Die Messwerte knapp über dem Wasserspiegel und 1½ Meter unter der Wasserlinie zeigten nahezu den gleichen Betrag. Also schien ihm der Schluss vernünftig, dass die radioaktive Strahlung in ihrer Hauptsache nicht von der Atmosphäre, sondern von der Erdoberfläche ausging.

Am 28. August 1911 trat Hess seinen ersten Aufstieg mit einem Freiballon an. Es handelte sich um den Ballon Radetzky des Österreichischen Aeroklubs, mit 1200 m<sup>3</sup> Leuchtgas gefüllt (Bei Leuchtgas handelt es sich um Erdgas, das damals vor allem für Beleuchtungszwecke verwendet wurde). Oberleutnant Heller fungierte als Führer und Hess selbst als einziger Passagier. Hess hatte stets den Vorteil, in solch kleinen Gruppen zu reisen, und somit viel Platz für seine Messgeräte in der Ballongondel zu haben. Albert Gockel hingegen boten sich nur Gelegenheiten, an Ausflugsfahrten teilzunehmen, wo sich schon mehrere Personen in der Ballongondel drängten.

Durchflogene Strecke: 45 km, erreichte Höhe 1070 m, die beobachteten Werte sind in nachfolgender Tabelle angeführt:

ZEIT	ORT	RELATIVE HÖHE [METER]	BEOBACHTETE STRAHLUNG [J]
06:30 – 07:45	Klubplatz des Aeroklubs im Prater	0	32.3
08:14 – 08:59	Über Wien, längs der Donau	150 – 440	28.1
08:59 – 09:44	Über Inundationsgebiet und Klosterneuburg	440 – 800	34.7
09:48 – 10:18	Über Leitzersdorf, Hatzenbach	800 – 900	34.3
10:18 – 10:48	Über Höbersdorf, Schönborn-Mallebarn	900 – 1070	35.5
11:11 – 12:12	Auf Stoppelfeld bei Göllersdorf (nach der Landung)	0	34.9

Abbildung 3-19 Ballonfahrt Viktor Hess, 28. August, 1911

Wie damals scheinbar üblich sind auch in dieser Tabelle keine Messfehler angegeben. Qualitativ kann man aber wohl sehen, dass in den durchwanderten Höhen bis 1070 m die vorgefundene Strahlung sich nicht wesentlich von der am Boden unterscheidet, ganz im Gegensatz zu den Erwartungen von Eve und dem, was Hess über die Absorption der  $\gamma$ -Strahlung in der Atmosphäre wusste. Die Abnahme von 32.3 J auf 28.1 J beim Aufstieg von 0 m auf 440 m über der Erdoberfläche schätzte Hess als statistischen Ausreißer ein, dem er weiter keine große Bedeutung beimaß. Ansonsten fand Hess, dass seine Messergebnisse ganz gut mit denen von Gockel übereinstimmten, wenn man zweitens auf normalen Luftdruck korrigierte. Da bei Gockel dann sogar eine leichte Zunahme der Ionisation festzustellen war, folgte nun Hess, dass nach allen bisherigen Ergebnissen an noch weitere Ionisatoren in der Atmosphäre zu denken wäre, deren Wirksamkeit mit zunehmender Höhe noch zunahm.

Auch dem möglichen Einwand, dass sich der Ballon während der Fahrt mit radioaktiven Substanzen anreichert und somit während der ganzen Fahrt eigentlich die Ionisation durch den Ballon gemessen wurde, und nicht ein neues, noch unbekanntes Phänomen der Natur, kam Hess zuvor, indem er gleich nach der Landung Messungen direkt neben der Ballonhülle durchführte, die zu völlig normalen Werten führte, was nicht der Fall gewesen wäre, hätte sich jetzt zur natürlichen Radioaktivität der Erde noch die angenommene Radioaktivität des Ballons addiert, was einen markant höheren Wert hätte ergeben müssen.

Um weitere Informationen über diesen unbekanntem Ionisator zu erhalten, plante Hess an dieser Stelle weitere Ballonfahrten und vor allem solche bei Nacht durchzuführen. Damit schien er auf die Annahme eingehen zu wollen, dass es sich bei diesem Ionisator um von der Sonne stammende  $\beta$ -Strahlung oder ähnliche heliogene Strahlung handeln könnte. [10]

## 4. Die Entdeckung der *Kosmischen Strahlung*



Abbildung 4-1 Viktor Franz Hess bei der Landung mit dem Fesselballon

### 4.1. Die ersten beiden Ballonflüge 1911

In der Erforschung des Ursprunges der sehr durchdringenden Strahlung, die für die Leitungseigenschaften der Atmosphäre verantwortlich gemacht werden musste, war man also an einem schwierigen Punkt angelangt:

Man hatte in der Radioaktivität die primäre Quelle für die Ionisation der Atmosphäre entdeckt, und man wusste bereits einigermaßen über die Verteilung der radioaktiven Substanzen in der Erde und in der Atmosphäre bescheid. Zählte man aber eins und eins zusammen und schloss man von der Verteilung der radioaktiven Substanzen in der Atmosphäre auf den Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit der Luft mit der

Seehöhe, so wurden die theoretischen Vorhersagen nicht mehr von den praktischen Experimenten bestätigt, die es damals bereits, wenn auch in noch bescheidener Zahl, gab.

Würden alle Voraussetzungen stimmen, so müsste die Leitfähigkeit der Luft mit zunehmender Höhe rapide absinken. In einer Höhe von 100 Metern sollte man nur mehr um 36 % der Ionisationsrate an der Erdoberfläche messen können. Aber eben diese Annahme wurde durch die neuesten Ergebnisse der Experimentatoren nicht einfach entkräftet, sondern der Unhaltbarkeit anheim gestellt.

Wohl fand Theodor Wulf die radiogene Ionisation an der Spitze des Eiffelturmes auf etwa 64 % geschwächt, doch hatte er stattdessen nur mehr 10 % des ursprünglichen Wertes erwartet.

K. Bergwitz, der als erster die neue Technologie der Freiballone für derartige Erkundungsfahrten nutzte, glaubte, in einer Höhe von 1300 Metern eine Abnahme der Ionisation auf 24 % festgestellt zu haben. Allerdings stellte sich später heraus, dass sein Messgerät während des Aufstieges durch den höhenbedingten Druckabfall vollkommen zerstört worden war, wodurch es beim besten Willen nichts anderes mehr als diese 24 % anzeigen konnte.

Gockel hingegen fand bei seiner zweiten Fahrt, bei der er einen verbesserten Wulf'schen Strahlungsapparat benutzte, sogar eine schwache Zunahme der Strahlung mit der Höhe. Allerdings waren auch seine Messergebnisse etwas unsicher: Auf Grund der leicht fragilen Bauweise seines Elektrometers war er gezwungen gewesen, für einen Ausgleich zwischen Innen- und Außendruck zu sorgen, wodurch alle Messwerte erst auf gleiche Dichte wie an der Erdoberfläche zurückgerechnet werden mussten. Das sorgte natürlich für zusätzliche Unsicherheiten.

Viktor Hess hatte nun das Glück, eine neue Konstruktion des Wulf'schen Strahlenapparates in seine Finger zu bekommen, der auf Grund seiner massiven Bauweise gleichermaßen für Unterwassermessungen wie für Messungen in großen Höhen mit konstantem Innendruck geeignet war. Damit fiel die Notwendigkeit für eine nachträgliche Reduzierung der Werte nach der Dichte auf der Erdoberfläche weg.

Nach den oben beschriebenen Ergebnissen dieser ersten Fahrt, die Hess mit dem neuen Messgerät durchführte, musste eigentlich daran gedacht werden, dass außer den radioaktiven Substanzen der Erdoberfläche noch andere Ionisatoren mit durchdringenden Strahlen in der Atmosphäre wirksam sein mussten, und dass deren Wirksamkeit mit der Höhe anscheinend noch anwuchs, sodass sie in der Lage waren, die nachgewiesene Abnahme der Strahlung der Erde mit der Höhe mehr als zu kompensieren!

Um diesem Problem weiter auf den Grund zu gehen, nahm Hess eine zweite Fahrt mit einem Freiballon in Angriff. Die Fahrt wurde in der Nacht vom 12. zum 13. Oktober des Jahres 1911 durchgeführt. Es wurde für den Aufstieg die Nacht gewählt, weil einerseits festgestellt werden sollte, ob etwa bei Nacht in der Höhe andere Strahlungswerte zu beobachten seien, als bei Tag. Andererseits sind bei Nacht günstigere Voraussetzungen für ein ruhigeres Manövrieren mit dem Freiballon gegeben. Erstens ist der Ballon leichter auf einer konstanten Höhe zu halten, wenn er nicht von der Sonne beschienen wird, was für längere Messungen sehr wichtig ist;

zweitens sind erheblich längere Fahrtauern ermöglicht, da der Gasverlust bei Nacht geringer als bei Tag ist.

Verwendung fand der leuchtgasgefüllte Freiballon Austria mit einem Volumen von  $1200 \text{ m}^3$ . Ansonsten war dieser Ausflug von einer Pechsträhne gekennzeichnet: die Luftfeuchtigkeit war derartig hoch, dass die starke Kondensation am Ballon einen Aufstieg massiv erschwerte. So konnten einerseits nicht die größeren Höhen erreicht werden, von denen Hess träumte, und außerdem schlug das Schleppseil immer wieder hart am Boden auf, was durch resultierende Erschütterungen des Korbes das Ablesen der Messgeräte erschwerte. Zudem zog dichter Bodennebel auf, der zeitweise die Orientierung unmöglich machte, und zudem keine genauere Abschätzung der Flughöhe erlaubte. Außerdem war es für Hess schwierig, die Auswirkung des Niederschlages auf das Messergebnis abzuschätzen. Die wichtigsten Ergebnisse erhielt Hess dann, wenn die Nebeldecke sich regional auflöste, nämlich, dass auch in Höhen von 200 bis 400 Metern die Strahlung in der Nacht gleich groß wie bei Tag war.

Inzwischen hatte aber Hess eine ausgeprägte Leidenschaft für das Ballonfahren entwickelt, und so hatte er sich noch einige Möglichkeiten überlegt, wie man mit dieser Technologie die Erkenntnisse über das seltsame Verhalten der Ionisation der Luft vertiefen könnte.

Er erweiterte also sein Forschungsprogramm um folgende Punkte:

1. Es ist notwendig, eine Messung gleichzeitig mit einem extrem dünnwandigen und einem dickwandigen Messgerät durchzuführen, um so die sehr durchdringende  $\gamma$ -Strahlung sowie für die weichere  $\beta$ -Strahlung gleichzeitig untersuchen zu können. Daraus würden sich wichtige Schlüsse über die Verteilung der radioaktiven Substanzen in der Atmosphäre ergeben.
2. Vor allem aber stehen noch Messungen in sehr großen Höhen bis 7000 Meter aus.
3. Bei einer Dauerfahrt wäre festzustellen, ob auch in größeren Höhen die bereits von Elster und Geitel gefundenen täglichen Schwankungen der Ionisation, und damit der Strahlung, zu beobachten seien, und ob in diesem Falle die Größe der Schwankungen in der Höhe verschieden von der an der Erdoberfläche ist.
4. Sollten auch in größeren Höhen die Strahlungswerte nicht erheblich geringer sein, als die am Erdboden gemessenen, so erwartete sich Hess einen Gewinn aus einer quantitativen Bestimmung des Emanationsgehaltes der Atmosphäre in dieser Höhe.

Eine Fortführung seiner Versuche in dieser Richtung hatte Hess bereits in Aussicht gestellt. [11]

#### 4.2. Die sieben Fahrten 1912 – die Entdeckung einer neuen Strahlung

Eine Subvention der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien ermöglichte es Viktor Hess, im Jahre 1912 sieben weitere Ballonfahrten durchzuführen, die ihn in den Reihen der Ballonforscher ganz nach vorne katapultierten.

Für seine Messungen standen ihm nun zwei Apparate zur Verfügung. Sein bewährter Wulfscher Strahlungsapparat Apparat I mit einem Volumen von  $2039 \text{ cm}^3$ , der ihm noch aus dem Vorjahr übrig geblieben war, und ein neuer Apparat II.

Das Innere der aus Messing gefertigten Apparate war, um die Eigenstrahlung der Geräte zu minimieren, verzinkt worden. Dadurch war der Normalverlust des Apparates I von den 35 J des Vorjahres auf 15 bis 16 J vermindert worden. Die Idee dazu stammte vom glücklosen Privatdozenten Dr. Bergwitz aus Braunschweig. Durch die Verzinkung war die Wandstärke auf 3 mm erhöht, wodurch im Inneren des Ionisationsraumes nur die Gamma Strahlen wirken konnten.

Um auch das Verhalten der  $\beta$ -Strahlung in großen Höhen studieren zu können, hatte sich Hess ein weiteres Messgerät von nicht luftdichter Bauart, den Apparat III, gebastelt. Es handelte sich dabei um ein einfaches Wulf'sches Zweifadenelektrometer mit einem 20 cm langem Messingstift als Zerstreuungskörper. Darüber war ein Zinkzylinder mit 16.7 Liter Rauminhalt gestülpt, der als Ionisationsraum diente. Der Zylinder war aus dem dünnsten, damals erhältlichen Zinkblech gefertigt, und hatte somit eine Stärke von 0.188 mm. Somit konnte auch die  $\beta$ -Strahlung noch teilweise im Volumen wirksam werden.

BEZEICHNUNG	IONISATIONSVOLUMEN [ $\text{cm}^3$ ]	KAPAZITÄT [ cm ]	IONISATIONSSTÄRKE FÜR $1 \text{ V} \cdot \text{h}^{-1}$ [J]
Apparat I	2039	1.59	1.56
Apparat II	2970	1.097	0.735
Apparat III	16700	6.57	0.78

**Abbildung 4-2 Die Messgeräte von Viktor Hess**

In dieser Tabelle sind die Technischen Daten der Messgeräte noch einmal zusammengefasst.

Üblicherweise entfernte man bei den Strahlenapparaten das Ionisationsvolumen, um den Ladungsverlust zu bestimmen, der sich aus einer mangelhaften Isolation ergab. Beim Wulfschen Strahlenapparat geschah das durch Herunterlassen eines Schutzzylinders über die Fäden des Elektrometers. Die Messung ergab einen so verursachten Spannungsabfall von  $0.2 \text{ V} \cdot \text{h}^{-1}$  bei Apparat I und  $0.7 \text{ V} \cdot \text{h}^{-1}$  bei Apparat II. Beim  $\beta$ -Strahlenapparat III erfolgte die Isolationsmessung, indem der Zinkzylinder abgenommen und durch eine Schutzkappe für das Elektrometer ersetzt wurde, wodurch die stündliche Entladung unabhängig von einer Ionisation im großen Volumen bestimmt werden konnte.

Zunächst kam es Hess darauf an, ein großes Datenmaterial zu sammeln, um zuverlässige Mittelwerte zu gewinnen, vor allem auch in geringeren Höhen wie 100 oder 200 m. Gleichzeitige Parallelmessungen mit allen drei Apparaten sollten zeigen, ob sich die weicheren Strahlungskomponenten ähnlich verhalten, wie die sehr durchdringende Strahlung.

Außerdem war es ihm von Interesse, den unergründlichen Schwankungen der Strahlung auf die Spur zu kommen, von denen schon Pacini und Gockel berichtet hatten. Wie Parallelmessungen mit zwei Wulf'schen Elektrometern seitens Pacinis bereits gezeigt hatten, traten diese Schwankungen im allgemeinen zeitgleich in beiden

Geräten auf, was darauf hinweisen mochte, dass die Hauptursache der Schwankungen außerhalb der Apparate, also in der Strahlung selbst, zu suchen war. Hess wollte feststellen, ob auch während Ballonfahrten solche Schwankungen auftreten würden, und von welcher Größenordnung diese dann wären. Da solche Messungen nur über größere Zeiträume durchgeführt Erfolg versprachen, war es für Hess klar, dass er einen guten Teil seiner Flüge bei Nacht würde durchführen müssen, da es bei Nachtflügen erfahrungsgemäß viel einfacher war, den Ballon über lange Zeit in gleicher Höhe zu führen. Wiederum sollten Parallelmessungen in allen drei Apparaten zeigen, ob eventuelle Schwankungen der ionisierenden Strahlung die weicheren und härteren Komponenten der Strahlung im gleichen Ausmaß betreffen.

Aber der für Hess ganz wesentliche Punkt war die Messung der Strahlung in möglichst großen Höhen. Da die geringe Tragfähigkeit des in Wien zur Verfügung stehenden Leuchtgases und die besonderen meteorologischen Verhältnisse stets ein Erreichen bedeutender Höhen verhinderten, wandte er seinen Blick hoffnungsreich nach dem industriell weit fortgeschrittenen Böhmen, wo man den vielversprechenden Wasserstoff als Füllgas zur Verfügung hatte. Einen Flug zumindest wollte er mit einem solchen Ballon aus Böhmen probieren.

Da Hess sich immer wieder mit den Befürchtungen seiner Zeitgenossen konfrontiert sah, dass der Ballonkorb, die Ballonhülle oder der Ballastsand radioaktiv kontaminiert sein könnten und damit die Ergebnisse der Experimente verfälschten, machte er es sich zur Angewohnheit, einige Stunden vor und nach dem Erkundungsflug die Ionisation in unmittelbarer Nähe seiner Ausrüstung zu messen, um jedes Mal die völlig normalen Bodenwerte zu erhalten. Ebenso bestimmte er die Ionisation direkt bei einem größeren Ballastsandvorrat, um auch die letzten Sorgen seiner Kritiker zu zerstreuen.

Die im folgenden angegebenen Messparameter hat Hess wie folgt bestimmt: Die Höhen sind den Angaben des mitgeführten Barographen entnommen. Die zwischen Beginn und Endpunkt eines Beobachtungsintervalles liegende mittlere Höhe wurde aus der Barographenkurve mittels graphischen Verfahrens gemittelt. Die aus Kartenmaterial ermittelte Seehöhe der überflogenen Orte wurde von dieser absoluten Höhe abgezogen, was die relative Höhe, also den Abstand zur Erdoberfläche, ergab.

Während des gesamten Ballonfluges blieb der Luftdruck in den beiden Messgeräten Apparat I & II konstant und entsprach dem Luftdruck auf der Erdoberfläche, während er bei dem dünnwandigen Messgerät immer gleich dem Außendruck war, also mit steigender Seehöhe immer geringer wurde. Ausgehend von der bereits oben verwendeten Dichteformel ist die durch  $\gamma$ -Strahlung erzeugte Ionisation im Medium proportional zur Dichte des Mediums. Die Dichte der Luft im Ionisationsraum ist wiederum proportional zum darin herrschenden Druck. Daher kann man in guter Näherung annehmen, dass auch die Ionisation im Volumen proportional zum Luftdruck sein wird, wenn man davon ausgeht, dass die Ionisation durch die Eigenaktivität der Gefäßwände ebenfalls mit dem Luftdruck im Volumen geht, was z. B. dann nicht der Fall zu sein braucht, wenn es sich dabei um sehr weiche Strahlung wie z. B. die  $\alpha$ -Strahlung handelt, die bei den auftretenden Dichten auf jeden Fall zur Gänze im Ionisationsraum absorbiert wird.

Auf jeden Fall lässt sich unter obiger Annahme der gefundene Messwert leicht auf Normaldruck reduzieren, indem man die gemessene Ionisation mit dem Faktor  $b/b_0$

multipliziert, wo  $b$  der mittlere Luftdruck während der Messung und  $b_0 = 750$  mmHg ist. Die so gewonnene Ionisationsraten werden in den Messergebnissen der Ballonfahrten mit  $q_{\text{red}}$  gekennzeichnet.

#### 4.2.1. Die erste Fahrt

Die erste der sieben Fahrten war tatsächlich Viktor Hess' dritte Fahrt mit einem Freiluftballon. Sie fand am 17. April 1912 anlässlich einer Sonnenfinsternis statt, während der Hess mögliche Veränderung der Intensität der Ionisation durch ein teilweises bis vollständiges Verdecken der Sonne überprüfen wollte. Gestartet wurde im Wiener Prater um 10:30 Uhr morgens. In etwa 2000 Metern Höhe brachten Hess und sein Ballonführer Oberleutnant Heller den Ballon ins Gleichgewicht, und so trieben sie in rascher Fahrt immer Richtung West Nord West über das Niederösterreichische Waldviertel dahin. Außer Hess und seinem Ballonführer bekam in dieser Gegend kaum jemand etwas von der Sonnenfinsternis mit, da das ganze Land unter einer dichten Wolkendecke verborgen lag.

Während der Sonnenfinsternis führte die verminderte Sonneneinstrahlung dann zu einer derartigen Abkühlung des Traggases, dass die beiden um 13:36 Uhr mittags zur Landung in Wulfschau in der Nähe von Weitra, 135 km von Wien entfernt, zur Landung gezwungen waren, ohne die Messungen während aller Phasen der Finsternis vollenden zu können. Die erreichte Maximalhöhe lag bei 2750 m.

ZEIT	MITTLERE HÖHE [ m ]		BEOBACHTETE STRAHLUNG [ J ]		ANMERKUNG
	absolut	relativ	Apparat I	Apparat II	
08:33-09:33	156	0	14.4	10.7	Vor dem Aufstieg am Klubplatz
11:06-12:13	1900	1700	13.7	11.1	
12:13-12:50	2400	1700-2100	27.3	14.4	
12:50-13:26	1800	ca. 1100		15.1	

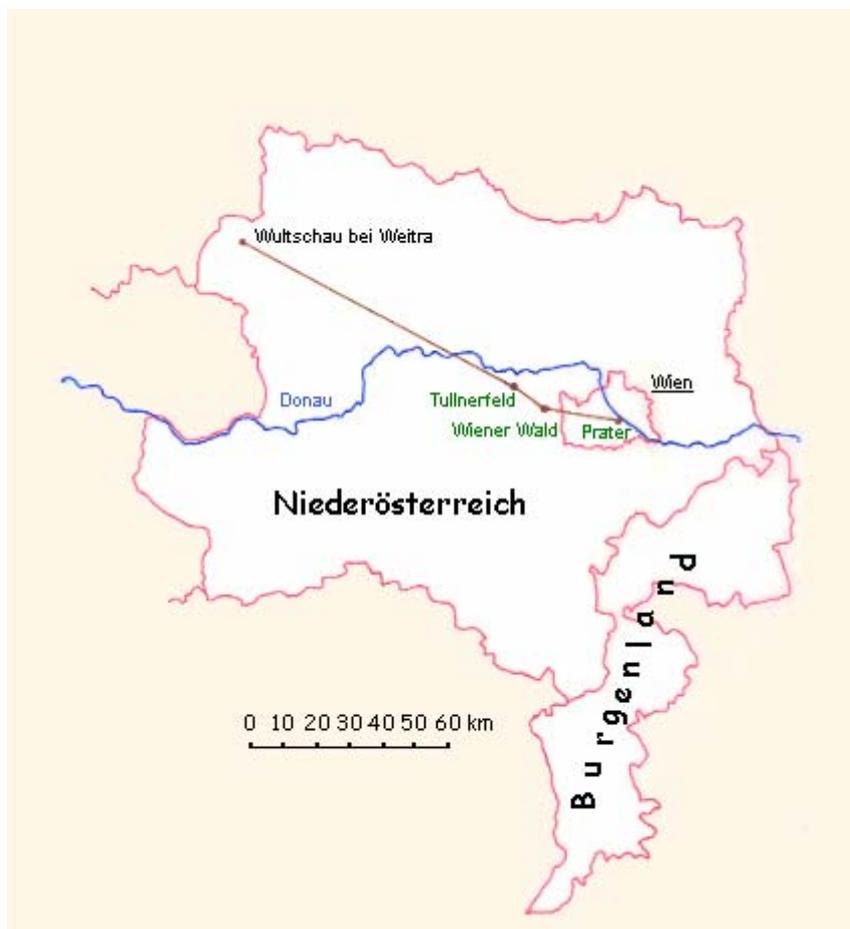
Abbildung 4-3 Ballonfahrt Viktor Hess, 17. April, 1912

Die beiden  $\gamma$ -Strahlen Apparate zeigten also übereinstimmend eine erhöhte Strahlung gegenüber den Bodenwerten. Der enorm hohe Wert 27.3 J des Apparates I muss als fehlerhaft gelten, da beim Ablesen ein kleiner Unfall passierte. Wenn man jetzt annimmt, dass ein Teil dieser durchdringenden, ionisierenden Strahlung extraterrestrischen Ursprunges ist, und zwar von der Sonne kommt, dann ist wiederum anzunehmen, dass bei zunehmender Sonnenbedeckung während einer Sonnenfinsternis durch den Mond die Intensität dieser Strahlung gehörig abnimmt.

Bei der vorletzten und letzten Messung in obiger Tabelle war die Sonnenbedeckung bereits 20 % bzw. 53 %, und dennoch war keine wesentliche Verminderung festzustellen. Hess schloss also aus dieser Messung, dass, wenn ein Teil der gesuchten Strahlung außerirdischen Ursprunges wäre, er jedenfalls nicht von der Sonne stammen

kann, das jedenfalls, solange man an eine geradlinige Ausbreitung der  $\gamma$ -Strahlung glaubt.

Dass die Sonne keinen wesentlichen Beitrag zu dieser Strahlung liefert, scheint auch daraus klar zu folgern, dass auch zwischen Messungen, die bei Tag und Nacht durchgeführt wurden, kein Unterschied festzustellen war.



**Abbildung 4-4 Die erste Ballonfahrt von Viktor Hess**

Die erste Ballonfahrt führte Hess vom Wiener Prater aus über den Kamm des Wiener Waldes und das Tullner Feld hinaus bis weit ins niederösterreichische Waldviertel. Dort landete er bei Wultschau in der Nähe von Weitra. In dieser und den weiteren Karten werden die heutigen Landesgrenzen und Namen der Länder verwendet.

#### 4.2.2. Die zweite Fahrt

Für diese zweite Fahrt hatte Viktor Hess sich vorgenommen, über lange Zeit in gleicher Höhe verweilend zu messen, um einerseits eine große Anzahl von Messwerten für eine bessere Statistik der Ergebnisse zu erhalten, und um andererseits eventuellen Schwankungen der Strahlung auf die Spur zu kommen. Wegen der einfacheren meteorologischen Bedingungen bei Nacht, die das stabile Manövrieren des Ballons erleichtern, entschieden sich Hess und sein Ballonführer Hauptmann W. Hoffory, diesen Flug bei Nacht zu unternehmen. Der Start erfolgte dann um 10:59 Uhr abends im Wiener Prater, und durch geschicktes Manövrieren gelang es, den Ballon tatsächlich über 6 Stunden in fast gleichbleibender Höhe zwischen 300 und 350 Meter zu halten.

Beob. Nr.	Zeit	Mittlere Höhe [m]		Beobachtete Strahlung [J]				Anmerkung
		absolut	relativ	Apparat I $q^I$ [J]	Apparat II $q^{II}$ [J]	Apparat III		
						$q^{III}$ [J]	$q^{III}_{red}$ [J]	
1	16:40 - 17:40	156	0	15.6	11.5	-	-	Vor dem Aufstieg am Klubplatz
2	17:40 - 18:40			18.7	11.8	21.0	21.0	
3	18:40 - 21:30			17.8	11.6	19.5	19.5	
4	21:30 - 22:30			17.8	11.3	20.0	20.0	
5	23:26 - 00:26	300	140	14.4	9.6	19.4	19.8	
6	00:26 - 01:26	350	190	16.2	9.9	17.4	17.9	
7	01:26 - 02:26	300	140	14.4	10.1	17.7	18.1	
8	02:26 - 03:32	330	160	15.0	9.6	18.2	18.7	
9	03:32 - 04:32	320	150	14.4	9.8	18.5	19.0	
10	04:32 - 05:35	300	70	17.2	13.3	20.6	21.0	
11	05:35 - 06:35	540	240	17.8	11.8	19.6	20.8	
12	06:35 - 07:35	1050	800	17.6	10.0	18.1	20.3	
13	07:35 - 08:35	1400	1200	12.2	8.8	17.3	20.3	
14	08:35 - 09:35	1800	1600	17.5	10.9	17.3	21.3	

Abbildung 4-5 Ballonfahrt Viktor Hess, 20. und 21 Mai, 1912

Das wesentliche Ergebnis dieser Ausfahrt war, dass in geringen Höhen über dem Boden die Intensität der ionisierenden Strahlung tatsächlich abnimmt. Der durchschnittliche Ionisationswert lag in den sechs Stunden vor dem Aufstieg beim Apparat I bei  $q^I=17.5$  J und beim Apparat II bei  $q^{II}=11.6$  J, beim Apparat III bei  $q^{III}=20.2$  J. Bei den Messungen 5 bis 9, die in sämtlich in Höhen zwischen 140 und 190 Metern gemacht wurden, ergeben sich gemittelt folgende Werte:  $q^I=12.6$  J,  $q^{II}=9.8$  J,  $q^{III}=18.24$  J. Im Mittel beträgt die Differenz  $2.8 \pm 1.7$  J. Diese Abnahme der Ionisation der Luft ist dadurch erklärbar, dass der Anteil der  $\gamma$ -Strahlung, der von den radioaktiven Elementen der Erdoberfläche stammt, beim Weg durch die Atmosphäre absorbiert wird. Bei einem Weg von 160 Metern durch die Atmosphäre wird  $\gamma$ -Strahlung, wie Eve berechnet und Hess verifiziert hatte, auf 24 % des ursprünglichen Wertes abgeschwächt. Bei den 2 J Differenz handelt es sich anscheinend um die entsprechenden 76 %, die von der ionisierenden Strahlung der Erdoberfläche am Weg durch die Atmosphäre absorbiert werden! Die gesamte  $\gamma$ -Strahlung der Erde dürfte daher in den Zinkgefäßen eine Ionisation von etwa 3 J verursachen!

Hess konstatierte für Ungenauigkeiten, die durch Ablesefehler verursacht waren, Werte von maximal 14 % bei Apparat I, 9 % bei Apparat II und 5.4 % bei Apparat III.

Bei den Messungen wurden jetzt Schwankungen festgestellt, die auf jeden Fall außerhalb dieser Prozentbeträge lagen. Bei Beobachtung Nr. 13 blieb Apparat I um 40 % hinter seinem Durchschnitt, und auch Apparat II zeigte gleichzeitig eine Abnahme von 2 J. Es wies alles darauf hin, dass es sich dabei um eine Schwankung der Intensität der Strahlung selbst handelte. Dass der Apparat III gleichzeitig keine größere Änderung der Strahlungsintensität anzeigte, lag wohl zum Teil am etwas veränderten Verhalten der weicheren Strahlungskomponenten.

Eine zweite zweifellos reelle Schwankung der Strahlung wurde bei der Beobachtung Nr. 10 gefunden, wo alle Messwerte um einige J zunehmen. Diese Zunahme hängt jedenfalls nicht mit der größeren Nähe zur Erde zusammen, die sich hier auf 70 Meter beläuft, da dies allen anderen bisher gemachten Beobachtungen widersprechen würde.

Nachdem Pacini am Erdboden und auch über dem Meer ebenfalls solche Schwankungen festgestellt hatte, wollte Hess nicht länger an ihnen und ihrer Ursache in der Strahlung zweifeln. Um so mehr nicht, als diese Schwankungen von keinerlei meteorologischen Veränderungen begleitet waren, die diese hätten bedingen können.

Mit dem weiteren Gewinnen an Höhe stiegen auch die Ionisationswerte wieder an, bis sie bei 800 bis 1600 Meter ähnliche Werte wie an der Erdoberfläche erreichten.

Eine wesentliche Erkenntnis aus jener Nacht war, dass die radioaktive  $\gamma$ -Strahlung der Erdrinde keineswegs den überwiegenden Teil der Gesamtstrahlung ausmacht. Außerdem zeigten sich Schwankungen der Strahlung, die darauf hinweisen, dass außer den radioaktiven Substanzen der Erde und der Atmosphäre noch eine andere Strahlungsquelle vorhanden sein muss. Letztlich zeigt sich in Höhen von 800 bis 1000 Metern wieder eine kleine Zunahme der Strahlung, weshalb die Möglichkeit der Existenz einer von oben kommenden Strahlung nicht auszuschließen ist.



**Abbildung 4-6 Die zweite Ballonfahrt von Viktor Hess**

Diese Fahrt führte von der Praterwiese zunächst nach Süden. Von dort ging es wieder in nördliche Richtung über Klosterneuburg nach Stockerau und dann mit zunehmender Geschwindigkeit über Russbach und Guntersdorf hinweg über die mährische Grenze bis nach Pausram südlich von Brünn.

### 4.2.3. Die dritte Fahrt

Die dritte Fahrt fand in der Nacht vom 20. auf den 21. Mai 1912 statt. Der Wind trieb den Ballon während der Nacht in Richtung NNW, und da dabei das Terrain ständig anstieg, musste stetig Ballastsand abgeworfen werden. Als gegen Morgen die Sonne den Ballon immer höher zog und für eine Landung aus größerer Höhe nicht mehr genügend Bremsand zur Verfügung stand, ging Hess um 05:00 Uhr 235 km von Wien entfernt am Schlachtfeld von Königgrätz nieder.

Bei diesem Ausflug las Hess nicht nur wie gewohnt seine drei Strahlenapparate ab, sondern auch meteorologische Elemente, ein Aspirationsthermometer und ein Hygrometer, von Herrn E. Wolf von der meteorologischen Zentralanstalt in Wien, um so genauere Kenntnis von etwaigen meteorologischen Einflüssen auf die Werte der ionisierenden Strahlung zu erhalten. Die Werte aller Messgeräte sind in der nachfolgenden Tabelle festgehalten.

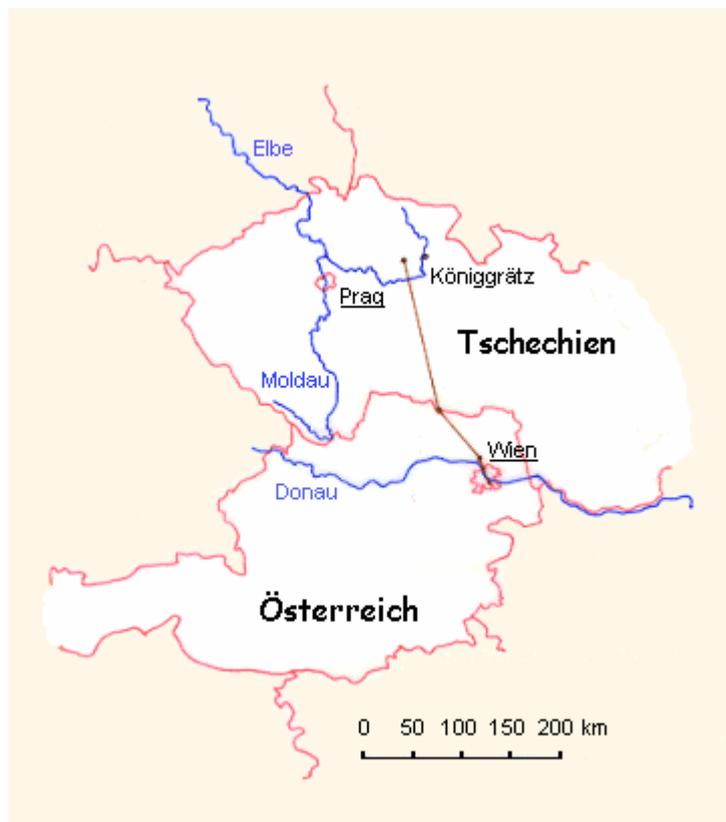
Die Beobachtungen der Strahlenapparate zeigten einen übereinstimmenden Gang. Wieder fand sich fast kein Unterschied zwischen den Messwerten in geringen Höhen von 150 bis 350 Metern über dem Boden zu denen, die vor dem Abflug am Boden aufgenommen wurden. Der Schluss von Hess war, dass die Abnahme der  $\gamma$ -Strahlung vom Erdboden her sehr wahrscheinlich durch zufällige Erhöhung der übrigen Strahlung ausgeglichen wird. In einer Höhe von rund 500 Metern über der Erdoberfläche allerdings trat eine Abnahme der Werte deutlich hervor.

Beob. Nr.	Zeit	Mittlere Höhe		Beobachtete Ionisationsrate				Temperatur [ ° C ]	Relative Feuchtigkeit [ % ]	Anmerkungen
		absolut [ m ]	relativ [ m ]	App. I $q^I$ [ J ]	App. II $q^{II}$ [ J ]	App. III				
						$q^{III}$ [ J ]	$q^{III}_{red.}$ [ J ]			
1	17:03-18:03	156	0	16.5	10.9	---	---	---	Vor dem Aufstieg in Wien	
2	18:03-19:03			17.3	11.0	20.1	20.1	---		---
3	19:03-20:33			17.4	12.1	19.3	19.3	---		---
4	20:33-21:26			16.2	11.5	19.7	19.7	16.0		69
5	22:34-23:34	600	340	15.3	10.2	17.5	18.5	15.2		70
6	23:34-00:36	640	190	18.1	12.2	18.4	19.5	12.8		80
7	00:36-01:36	700	150	17.1	10.7	17.9	19.2	12.0		88
8	01:36-02:36	850	220	17.3	11.5	18.0	19.6	13.0		80
9	02:36-03:36	900	470	15.3	10.2	16.7	18.3	14.6		69
10	03:36-04:27	800	500	14.0	8.9	15.6	16.9	---		---

Abbildung 4-7 Ballonfahrt Viktor Hess, 20. – 21. Mai, 1912

Die Mittelwerte der Messungen vor dem Aufstieg sind  $q^I=16.9$  J,  $q^{II}=11.4$  J und  $q^{III}=19.7$  J. Ganz ähnlich sind dann die gemittelten Messwerte in geringer Höhe zwischen 150 und 340 m:  $q^I=16.9$  J,  $q^{II}=11.1$  J und  $q^{III}=19.2$  J. Die Abnahme wird deutlich, wenn man diese Mittelwerte mit denen der Messwerte in einer Höhe von 500 Metern vergleicht:  $q^I=14.7$  J,  $q^{II}=9.6$  J und  $q^{III}=17.6$  J. Die Differenz zu den am Boden bestimmten Mittelwerten beträgt jeweils 2.2, 1.8, und 2.1 J. Dadurch erschien

Hess der schon bei der zweiten Fahrt gezogene Schluss gerechtfertigt, dass die von der Erdoberfläche allein stammende Strahlung nicht mehr als etwa 3 J im Mittel beträgt.



**Abbildung 4-8 Die dritte Ballonfahrt von Viktor Hess**

Die dritte Fahrt führte Hess von Wiener Prater über Korneuburg und dann weit über die tschechische Grenze. Kurz nach Überquerung der Elbe landete Hess am alten Schlachtfeld bei Königgrätz.

#### 4.2.4. Die vierte Fahrt

Die vierte Fahrt fand in der Nacht vom 3. auf den 4. Juni 1912 statt und war eigentlich als Hochfahrt geplant. Hess wollte nach einer langen Nacht der bodennahen Messungen den wärmenden Einfluss der Morgensonne nutzen, um in den frühen Morgenstunden des 4. Junis in besonders großen Höhen Messungen der ionisierenden Strahlung anzustellen. Dafür hatte er sich von einem Privatmann einen besonders großen, 2200 m<sup>3</sup> fassenden Ballon „Astarte“ geliehen. Allerdings gerieten Hess und sein Flugbegleiter gegen Mitternacht an eine Gewitterfront, die sie zur Landung um 01:30 Uhr auf einer Wiese 30 km nördlich von Brünn zwang. Nachdem das Gewitter vorbeigezogen war, und eine dichte Cirrusbewölkung am nächsten Morgen einen neuerlichen Aufstieg unmöglich machte, wurde das Unternehmen abgebrochen.

Wie man aus der neuen Tabelle ersehen mag, sind die Messwerte in einer Höhe von 830 bis 1120 m schon wieder fast gleich groß, wie die Werte vor dem Aufstieg. Nur beim Apparate III ergibt sich bei 1200 m nach Reduktion auf normalen Luftdruck schon eine kleine Zunahme der Strahlenwirkung.

Beob. Nr.	Zeit	Mittlere Höhe [m]		Beobachtete Ionisationsrate				Temperatur [°C]	Relative Feuchtigkeit [%]	Anmerkungen
		absolut [m]	relativ [m]	App. I $q^I$ [J]	App. II $q^II$ [J]	App. III				
						$q^III$ [J]	$q^III_{red.}$ [J]			
1	17:11-18:21	156	0	15.3	12.4	---	---	---	---	Vor dem Aufstieg in Wien
2	18:21-18:58			15.9	10.2	---	---	18.0	55	
3	18:58-20:43			16.2	12.4	21.3	21.3	---	---	
4	22:25-23:26	1100	830	15.8	10.6	19.0	21.4	12.9	57	
5	23:26-00:29	1400	1120	15.1	11.8	19.0	22.1	8.1	68	

Abbildung 4-9 Ballonfahrt Viktor Hess, 3. – 4. Juni, 1912



Abbildung 4-10 Die vierte Ballonfahrt von Viktor Hess

Seine vierte Ballonfahrt führte Hess vom Prater über Leitzersdorf und Wullersdorf-Alberndorf nach Mähren wo er bei Króvy, 30 km nordwestlich von Brunn, landete.

#### 4.2.5. Die fünfte Fahrt

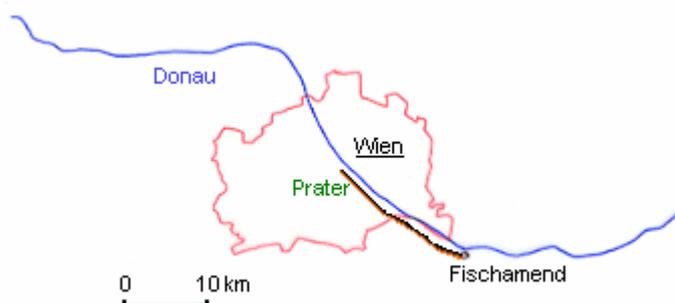
Das war die erste Fahrt, die Hess auf sich alleine gestellt durchführte. Da er sowohl die Strahlungsmessungen wie die Führung des Ballons zu besorgen hatte, nahm er auf diesen Flug bloß den Apparat II mit. Er startete um 05:10 Uhr nachmittags vom altbewährten Klubplatz auf der Praterwiese auf. In einer Höhe von 500 m geriet er in

eine schwache Luftströmung nach Südost, und so trieb er bis 07:00 Uhr Abends bei einer Maximalhöhe von 1200 m bis Fischamend, wo er landete.

Beob. Nr.	Zeit	Mittlere Höhe		Beobachtete Strahlung	Anmerkungen
		absolut [ m ]	relativ [ m ]	Apparat II $q^{\text{II}}$ [ J ]	
1	15:12-16:12	156	0	12.3	Vor dem Aufstiege am Klubplatz
2	16:12-16:57			14.5	
3	17:29-18:14	1000	850	10.7	
4	18:14-18:41	1100	950	9.8	

**Abbildung 4-11 Ballonfahrt Viktor Hess, 19. Juni, 1912**

Was man aus dem spärlichen Beobachtungsmaterial herauslesen mag, ist eine deutliche Abnahme der Strahlungswerte. Den relativ hohen Wert von  $14.5 \text{ J}$  kurz vor dem Aufstieg interpretierte Hess als eine der oft beobachteten Schwankungen der ionisierenden Strahlung, denen er später noch auf den Grund gehen wollte. Die beiden in 850 und 950 m Höhe gefundenen Werte ergeben im Mittel  $10.3 \text{ J}$ , was um etwa  $2 \text{ J}$  niedriger liegt, als der Durchschnittswert auf dem Boden. Hess schloss, dass die konstatierbare Abnahme der Strahlung bis etwa 1000 m über den Boden reichen dürfte. Bei der vorhergehenden, der fünften Fahrt, war ja in etwa 1000 m über dem Boden keine Verminderung der Strahlung festzustellen gewesen. Da diese letzte Fahrt aber bei ganz ungewöhnlichen, nämlich gewittrigen Verhältnissen unternommen worden war, so schloss Hess, dass unter Umständen die normale Abnahme der Strahlung der Erdoberfläche durch Zunahme der übrigen Strahlung überdeckt werden kann, was dann bei der letzten, der fünften Fahrt der Fall gewesen wäre.



**Abbildung 4-12 Die fünfte Ballonfahrt von Viktor Hess**

Bei seiner fünften Fahrt stieg Hess im Wiener Prater auf. Während seines Fluges folgte er dem Verlauf der Donau in südöstlicher Richtung und landete schließlich bei Fischamend.

#### 4.2.6. Die sechste Fahrt

Auch die sechste Fahrt, die während der Nacht vom 28. auf den 29. Juni 1912 stattfand, hatte zum Ziel, eine Messreihe in Bodennähe aufzunehmen, um seinerzeit erhaltene Resultate womöglich zu bestätigen. Hess übernahm wieder die Führung des Ballons, weshalb er nur zwei Messgeräte mitnehmen konnte, da er mehr unmöglich betreuen konnte. Bei dem Flug begleitete ihn aber Herr E. Wolf vom meteorologischen

Zentrum als meteorologischer Beobachter. Der Aufstieg erfolgte um 11:36 Uhr Abends vom Prater aus. Die erreichte Maximalhöhe betrug 1170 m, der Himmel war die ganze Nacht wolkenlos, und über mehrere Stunden gelang es den beiden wackeren Forschern, den Ballon in einer Höhe zwischen 280 und 350 Metern zu halten.

Beob. Nr.	Zeit	Mittlere Höhe		Beobachtete Ionisationsrate		Temperatur [ ° C ]	Relative Feuchtigkeit [ % ]	Anmerkungen
		absolut [ m ]	relativ [ m ]	Apparat I $q^I$ [ J ]	Apparat II $q^{II}$ [ J ]			
1	20:10-21:24	156	0	15.0	12.3	---	---	Vor dem Aufstieg
2	21:24-23:12			16.0	12.1	17.1	92	
3	00:37-01:38	280	90	14.0	11.5	18.0	68	
4	01:38-02:38	340	170	15.9	13.1	16.2	80	
5	02:38-03:38	250	180	15.4	11.4	16.5	85	
6	03:38-04:38	340	170	15.8	11.4	16.4	84	
7	04:38-05:38	550	360	13.4	9.8	18.3	50	

Abbildung 4-13 Ballonfahrt Viktor Hess, 28. – 29. Juni, 1912

Die Messwerte der beiden Apparate liefen wieder nahezu parallel. Bei geringen Höhen über dem Boden wie bei der dritten Messung ist die Abnahme der Strahlung ganz deutlich zu beobachten. Der Mittelwert der Messungen nimmt in einer Höhe von 90 Metern verglichen mit dem Wert an der Erdoberfläche bei Apparat I um **1.5 J** und bei Apparat II um **0.7 J** ab. Die festgestellte Verminderung der ionisierenden Strahlung in dieser Höhe liegt jedenfalls bei dem erwarteten Wert von etwa 1 J.

Die Messwerte 4, 5 und 6 sind hingegen unerwartet hoch. Hess ist sich aber seiner Sache sicher und schließt daraus eine Erhöhung der ionisierenden Strahlung durch eine der zufälligen Schwankungen, die ja bisher immerhin schon des öfteren festzustellen waren. Dadurch ist bei diesen Werten die erwartete Abnahme der  $\gamma$ -Strahlung von der Erdrinde nicht erkennbar. Sehr deutlich tritt hingegen wieder die Abnahme bei der Messung Nr. 7 vor allem beim Apparat II zutage. In 360 Metern über dem Boden betrug die Abnahme zum Erdoberflächenmittel **1.2 J** bzw. **2.4 J**.

Berechnet man die Strahlung, die durch einen Weg von 360 Metern durch die Atmosphäre um etwa 2.4 J abgeschwächt wird, so ist wieder der Schluss zu ziehen, dass die  $\gamma$ -Strahlung der Erdoberfläche nicht mehr als 3 J im Wulfschen Strahlenapparat erzeugt.



**Abbildung 4-14 Die sechste Ballonfahrt von Viktor Hess**

Bei seiner sechsten Fahrt startete Hess im Wiener Prater. Dann trieb der Ballon über den Laaerberg bis Himberg und weiter über Ebergassing zum Leithagebirge. Von dort ging es zurück nach Norden bis Maria Ellend, wo Hess 28 km vor Wien landete.

#### 4.2.7. Die siebente Fahrt – Die Entdeckung der *Kosmischen Strahlung*

Der Aufstieg vom 7. August, 1912 war als reine Hochfahrt geplant. Hess interessierte sich nicht mehr für ein längeres Verweilen in einer niedrigen Höhe, um eine große Menge an statistisch gesicherteren Daten zu erhalten, sondern seine Begeisterung galt jetzt allein dem Verlauf der Intensität der ionisierenden Strahlen in der Atmosphäre. Um wirklich große Höhen erreichen zu können war Wien aus zwei Gründen kein optimaler Startplatz. Zum ersten wurde vom k. u. k. Aeroklub ein nicht sehr tragkräftiges Leuchtgas zum Befüllen der Ballone verwendet, zum zweiten waren die meteorologischen Bedingungen aus verschiedenen Gründen für ein Aufsteigen in große Höhen eher ungünstig.

Daher entschloss Hess, dieses Mal von Aussig an der Elbe aus zu starten, einem an der Elbe gelegenen Ort im nördlichen Böhmen. Er bekam den mit 1680 m<sup>3</sup> Wasserstoff gefüllten Ballon *Böhmen* zur Verfügung gestellt, mit dem um 06:12 Uhr morgens gestartet wurde. Der Ballonführer war der altbewährte Hauptmann W. Hoffory, E. Wolf übernahm wieder die meteorologische Beobachtung, und als luftelektrischer Beobachter war Hess dabei. Sie trieben in nördliche Richtung davon und erreichten im Laufe des Vormittags in der Gegend des Schwielochsees eine maximale Höhe von 5350 Metern. Hess litt trotz zusätzlicher Sauerstoffinhalation derartig schwer unter der Höhenkrankheit, dass er bereits um 12:15 Uhr wieder landen musste – einen weiteren Versuch einer Hochfahrt hat er dann anderen überlassen.

Am Aufstiegsort konnte Hess dieses Mal keine vorbereitenden Messungen durchführen, doch konnte er direkt nach der Landung unter dem noch nicht aufgerissenen Ballon einige Messungen durchführen, die zeigten, dass Ballon und Ballast durchaus nicht kontaminiert waren.

Diese Fahrt erfolgte ausnahmsweise nicht bei ausgesprochenem Schönwetter. Die Sonne hielt sich während des gesamten Fluges hinter einer sehr hohen Altocumulusdecke verborgen. Diese ungewöhnlich hoch liegende Wolkendecke dürfte ihre untere Grenze in einer Höhe von mindesten 6000 Metern gehabt haben. Auf jeden Fall befand sich der Ballon während der ganzen Fahrt niemals selbst in einer Wolke, was Hess mit Entschiedenheit festhielt, da er aus Berichten wusste, dass in Wolken auf Grund noch ungeklärter Phänomene die ionisierende Strahlung stark zunehmen konnte.



**Abbildung 4-15 Die siebente Ballonfahrt von Viktor Hess**

Bei seiner siebenten Fahrt stieg Hess von Karbitz westlich von Aussig an der Elbe auf. Die Fahrt führte ihn nach Norden über die sächsische Grenze bei Peterswalda, dann ging es weiter über Struppen bei Pirna, Hohnstein-Ehrenberg, Bischofswerda, Hoyerswerda, Kottbus und den Schwielochsee. Dann landete er bei Piskow am Scharmützelsee, 50 km östlich von Berlin.

Nach dieser Fahrt hatte Hess endlich die Gelegenheit, in knapper Folge über große Höhenunterschiede erworbene Messwerte zu vergleichen.

Die Betrachtung der Ergebnisse der Apparate I und II ergibt zunächst, dass die Strahlung in einer Höhe von 1400 bis 2500 Metern in etwa ebenso groß wie die an der Erdoberfläche vorgefundene ist. Dann aber beginnt mit einem weiteren Aufstieg eine dramatische Zunahme der Strahlungsleistung! In 3600 Metern relativer Höhe war die von Hess gemessene Strahlung bereits um 4 bis 5 J höher als am Boden. Auch der dünnwandige Apparat, bei dem die aus Elektronen bestehende  $\beta$ -Strahlung teilweise wirksam werden konnte, zeigte eine deutliche Erhöhung der beobachteten Werte. In einer relativen Höhe von 1400 bis 2500 Metern war aus dem Messwerten bereits eine

Zunahme von 3 bis 4 J ersichtlich, wo die beiden anderen Apparate, druckdicht und dickwandig wie sie waren, nur eine geringfügige Zunahme anzeigten. Der Anstieg der Messwerte im dünnwandigen Apparat ist freilich noch um einiges augenscheinlicher, wenn man die Werte auf normale Dichte der Luft im Ionisationsvolumen reduziert. Dann ist der Wert in einer Höhe von 3600 Metern bereits fast doppelt so groß wie am Boden. Die Messung mit dem Apparat III fand um 10:45 Uhr ein abruptes Ende, als der höhenkranke Hess in einer ungeschickten Bewegung kurz vor dem Ablesen in Maximalhöhe das Messgerät entlud.

Beob. Nr.	Zeit	Mittlere Höhe		Beobachtete Strahlung [J]				Temperatur [°C]	Relative Feuchtigkeit [%]	Anmerkungen
		absolut [m]	relativ [m]	App. I $q^I$ [J]	App. II $q^{II}$ [J]	App. III				
						$q^{III}$ [J]	$q^{III}_{red.}$ [J]			
1	15:15-16:15	156	0	17.3	12.9	---	---	---	Zwei Tage vor dem Aufstieg am Klubplatz in Wien	
2	16:15-17:15			15.9	11.9	18.4	18.4	---		
3	17:15-18:15			15.8	11.2	17.5	17.5	---		
4	06:45-07:45	1700	1400	15.8	14.4	21.1	25.3	+ 6.4	60	
5	07:45-08:45	2750	2500	17.3	13.3	22.5	31.2	+ 1.4	41	
6	08:45-09:45	3850	3600	19.8	16.5	21.8	35.2	- 6.8	64	
7	09:45-10:45	4400-5350 (4800)	4700	40.7	31.8	---	---	- 9.8	40	
8	10:45-11:15	4400	4200	28.1	22.7	---	---	---	---	
9	11:15-11:45	1300	1200	(9.7)	(11.5)	---	---	---	---	
10	11:45-12:10	250	150	11.9	10.7	---	---	+ 16.0	68	
11	12:25-13:12	140	0	15.0	11.6	---	---	+ 18.0	76	

Abbildung 4-16 Ballonfahrt Viktor Hess, 7. August 1912

Bei den Gamma-Strahlenapparaten I und II wurden während der 1½ Stunden, da der Ballon sich in einer Höhe von 4400 bis 5350 Metern aufhielt, die ungemein hohen Strahlungswerte von 40.7 und 31.8 J abgelesen, die also bereits mehr als doppelt so groß wie an der Erdoberfläche waren. Auch beim dann rasch erfolgenden Abstieg wurden in der Höhe von 4400 Metern die recht hohen Werte von  $q^I=28.1$  J und  $q^{II}=22.7$  J gefunden. Beim weiteren, ziemlich raschen Fall von etwa  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  wurde im Apparat I der sehr niedrige Wert von 9.7 J gemessen, während Apparat II einen durchaus normalen Wert anzeigte. Hess folgerte daraus, dass es sich keineswegs um eine der schon oft beobachteten zufälligen Schwankungen der untersuchten Strahlung handeln dürfte, sondern er nahm einige ähnliche Beobachtungen zusammen, wo Apparat I einen weitaus geringeren Wert anzeigte als Apparat II (Fahrt 1, Beobachtung Nr. 3; Fahrt 2, Beobachtung Nr. 13; Fahrt 7, Beobachtung Nr. 9,10), zählte eins und eins zusammen und folgerte, dass wohl die etwas dickeren Fäden des Elektrometers des Strahlenapparates I eine gewisse Steifigkeit und damit größere Trägheit als die des Apparates II aufweisen dürften.

Kurz vor der Landung wurden in der Höhe von etwa 150 Metern wieder leicht erniedrigte Werte von  $q^I=11.9$  J und  $q^{II}=10.7$  J gemessen, was die bereits öfter

strapazierte Theorie unterstützt, dass die durch die Erdrinde verursachte radioaktive Strahlung auf ihrem Wege durch die Atmosphäre absorbiert und verringert wird. Die unmittelbar nach der Landung direkt unter dem noch gefüllten Ballon am Landungsorte erhaltenen Messwerte sind wiederum ganz normal.

Das wichtigste Resultat, das für Hess aus den Ergebnissen dieser Fahrt zu ziehen war, lautete, dass in Höhen jenseits der 3000 Meter von allen drei Apparaten übereinstimmend eine deutliche Zunahme der durchdringenden Strahlung angezeigt wurde. Da Hess nicht erwarten konnte oder wollte, dass sich gerade in Höhen um die 5000 Metern viel mehr radioaktive Zerfallsprodukte ansammeln wollten, als in den unteren Luftschichten, so war für ihn die Annahme nicht mehr von der Hand zu weisen, dass eine Strahlung von sehr hoher Durchdringungskraft von oben her in die Atmosphäre der Erde eindringt.

### 4.3. Schlussfolgerungen

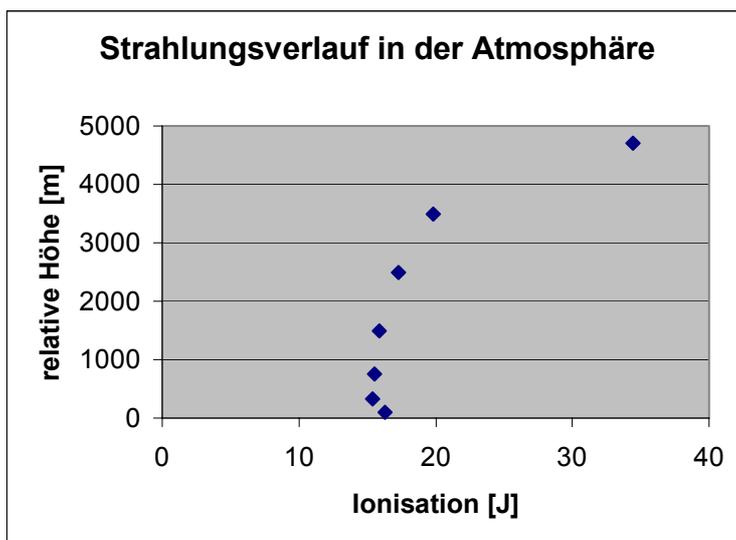
Nimmt man alle beobachteten Messwerte zusammen, ordnet sie nach Höhenstufen und bestimmt den Mittelwert, so erhält man die Tabelle aus Abbildung 4-17. Da die Messungen unter völlig verschiedenen Verhältnissen, was die Tageszeit, die Witterung und weitere Umstände wie schon die erwähnten regelmäßigen und zufälligen Schwankungen der Strahlung betrifft, so mag man sich fragen, ob eine Mittelung der Werte zulässig ist. Jedenfalls hat Hess diesen Schritt unternommen, und wenn man auch auf keinen Fall etwa den endgültigen genauen Verlauf der Intensität der Strahlung mit der relativen Höhe aus der Tabelle lesen kann, so bekommt man doch einen ersten wagen Eindruck der tatsächlichen Gegebenheiten.

Mittlere Höhe über dem Boden	Beobachtete Strahlung [J]			
	Apparat I $q^I$	Apparat II $q^{II}$	Apparat III	
			$q^{III}$	$q^{III}_{red.}$
0 (am Boden)	16.3 (18)	11.8 (20)	19.6 (9)	19.6 (9)
Bis 200	15.4 (13)	11.1 (12)	18.5 (8)	19.1 (8)
200 – 500	15.5 (6)	10.4 (6)	17.7 (5)	18.8 (5)
500 – 1000	15.6 (3)	10.3 (4)	18.5 (2)	20.8 (2)
1000 – 2000	15.9 (7)	12.1 (8)	18.7 (4)	22.2 (4)
2000 – 3000	17.3 (1)	13.3 (1)	22.5 (1)	31.2 (1)
3000 – 4000	19.8 (1)	16.5 (1)	21.8 (1)	35.2 (1)
4000 – 5200	34.4 (2)	27.2 (2)	---	---

Abbildung 4-17 Ballonfahrten Viktor Hess, eine Zusammenfassung

Aus der Tabelle können zusammenfassend noch einmal die wichtigsten Schlüsse abgelesen werden. Zunächst nimmt die Strahlung unmittelbar über der Erdoberfläche ab. Die Abnahme liegt bei den drei Apparaten zwischen 0.8 J und 1.4 J, erstreckt sich bis in eine Höhe von etwa 1000 Metern und ist offenbar durch eine Absorption der  $\gamma$ -Strahlung der radioaktiven Elemente der Erde durch die Atmosphäre verursacht.

Daraus wäre zu folgern, dass die  $\gamma$ -Strahlung der Erdoberfläche nicht mehr als 3 J zur Gesamtionisation in den Strahlenapparaten beiträgt.



**Abbildung 4-18 Strahlungsverlauf in der Atmosphäre**

In diesem Diagramm sind die Werte aus Abbildung 4-17 graphisch dargestellt.

Die Zunahme der Strahlungsintensität zwischen 1000 und 2000 Metern macht die Strahlungsminderung durch die atmosphärische Absorption bereits wieder wett, in 4000 bis 5200 Metern Höhe ist die strahlungsbedingte Ionisation relativ zur Erdoberfläche bereits um 15 bis 18 J angewachsen.

Reduziert man die Ergebnisse, die mit den dünnwandigen Apparaten gewonnen wurden, auf normale Dichte, so stellt man, verglichen mit den dickwandigen  $\gamma$ -Strahlen Messapparaten, eine noch deutlichere Zunahme der ionisierenden Wirkung der durchdringenden Strahlung fest. Es hat den Eindruck, als nähme die weichere  $\beta$ -Strahlung bereits ab 500 Metern aufwärts wieder zu, und als ob diese Zunahme viel größer als bei der harten  $\gamma$ -Strahlung sei.

Die wesentliche Frage, zu der all die Experimente und Messergebnisse hinführten, und die sich natürlich auch Hess stellen musste, lautete, wo denn diese an allen drei Apparaten gleichzeitig und übereinstimmend festgestellte, und im Diagramm Abbildung 4-18 dargestellte Zunahme der Strahlung in größeren Höhen herrührte.

Keinesfalls ist dieses Verhalten damit zu erklären, dass allein die radioaktiven Elemente in der Erdkruste für die ionisierenden Strahlen verantwortlich zeichnen. Denn dann könnten auf Grund der Absorption der  $\gamma$ -Strahlung in der Atmosphäre 500 Meter über dem Boden kaum mehr 10 % dieser Strahlung wirksam sein, und die derartig verursachte Leitfähigkeit der Luft müsste mit steigender Höhe schnell gegen null streben.

Eine andere Möglichkeit der Erklärung des seltsamen Verhaltens der durchdringenden Strahlung in der Atmosphäre könnte so gedacht werden, dass ihrerseits radioaktive Zerfallsprodukte, und da vor allem das Zerfallsprodukt des Radiums, nämlich das sehr bewegliche Edelgas Radon, sich in der Atmosphäre verteilen, und so in verschiedenen Höhen zu ganz unterschiedlichen Strahlungsbilanzen führen. Gegen diese Annahme sprechen aber die mit größter Sorgfältigkeit und Ausdauer durchgeführten Messungen

von Viktor Hess. Unermüdlich und immer aufs Neue stieg er mit den Freiballonen auf, wodurch es gelang, eine größere Menge an Messergebnissen in verschiedenen Höhen, zu verschiedenen Tages- und Nachtzeiten und bei sehr unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen zu sammeln. Denkbar wären solche Anhäufungen von radioaktiven Elementen, die zu einer solchen Verstärkung der Ionisationsleistung führen könnten, nur regional beschränkt, zum Beispiel in Cumuluswolken, die womöglich durch die Wirkung der radioaktiven Elemente als Kondensationskeime entstanden sein mögen, oder in Stabilitätsschichten mit Temperaturinversion. Aber eine derartig gleich- und regelmäßige Zunahme der ionisierenden Strahlung, wie sie von Hess entdeckt wurde, ist auf solch eine Art und Weise sicherlich nicht erklärbar.

Ebenso spricht gegen diese Theorie eine weitere Entdeckung von Hess, nämlich die plötzliche, scheinbar zufällige Schwankung der Intensität der ionisierenden Wirkung der untersuchten Strahlung, die für gewöhnlich auch bei vollkommener Ruhe der Atmosphäre zu beobachten war. Eine derartig große Änderung der Verteilung von Radon in der Atmosphäre ist beim Fehlen jeglicher meteorologischer Veränderung wahrlich nicht denkbar, so Hess.

Die einzige Theorie, die Hess geeignet erschien, dieses Phänomen zu erklären, war eine Theorie, die vor ihm auch schon Theodor Wulf formuliert hatte, zu deren näheren Erforschung Wulf aber die Mittel und Möglichkeiten fehlten.

Hess nahm an, dass eine Strahlung von sehr hoher Durchdringungskraft von oben her in die Atmosphäre der Erde eindringe und auch noch in den untersten Schichten für einen Teil der in geschlossenen Gefäßen erzeugten Ionisation verantwortlich ist. Die Intensität dieser Strahlung scheint zeitlichen Schwankungen unterworfen zu sein, die auch noch in einstündigen Messintervallen feststellbar ist.

Da Hess auch die Gelegenheit wahrnahm, während einer Sonnenfinsternis seine Messungen durchzuführen, und auch bei dieser Gelegenheit keine Abnahme dieser hypothetischen, durchdringenden Strahlung wahrnehmen konnte, so zog er den Schluss, dass diese Strahlung ihren Ursprung auch nicht in der Sonne haben konnte, wenn man dabei von sich geradlinig ausbreitenden Gamma Strahlen ausgehen wollte.

Akzeptiert man dieses Erklärungsmodell, dann hat auch die plötzliche und sehr starke Zunahme der Ionisationswirkung der Strahlung ab etwa 4000 Metern nichts Überraschendes mehr. Da es sich, wie angenommen, um eine sehr harte  $\gamma$ -Strahlung handeln würde, müsste ihre Intensität gemäß der Absorption in der Atmosphäre einer Exponentialkurve folgen, was eine weitere starke Zunahme in höheren Schichten der Atmosphäre erwarten ließe. In der Nähe der Erde werden die Verhältnisse allerdings komplizierter, da hier noch die Aktivitäten der radioaktiven Elemente der Erdoberfläche und der Radongehalt der Atmosphäre zur Strahlungsbilanz beitragen.

Nun hatten im Vorfeld einige Forscher, darunter Theodor Wulf, Albert Gockel, Simpson, Wright und McLennan einige Experimente angestellt, die zu beweisen schienen, dass die ionisierende Strahlung in unmittelbarer Erdbodennähe ihren Ursprung hauptsächlich in den radioaktiven Elementen des Bodens fände, während Hess jetzt meinte, folgern zu können, dass nur maximal 3 J vom Boden stammten, und der Rest sich aus einer Summe der Wirkungen der hypothetischen, von oben in die Atmosphäre einfallenden, sehr durchdringenden Strahlung und einer Restaktivität des für die Konstruktion der Messapparate verwendeten Materials ergäbe.

Es war nun an Hess, die Widersprüche zwischen seinen und anderer Experimente aufzulösen. Tatsächlich gelang dies Hess leicht, indem er zeigte, dass sich nicht die Ergebnisse der Experimente widersprachen, sondern die Interpretationen:

Man hatte bei Messungen über Wasser und großen Eisflächen übereinstimmend festgestellt, dass schon bei geringen Distanzen zum Festland die Ionisation stark, und zwar um 4 bis 6 J, abnimmt. Der naheliegende Schluss war natürlich, dass die Quelle der Strahlung dann wohl auch zum Großteil der Erdboden ist, da ja die Strahlung zum Großteil verschwand, wenn man sich vom Erdboden entfernte.

Auch hier dachte Hess wieder weiter und konnte, indem er das gesamte Wissen verwendete, das damals über Radioaktivität bestand, auch dieses Phänomen hinreichend erklären. Er wusste bereits, dass  $\gamma$ -Strahlung beim Auftreffen auf Materie eine Sekundärstrahlung erzeugen kann, die im selben Maße zunimmt, wie die Dichte der betroffenen Materie. Diese Sekundärstrahlung ist wiederum durch ihre ionisierende Wirkung nachweisbar. Das bedeutet, dass man mit den Wulf'schen Strahlenapparaten nicht nur die eigentliche Strahlung nachweist, sondern auch die Sekundärstrahlung. Da in der Erdkruste sehr viel höhere Dichten zu finden sind als über dem Wasser, so ist dort auch die Intensität der Sekundärstrahlung viel größer und die gefundene Ionisation viel höher. Somit stehen die früheren Entdeckungen in keinem Widerspruch mehr zu der von Hess konstatierten außerirdischen Strahlung.

Während viele Zeitgenossen von Hess noch nicht von der Existenz einer Strahlung, die vom Kosmos her in die Atmosphäre der Erde eindringen soll, überzeugt waren, machten sich andere sofort daran, dieses neue Phänomen weiter zu untersuchen und womöglich weiter aufzuklären. Der Zugang von Hess zu der von ihm entdeckten *Kosmischen Strahlung* war über die elektrischen Eigenschaften der Atmosphäre erfolgt. Daher hatte er die *Kosmische Strahlung* auch vermittels ihrer luftelektrischen Eigenschaften, also ihrer Fähigkeit, die Luftmoleküle zu ionisieren und dadurch die Luft selbst leitfähig zu machen, untersucht. Seine Werkzeuge waren daher Ionisationskammern und Elektrometer. Was er mit diesen Hilfsmitteln über die neue Strahlung herausfinden konnte, war damit im Prinzip schon erreicht. Auch in den Jahren, die folgen sollten, verfolgte Hess sein Ziel weiter, mit immer besser konstruierten Ionisationskammern seiner Entdeckung neue Informationen zu entlocken. Auf seiner Suche stürmte er die Gipfel Europas, um mit seinen Steinkeschen Standardapparaten der Quelle der *Kosmischen Strahlung* näher und immer näher zu kommen, aber ein Verständnis des Wesens und der Beschaffenheit der Strahlung erreichte er so nicht. Er konnte nur immer und immer wieder aufs Neue zeigen, dass die durch die Strahlung verursachte ionisierende Wirkung immer noch vorhanden war, sonst kam er nicht mehr weiter.

Aber andere verstanden es, die Eigenschaften der Strahlung zu erforschen und in ihren Experimenten nutzbar zu machen, um bedeutende Beiträge zur modernen Physik zu leisten. Zum Teil waren es Mitglieder der von Hess gegründeten Arbeitsgemeinschaft der Höhenstrahlungsforscher. Großteils waren es junge Wissenschaftler aus aller Herren Länder über den ganzen Globus verstreut, die das große Potential der Entdeckung von Hess erkannten und verstanden.

Egon von Schweidler schlug vor, die neue Strahlung nach ihrem Entdecker Hess'sche Strahlung zu nennen. Hess hingegen, der aus dem stark verminderten

Absorptionsverhalten der neuen Strahlung schloss, dass es sich um eine sehr harte Gamma Strahlung handeln müsse, beharrte auf den Namen Ultra Gamma Strahlung, den er später in Ultrastrahlung umwandelte, um sich letztendlich den Amerikanern anzuschließen, die den Namen *Cosmic Rays* (*Kosmische Strahlung*) verwendeten, der von Robert Millikan geprägt worden war. [12]

## 5. Viktor Hess in Innsbruck

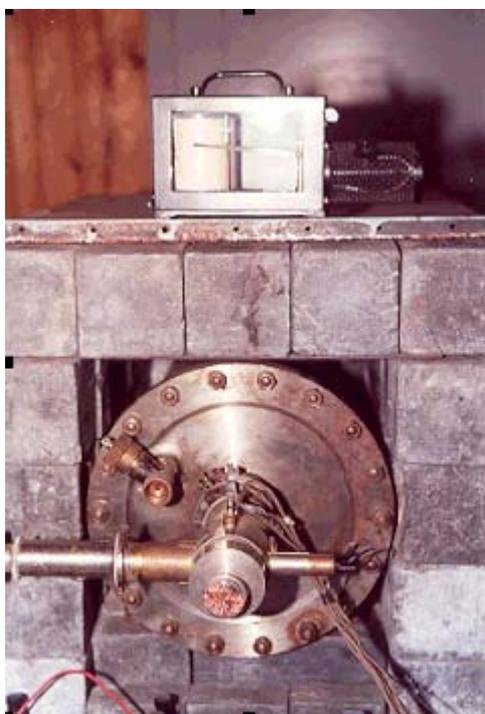
20 Jahre waren vergangen, seit Viktor Hess die *Kosmische Strahlung* während eines Ballonfluges entdeckt hatte, und trotz zweier Jahrzehnter internationaler Bemühungen und fortgesetzter Forschungsarbeit blieb das Phänomen der *Kosmischen Strahlung* geheimnisumwittert. Als Viktor Hess 1931 der Berufung nach Innsbruck folgte, tat er das in fieberndem Erwarten. Wohl wusste er um die wenig erfreulichen Umstände, die zu dieser Zeit an der Leopold Franzens Universität herrschten, dass er über wenig Raum verfügen würde und über ein recht beschränktes Budget, um Instrumente und Ausrüstung zu beschaffen. Aber eine andere Aussicht ließ alle Mängel gering erscheinen.

In der Zwischenzeit hatten sich Hess schon die Gelegenheiten geboten, am Groß Obir in Kärnten und am Sonnblick in Salzburg jeweils über kürzere Zeiträume Messungen anzustellen. Die Ergebnisse schienen Hess sehr vielversprechend. Aber in ihm lebte immer noch der Traum eines hochgelegenen Observatoriums, in dem dauerhaft und über Jahre hinweg die *Kosmische Strahlung* mit viel genaueren Messgeräten bei Tag und bei Nacht gemessen und registriert werden konnte. Hochgelegen sollte es sein, weil in größeren Höhen die *Kosmische Strahlung* noch weniger durch die Atmosphäre abgeschwächt ist. Die Wahrscheinlichkeit, neue Fakten über die *Kosmische Strahlung* in Erfahrung zu bringen, musste also wohl mit der Seehöhe ansteigen. Ein Labor, festgemauert in der Erde, sollte es sein, kein Ballon oder Flugzeug, damit Hess' Präzisionsgeräte erschütterungsfrei und bei konstanter Temperatur aufgestellt werden konnten. Geräte, die auf Grund ihres Gewichts, ihre Größe und ihrer Empfindlichkeit für jegliche Art von Expedition gänzlich ungeeignet waren, in einem hochgelegenen Labor hingegen leicht zu einem vielversprechenden Einsatz kommen konnten. Die Aufstellung solcher Hochleistungspräzisionsmaschinen, und Hess dachte dabei an Steinke'sche Standardapparate wie sie im folgenden beschrieben werden, erforderte außerdem massive Bleiplatten, die das Gerät wie ein Panzer vor der Umgebungsradioaktivität schützen soll. Der Transport dieses Bleipanzers wiederum machte es dringlich erforderlich, dass der hochgelegene Gipfel, auf dem das Labor gebaut werden soll, leicht erreichbar ist. Am besten sollte wohl eine Straße hinaufführen, wie es am Pike's Peak der Fall war, den Robert Millikan als Laborstandort entdeckte. Ebenfalls geeignet wäre eine Seilbahn, wie sie zum Hafelekar (2300 m) hinaufführt, ein Gipfel der Nordkette (Alpen) unweit von Innsbruck.

Freilich ergriff Viktor Hess unter solchen Umständen die Gelegenheit beim Schopf und ging nach Innsbruck. Mit brachte er große Pläne von einem alpinen Forschungszentrum, das eine Sternwarte, eine meteorologische Beobachtungsstation,

Räumlichkeiten für die wissenschaftlichen Teams und ein Observatorium für die *Kosmische Strahlung* beherbergen sollte. Auf Grund der schwierigen wirtschaftlichen Situation in der Zwischenkriegszeit ließ sich nur mit Mühe und Dank Unterstützung seitens der *Preußischen Akademie der Wissenschaften*, der *Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft* und der *Akademie der Wissenschaften in Wien*, eine kleine Blockhütte realisieren, in deren Registrierraum (4.5 x 4.5 m) die Messgeräte auf einem Zementsockel standen.

Um Langzeitmessungen durchzuführen, verwendete Viktor Hess Steinke'sche Standardapparate. Im Prinzip große Ionisationskammern waren sie unter Druck mit CO<sub>2</sub> gefüllt und mit einem Lindemann Elektrometer verbunden, das die Ionisationsmaß, die von der *Kosmischen Strahlung* im Inneren der Kammer verursacht wurde. Die Anzeige des Elektrometers wurde in regelmäßigen Abständen durch einen uhrähnlichen Mechanismus photographisch aufgezeichnet. So war der Steinke'sche Apparat in der Lage, über mehrere Tage unbetreut Messwerte zu sammeln.



**Abbildung 5-1 Der Steinke'sche Standardapparat**

Dieser Steinke'sche Standardapparat befindet sich auch heute noch in der Forschungsstation am Hafelekar. Deutlich zu sehen ist der massive Bleipanzer, der die Ionisationskammer vor der Umgebungsradioaktivität schützen soll. Oben am Panzer befindet sich ein Messgerät, das die klimatischen Bedingungen registriert.

Damit die Messergebnisse möglichst aussagekräftig blieben, mussten die wesentlichen Umgebungsbedingungen konstant gehalten werden. Die Raumtemperatur wurde mittels elektrischer Heizung auf 13° Celsius gehalten. Während des Winters wurde das Dach der Blockhütte schneefrei gehalten. Außerdem wurden alle Messwerte auf den mittleren Barometerstand von 590 mm Hg am Hafelekar zurückgerechnet. Vom September 1931 an rollte Viktor Hess' automatisch registrierende Maschinerie. Die einzige Schwierigkeit war jetzt noch, aus dem erhaltenen Datenmaterial neue Erkenntnisse zu gewinnen.

Eine wichtige Frage, die zu diesem Zeitpunkt noch im Raum stand, war die nach der Zusammensetzung der *Kosmischen Strahlung*. Handelte es sich um eine reine Photonenstrahlung, dann wurde sie dem Namen *Ultragammastrahlung* gerecht. Wenn sie aber aus geladenen Teilchen oder gar aus Neutronen bestand, dann wäre der Name *Ultrastrahlung* geeigneter gewesen. Viktor Hess selbst erwartete sich in dieser Angelegenheit wesentliche Fortschritte durch die Erforschung der 1932 von James Chadwick neuentdeckten Neutronen. Mit seinen Ionisationskammern war er freilich kaum in der Lage, ein Neutron nachzuweisen. Aber vom Einsatz der Wilson'schen Nebelkammer versprach er sich einiges. Nachdem aber in dieser Hinsicht andere Forschungsgruppen die besseren Karten in Händen hielten, konzentrierte sich Hess auf die Untersuchung des täglichen Ganges der *Kosmischen Strahlung*, das bedeutet, auf die regelmäßigen Schwankungen der Intensität der *Kosmischen Strahlung* mit einer Periode von 24 Stunden.

Ende August 1931 ging die Anlage in Betrieb und während der ersten 9 Monate wurden die Daten aus Abbildung 5-2 aufgenommen.

Jahr	Monat	Wert [J]	Jahr	Monat	Wert [J]
1931	September	2.787	1932	Jänner	2.799
1931	Oktober	2.789	1932	Februar	2.841
1931	November	2.769	1932	März	2.784
1931	Dezember	2.801	1932	April	2.832
			1932	Mai	2.802

**Abbildung 5-2 Die ersten Messwerte am Hafelekar**

Im Spätsommer 1931 ging der langgehegte Wunsch von Viktor Hess nach einer dauerhaften Beobachtungsstation der *Kosmischen Strahlung* endlich in Erfüllung. Während der ersten neun Monate wurde ohne Unterbrechung gemessen. Hier angegeben sind die erhaltenen Werte jeweils über einen Monat gemittelt. In der Originalarbeit [16] sind keine Messfehler angegeben.

Was Viktor Hess in dieser Zeit fand, war eine regelmäßige tägliche Schwankung der Ionisationsrate mit einem Nachmittagsmaximum und einem Minimum um Mitternacht. Die Ursache dafür könnte eine Schwankung der Intensität der *Kosmischen Strahlung* sein, aber auch eine Veränderung meteorologischer Verhältnisse, die sich in der Ionisationsrate niederschlagen konnten. Nicht ganz auszuschließen war auch eine schwankende primäre Strahlungskomponente, die von der Sonne stammte und somit von der Tageszeit abhängig war. Diese Fragen mussten aber ungeklärt bleiben.

Der tägliche Gang der *Kosmischen Strahlung* lag der Arbeitsgemeinschaft der Ultrastrahlenforscher zu Innsbruck jedenfalls sehr am Herzen. Bis 1936 wurden in dieser Sache genaueste Messungen angestellt, die im Endeffekt das Ergebnis lieferten, dass ein solarer Einfluss auf die Ionisationsrate in der Atmosphäre nicht auszuschließen war.

Einige Zeit versuchte man sich in Innsbruck an Messungen mit der Wilson'schen Nebelkammer. Verwendet wurde eine Nebelkammer mit einem Durchmesser von

12 cm und einem Magnetfeld von 1500 Gauss (0.15 Tesla). Insgesamt wurden 1200 photographische Aufnahmen angefertigt, auf 160 davon konnten Elektronenbahnen identifiziert werden, wobei sich eine Bestimmung der Flugrichtung bzw. der Ladungen als schwierig herausstellte. Nachdem eine horizontale Bleiplatte in die Nebelkammer eingesetzt wurde, um dieses Problem zu beseitigen (vgl. Kapitel 6.1 Die Nebelkammer), konnte nur mehr eine Teilchenbahn gefunden werden, die durch die Platte hindurchging. Diese eine Spur zeigte jedenfalls vor und nach der Platte keine erkennbare Krümmung. Aus den Krümmungsradien der Teilchenbahnen konnte auf Teilchenenergien zwischen  $10^5$  und  $10^7$  eV geschlossen werden. Die Frage, ob die detektierten Teilchen der primären oder sekundären *Kosmischen Strahlung* angehörten, konnte nie mit Sicherheit beantwortet werden.

Wenn man die Ergebnisse der ausgedehnten Messungen von Viktor Hess in seinen Innsbrucker Jahren zusammenfasst, so kann man sich kaum des Eindrucks erwehren, dass der beharrliche Einsatz von Ionisationskammern nur geringe neue Erkenntnisse über die Natur der *Kosmischen Strahlung* brachte. Die großen Entdeckungen, die in der *Kosmischen Strahlung* noch ihrer Entdecker harnten, wurden dann auch andernorts mit anderen Geräten gemacht.

Trotz alledem sollte die Forschungsstation am Hafelekar noch Schauplatz einer epochalen Entdeckung werden, nämlich der *Kosmischen Sterne*. (vgl. 7.4 Die Kosmischen Sterne).

Die Originalarbeiten von Viktor Hess aus seiner Innsbrucker Zeit sind im Literaturverzeichnis unter folgenden Nummern angeführt.

[13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30]

## 6. Die neuen Messgeräte

Viktor Franz Hess war es gelungen, mit einfachen Messgeräten, die auf dem Prinzip der Ionisationskammern beruhten, die Existenz der *Kosmischen Strahlung* nachzuweisen. Die Ionisationskammer lieferte ihm dabei Ergebnisse, indem sie die Wirkung der *Kosmischen Strahlung* über eine längere Zeit integrierte, und dadurch wenig Spielraum für Rückschlüsse auf detaillierte Wechselwirkungen der Strahlung mit dem Medium der Ionisationskammer zuließ. Für die Erforschung des Wesens der *Kosmischen Strahlung* waren daher neue verbesserte Detektoren erforderlich, die sich von der Tradition der Ionisationskammer lösten und es ermöglichten, die Wechselwirkungen jedes einzelnen Strahlungspartikels zu untersuchen.

Dass Viktor Hess immer dem Prinzip der Ionisationskammer in immer ausgereifteren und weiter entwickelten Formen wie dem automatisch registrierenden Steinke'schen Standardapparat treu blieb, war der Hauptgrund, warum seine Forschungsgruppe immer mehr in den Hintergrund geriet und an internationaler Bedeutung verlor.

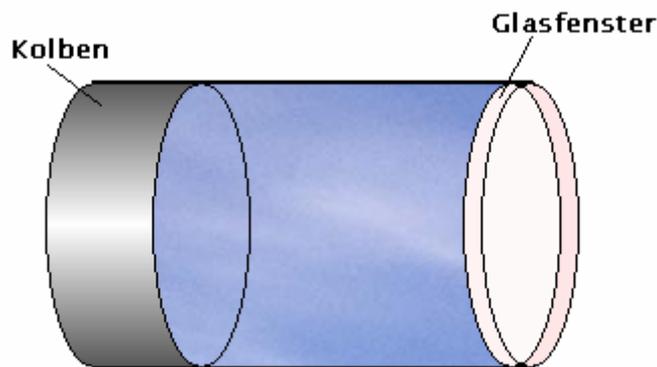
Die weiteren, sensationellen Entdeckungen wurden anderorts und mit anderen Detektoren gemacht. Vor allem tat sich dabei die Arbeitsgruppe um Robert Andrews Millikan hervor, die auf den verschiedensten Gebieten sehr erfolgreich war. Am

Gebiet der *Kosmischen Strahlung* konnten dabei vor allem Carl Anderson und Seth Neddermayr punkten, die mit der Nebelkammer arbeiteten.

Marietta Blau, Hertha Wambacher und später Cecil Powell verwendeten Photographische Platten als Detektoren, eine Technik, die revolutionäre Ergebnisse in der Erforschung der *Kosmischen Strahlung* und in der Kernphysik selbst ermöglichte.

## 6.1. Die Nebelkammer

Charles Thomson Rees Wilson, ein brillanter britischer Physiker, begeisterte sich seit seiner Jugend für die Phänomene des Wetters. Vor allem untersuchte er die Mechanismen, die dazu führten, dass sich unzählige Wassertropfen zu Wolken versammelten. Um das Verhalten von den Wassertropfen unter Laborbedingungen studieren zu können, machte er sich daran, eine Kammer zu konstruieren, in der sich unter genau vorgegebenen Bedingungen feinste Wassertropfen bilden konnten, die die Kammer in Form von Nebel erfüllten. Daher benannte man diese Kammer im Deutschen auch als Nebelkammer (englisch cloud chamber = Wolkenkammer). Hätte C.T.R. Wilson seine Nebelkammer nur dafür verwendet, seine Tropfen zu untersuchen, so hätte wahrscheinlich niemals jemand von dieser epochalen Erfindung erfahren.



**Abbildung 6-1 Die Nebelkammer**

Ernest Rutherford sagte einmal von der Nebelkammer, dass sie eine der originellsten und wichtigsten Erfindungen des 19. Jahrhunderts sei.

Die Nebelkammer ist ein meist zylindrisches Gefäß, das mit einer Mischung aus Gas und Wasserdampf gefüllt ist, wobei sich der Dampf noch im Gleichgewicht mit der Flüssigkeitsphase befindet. Die Nebelkammer ist mit einem Kolben versehen, der es ermöglicht, ihr Volumen sehr schnell zu vergrößern. Dabei dehnt sich das Gas im Inneren der Kammer entsprechend dem vergrößerten Volumen aus und kühlt dabei ab, weil es bei diesem schnellen Vorgang keine Zeit findet, von seiner Umgebung Wärme aufzunehmen.

Durch diese plötzliche Abkühlung ist der Wasserdampf in der Nebelkammer übersättigt und würde sich als Nebel niederschlagen, könnte er Kondensationskeime wie Staub oder ähnliches finden. C.T.R. Wilson aber versuchte eben das zu verhindern, indem er hochreine Luft verwendete, in der solche Verunreinigungen nicht zu finden waren. Mit dieser hochreinen Luft meinte Wilson, davon ausgehen zu

können, dass es keine Niederschläge geben würde. Es geschah aber zu seinem zunächst höchstem Erstaunen, dass sich dann doch stets feine Nebelschleier bildeten. Sooft er seine Versuche auch ausführte, immer wieder erhielt er auf zunächst unerklärliche Art und Weise tropfenartige Niederschläge, und zwar meist entlang haarfeiner Linien, die sich durch seine Nebelkammer zogen.

Sein scharfer Verstand und seine Vorbildung ermöglichten ihm den Schluss, dass es sich bei den Kondensationskeimen, die den Niederschlag ermöglichten, um geladene Atome handeln könnte, möglicherweise um die Ionen, die für die Restleitfähigkeit der Atmosphäre verantwortlich waren.

Im selben Jahr, in dem Wilson seine Nebelkammerversuche anstellte (1895), wurde die Röntgenstrahlung entdeckt. Thomson und McClelland entdeckten schnell, dass die Röntgenstrahlung geeignet war, die Leitfähigkeit der Luft dramatisch zu erhöhen, indem sie die Atome der Luft ionisierte und so Ladungsträger zur Verfügung stellte. Wilson überprüfte diese Eigenschaft der Röntgenstrahlung mit seiner Nebelkammer und stellte sofort einen sehr starken Zuwachs an regenartigem Niederschlag fest, wenn die Nebelkammer der Röntgenstrahlung ausgesetzt war.

Als Thomson und Rutherford 1906 zeigen konnten, dass die Leitfähigkeit von Gasen tatsächlich auf eine Ionisation der Gase zurückzuführen war, blieb kein Zweifel mehr daran, dass Wilsons Nebelkammer es ermöglichte, Gasionen als Kondensationskeime sichtbar zu machen, photographisch festzuhalten und dann nach Belieben zu studieren.

Dringen schnelle Teilchen bzw. Strahlung in das Kammervolumen ein, dann können sie auf ihrem Weg durch die Kammer Gasmoleküle ionisieren. Entlang dieser Ionenbahnen entstehen dann Wassertropfen, die eine Nebelspur entlang der Teilchenbahn bilden. Beleuchtet man das Innere der Nebelkammer, dann wird das Licht an der Nebelspur gestreut, wodurch die Spur hell vor dem dunklen Hintergrund aufleuchtet und photographiert werden kann. Diese Nebelspur in der Nebelkammer entsteht ganz ähnlich wie die Kondensstreifen bei Flugzeugen.

Nachdem Wilson seine Nebelkammer weiter verbessert hatte, war er 1911 der erste Mensch, der die Teilchenbahn von Alphateilchen und von Elektronen mit eigenen Augen sah.

Mit der Nebelkammer wurden über Jahre hinweg viele der wichtigsten Experimente der Kern- und Teilchenphysik ausgeführt.

Die Comptonstreuung der Nebelkammer wurde nachgewiesen, womit der Comptoneffekt nicht weiter angezweifelt werden konnte. Anderson entdeckte das Positron, Blackett und Ochialini zeigten Paarerzeugung und Paarvernichtung von Elektronen und Positronen, Cockroft und Walton konnten die ersten künstlichen Kernreaktionen nachweisen. [5,6,31]

## 6.2. Die Photographische Platte

Bei dieser Technologie werden photographische Platten eingesetzt, um Strahlung zu detektieren. Da die Radioaktivität erstmals mit Hilfe von photographischen Medien

entdeckt wurde, schienen diese auch für die weitere Erforschung der Radioaktivität geeignet zu sein.

Ein photographischer Film, wie er zum Nachweis von radioaktiver Strahlung eingesetzt wird, besteht gewöhnlich aus Silberbromidkörnern, die in ein Gelatineträgermaterial eingebettet sind. Um die Gelatine strukturell zu verstärken, ist sie meist auf einer Glasplatte oder einer Zelluloidschicht aufgebracht. Die Auflösung und damit die Qualität der Bilder, die mit solchen photographischen Medien erreicht werden kann, hängt vor allem von der Größe der einzelnen Silberbromidkörner und deren räumlichen Dichte in der Gelatine ab.

Gelangen energiereiche Teilchen bzw. Strahlung in die Gelatine, dann kommt es zu einer ganzen Menge Wechselwirkungen, wobei für den Kernphysiker nur die Wechselwirkungen zwischen der Strahlung und den Silberbromidmolekülen wichtig sind. Durch Stöße werden Silberbromidmoleküle aufgespalten und es bleiben einzelne Silberatome über, die auf den großen Silberbromidkörnern haften bleiben. Bei der späteren Entwicklung dienen die dissoziierten Silberatome als Kristallisationskeime. Das ganze Silberbromidkorn, das zuvor von einem Strahlungspartikel gestreift wurde, wird jetzt in elementares Silber umgewandelt. Dadurch wird die Teilchenbahn sehr deutlich markiert. Die anderen Silberbromidkörner bleiben wie sie waren. Im nächsten Bearbeitungsschritt werden die nicht entwickelten Silberbromidkörner aus der Gelatinematrix ausgewaschen. Übrig bleiben nur die reinen Silberatome, die die Bahn des Teilchen als silberschwarze Spur sichtbar machen.

Um die Spur von einzelnen Atomkernen sichtbar zu machen, braucht man besonders geeignete photographische Platten, die als Kernspurplatten bezeichnet werden. Um die benötigte Auflösung zu gewährleisten, muss die Konzentration der Silberbromidkörner in der Gelatinematrix von sonst üblichen 40% auf 80% angehoben werden, was vor allem in der ersten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts noch eine große technische Herausforderung darstellte.

Um die Spur, die ein Kern im Film hinterlässt, sinnvoll auswerten zu können, ist es noch dazu notwendig, dass die Gelatine sehr dick ist (etwa einen halben Millimeter), was zusätzliche Schwierigkeiten bei der Entwicklung mit sich bringt.

Unbestritten sind aber die herausragenden Vorteile, die diese Methode mit sich bringt. Zunächst hinterlässt jedes Strahlungsteilchen, das die Gelatine passiert, eine dauerhaften und bei niedriger Temperatur und Feuchtigkeit unverwischbare Spur, die auch noch sehr viel später entwickelt und ausgewertet werden kann. Kernspurplatten eignen sich also z.B. für Messungen, die über lange Zeit und/oder unbeaufsichtigt durchgeführt werden müssen. Darum wäre diese Messmethode gerade für die Höhenstrahlungsforscher rund um Viktor Hess wertvoll gewesen.

Es war dann auch eine Österreicherin, die sich besonders verdient um die Messtechnik mit der Kernspurplatte machte. Mariette Blau arbeitete relativ eng mit der Firma Ilford zusammen, die damals schon das Material für photographische Detektoren lieferte und half dabei, die Herstellung so weit zu verfeinern, dass man Filme eben sogar zum Detektieren von Strahlung verwenden konnte. So gelang ihr zusammen mit Herta Wambacher der erste direkte Nachweis einer Kernzertrümmerung durch die *Kosmische Strahlung* [35]. Ansonsten war ihre wissenschaftliche Karriere von viel Unbill geprägt. Insbesondere musste sie wegen ihrer jüdischen Abstammung vor den

Nationalsozialisten fliehen, den Zweiten Weltkrieg verbrachte sie sozusagen im wissenschaftlichen Exil im Mexiko. So war sie in ihren produktivsten Lebensjahren vom Puls der Forschung getrennt und andere konnten Früchte ernten, die sie einst mitgesät hatte. [5]

### 6.3. Das Geiger-Müller-Zählrohr

Beim Geiger-Müller Zählrohr (GM-Zählrohr) handelt es sich um einen der ältesten Detektorentypen, die immer noch im Gebrauch sind. Es wurde bereits im Jahre 1928 von Hans Geiger und seinem Kollegen Müller vorgestellt.

Zu den entscheidenden Vorzügen des Zählrohres gehören, dass es nach einem sehr einfachen Konzept funktioniert, dass es unkompliziert zu handhaben und günstig in der Anschaffung ist.

Das GM-Zählrohr ist ein gasgefüllter Detektor und arbeitet mit Ionisation, also nach dem gleichen Prinzip wie die Ionisationskammer, wie sie im Kapitel 3.3.2.1 dargestellt ist. Der wesentliche Unterschied liegt in den Entladungskaskaden, die beim GM-Zählrohr auftreten.

In der Ionisationskammer kommen elektrische Felder zum Tragen, die gerade stark genug sind, um die radiogenen Ionen abzutransportieren. Im GM-Zählrohr sind die Spannungen hingegen so groß gewählt, dass die Elektronen auf ihrem Weg durch das Füllgas stark beschleunigt werden. Mit der Geschwindigkeit der Elektronen steigt auch deren Energie. Unterwegs stoßen die Elektronen immer wieder mit Atomen und Molekülen des Füllgases zusammen. Ist die Geschwindigkeit der Elektronen ausreichend angewachsen, so reicht deren Energie, um die gestoßenen Moleküle zu ionisieren. Dabei entstehen wieder neue Ladungsträger, nämlich negativ geladene freie Elektronen und positiv geladene Atomrümpfe, denen ein Elektron fehlt. Auch diese Ladungsträger werden nun im bestehenden elektrischen Feld des GM-Zählrohres beschleunigt und bei weiteren Stößen ihrerseits freie Ladungsträger erzeugen. Es bildet sich eine Ladungslawine aus, die als Entladungskaskade bezeichnet wird. Um die benötigten elektrischen Feldstärken zu gewährleisten werden auch beim GM-Zählrohr ein feiner Draht als Innenelektrode verwendet. In der Nähe des Drahtes entstehen durch die Spitzenwirkung sehr starke elektrische Felder.

In Gasen, wie sie typischerweise in GM-Zählrohren verwendet werden, treten solche Entladungskaskaden ab Spannungen von etwa  $10^6$  V/m auf.

Bei solchen Spannungswerten ist die Gesamtzahl der Ladungsträger, die in der Entladungskaskade entstehen, noch proportional zu der Anzahl der Ionen, die direkt durch die Einwirkung einer radioaktiven Strahlung im Zählervolumen entstanden sind. Im Falle des GM-Zählrohres wird die Spannung aber so hoch gewählt, dass durch die Kettenreaktion der Ionenerzeugung eine elektrische Entladung über das ganze Kammervolumen stattfindet, egal wie groß das ursprüngliche Signal war. Mit einem GM-Zählrohr kann man daher nur einzelne radioaktive Ereignisse zählen, eine Information über die Energie der radioaktiven Strahlung geht hingegen verloren.

Durch diese großen, lawinenartigen Effekte, die jedes Strahlungsereignis verursacht erhält man bei der Arbeit mit dem GM-Zählrohr ein deutliches elektrisches Signal, das

sich sehr einfach messen und zählen lässt. Aufwendige Messanordnungen mit Vorverstärkern und Verstärkern sind nicht notwendig. Daher eignet sich das GM-Zählrohr vor allem z.B. für Messungen im freien Feld, wo ohne großem finanziellen und technischen Aufwand schnelle Messungen durchgeführt werden sollen.

Dafür weist das Zählrohr auch einige Mängel auf:

- Informationen über die Energie der radioaktiven Strahlung gehen verloren.
- Das GM-Zählrohr weist eine unverhältnismäßig hohe Totzeit auf, die weit über der anderer Detektoren liegt. Das bedeutet, dass das GM-Zählrohr nach dem Nachweis eines radioaktiven Ereignisses lange braucht, bis sich so weit erholt hat, ein weiteres Ereignis nachweisen zu können.
- Das Zählrohr ist daher nur für geringere Zählraten geeignet und Totzeitkorrekturen müssen bereits bei wenigen hundert Ereignissen pro Sekunde vorgenommen werden, wo andere Detektorsysteme noch lange nicht ausgelastet sind.

Das Zählrohr hat eine beschränkte Lebensdauer, weil die Moleküle seines Füllgases während seines Gebrauches aufgespaltet werden. Irgendwann ist der Punkt erreicht, an dem so viele Moleküle zerstört wurden, dass sich die Entladungskaskaden nicht mehr ungehindert ausbilden können und ein zuverlässiger Betrieb unmöglich wird. Typische GM-Zählrohre haben eine Lebensdauer von etwa  $10^9$  (eine Milliarde) Ereignissen. [5,6]

## 7. Die neuen Teilchen

### 7.1. Das Wesen der *Kosmischen Strahlung*

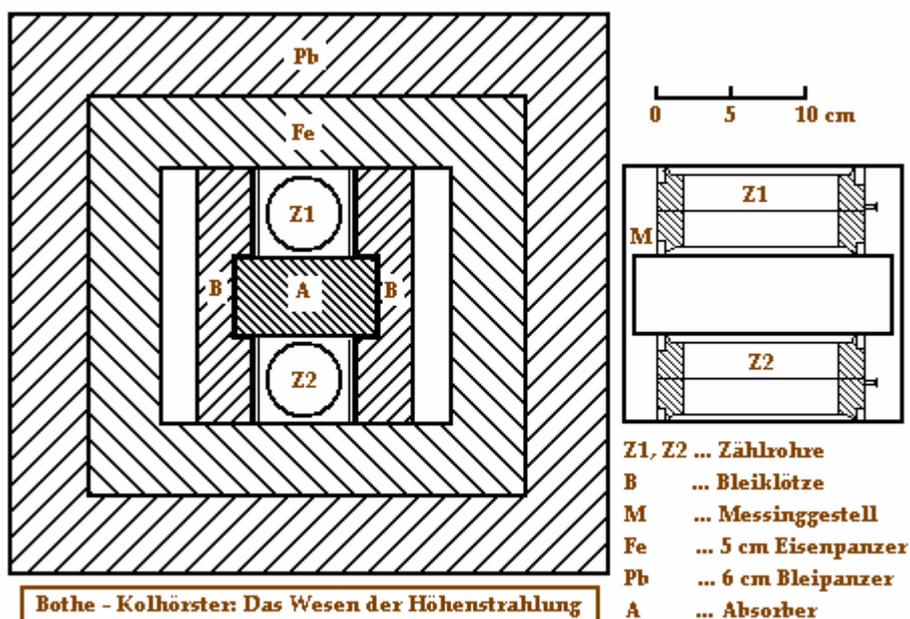
Viktor Franz Hess, der Entdecker der *Kosmischen Strahlung*, bezeichnete seine Entdeckung selbst als Ultragammastrahlung, was auf seine Überzeugung hinweist, dass es sich bei der *Kosmischen Strahlung* um eine hochenergetische  $\gamma$ -Strahlung handelt. Seine Annahme beruhte aber auf reiner Vermutung, und im nächsten Jahrzehnt, während dem sich die internationalen Forscher damit abmühten, Schwankungen in der Intensität der *Kosmischen Strahlung* in Abhängigkeit von der Uhrzeit, der Himmelsrichtung und der Tagesverfassung zu bestimmen, kam keiner auf die Idee, die tatsächliche Natur der *Kosmischen Strahlung*, also ihren Aufbau und ihre Zusammensetzung, zu hinterfragen. Der unerschütterliche Glaube an die  $\gamma$ -Strahlung aus dem Weltraum rührte vor allem daher, dass man sich die unglaubliche Durchdringungskraft dieser Strahlung, die durch die gesamte Atmosphäre bis zur Erdoberfläche hindurchkommt, bei einer Teilchenstrahlung noch viel weniger vorstellen konnte.

Erst 1929 sollte es soweit sein. Die beiden deutschen Forscher Werner Kolhörster und Walter Bothe, in der Physikalischen Reichsanstalt in Berlin zuhause, machten sich

daran, endlich den Nachweis dafür zu erbringen, wovon alle überzeugt waren, dass die *Kosmische Strahlung* eine hochenergetische  $\gamma$ -Strahlung sei.

Für ihre Experimente verwendeten sie eine Messanordnung, die im wesentlichen aus zwei Geiger-Müller Zählrohren bestand, zwischen die man verschieden dicke Absorber in Form von Eisen- oder Bleiplatten bringen konnte.

Bothe und Kolhörster gingen davon aus, dass ein  $\gamma$ -Quant nur dann mit einem Geiger-Müller Zählrohr nachgewiesen werden kann, wenn es zuvor ein Elektron aus einem neutralen Atom schlägt. Tatsächlich würde dann dieses Elektron vom Zählrohr nachgewiesen. Diese sekundären Elektronen wollten Bothe und Kolhörster untersuchen, und dazu verwendeten sie die Zählrohre. Tatsächlich entdeckten sie sehr bald Koinzidenzen, das bedeutet Ereignisse, die in beiden Zählrohren zu gleichen Zeit stattfanden. Das musste bedeuten, dass ein Elektron, das von einem  $\gamma$ -Quant aus einem Atom geschlagen wurde, im raschen Flug beide Zählrohre durchquert haben musste. Das war ein erster Erfolg für die beiden Berliner. Als nächstes wollten sie die Energie dieser vermeintlichen Elektronen bestimmen, indem sie immer dicker werdende Absorber in Form von Metallplatten zwischen die beiden Zählrohre einbrachten, bis keine Koinzidenzen mehr eintreten würden. Doch jetzt hielt die Natur eine weitere Überraschung für die Physiker bereit. Bothe und Kolhörster stellten zu ihrem maßlosen Erstaunen fest, dass 75% der Koinzidenzen nicht einmal durch einen vier Zentimeter dicken Goldbarren zu verhindern waren. Der Goldbarren stand den beiden für kurze Zeit als Leihgabe zur Verfügung.



**Abbildung 7-1 Die Messanordnung von Bothe und Kolhörster**

Bothe und Kolhörster hatten eigentlich gemeint, endlich den lange ausstehenden Beweis dafür zu erbringen, dass die *Kosmische Strahlung* eine  $\gamma$ -Strahlung sei. Tatsächlich gelang es ihnen nur, den Beweis zu erbringen, dass die sekundäre Strahlung, wie wir sie an der Erdoberfläche feststellen können, keine  $\gamma$ -Strahlung ist.

Tatsächlich waren die Teilchen, von denen die Geiger-Müller Zählrohre ausgelöst wurden, gerade so durchdringend, wie die *Kosmische Strahlung* selbst. Die beiden deutschen Forscher konnten nicht umhin, die Folgerung zu ziehen, dass die *Kosmische*

*Strahlung* selbst entgegen der allgemeinen Annahme keine  $\gamma$ -Strahlung ist, sondern zumindest zu einem Teil aus geladenen Teilchen sehr hoher Durchdringungskraft besteht.

Was Bothe und Kolhörster mit ihrem Experiment bezweckten, war, den schon lange ausstehenden Nachweis zu erbringen, dass die *Kosmische Strahlung* eine ultrahochenergetische  $\gamma$ -Strahlung sei. Was sie tatsächlich zeigen konnten, war, dass die sekundäre Strahlung, die von der primären *Kosmischen Strahlung* in der Wechselwirkung mit unserer Atmosphäre erzeugt wird, aus elektrisch geladenen Teilchen besteht. [32]

## 7.2. Erste Antimaterie – das Positron

So war Ende der Zwanziger Jahre des 20. Jahrhunderts endlich geklärt worden, dass die sekundäre *Kosmische Strahlung*, die wir an der Erdoberfläche messen können, keine ultrahochenergetische  $\gamma$ -Strahlung ist, sondern eine Teilchenstrahlung, über deren genauere Eigenschaften man sich noch nicht völlig klar war, man vermutete aber vor allem Elektronen und Protonen, die durch die primäre *Kosmische Strahlung* aus den Molekülen der Luft geschlagen wurden.

Nicht überzeugen ließ sich der Amerikaner Robert Andrews Millikan, der noch immer überzeugt war, dass die primäre *Kosmische Strahlung* eine  $\gamma$ -Strahlung war, die auf ihrem Weg durch die Atmosphäre eine sekundäre Partikelstrahlung erzeugte. Um dieses Phänomen genauer zu untersuchen, setzte er einen seiner Studenten auf eine neue Detektortechnologie an, die in Russland von einem jungen Physiker Dmitry Skobeltzyn aus Leningrad entwickelt wurde. Skobeltzyn hatte es sich 1924 als Ziel gesetzt, mit Hilfe der Wilson'schen Nebelkammer die Spuren von Elektronen aufzuzeichnen, die die vermeintliche kosmische Ultragammapartikelstrahlung aus den Luftatomen seiner Nebelkammer schlug. Dabei hatte er das Problem, dass Elektronen, die aus der metallischen Wand der Nebelkammer stammten, die Spuren der Elektronen, die aus dem Gas stammten, überlagerten und die Ergebnisse schwerer zu analysieren machten. Daher entschied er sich dazu, mit Hilfe eines starken Elektromagneten die Elektronen, die aus der Gefäßbewandung stammten, aus dem Kammervolumen hinauszulenken (das geht deswegen, weil bewegte elektrisch geladene Körper im magnetischen Feld eine Kraft normal auf die Bewegungsrichtung erfahren, die sogenannte Lorentzkraft, und daher auf einer Kurve abgelenkt werden). Trotz der starken Magneten, die Skobeltzyn verwendete, blieben immer noch einige Teilchen über, deren Bahnspuren kaum gekrümmt waren. Skobeltzyn erklärte sich diese seltsamen Spuren mit hochenergetischen Elektronen, die gerade von der *Kosmischen Strahlung* aus den Atomen geschlagen wurden. Tatsächlich aber, und ohne es zu wissen, war er der erste Mensch, der die sekundäre *Kosmische Strahlung* selbst nachgewiesen hatte. Jedenfalls verfolgte Skobeltzyn diese Experimente nicht mehr weiter, aber Robert Andrews Millikan sah in ihnen noch einiges Potential.

Er beauftragte also seinen frisch promovierten Assistenten Carl David Anderson, eine Wilson'sche Nebelkammer zu bauen, sie mit einem starken Elektromagneten zu versehen und die *Kosmische Strahlung* zu beobachten. Die großartige Leistung Carl David Anderson bestand darin, im Zwischenkriegsamerika in der Zeit der

Wirtschaftskrisen tatsächlich eine Nebelkammer zu bauen, diese mit einem wassergekühlten Elektromagneten zu versehen, der zehnmal so stark war wie jener, den Skobelzyn konstruiert hatte, und damit bis auf den 4300 Meter hohen Pike's Peak zu fahren.

Die Ergebnisse dieser Messungen waren überraschend und entsprachen keineswegs den Erwartungen des Experimentators oder des Auftraggebers. Es stellte sich nämlich heraus, dass die sekundäre *Kosmische Strahlung* zu gleichen Teilen aus positiven und negativen Teilchen zu bestehen schien, da zu etwa gleichen Teilen Teilchenbahnen gefunden wurden, die nach links und die nach rechts gekrümmt waren. Millikan war der Überzeugung, dass es sich bei den positiven Teilchen um Protonen handeln musste, die von der ultrahochenergetischen kosmischen  $\gamma$ -Strahlung aus den Atomkernen der Atmosphäre geschlagen worden sein mussten, denn andere positive Teilchen konnte er sich nicht vorstellen. Anderson lehnte diese Erklärung jedoch vehement ab, da er sehen konnte, dass es sich in keinem Fall um Protonen handeln konnte. Die Bahnen der positiven Teilchen waren ähnlich stark gekrümmt wie die der negativen. Damit die massereichen Protonen gleich stark abgelenkt werden, wie die leichten Elektronen, müssen sie viel langsamer unterwegs sein. Wenn sie aber langsamer waren, dann musste auch die Ionisationsdichte entlang ihres Weges viel höher sein; dafür gab es aber keinen Hinweis. Daher meinte Anderson, dass es sich nicht um Protonen handeln konnte, sondern es mussten Elektronen sein, die sich nicht von oben nach unten durch die Nebelkammer bewegten, sondern von unten nach oben. Diese Erklärung wiederum lehnte Millikan ab, der nicht einsah, warum *Kosmische Strahlung* plötzlich von unten her anstatt vom Himmel kommen sollte.

Um den Streit zu schlichten fügte Anderson in die Mitte seiner Nebelkammer eine Bleiplatte ein, die sich den Elektronen in den Weg stellen sollte, um sie auf ihrem Weg abzubremsten. Nachdem die Elektronen die Bleiplatte durchquerten, mussten sie auf Grund von Wechselwirkungen mit den Hüllenelektronen der Bleiatome Energie verloren haben und sich somit um einiges langsamer bewegen. Dadurch würden sie nach der Bleiplatte im Magnetfeld stärker abgelenkt werden und anhand der Krümmungsradien der Teilchenbahnspur vor und nach der Platte würde sich ganz klar entscheiden lassen, ob es sich bei den sonderbaren Teilchen um abwärtsbewegende Protonen oder um aufwärtsbewegende Elektronen handelte.

Wieder enttäuschten die Ergebnisse des Experiments die Erwartungen der beiden amerikanischen Wissenschaftler. Anderson konnte ganz klar zeigen, dass es sich bei den eigenartigen Teilchenbahnen weder um die Spuren von Protonen noch von Elektronen handeln konnte. Er erhielt ein sehr schönes Bild von einer Teilchenbahn, die auf ein Teilchen schließen ließ, das in etwa die Masse des Elektrons aufwies, aber eine positive elektrische Ladung. Damit war Anderson der erste Mensch, dem es gelang, das positive Antielektron, das Positron, nachzuweisen, das bereits einige Jahre zuvor vom theoretischen Physiker Paul Dirac vorhergesagt worden war. Für diese Leistung wurde Carl David Anderson im Jahre 1936 im Alter von 31 Jahren, gemeinsam mit Viktor Franz Hess, mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.

Eine Frage, die noch unbeantwortet war, lautete, wo denn dieses Positron so plötzlich herkam. Elektronen und Protonen, die man schon zuvor gefunden hatte, stammten, wie man wusste, aus den Kernen und den Hüllen der Atome unserer Umwelt, der Atmosphäre usw. Bei den Positronen handelte es sich aber um Antimaterie, die in

dieser Form nicht in unserer Umwelt vorkommt. Die Frage nach dem Woher der Positronen war also äußerst schwierig zu beantworten. Anderson und Millikan fanden bald eine Antwort auf diese Frage, die sich aber wiederum als falsch herausstellen sollte. Ihre Erklärung war, dass die Positronen exotische Partikel waren, die mit der *Kosmischen Strahlung* aus den Tiefen des Kosmos kamen.

Patrick Blackett und Giuseppe Occhialini, die am Cavendish Labor in Cambridge arbeiteten, gaben sich hingegen mit der Erklärung der Amerikaner nicht zufrieden. Ihnen war es gelungen, die Wilson'sche Nebelkammer entscheidend zu verbessern. Ihre Idee war brilliant weil einfach. Sie montierten oberhalb und unterhalb der Nebelkammer je ein Geiger-Müller Zählrohr und machten genau dann Bilder von den Teilchenspuren in ihrer Nebelkammer, wenn beide Zählrohre gleichzeitig ein Ereignis meldeten. Dann war die Wahrscheinlichkeit hoch, dass ein Teilchen der *Kosmischen Strahlung* auf ihrem Weg durch beide Zählrohre auch die Nebelkammer durchquert und dort interessante Ereignisse ausgelöst hatte. Was sie fanden, waren sogenannte Schauer von Elementarteilchen, die entstanden, wenn die *Kosmische Strahlung* in Materie Wechselwirkungen durchmachte. Dabei entstanden große Mengen von Elektronen und Positronen. Damit gelang es Blackett und Occhialini nachzuweisen, dass die Positronen keineswegs Beispiele für exotische Materie waren, die als Gäste aus entfernten Antimateriegalaxien kamen, sondern dass diese Antimaterie bei uns auf der Erde in hochenergetischen Kernkollisionen erzeugt wurden.

Zwar stammte die Idee, eine Nebelkammer mit einem Elektromagneten zu kombinieren von Dmitry Skobelzyn, zwar stammte die Idee, diese Technologie wieder aufzugreifen von Robert Andrews Millikan, zwar stammten die Erklärungen der eigentümlichen und neuen Phänomene rund um das Positron von Patrick Blackett und Giuseppe Occhialini, aber der erste Mensch, der Positronenspuren photographierte war eben Carl David Anderson, weshalb auch er mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde. [33,34]

### 7.3. Das Myon – ein „schweres Elektron“

Anfang der Dreißiger Jahre des 20. Jahrhunderts war man sich also klar geworden, dass die sekundäre *Kosmische Strahlung* aus Elektronen und Positronen bestand. Aber immer noch traten unerklärliche Phänomene auf. Unter den Teilchenbahnen, die man in den Nebelkammern entdeckte, gab es einige, die auf Teilchen mit positiver Ladung und negativer Ladung hinwiesen. Diese Teilchen waren aber wesentlich durchdringender als Elektronen und Positronen. Carl David Anderson und sein Kollege Seth Neddermeyer nahmen sich der Frage an. Zunächst gingen sie davon aus, dass es sich bei den beobachteten Teilchen um spezielle Elektronen handelte. Sie bezeichneten die konventionellen Elektronen, wie man sie bisher kannte, als *rote Elektronen*, und die durchdringenden Elektronen, die keine Schauer erzeugen konnten, als *grüne Elektronen*. Nach Jahren der weiteren Forschung gelang es ihnen, die Massen der Elementarteilchen viel genauer zu bestimmen. Sie konnten zeigen, dass die *grünen Elektronen* eine Masse irgendwo zwischen den tatsächlichen Elektronen und den Protonen aufwiesen, und dass es sich daher um neue Teilchen handeln musste, die man als Mesotronen (griechisch für *in der Mitte liegend*) bezeichnete. Als

Anderson und Neddermeyer ihre neue Entdeckung veröffentlichten, meldete sich Hideki Yukawa, ein japanischer Wissenschaftler, zu Wort, der bereits Jahre zuvor ein neues Teilchen vorhergesagt hatte, auf das die Beschreibung des Mesotrons, das später einfach Meson genannt wurde, ziemlich genau passte. Yukawa hatte eine Theorie der *Starken Wechselwirkung* entwickelt, die als Vermittler der Kernkräfte ein neues Teilchen postulierte, das etwa die 250fache Masse von Elektronen oder ein Siebtel der Masse von Protonen aufweisen musste. Hideki Yukawa beanspruchte Anderson und Neddermeyers neues Teilchen für seine Theorie und wurde dabei von Robert Oppenheimer und Robert Serber von Berkeley unterstützt. Allerdings sollte sich bald herausstellen, dass sich hier alle irrten. Yukawas Teilchen, das sogenannte Pi-Meson oder Pion sollte erst zehn Jahre später von Cecil Powell entdeckt werden. Das von Anderson und Neddermeyer entdeckte Meson oder Myon [Mü:on], wie es heute genannt wird, ist etwas gänzlich Anderes und Unerwartetes, und als solches bis heute der Wissenschaft ein kleines Rätsel geblieben. Der Nobelpreisträger Isidore Rabi drückte seine Verwunderung über das Myon einmal durch die Worte „Who ordered that?“ aus. [33,34]

#### 7.4. Die Kosmischen Sterne

Marietta Blau ist die tragischste Gestalt in der Geschichte rund um die *Kosmische Strahlung*. Ihr Leben und ihre Arbeit waren von Widrigkeiten und Rückschlägen geprägt, und doch übertreffen ihre Leistungen und die Ergebnisse ihrer Arbeit die vieler anderer, die im Zusammenhang mit der *Kosmischen Strahlung* einen Nobelpreis erhielten.

Marietta Blau wurde 1894 in Wien als Tochter wohlhabender jüdischer Eltern geboren, die es sich leisten konnten, ihre Tochter auf einen langen Bildungsweg zu schicken. 1919 erhielt Blau ihren Dokortitel, nachdem sie ihre Dissertation über Absorption von Gamma Strahlung eingereicht hatte. Mit 27 Jahren ging sie nach Berlin, um bei einer Firma zu arbeiten, die Röntgenröhren herstellte. Danach nahm sie eine Stelle am Institut für Medizinische Physik an der Universität Frankfurt an, bei der sie sich mit der Physik der Röntgenstrahlung beschäftigte, eine Beschäftigung, die sie mit Röntgenfilmen in Bekanntschaft brachte. In dieser Zeit geriet Blau immer mehr in die Grauzone zwischen Medizin und Kernphysik, die sich schon damals immer weiter ausbreitete. Marietta Blau brachte dabei ihre Erfahrungen mit photographischen Materialien in die Kernphysik mit, und ihre Überzeugung, dass mit Hilfe der photographischen Materialien wichtige Entdeckungen in der Radioaktivität und den Zerfällen von Kernen zu machen seien.

Nachdem sich die Dinge anfänglich gut entwickelten, war Marietta Blau 1923 gezwungen, nach Wien zurückzukehren, weil sich die Gesundheit ihrer Mutter stetig verschlechterte. Die nächsten 15 Jahre verbrachte sie in Wien, wo ihr Stefan Meyer, der Direktor des Instituts für Radiumforschung, die Möglichkeit verschaffte, an seinem Institut zu arbeiten. Trotz ihres großen Einsatzes und ihrer Leistungen erhielt sie dort jedoch nie eine feste Anstellung. Als sie einmal für eine Dozentenstellung im Gespräch war, soll ein Professor zu ihr gesagt haben, dass „Frau und Jüdin zu sein“ einfach zu viel sei, als dass sie für die Stelle in Frage käme.

Auf Grund der angeschlagenen Gesundheit ihrer Mutter blieb Marietta Blau keine andere Wahl, als in Wien zu bleiben. So arbeitete sie weiter am Institut für Radiumforschung, im wesentlichen ohne Bezahlung, und entwickelte die Technologie weiter, mit photographischen Platten radioaktive Strahlung nachzuweisen. Doch noch war der Weg weit und die Ergebnisse ernüchternd, und kaum jemand anders hätte wohl die Ausdauer und die Begeisterung aufgebracht, in solchen Schwierigkeiten durchzuhalten, als Marietta Blau, die von einer starken Vision geleitet war.

Noch waren photographische Filme nur geeignet, Röntgenphotographien aufzuzeichnen. Um die Spuren einzelner Kernbausteine wie Protonen oder Alphateilchen nachzuweisen, waren sie noch viel zu grob, die Zahl der unkontrollierbaren Effekte noch viel zu hoch. Zusätzlich hatte sie in Wien nicht das beste Material zum Arbeiten, die radioaktiven Quellen waren schwach, und so waren die wenigen Spuren, die diese schwachen Quellen im Film hinterließen, mit den noch nicht ausgereiften photographischen Materialien noch schwerer zu finden.

Mitte des Jahres 1932 ging Marietta Blau eine Zusammenarbeit mit Herta Wambacher, einer ihrer ehemaligen Studentinnen, ein, deren Dissertation sie betreut hatte. Noch im Herbst des Jahres 1932 feierten sie gemeinsam ihren ersten großen Erfolg. Es gelang ihnen, die Spuren von Protonen nachzuweisen, die sich durch den Film bewegt hatten, nachdem sie von noch nicht direkt zeigbaren Neutronen angestoßen wurden. So gelang es ihnen, die Neutronen nachzuweisen, die gerade eben erst von James Chadwick entdeckt worden waren.

Der nächste große Erfolg der beiden war ebenso erfreulich wie unverstänlich. Um die unerwünschte Schwärzung des photographischen Materials durch  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung zu reduzieren, entschlossen sich die beiden, einen organischen Farbstoff Pinakryptol Gelb zu verwenden, der erfahrungsgemäß den Film für  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung weniger sensibel machte. Gleichzeitig schien es aber, dass der Film durch diese Behandlung wesentlich sensibler für den Nachweis der  $\alpha$ -Strahlung wurde. Jedenfalls blieb die Anzahl der nachgewiesenen  $\alpha$ -Teilchen gleich groß, während die Anzahl der durch die  $\alpha$ -Teilchen geschwärzten Körner zunahm, die  $\alpha$ -Spur also deutlicher sichtbar wurde.

Um sich ihrer Ergebnisse sicher zu sein, verglichen Blau und Wambacher die Resultate ihrer Messungen mit den Bildern, die sich aus Aufnahmen von Nebelkammern ergaben. Die Ähnlichkeit der Bilder, die sich mit beiden Methoden ergab, war überzeugend, zumindest für die beiden Physikerinnen.

Indem sie die Reichweite der Rückstoßprotonen, die von Neutronen angestoßen wurden, mit der Reichweite von Protonen, die direkt aus einer radioaktiven Quelle stammten, verglichen, gelang es Blau und Wambacher, eine erste grobe Abschätzung der Energie der Neutronen zu geben.

Blau setzte ihre Forschungen beherzt und geduldig über die Jahre fort. Die nächsten Probleme bestanden darin, dass die Filme zu dünn waren, als dass die radioaktiven Teilchen in ihnen bis zum Stillstand abgebremst wurden. So war es ihr nur in seltenen Fällen möglich, Rückschlüsse auf die Energie der radioaktiven Strahlung zu ziehen. 1934 erhielt Marietta Blau von Marie Curie die Gelegenheit, am Institut du Radium in Paris mit starken radioaktiven Quellen zu arbeiten. In dieser Zeit hatte sie großartige Möglichkeiten, die Fähigkeiten ihrer Filme zu testen und zu verbessern. Gemeinsam mit der Firma Ilford gelang es Blau, die Technologie der Filmerzeugung immer weiter

voran zu treiben, und so kam es, dass sie 1937 gerade rechtzeitig ihre neuen Emulsionen bereit hatte, als sich ihr eine weitere einzigartige Gelegenheit bot. In mitten eines feindlichen Umfeldes, umgeben von heimlichen Nationalsozialisten und feindlichen Physikern, die ihre Filme mehr „anschwärzten“ als es die Röntgenstrahlung hätte tun können, bot sich ihr plötzlich eine unerwartete Chance. Viktor Hess, der Entdecker der *Kosmischen Strahlung*, bot ihr an, ihre Filme in seinem Forschungslabor am Hafelekar bei Innsbruck der *Kosmischen Strahlung* auszusetzen. Blau nahm dankend an, und so wurden ihre neu entwickelten Filme bis Juni 1937 fünf Monate lang in einer Höhe von 2300 Metern der *Kosmischen Strahlung* exponiert.

Schon bei der ersten Sichtung des entstandenen Materials fanden Blau und Wambacher Spuren, die Protonen auf ihrem Weg durch den photographischen Film hinterlassen hatte, die eine Länge aufwiesen, wie sie weder die beiden noch irgend jemand anders jemals zuvor gesehen hatten. Die Energien der *Kosmischen Strahlung*, die hinter diesen Erscheinungen stand, musste weit jenseits dessen liegen, was man von den radioaktiven Zerfällen der natürlichen Elemente bisher kannte. Aber es sollte noch bedeutend spannender werden. Denn an einigen wenigen Stellen im photographischen Film entdeckten die beiden Forscherinnen seltsame Sterne. Von jeweils einem Punkt gingen einige Spuren aus, wie sie von Protonen oder Heliumkernen hätten stammen können. Noch waren die Filme bei weitem noch nicht so perfekt wie jene, die später zur Entdeckung des Pions führen würden, und die Ergebnisse waren daher noch sehr schwer zu deuten. Aber einiges konnte man zu diesem Zeitpunkt schon völlig klar folgern: Der Stern, den Marietta Blau und ihre Mitarbeiterin Herta Wambacher entdeckt hatten, stammte von der Zertrümmerung eines Atomkernes. Ein Atomkern war von einem Teilchen, das über extrem hohe Energie verfügt haben musste, getroffen worden, und unter der Wucht des Einschlages war es dann auseinander geschleudert worden, seine Kernbausteine flogen sternförmig auseinander.

Das Teilchen, das diese Kernexplosion ausgelöst hatte, musste aus der *Kosmischen Strahlung* stammen, da seine Energie um vieles höher sein musste, als sie bei gewöhnlichen Kernzerfällen frei wurde. Der Kern, der zerstört worden war, musste zu den schwereren gehören, die in der Emulsion zu finden waren, denn seine Kernladungszahl musste mindestens neun betragen, da neun Spuren von seinem Zentrum ausgingen. Am ehesten dürfte es sich um ein Brom- oder ein Silberatom gehandelt haben. Blau und Wambacher waren damit die ersten, die das Zentrum einer Kernzertrümmerung sichtbar gemacht hatten.

Das Paper, am 2. Oktober 1937 in *Nature* veröffentlicht [35], markiert den kurzen, spektakulären Höhepunkt in der Karriere von Marietta Blau. An diesem Punkt hätte sie es eigentlich geschafft. Die von ihr entwickelte Methode begann zu greifen. Die Filme waren so weit ausgereift, dass mit ihnen wissenschaftlich geforscht werden konnte. Die ersten Ergebnisse hielt sie bereits in Händen, und die Ergebnisse waren spektakulär. Noch ein wenig Zeit intensiver Forschung hätte ausgereicht, und Marietta Blau hätte die Früchte ihrer Arbeit einbringen können. Doch so plötzlich der Erfolg kam, verebbte er auch wieder. Im Jahre 1938 musste Marietta Blau vor den Nationalsozialisten fliehen, die ihr noch auf der Flucht ihre gesamten Forschungsunterlagen raubten. Blau selbst war auf die Unterstützung von Albert Einstein angewiesen, der ihr eine Anstellung an der Universität von Mexico

verschaffte. Allerdings war sie dort weit ab vom Puls der Wissenschaft, ihre Arbeit war unterbrochen, und sie selbst über Monate und Jahre zum Abwarten verurteilt. Inzwischen nutzten andere die von ihr entwickelten photographischen Platten, und machten damit die Entdeckungen, vor denen Marietta Blau eben noch selbst knapp gestanden war. Als bescheidener, ruhiger Mensch, der sie war, gelang es ihr nicht, die Mittel aufzutreiben, die sie benötigt hätte, um ein effizientes Labor aufzubauen. Als sie 1960 nach Wien zurückkehrte, war sie trotz ihrer großen Leistungen außer im kleinen Kreis derjenigen, die Kernemulsionen seit der ersten Stunde verwendeten, völlig vergessen. Obwohl sie offenbar fast völlig mittellos war, verbat es ihr der Stolz, eine Rente von Kodak und Ilford anzunehmen, die sich für Blaus Verdienste um die Filmindustrie erkenntlich zeigen wollten. Nach einem aufregenden Leben, nach langen Jahren der wissenschaftlichen Arbeit, nach einem kurzen Höhepunkt ihres Forscherlebens, nach langen Jahren der Flucht, des Reisens, des Hoffens und immer wieder neuen Enttäuschungen verbrachte sie ihren Lebensabend, von der Welt vergessen und alleine in Wien. [35,36,37,38]

## 7.5. Das Pion – Vermittler der Kernkräfte

Bothe und Kolhörster hatten zeigen können, dass die sekundäre Strahlung der *Kosmischen Strahlung*, wie sie an der Erdoberfläche wirksam wurde, keineswegs eine hochenergetische  $\gamma$ -Strahlung sondern eine Teilchenstrahlung war. Mit Hilfe der Wilson'schen Nebelkammer konnte recht bald gezeigt werden, dass die Teilchenstrahlung im wesentlichen aus Elektronen, Positronen und Myonen bestand. In den späteren 30ern des 20. Jahrhunderts stand bald fest, dass alle diese Teilchen keineswegs direkt die *Kosmische Strahlung* darstellten, wie es noch Bothe und Kolhörster angenommen hatten, sondern dass es sich dabei um eine Sekundäre Strahlung handelte, also Strahlung, die aus der Wechselwirkung der primären *Kosmischen Strahlung* mit unserer Atmosphäre entstand.

Cecil Powell, ein Student von C. T. R. Wilson, arbeitete schon des längeren mit der Nebelkammer, als ein Kollege seine Aufmerksamkeit auf das Tätigkeitsfeld zweier Wiener Forscherinnen, Marietta Blau und Herta Wambacher, lenkte, die mit photographischen Platten die *Kosmische Strahlung* untersuchten und bereits erste Erfolge erzielen konnten. Cecil Powell erkannte sofort das Potential der photographischen Platten. Zunächst waren sie einfacher zu handhaben, hatten keine beweglichen Teile und keine feine Mechanik. So waren viel kleiner und leichter, und brauchten während der Messungen nicht beaufsichtigt zu werden. Außerdem konnten sie Informationen über unzählige Ereignisse speichern, und diese Ereignisse um vieles genauer aufzeichnen, als es das die Nebelkammer hätte tun können. Insgesamt waren die photographischen Platten also wie geschaffen, um z.B. mittels unbemannter Ballone in sehr große Höhe gebracht zu werden, um dort die Eigenschaften der primären *Kosmischen Strahlung* selbst zu messen.

Doch noch war die Methode nicht soweit ausgereift, diese ehrgeizigen Pläne erfüllen zu können. Marietta Blau hatte zwar wesentliche Vorarbeit geleistet, doch ihre Arbeit war unterbrochen worden, und Cecil Powell ergriff die Gelegenheit, diese revolutionäre Messtechnik weiter zu entwickeln. Während der Zeit des Zweiten

Weltkrieges verwendete Cecil Powell photographische Platten als Detektor neben der Nebelkammer, um Kernkollisionen aufzuzeichnen, die mit den ersten Teilchenbeschleunigern in Bristol und in Liverpool erzeugt wurden. Dabei hatte er genug Gelegenheit, das neue Detektormedium unter Laborbedingungen kennen zu lernen und zu verbessern. Etwas nach Kriegsende war Powell soweit, photographische Platten einzusetzen, um in großen Höhen der *Kosmischen Strahlung* auf die Spur zu kommen. Im Mai 1946 gelang es, eine Photoemulsion herzustellen, die achtmal mehr Silberbromid enthielt, als ihre Vorgänger. Mit diesem Material konnten Bilder von Teilchenbahnen hergestellt werden, die die Qualität der Nebelkammer bereits übertrafen. Powell und sein Kollege Occhialini, der 1945 nach Bristol gekommen war, exponierten das neue Photomaterial am Pic du Midi in den französischen Pyrenäen der *Kosmischen Strahlung* und erhielten Bilder von Ereignissen, wie sie nie ein Mensch zuvor gesehen hatte. Unter den vielfältigen Spuren entdeckten sie 1947 die eines neuen Teilchens, das Carl David Anderson bereits 10 Jahre zuvor entdeckt zu haben gemeint hatte: das Pion, der Vermittler der Kernkräfte. Hideki Yukawa, der die Existenz des Pions vorhergesagt hatte, erhielt kurz nach dessen Entdeckung den Nobelpreis. Powells Ehrung folgte nur ein Jahr später.

Mit der Erforschung der primären *Kosmischen Strahlung* durch Ballone, die in die höchsten Schichten der Atmosphäre aufsteigen konnten, um dort photographische Platten direkt der *Kosmischen Strahlung* auszusetzen, bevor sie durch Wechselwirkungen mit Atomen der Luft sekundäre Strahlung erzeugen konnte, war es endlich möglich, die Zusammensetzung der *Kosmischen Strahlung* selbst zu untersuchen. Endlich konnte man mit Bestimmtheit nachweisen, dass die *Kosmische Strahlung* eine Teilchenstrahlung ist, die zum größten Teil aus Protonen (etwa 86 %) und Heliumkernen ( $\alpha$ -Teilchen, etwa 12 %), und in verschwindenden Mengen allen anderen natürlichen Elementen bis hinauf zu Uran besteht. So schloss sich der Kreis von Ballonfahrten, die zur Erforschung der *Kosmischen Strahlung* führten, von Viktor Hess ersten Flügen mit Fesselballonen bis in eine Höhe von 5350 Metern bis zu den unbemannten Stratosphärenflügen bis in Höhen von etwa 30 Kilometern. [37]

## 8. Einige Lebensdaten

### 8.1. Viktor Franz Hess



geboren: 24.06.1883 in Schloss Waldstein bei Peggau, Steiermark  
gestorben: 17.12.1964 in Mt. Vernon, New York

#### 8.1.1. Familie, Kindheit und Ausbildung

Viktor Franz Hess wurde am 24. Juni 1883 im idyllischen Schloss Waldstein bei Peggau in der österreichischen Steiermark um ein Uhr morgens geboren. Sein Vater

Vinzenz war Förster und stand im Dienste des Schlossherren, dem Prinzen Moritz Öttinger-Wallenstein. Viktors Mutter war Serafine Edle von Grossbauer-Waldstät.

In den Jahren 1893 bis 1901 absolvierte der junge Steirer seine Schulbildung am Gymnasium in Graz. Seine Begabung und sein Eifer machten sich schon in der Schule bemerkbar, und so lauteten seine sämtlichen Beurteilungen "Sehr Gut".

In jungen Jahren hatte Viktor Hess die Gelegenheit, einen Blitz dabei zu beobachten, wie er in den Turm des Schlosses fuhr, in dem er wohnte. Seither war Viktor von den Phänomenen der atmosphärischen Elektrizität fasziniert.

In den Jahren von 1901 bis 1905 studierte Viktor Hess daher an der Universität in Graz Physik. Wertvollste Anregungen erhielt er dabei von seinem Professor Leopold von Pfaundler, bei dem er auch seine Doktorarbeit verfasste.

1906 hatte er die besondere Ehre, „sub auspiciis imperatoris“ (daher unter Anwesenheit des Kaisers Franz Joseph höchst persönlich) zu promovieren, da es ihm geglückt war, auch alle Prüfungen während der Studienzeit mit der Note „ausgezeichnet“ abzulegen.

Damit hatte Viktor Hess seine Ausbildung mit allen erdenk- und erreichbaren Ehren abgeschlossen. Für ihn ging es nun daran, seine akademische Karriere zu planen.

### 8.1.2. Einzug ins Wissenschaftliche Leben

Nach seinem Studium hatte Viktor Hess eigentlich vor, sich dem angesehenen Professor Paul Drude in Berlin anzuschließen, um sich weiter über die Optik zu vertiefen. Leider machte der Selbstmord Paul Drudes diese vielversprechenden Pläne zunichte. So hang der junge Physiker jetzt einigermaßen in der Luft.

Sein Doktorvater an der Universität Graz, Leopold Pfaundler, hatte aber zum Glück einige Verbindungen und konnte seinen Schützling dem Wiener Professor Franz Exner anempfehlen, der gemeinsam mit Egon von Schweidler ein Pionier in der Erforschung der Lufterlektrizität war und die Aufmerksamkeit des jungen Hess auf das spannende und umfangreiche Thema der damit verbundenen Radioaktivität lenkte. Hier lernte Viktor Hess auch Professor Stefan Meyer kennen, mit dem ihn über viele Jahre eine tiefe Freundschaft verband.

Viktor Hess war ein Wissenschaftler mit breit gestreutem Interesse, großem Fleiß und starkem inneren Antrieb. Außer seiner Tätigkeit am Institut Franz Exners hatte er noch einige andere Aufgaben zu bewältigen. 1907 und 1908 sammelte Viktor Hess wichtige Erfahrungen am Mineralogischen Institut der Universität Wien. Im Zeitraum von 1908 bis 1920 hielt Hess Vorlesungen in medizinischer Physik an der Veterinäruniversität, und seit 1910 las er als Privatdozent an der Wiener Universität.

Im Jahre 1910 konnte Dank einer Stiftung das Radiuminstitut der Österreichischen Akademie der Wissenschaften eingerichtet werden. Viktor Hess wurde am neuen Institut Assistent bei Stefan Meyer, eine Stelle, die er bis 1920 behielt.

### 8.1.3. Entdeckung der *Kosmischen Strahlung*

Am Wiener Radiuminstitut begann Viktor Hess 1911 mit der Forschungsarbeit, die ihm 25 Jahre später den Nobelpreis einbringen sollte:

Schon seit einiger Zeit untersuchte man das Phänomen, dass sich elektrisch geladene Körper an der Luft entladen. Für diesen Ladungsverlust war eine elektrische Leitfähigkeit der Luft verantwortlich zu machen. Man nahm damals an, dass die ionisierende Strahlung radioaktiver Elemente des Erdbodens die Luft elektrisch leitend machte. Wenn diese Erklärung zutraf, so musste die elektrische Leitfähigkeit der Atmosphäre mit der Seehöhe rasch abnehmen, da die radioaktive Strahlung von der Atmosphäre abgeschirmt wird und daher nur in Bodennähe wirken könnte. Aber gerade diese Abnahme konnte trotz eifriger Suche vieler Forscher nicht gefunden werden. Im Jahre 1910 stellte der physikbegeisterte Jesuitenpater Theodor Wulf vergleichende Messungen zu Füßen und an der Spitze des Eiffelturmes in 300 m Höhe an und stellte fest, dass die radiogene Leitfähigkeit der Atmosphäre in dieser Höhe zwar geringer als am Erdboden war, aber immer noch viel höher, als sie nach 300 m abschirmender Luft sein dürfte.

Theodor Wulf war einer der ersten, die an die Möglichkeit dachten, dass die Leitfähigkeit der Luft durch eine ionisierende Strahlung verursacht würde, die aus dem Weltall auf unsere Atmosphäre trifft. Um seine Theorie zu bestätigen, forderte er seine Physikerkollegen auf, mit Hilfe von Ballonen Messungen der Ionisation der Luft in größeren Höhen durchzuführen. Dass ihm der Wagemut fehlte, diese Messungen selber durchzuführen, kostete Theodor Wulf letztendlich den Nobelpreis.

Zunächst folgten K. Bergwitz und der Schweizer Albert Gockel der Aufforderung und stiegen mit Ballonen auf, um die Luftionisation zu messen. In beiden Fällen versagten aber die Präzisionsmessgeräte auf Grund der schwierigen Verhältnisse in größeren Höhen ihren Dienst. Daher konnten keine verwertbaren Messergebnisse geliefert werden.

Viktor Hess beschäftigte sich eingehend mit den gescheiterten Versuchen seiner Kollegen. Er berechnete eine Höhe von etwa 500 m, in der die radioaktive Strahlung des Erdbodens vollständig abgeschirmt sein müsste und konstruierte dann Messgeräte, die bei Temperaturen und Luftdruckverhältnissen in dieser Höhe nicht zerstört werden würden.

In den folgenden Jahren unternahm Viktor Hess zehn Forschungsfahrten mit dem Fesselballon, zwei davon 1911, sieben 1912 und eine letzte Fahrt im Jahre 1913. Den größten Teil seiner Messwerte erhielt Hess in einer Höhe von 400 m bis 1200 m über der Erdoberfläche. Die größte Höhe, die er insgesamt erreichte, lag bei 5350 m.

Die Ergebnisse seiner Arbeit zeigten deutlich, dass die ionisierende Strahlung anfangs mit zunehmender Höhe leicht abnimmt, aber ab einigen 100 Metern über der Erdoberfläche wieder an Intensität gewinnt. In seiner Interpretation der Ergebnisse hielt sich Hess eng an Theodor Wulf, indem er sie durch die Annahme einer neuen, bis dahin unbekanntem Strahlung erklärte, die ihren Ursprung im Weltraum haben musste.

Eine Fahrt am 17. April 1912 während einer Sonnenfinsternis zeigte, dass die Sonne als Quelle dieser neuen, geheimnisvollen Strahlung nicht in Frage kam, da die Strahlungsintensität durch die Abdeckung durch den Mond nicht beeinflusst wurde.

Viktor Hess blieb sein ganzes Leben lang von einer tiefen Begeisterung für die solchermaßen von ihm entdeckten *Kosmischen Strahlung* beseelt. So richtete er unter anderem auf verschiedensten Berggipfeln dauernde Beobachtungsstationen ein, unter anderem am Hochobir in Kärnten, am Sonnblick im Land Salzburg und am Hafelekar bei Innsbruck.

#### 8.1.4. Die weitere Karriere in der Wissenschaft

Anfangs hatte Viktor Hess recht wenig Freude mit seiner epochalen Entdeckung, weil er in Kollegenkreisen auf Unglauben und Widerstand stieß. Besonders vernichtend war die Kritik von R.A. Millikan, einem Professor an der renommierten CalTech Universität in den Vereinigten Staaten. Erst als Millikan, damals eine Autorität auf dem Gebiet, seinen Widerstand Mitte der Zwanziger Jahre fallen ließ, konnte sich Viktor Hess durchsetzen. Allerdings hat er die Schmähungen der vorangegangenen Jahre nie ganz vergessen können.

Viktor Hess führte ein recht bewegtes Leben. Zum Teil lag die Ursache dafür wohl in seinem regen Geist und seiner Abenteuerlust. Zum Teil wurde er auch durch die äußeren Umstände dazu gezwungen.

In den Jahren von 1910 bis 1920 diente Viktor Hess am neugegründeten Radium-Institut der Wiener Akademie der Wissenschaften als Assistent von Professor Stefan Meyer. 1919 bis 1920 verrichtete Hess außerdem Dienst als Assistenz-Professor an der Universität Wien.

Im Jahre 1920 wurde Viktor Hess endlich an seine Heimatuniversität in Graz berufen, wo er das Amt eines außerordentlichen Professors erhielt.

Am 6. September 1920 heiratete Viktor Hess die Witwe des k.u.k. Rittmeisters Arthur Breisky, bei dem Hess in Untermiete gewohnt hatte. Maria Breisky, geborene Wärmer, hatte aus erster Ehe zwei Kinder, Rosa Helene und Hans. Viktor Hess soll lange Zeit zwischen Mutter und Tochter geschwankt sein. Aber als begeisterter Esser und ansonsten leidenschaftsloser Mann entschied er sich dann für die Mutter Maria, deren überzeugende Kochkünste er schon kannte.

Bereits 1921 ließ sich Viktor Hess für zwei Jahre von seiner Stelle in Graz beurlauben, um in den Vereinigten Staaten sein Glück zu machen. Als Direktor leitete er den Aufbau eines Forschungslabors der Untited States Radium Corporation in New Jersey. Außerdem las er an einigen amerikanischen Universitäten und hatte eine Stellung als Berater beim U.S. Department of the Interior am Bureau of Mines inne.

Nachdem er seinen Urlaub aufgezehrt hatte, kehrte Viktor Hess 1923 nach Graz zurück und wurde 1925 Professor für Experimentalphysik. 1931 folgte er dann dem Ruf nach Innsbruck, wo er Vorstand des neugegründeten Institutes für Strahlenforschung wurde. Hier begann er sofort damit, eine hochgelegene Station zur Erforschung der *Kosmischen Strahlung* am Hafelekar (2300 m) einzurichten.

Im Jahre 1936 wurde Viktor Hess für seine Verdienste um die Kosmische Strahlung mit dem Nobelpreis für Physik geehrt. Er erhielt den Preis gemeinsam mit Carl David Anderson, einem Schüler von Robert Millikan, der in der *Kosmischen Strahlung* das Positron entdeckt hatte.

1937 kehrte Hess von Innsbruck nach Graz zurück, doch konnte er dort seine Stellung wieder nicht lange behalten. Nach dem März 1938 wurde Hess von den Nationalsozialisten aus verschiedenen Gründen ohne Pension in den Zwangsruhestand geschickt. Einige der Gründe waren, dass Hess's Frau jüdischer Abstammung war, und Hess selbst sich in der Regierung Schuschnigg als Gegner der extremen Rechten exponiert hatte. Von einem befreundeten Gestapo-Offizier vor seiner bevorstehenden Verhaftung gewarnt blieb Viktor Hess keine Wahl als alles zurückzulassen und mit seiner Frau in die Schweiz zu flüchten. Die Weltpresse berichtete damals in ihren Schlagzeilen, dass ein weiterer anerkannter Wissenschaftler und Nobelpreisträger der Physik vor dem nationalsozialistischen Regime in Österreich fliehen musste.

Die Fordham University in New York bot Viktor Hess eine Stellung an, die er in dieser Situation sehr gerne annahm. 1944 erhielt er die U.S. Staatsbürgerschaft und blieb an der Fordham University bis zu seiner Emeritierung 1956 tätig.

Nach Österreich kehrte er nur für kurze Besuche zurück. So las er im Sommersemester 1948 als Gastprofessor an der Universität Innsbruck und seinen 75. Geburtstag feierte er in der alten Heimat.

Seit 1950 nahm er an einem amerikanischen Programm teil, das zum Ziel hatte, Regen künstlich zu erzeugen und partizipierte an einem Projekt der U.S. Airforce, in dem die Auswirkungen des radioaktiven Fall Outs nach Kernwaffen-Versuchen untersucht wurden. Die Ergebnisse der Forschungsarbeit ermöglichten es, zwischen natürlicher und künstlicher Radioaktivität zu unterscheiden. Hess konnte außerdem zeigen, dass die Atombombenversuche deutliche Spuren in der Umwelt hinterlassen haben.

1958 trat Hess von seiner Professur in Fordham zurück und ging im Alter von 75 Jahren in den wohlverdienten Ruhestand, setzte seine Forschungstätigkeit aber mit großer Liebe und Begeisterung fort. Er widmete sich vor allem der Erforschung der Auswirkung radioaktiver Strahlung auf den menschlichen Körper.

## 8.2. Leopold Pfaundler von Hadermur



geboren: 14.02.1839 in Innsbruck, Österreich

gestorben: 06.05.1920 in Graz, Österreich

Am 14. Februar des Jahres 1839 wurde Leopold Pfaundler in Innsbruck geboren. Sein Vater war juristischer Universitätsprofessor, seine Mutter Rosine geborene Bollen war die Tochter eines reichen Kaufmannes aus Salzburg.

1845 bis 1848 besuchte Leopold Pfaundler die Volksschule, 1848 bis 1856 das Gymnasium, wobei sich schon hier seine Vorliebe für die Fächer Mathematik und Physik zeigten. An der Universität inskribierte er Chemie, besuchte aber außerdem Vorlesungen über Mathematik und Physik.

Zweimal, 1859 und 1866, unterbrach Leopold Pfaundler seine akademische Arbeit, um als freiwilliger Schütze der akademischen Kompanie die Grenzen seines Landes zu verteidigen. Man kann also wohl sagen, dass er von relativ kriegerischer Natur war. In

Feindkontakt kam er allerdings nur kurz und nur beim zweiten Feldzug, bei dem ihm durch den Rucksack geschossen wurde.

Am 24. Februar 1866 wurde Leopold Pfaundler habilitiert. Als Habilitationsschrift diente eine Arbeit über chemische Verbindungen nach unbestimmten Verhältnissen, die in dieser Form allerdings niemals gedruckt wurde, aber in späteren Arbeiten aufgegangen ist.

Am 2. August 1869 heirateten Leopold Pfaundler und Amalie Steffan, Tochter eines Hauptmannes der k.u.k. Armee. Die beiden hatten vier Kinder, und ihre Ehe soll sehr glücklich und harmonisch gewesen sein.

Leopold Pfaundler machte sich sehr bald einen Ruf als glänzender Lehrer und Experimentator, der weit über die Grenzen Tirols hinaus ging. Bevor er seine Vorlesungen hielt, lag die durchschnittliche Studentenzahl der Physik in Innsbruck bei 30 bis 40. Seitdem Pfaundler als Lehrer tätig war, stieg die Anzahl der Studenten auf bis zu 179. Trotzdem gelang es ihm nicht, für die Innsbrucker Universität die Mittel zur Verfügung gestellt zu bekommen, die für einen annähernd reibungsfreien Vorlesungs- und Forschungsbetrieb notwendig sind.

Nach jahrzehntelangen, fruchtlosen Anstrengungen folgte er so dem ehrenhaften Ruf nach Graz, wo die Dinge um einiges besser lagen, und wo er dann auch als Professor von Viktor Hess diesem den Weg nach Wien ebnete.

Im persönlichen Verkehr war Pfaundler von außerordentlicher Liebenswürdigkeit und seltener Herzensgüte voll wärmster Teilnahme (*Doz. Dr. Hämmerle*). Seine wissenschaftlichen Leistungen wurden vielfach ausgezeichnet.

- 1865 – Mitglied der *Societe chimique de Paris*
- 02.02.1870 – von der deutschen chemischen Gesellschaft zu Berlin zum auswärtigen Mitglied gewählt
- Mai 1870 – korrespondierendes Mitglied der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien
- Juni 1882 – korrespondierendes Mitglied der böhmischen Gesellschaften der Wissenschaften
- Juli 1882 – Mitglied der Kaiserlichen Leopold. Karol. Deutschen Akademie der Naturforscher
- Juni 1883 – wirkliches auswärtiges Mitglied der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien
- Mai 1887 – Leopold Pfaundler wird mit dem Orden der Eisernen Krone III. Klasse dekoriert
- 1887 – Mitglied der *societe de francaise de Physique*
- März 1891 – Leopold Pfaundler wird Professor der Physik und Leiter des Physikalischen Institutes in Graz
- Juli 1900 – Leopold Pfaundler wird zum Hofrat ernannt
- August 1910 – Leopold Pfaundler wird vom Kaiser in den Adelsstand mit dem Prädikat "von Pfaundler" erhoben.

### 8.3. Franz Serafin Exner



geboren: 24.03.1849 in Wien, Österreich  
gestorben: 15.10.1926 in Wien, Österreich

Am 24. März 1849 wurde Franz Serafin Exner in Wien geboren, wo er seit 1867 auch an der Universität studierte. Sein Vater, ebenfalls Franz Serafin Exner, war von 1831 bis 1848 Professor für Philosophie in Prag. Seit 1848 war er Ministerialrat im Unterrichtsministerium und arbeitete an einem “Entwurf der Grundzüge des öffentlichen Unterrichtswesens in Österreich”, der die österreichische Bildungspolitik bis weit in das zwanzigste Jahrhundert hinein beeinflusste.

Im Jahre 1871 promovierte Franz Exner zum Dr.phil., 1873 kehrte er von einem Aufenthalt an der Universität Straßburg nach Wien zurück, wo er sich 1874 habilitierte. In weiterer Folge zeichnet sich Franz Exner vor allem durch seine Leistungen am Gebiete der Elektrochemie, der Lufterlektrizität, der Spektralanalyse und der Farbenlehre aus. Vor allem durch seine Arbeiten im Gebiet der Lufterlektrizität weckte er das Interesse des jungen Viktor Hess für dieses Thema, wodurch er sein Scherflein zur Entdeckung der *Kosmischen Strahlung* beitrug.

1907 erklomm Franz Serafin Exner die höchste Sprosse der akademischen Würden und wurde Rector Magnificus der Universität Wien.

Im März des Jahres 1909 stellte Viktor Hess einen Habilitationsantrag, um Dozent für Physik an der Wiener philosophischen Fakultät zu werden. In der zuständigen Kommission saßen die Professoren Exner, Hasenöhr, Hepperger, Höfler, Jodl, Lang und Wirtinger. Im Mai 1909 wurde das Gesuch zurückgewiesen. Franz Exner meinte, dass Hess's Arbeiten durchaus solide und fleißig gearbeitet seien, im ganzen aber nicht bedeutend wären. Wirtingers Einwand, dass andere Professoren auch nicht mehr hätten, konnte die anderen Mitglieder der Kommission nicht überzeugen.

1910 versuchte Viktor Hess einen zweiten Anlauf, und dieses Mal gelang es, Viktor Hess wurde habilitiert und konnte Dozent werden. Franz Exner fügte hinzu:

*Die Arbeiten sind durchaus streng wissenschaftlich und mit großer Sorgfalt ausgeführt, aber es soll nicht verschwiegen werden, dass das Gebiet, auf welches dieselben sich beziehen, ein relativ eingeschränktes ist, im wesentlichen das der Radioaktivität, allerdings ein Gebiet, das gerade jetzt von besonderer Aktualität ist; auch muss berücksichtigt werden, dass gegenwärtig, bei der allgemein intensiven Betätigung auf experimentellem Gebiete, es für den Anfänger kaum möglich ist, anders ersprißliches zu leisten, als durch Konzentration auf ein Gebiet.*

## 8.4. Stefan Meyer



geboren: 24.04.1872 in Wien, Österreich  
gestorben: 29.12.1949 in Bad Ischl, Österreich

Ab 1892 studierte Stefan Meyer an der Universität Wien. 1896 promovierte er zum Dr.phil und führte danach seine Studien in Leipzig und an der Technischen Hochschule Wien fort. 1897 wurde er Assistent bei Boltzmann, nach dessen Tod im Jahre 1906 er das Institut für Theoretische Physik leitete. 1907 wurde Stefan Meyer Assistent bei Franz Serafin Exner und erhielt 1908 den Titel eines außerordentlichen Professors an der Universität Wien.

1908 bis 1910 war er mit der Planung des Institutes für Radiumforschung betraut, dessen Leitung er im Jahre 1910 übernahm. 1915 wurde er ordentlicher Professor und 1920 wurde er der Vorstand des Institutes.

1938 wurde Stefan Meyer, weil er Jude war, von den Nationalsozialisten zwangspensioniert. Weil er gute Verbindungen hatte, konnte Stefan Meyer die Kriegszeit in Bad Ischl verbringen, ohne weiter behelligt zu werden. Nach dem Krieg wurde Stefan Meyer vollständig rehabilitiert und mit altem Amt und Würden versehen. 1947 emeritiert starb Stefan Meyer 1949 in Bad Ischl.

Gemeinsam mit dem Ehepaar Curie und Ernest Rutherford gehörte Stefan Meyer zu den allerersten Pionieren am Felde der Erforschung der Radioaktivität. Zu den Leistungen Meyers gehörten die Erkenntnis, das es sich bei der Radiumstrahlung um eine Teilchenstrahlung handelt, dass Polonium kein stabiles Element ist, und erste Schritte zur Altersbestimmung mit Hilfe radioaktiver Elemente. 1937 bestimmte Stefan Meyer das Alter der Sonne auf etwa  $4 \frac{1}{2}$  Milliarden Jahre [39].

## 8.5. Paul Karl Ludwig Drude

geboren: 12.07.1863, Braunschweig in Deutschland  
gestorben: 05.07.1906 in Berlin

Am 12. Juli 1863 wurde Paul Drude in Braunschweig geboren. Als Sohn des hiesigen Arztes hatte er Zugang zu einer guten Ausbildung. So besuchte er das Gymnasium in Brunswick und inskribierte dann Mathematik an der Universität Göttingen. Die folgenden Semester verbrachte er in Freiburg und in Berlin. Im sechsten Semester ging er zurück nach Freiburg. Dort wurden ihm von Professor W. Voigt die Faszinationen der optischen Physik näher gebracht. Seine Dissertation bei Voigt beschäftigte sich auf rein theoretischer Basis mit den Gesetzmäßigkeiten der Reflektion und der Brechung des Lichtes an der Oberfläche von Kristallen.

Solange Paul Drude mit Professor Voigt in Göttingen zusammenarbeitete, war sein Zugang zur Optik vom mechanistischen Bild Fresnels geprägt. 1894 ging Paul Drude nach Leipzig und widmete sich dort verschiedenen wellenoptischen Problemen wie die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen und der drahtlosen Telegraphie. In dieser Zeit setzte er sich detaillierter mit den Theorien von Maxwell auseinander. Er

war einer der ersten, der die optischen Eigenschaften von Materie mit den Elektronen in der Materie in Zusammenhang brachte.

Mit seiner weiteren Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet legte Paul Drude den Grundstein für ein Verständnis für die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit sowie den optischen Eigenschaften von Metallen.

Im Jahre 1901 wurde Drude nach Gießen berufen, wo er der Vorstand des Institutes für Physik wurde. Nachdem er den Ruf an verschiedene andere Universitäten nicht wahrgenommen hatte, ließ er sich endlich dazu überreden, Vorstand des Institutes für Physik in Berlin zu werden. Paul Drude war noch kein Jahr in Berlin gewesen, als er aus dem regesten wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Leben gerissen wurde. Am 5. Juli 1906, eine Woche vor seinem 43. Geburtstag, nahm sich Paul Drude das Leben.

Drude hatte viele Ämter und Bürden auf seine Schultern gesammelt. Zur selben Zeit hielt er stets mehrere wissenschaftliche Projekte am Laufen, außerdem hielt er Vorlesungen, betreute Dissertanten, verwaltete als Vorstand mehrere Institute und gab die renommierte Zeitschrift "*Annalen der Physik*" heraus. Alle diese Aufgaben erfüllte Paul Drude vorbildlich und mit für ihn charakteristischer Gründlichkeit.

## 8.6. Robert Andrews Millikan



geboren: 22.03.1868 in Morrison, Illinois, USA

gestorben: 19.12.1953 in San Marino in Kalifornien, USA

Robert Andrews Millikans Bildungsweg in die Physik war nicht von Anfang an vorgezeichnet. Geboren und aufgewachsen ist Millikan in der ländlicher Umgebung von Morrison, Illinois, in den Vereinigten Staaten von Amerika. Seine Vorfahren waren schon vor 1750 in die USA eingewandert und als Pioniere in den Mittleren Westen gezogen. Nach Abschluss der Maquoketa High School in Iowa arbeitete Millikan einige Zeit als Journalist, bis es in an das Oberlin College in Ohio zog. Dort zeigte er vor allem Begeisterung für Griechisch und Mathematik.

Nach seinem Abschluss erhielt er für zwei Jahre eine Lehrstelle, in der er die Grundlagen der Physik unterrichten musste. Während dieser Zeit lernte Millikan erst das Fach kennen, in dem er später seine hervorragenden Erfolge feiern sollte. 1893 diplomierte er in Physik und erhielt eine Anstellung an der Columbia University. 1895 promovierte er mit einer Arbeit über die Polarisierung von Licht.

1895-1896 verbrachte Millikan ein Jahr an den deutschen Universitäten Berlin und Göttingen. 1896 folgte er dem Ruf von Michelson, bei dem er Assistent am neu eingerichteten Ryerson Laboratory an der Universität von Chicago wurde. Als hervorragender Lehrer wurde Millikan im Jahre 1910 Professor und blieb als solcher bis 1921 in Chicago.

Als Experimentator zeichnete sich Millikan durch seinen genialen Einfallsreichtum und seine Geschicklichkeit aus. Seine ganz großen Erfolge konnte er dort feiern, wo es darum ging, Voraussagen von theoretischen Physiker zu beweisen.

Sein experimenteller Durchbruch gelang ihm mit der Bestimmung der elektrischen Elementarladung mit Hilfe des legendären Öltröpfchen-Versuches (1910).

Als nächstes verifizierte er den Photoelektrischen Effekt und zeigte die Gültigkeit der Einstein'schen Formel  $E = h \cdot \nu$ . Bei dieser Gelegenheit bestimmte er zum ersten Mal direkt über photoelektrische Methoden den Wert des Planck'schen Wirkungsquantums  $h$  (1912-1915), ein Versuch, den heute noch jeder Physikstudent im Praktikum nachvollziehen muss.

Seine Untersuchungen der Braun'schen Bewegung führte er so gründlich und überzeugend durch, dass danach keine Einwände gegen die Anschauung aufzubringen waren, dass Materie aus kleinsten Teilchen, den Atomen, bestünde.

Nach einer solchen Erfolgsstory ist es verständlich, dass die damalige Weltphysikermeinung in die Richtung tendierte, dass es Dinge, die Millikan entdeckte, geben musste, und die, die er nicht entdeckte, nicht geben konnte. Als er Anfang der zwanziger Jahre des 20. Jahrhunderts verkündete, dass er keine Spur einer *Kosmischen Strahlung* ausmachen könne, war das ein schwerer Schlag für Viktor Hess, umso mehr, als Millikan wenige Jahre später erklärte, eine extraterrestrische Strahlung entdeckt zu haben, die er *Millikan'sche Strahlung* nennen wollte.

Wenn Robert Andrews Millikan letztendlich auch die Entdeckung der *Kosmischen Strahlung* nicht für sich beanspruchen konnte, so prägte er doch den Namen, den sie bis heute weltweit trägt: *Cosmic Rays*.

Außerdem zählt es mit zu seinen Verdiensten, dass einige der famosen Entdeckungen in der *Kosmischen Strahlung* an seinem Institut in CalTech gemacht wurden. Wieder war er es, der das große Potential der Wilson'schen Nebelkammer in Verbindung mit einem Elektromagneten als erstes abschätzen konnte und einen seiner Studenten, Carl David Anderson, damit auf die *Kosmische Strahlung* ansetzte. Das Ergebnis war die Entdeckung zweier neuer Elementarteilchen und ein Nobelpreis für Anderson.

Seit 1921 war Robert Andrews Millikan Vorstand des *Norman Bridge Laboratory of Physics* am California Institute of Technology (CalTech), Pasadena. Unter seiner Leitung erlebte das Institut eine seltene Blütezeit. Im Jahre 1946 ging Millikan in den Ruhestand, und soll seine letzten sieben Lebensjahre vor allem mit Tennisspiel und Golf verbracht haben.

## 8.7. Carl David Anderson



geboren: 3.09.1905 in New York City, USA

gestorben: 11.01.1991 in San Marino in Kalifornien, USA

Carl David Anderson wurde am 3. September 1905 in New York City geboren. Sein Vater, Carl David Anderson senior, war schwedischer Immigrant und lebte seit 1896 in den Vereinigten Staaten. Als Carl David Anderson jun. sieben Jahre alt war, zog seine Familie nach Los Angeles, wo Anderson seine Schulbildung erhielt und im Jahre 1923 sein Studium am California Institute of Technology (CalTech) begann.

Anderson war, wie auch Viktor Hess, ein hervorragender Student. Zunächst interessierte er sich vor allem für Elektrotechnik, wechselte aber bald zur Physik. Während seines Studiums erhielt er eine besondere Auszeichnung: die Universität bezahlte den zwei besten Studenten eines Jahrganges eine halbjährige Reise nach Europa, damit sie ihren Horizont etwas erweitern konnten. Anderson gehörte einmal zu den glücklichen, die diesen Preis für sich gewinnen konnten.

1927 erhielt Anderson sein Diplom. 1930 promovierte er summa cum laude zum Doktor der Physik.

Nach solchermaßen abgeschlossener Ausbildung bemühte sich Anderson um eine Anstellung bei Arthur Holly Compton in Chicago. Millikan, der sich selbst für diese Anstellung eingesetzt hatte, hielt Anderson quasi in letzter Minute zurück und forderte ihn auf, in seinem Auftrag einige Experimente durchzuführen, die mit der *Kosmischen Strahlung* in Zusammenhang standen. Seit den frühen Dreißigern interessierte sich Millikan vermehrt für die *Kosmische Strahlung*, vor allem für ihre Zusammensetzung und ihr Energiespektrum (Millikan hielt die *Kosmische Strahlung* für eine reine Photonenstrahlung).

Daher richtete Millikan drei Forschungsgruppen am CalTech ein, die die *Kosmische Strahlung* mit damaligen state of the art Methoden untersuchen sollten. Die Instrumente der verschiedenen Gruppen waren

- Elektrometer
- Geiger-Müller-Zählrohre
- Die Wilson'sche Nebelkammer

Anderson bildete das Team, das die *Kosmische Strahlung* mit Hilfe der Wilson'schen Nebelkammer untersuchen sollte.

Zunächst nahm Anderson einige dringende Verbesserungen an der Wilson'schen Nebelkammer vor:

- Er ließ den Expansionskolben in ein Vakuum expandieren. Dadurch konnte seine Nebelkammer außergewöhnlich rasch für den benötigten Druckabfall sorgen.
- Statt reinen Wasserdampfes verwendete er ein Gemisch aus Wasserdampf und Alkohol.

Als Lohn für seine Mühen erhielt er mit seiner Nebelkammern Photographien von einer Qualität, die die anderer Nebelkammer-Experimentatoren bei weitem übertraf. Was Anderson trotzdem stets Schwierigkeiten machte, war, den Strom für seinen selbstgebauten Magneten aufzutreiben, der innerhalb der Wilson'schen Nebelkammer für einen Magnetischen Fluss von 25 000 Gauss (2.5 Tesla) sorgte.

Die ersten Photographien, die Anderson mit seiner Wilson'schen Nebelkammer schoss, sorgten für einige Überraschung. Die *Kosmische Strahlung* erzeugte ganze Schauer von positiv und negativ geladenen Teilchen. Die Spuren von positiven und negativen Teilchen zeigten aber die gleiche Ionisationsdichte (Anzahl der Tröpfchen auf einer bestimmten Länge der Teilchenspur).

Da die Teilchen beider Ladungen die gleiche Ionisationsdichte aufwiesen, konnte es sich nicht um Elektronen und Protonen handeln, da Protonen eine sehr viel höhere Ionisationsdichte aufweisen, als Elektronen. Um sicher zu gehen, dass es sich nicht um Elektronen handelt, die von unten in die Nebelkammer gelangten und daher quasi rückwärts flogen, fügte Anderson eine Bleiplatte in die Nebelkammer ein, die es gestatten würde, die Flugrichtung der Teilchen eindeutig festzulegen.

Auf diesem Weg gelang es Anderson zu zeigen, dass er positive Teilchen mit der Masse eines Elektron gefunden hatte, das positive Elektron oder *Positron*. Witzigerweise bewegte sich das erste Positron, das Andersons Bleiplatte durchdrang, tatsächlich von unten nach oben durch die Nebelkammer.

Positronen haben eine sehr geringe Lebensdauer, die damit endet, dass ein Positron gemeinsam mit einem Elektron in einem kurzen Lichtblitz annihiliert (vernichtet) wird.

Für seine Entdeckung der Antimaterie in Form des Positrons erhielt Anderson im Jahre 1936 den Nobelpreis überreicht, den er gemeinsam mit Viktor Hess entgegennahm. Was die beiden verband war nicht nur, dass ihr gemeinsames Forschungsgebiet die *Kosmische Strahlung* war, sondern dass beider Entdeckung darauf zurückzuführen war, dass sie Experimente durchführten, die ein anderer vorgeschlagen hatte. Freilich konnte Viktor Hess davon ausgehen, die von Theodor Wulf vorhergesagte außerirdische Strahlung zu finden, während Carl Anderson keine Ahnung hatte, was auf ihn zukam.

Später gelang es Anderson, seine Erfolgsgeschichte fortzusetzen, als er gemeinsam mit Seth Neddermayr, der sich später auf die Konstruktion von Kernwaffen spezialisierte, ein weiteres Elementarteilchen entdeckte, das Myon.

Im Rückblick lässt sich heute sagen, dass die glanzvollen Leistungen von Carl David Anderson sicherlich zu einem Teil Millikan zu danken sind, dessen untrügbarer Sinn dafür, wo neue Entdeckungen zu machen sind, und wer die Fähigkeiten hat, entsprechende Detektoren zu bauen, sich auch in diesem Fall wieder vollstens bewährte. Anderson's Entdeckung der Antimaterie war ein wichtiger erster experimenteller Schritt in Richtung eines Verstehens des atomaren Aufbaus.

## 9. Literaturverzeichnis

1. The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty, CODATA Internationally recommended values of the Fundamental Physical Constants, <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/>
2. Elster, J., Geitel H., *Beiblätter zu den Annalen der Physik*, herausgegeben von E. Wiedemann, Band 24, Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1900, S. 591ff und 852f
3. Elster, J., Geitel, H., *Ueber Elektrizitätszerstreuung in der Luft*; Annalen der Physik, herausgegeben von Paul Drude, Vierte Folge. Band 2, 1900, S. 425-445
4. Hess, V. F., *Die elektrische Leitfähigkeit der Atmosphäre und ihre Ursachen*, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig 1926, S. 174
5. Knoll, G. F., *Radiation Detection and Measurement*, Third Edition, John Wiley & Sons, 2000, S. 802
6. Mayer-Kuckuk, T., *Kernphysik*, Teubner Studienbücher Physik, 6. Auflage, Teubner Stuttgart, 1994, S. 354
7. Wulf, Th., *Die Faden-Elektrometer*, Ferd. Dümmlers Verlag, Berlin und Bonn, 1933, S. 147
8. Wulf, Th., *Über die in der Atmosphäre vorhandene Strahlung von hoher Durchdringungsfähigkeit*, Physikalische Zeitschrift, No. 5, 10. Jahrgang, 1. März 1909, S. 152-157
9. Gockel, A., *Messungen der durchdringenden Strahlung bei Ballonfahrten*, Physikalische Zeitschrift, No. 14, 12. Jahrgang, 15. Juli 1911, S. 595-597
10. Hess, V.F., *Über die Absorption der  $\gamma$ -Strahlung in der Atmosphäre*, Physikalische Zeitschrift, No. 22|23, 12. Jahrgang, 1911, S. 998-1001
11. Hess, V. F., *Messungen der durchdringenden Strahlung bei zwei Freiballonfahrten*, Mitteilungen aus dem Institut für Radiumforschung, Aus den Sitzungsberichten der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien, Mathem.-naturw. Klasse, Bd CXX, Abt. IIa, November 1911, S. 1-11
12. Hess, V. F., *Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten*, Mitteilungen aus dem Institut für Radiumforschung, Sitzungsberichte der mathematisch-naturw. Klasse der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, Band CXXI, Abteilung IIa, Jahrgang 1912, Heft VIII bis X, zweiter Halbband, Wien, 1912, S. 2001-2032
13. Graziadei, H. Th., *Kosmische Ultrastrahlung und Aktivität der Sonne*, Akademie der Wissenschaften in Wien, Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, Sitzungsberichte, Abteilung IIa, 145. Band, Jahrgang 1936, Heft 1-10, S. 495

14. Hess, V. F., Steinmaurer, R., *Cosmic Rays from Nova Herculis?*, Nature, Vol. 135, 1935, S. 617
15. Hess, V. F., *Die Radioaktivität*, Referatesammlung f. d. Jahresbericht der Chemie, 1905-1908
16. Hess, V. F., *Die Station für Ultrastrahlenforschung auf d. Hafelekar (2300 m) bei Innsbruck*, Helvetica Physica Acta, edita a societate physica helvetica, Volumen V Fasciculus Quartus, S. 296f
17. Hess, V. F., *Die Station für Ultrastrahlenforschung auf dem Hafelekar (2300 m) bei Innsbruck*, Forschungen und Fortschritte, Nachrichtenblatt der deutschen Wissenschaft und Technik, 7. Jahrgang, Berlin, 1. November 1931, Nr. 31, S. 410f
18. Hess, V. F., Rieder, F., *Effects of Cosmic Radiation in a Wilson Chamber at the Hafelekar Observatory (2,300 m.) near Innsbruck*, Nature, Vol. 134, 1934, S. 772
19. Hess, V. F., Steinmaurer, R., Graziadei, H., *Meteorologische und solare Einflüsse auf die Intensität der Ultrastrahlung*, Helvetica Physica Acta, edita a societate physica helvetica, Volumen VI Fasciculus Septimus, S. 480ff
20. Hess, V. F., *New Results of Cosmic Ray Research*, Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity, December, 1936, Volume 41, No.4, S. 345-350
21. Hess, V. F., Graziadei, H. Th., *On the diurnal Variation of the Cosmic Radiation*, Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity, March 1936, Volume 41, No. 1, S. 9-14
22. Hess, V. F., *Rückblick und Ausblick auf die Erforschung der kosmischen Ultrastrahlung auf alpinen Hochstationen*, Verhandlungen der Schweizer. Naturforschenden Gesellschaft, Thun 1932, S. 259-262
23. Hess, V. F., *Entgegnung auf die Abhandlung von Arthur Wagner: „Kritische Bemerkungen zum täglichen Gang der kosmischen Ultrastrahlung (nach Aufzeichnungen auf dem Hafelekar)“*, Akademie der Wissenschaften in Wien, Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, Sitzungsberichte, Abteilung IIa, 144. Band, Jahrgang 1935, Heft 1-10, S. 53
24. Hess, V. F., *The Cosmic-Ray Observatory on the Hafelekar (2300 Meters) Near Innsbruck (Austria) and its Results*, Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity, Volume 37, No. 3, September, 1932, S. 399-405
25. Hess, V. F., *Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten*, Physikalische Zeitschrift, No. 21|22, 13. Jahrgang, 1. November 1912, S. 1084-1091
26. Hess, V. F., *Unsolved problems in physics: tasks for the immediate future in cosmic ray studies*, Nobel Lectures, 1936
27. Hess, V. F., Graziadei, H. Th., Steinmaurer R., *Untersuchungen über die Intensitätsänderungen der kosmischen Ultrastrahlung auf dem Hafelekar (2300 m)*, Verhandlungen der Schweizer. Naturforschenden Gesellschaft, Zürich 1934, S. 285-287

28. Hess, V. F., Graziadei, H. Th., Steinmaurer R., *Untersuchungen über die Intensitätsänderungen der kosmischen Ultrastrahlung auf dem Hafelekar (2300 m)*, Helvetica Physica Acta, edita a societate physica helvetica, Volumen VII Fasciculus Septimus, S. 669f
29. Hess, V. F., *Zum täglichen Gang der kosmischen Ultrastrahlung (Antwort an Artur Wagner)*, Akademie der Wissenschaften in Wien, Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, Sitzungsberichte, Abteilung IIa, 144. Band, Jahrgang 1935, Heft 1-10, S. 493
30. Ritz, H., *Untersuchungen an einer Ionisationskammer mit Gamma-Strahlen-Kompensation*, Inaugural Dissertation, Leopold-Franzens-Universität zu Innsbruck, 1955
31. Wilson, C.T.R., *On the cloud method of making visible ions and the tracks of ionizing particles*, Nobel Lecture, 1927
32. Bothe, W., Kolhörster, W., *Das Wesen der Höhenstrahlung*, Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Zeitschrift für Physik, herausgegeben unter Mitwirkung der deutschen physikalischen Gesellschaft von Karl Schell, 56. Band, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1929, S. 751-777
33. Anderson, C. D., *The production and properties of positrons*, Nobel Lecture, 1936
34. Anderson, C. D., *The Discovery of Antimatter, The Autobiography of Carl David Anderson, the Youngest Man to Win the Nobel Prize*, World Scientific, 1999, S. 144
35. Blau, M., Wambacher, H., *Disintegration Processes by Cosmic Rays with the Simultaneous Emission of Several Heavy Particles*, Nature 140, October 2, 1937, p. 585
36. Perlmutter, A., *Marietta Blau's Work After World War II*, Arnold Perlmutter, Department of Physics, University of Miami, Coral Gables, Florida, 2000, S. 44
37. Close, F., Marten M., Sutton Chr., *The Particle Explosion*, Oxford University Press, New York, Tokyo, Melbourne, 1987, S. 239
38. Galison, P. L., *Marietta Blau: Between Nazis and Nuclei*, Physics Today, 1997, S. 42-48
39. Meyer, S., *Über das "Alter" der Sonne, über die Zerfallskonstante des Actinurans und über die Mengenverhältnisse Blei zu Thor zu Uran auf der Erde*, vorgelegt in der Sitzung am 22. April 1937, Akademie der Wissenschaften in Wien, Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, Sitzungsberichte, Abteilung IIa, 146. Band, Jahrgang 1937 – Heft 1bis10, Wien 1937, S. 175-197
40. Blau, M., Wambacher, H., *Über die Empfindlichkeit desensibilisierter photographischer Schichten in Abhängigkeit vom Luftsauerstoff und von der Konzentration der Desensibilatoren*, Mitteilungen des Institutes für Radiumforschung Nr. 367, Akademie der Wissenschaften in Wien,

Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, Sitzungsberichte, Abteilung IIa, 144. Band, Jahrgang 1935, Heft 1-10, S. 403

41. Kollhörster, W., *Messungen der durchdringenden Strahlung im Freiballon in größeren Höhen*, Physikalische Zeitschrift, No. 22|23, 14. Jahrgang, 15. November 1913, S. 1153-1156
42. Huemer, G., *Viktor Franz Hess*, Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades an der philosophischen Fakultät der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Innsbruck, 1985
43. Hess, V.F., *Neue Ergebnisse der Erforschung der kosmischen Ultrastrahlung*, Forschungen und Fortschritte, Nachrichtenblatt der deutschen Wissenschaft und Technik, 7. Jahrgang, Berlin, 10. März 1931, Nr. 8, S. 116f
44. Millikan, R.A., *Der Ursprung der kosmischen Strahlung*, Forschungen und Fortschritte, Nachrichtenblatt der deutschen Wissenschaft und Technik, 7. Jahrgang, Berlin, 1. und 10. August 1931, Nr. 22/23, S. 305ff

## 10. Danksagungen

Zum Schluss möchte ich allen Personen danken, die zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben:

Allen voran Univ. Prof. Walter Kutschera. Durch seine Vorlesung „Spurenisotope in Umwelt und Technik“ wurde ich auf die spannende und interessante Arbeit aufmerksam, die auf dem Institut für Isotopenforschung und Kernphysik geleistet wird. Er ermöglichte es mir, eine spannende und umfangreiche Diplomarbeit, bei der ich in vielen Gebieten, nicht zuletzt didaktischen und organisatorischen, wichtige Erfahrungen sammeln konnte.

Prof. Dietmar Kuhn und Dr. Reinhard Bischof von der Leopold-Franzens Universität in Innsbruck möchte ich für ihre äußerste Hilfsbereitschaft danken, die mir wichtige Quellen zum Schaffen von Viktor Hess in Innsbruck zu Verfügung stellten.

Prof. Brigitte Strohmaier verdanke ich die Möglichkeit, die originalen Messgeräte von Viktor Hess zu studieren.

Bei Fragen fand ich in Dr. Robin Golser, Dr. Peter Steier und Dr. Alfred Priller stets hilfsbereite und überaus kompetente Diskussionspartner.

## 11. Curriculum Vitae

Name: Georg Federmann  
geboren: 29.09.1973 in Wien  
Staatsangehörigkeit: Österreich

Schulbildung: 1980 – 1981 Volksschule in Wien  
1981 – 1982 Volksschule in Thaya  
1982 – 1983 Externist  
1983 – 1984 Volksschule in Bad Goisern  
1984 – 1992 Realgymnasium Waidhofen a.d. Thaya  
1992 Matura mit Fachbereichsarbeit in Deutsch

Grundwehrdienst: 1992 – 1993 Jäger in Mautern

Studium: 1993 – 1995 Studium der Klassischen Philologie  
und der Geschichte an der Alma Mater  
  
1995 – 2002 Studium der Physik und der Geschichte  
  
20.11.1998 staatlich geprüfter Sprengmeister

seit 01.04.2002: selbständig